



Université de Liège
Faculté des Sciences
Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

**Vers une meilleure gestion de l'eau agricole à partir des plateformes libres de
télé-détection et de communication au Burkina Faso**

Sié PALE

Thèse présentée en vue de l'obtention
du grade de Docteur en Sciences

Octobre 2020

Membres du jury :

Président : Dr Pierre OZER (ULiège, Belgique)
Promoteur : Pr Bernard TYCHON (ULiège, Belgique)
Co-promoteurs: Dr Farid TRAORE (INERA, Burkina Faso)
Dr Joost WELLENS (ULiège, Belgique)
Lecteurs : Pr Hassan Bismarck NACRO (UNB, Burkina Faso)
Pr Charles BIELDERS (UCLouvain)
Dr Eric HALLOT (ISSeP, Belgique)

Année académique 2020-2021

Avec l'appui de :



A

*Papa et Maman,
Elodie, Nirvana, Gédéon et Serge,
Grand-maman Adama,
Tonton Sansan,
Etienne, Haiphon, Diego, Mikael et Love,
Mamans Eugénie, Inakpina, Fonona, Filègara & Joséphine,
Papas Frédéric & Julien,
Tous les oncles et tantes, cousins et cousines, frères et sœurs,
Feu Nougaté et Nota,
Professeur Bernard Tychon,

Je dédie cette thèse.*

REMERCIEMENTS

Cette thèse a été possible grâce à l'appui de plusieurs personnes morales et physiques. Je voudrais à travers ces paragraphes témoigner toute ma gratitude à ces personnes. Mes sincères remerciements s'adressent tout d'abord au Professeur Bernard Tychon, directeur de thèse, qui a accepté de diriger nos travaux de recherches et de nous accompagner tout au long de ces quatre dernières années. J'exprime également ma profonde gratitude aux membres du comité de thèse (Professeur Bernard Tychon, Dr Joost Wellens et Dr Farid Traoré) pour les appuis et nombreuses orientations que j'ai bénéficiées tout au long de ce parcours doctoral. Au Président du jury et à l'ensemble des membres du jury, j'adresse toute ma reconnaissance pour leur disponibilité à nous accompagner dans cette épreuve. Je remercie la Coopération Belge en général et Wallonie Bruxelles International en particulier, qui a financé essentiellement cette thèse. Mes vifs remerciements s'adressent à l'Administratrice générale Pascale Delcomminette et à l'ensemble de son personnel avec qui nous avons merveilleusement collaboré durant ces travaux de recherche (Michael Lamhasni, Michel-Ange Vinti, Julie Everaerd, Anselme Sawadogo...). Notre profonde gratitude va également à l'endroit de l'Association pour la Promotion de l'Education et de la Formation à l'Etranger (APEFE) qui a co-financé, à certain moment, en collaboration avec Wallonie Bruxelles International, notre Projet de recherche.

J'adresse tous mes remerciements au Ministère de l'Agriculture du Burkina Faso notamment à ses premiers responsables qui ont facilité la réalisation de cette formation doctorale : le Ministre et son Cabinet, le Secrétariat Général, le Directeur des ressources humaines et son personnel...

Je remercie particulièrement la Direction Générale des Aménagements Hydrauliques et du Développement de l'Irrigation et l'ensemble des collègues de la Direction pour leurs appuis inestimables dans la conduite de cette thèse : B.V.C. Adolphe Zangré, Frédéric Dabiré, Donkora Kambou, Kibissi Paré, Farid Traoré, Didier Warin, Francis

Guyon, Apolline Bambara, Awa Ouédraogo, Carine Ilboudo, Moussa Ouédraogo, Orokiatou Ouattara, Sérinatou Lingani, Atala Marie Pooda, A. Constantin Gildas Somé, Zakaria Zongo, Mahamadi Zoundi, Seydou Traoré, Théodore Béré, Nadège Marie Yé, Alain Franck Kaboré, Moussa Ouédraogo, Roland Kaboré, Ousmane Guiré, Fatoumata Kanao, Paul Kaganbèga, Safiatou Compaoré...

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble du personnel de l'Université de Liège, à son premier responsable, au Chef du département des « Sciences et Gestion de l'Environnement » et au Président du Collège doctoral. Je remercie particulièrement le personnel du Campus d'Arlon (Christine Dasnoy, Françoise Dasnoy, Lucia Guermant, Thomas Bartel, Roger Thill, Cathérine Heyman, Catherine Mougnot, Nathalie Fossion, Nathalie Semal, Gérard Bragard, Monique Tonnellier, Solofotiana Randresihaja, Astrid Marlière, Vanessa Hansen, Fabienne André...) pour leurs soutiens multiformes au cours de mon séjour sur le campus.

Je ne saurais oublier de saluer vivement mes collègues et anciens collègues de l'unité de recherche « Eau-Environnement-Développement » (Joost Wellens, Hamid Sallah, Mortalla Sall, Moussa El Jarroudi, Marie Lang, Antoine Denis, Ramin Heidarian Dehkordi, Pierre Ozer, Julien Minet, Ingrid Jacquemin, Claire Simonis, Dior Diallo, Khadija Sossey, Cyrille Baki, Pierre Ozer, Durgun Ozüm, Fouad Zouhir, Hugues Jupsin, Malika Yazza, Julien Deroy, Wiémé Somé, Bakary Djaby, Abdoul Aziz Diouf, Barké Mahamadou Karimou, Farid Traoré) pour leur franche collaboration tout au long de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent également à la Direction Régionale de l'Agriculture et des Aménagements Hydro-Agricoles des Cascades, particulièrement à l'équipe technique qui m'a soutenu dans la collecte des données sur le terrain (le Directeur Provincial Mathias Bado, Ali Hatem Sawadogo, Fousséni Sanon, Olive Sawadogo, Massé Kambiré, Cheick Diarra, Barthélemy Batiano, Ollo Fabrice Da, Babou Nébié, Jean Marc Diallo, Adama Lingani, Moustapha Sana...). J'adresse mes sincères

remerciements à Jean Marcel Oulé pour son accompagnement personnel tout au long de nos séjours répétés sur le terrain.

Je salue également l'accompagnement de la Direction Régionale de l'Eau et de l'Assainissement des Hauts-Bassins notamment les appuis techniques de Nestor Compaoré, Paul Apouri, Claver Bado, Martial Nitcheu et Ahmed Kam.

Je remercie l'Agence de l'Eau des Cascades, la Direction Provinciale de l'Agriculture et des Aménagements Hydro-agricoles de la Comoé, la Direction Provinciale de l'Eau et de l'Assainissement de la Comoé, le Comité Local de l'Eau de la Haute-Comoé (en particulier Bruno Kafando, Victorien Sawadogo, Ferdinand Sawadogo), la Chambre Régionale de l'Agriculture des Cascades, les Comités d'irrigants de la région, l'Union des Coopératives des Exploitants du Périmètre Aménagé de Karfiguéla, l'ensemble des irrigants de la province de la Comoé et de la plaine alluviale de Karfiguéla en particulier, l'encadrement technique de la Plaine de Karfiguéla, la Mairie de Banfora, pour leurs soutiens multiformes. Mes remerciements s'adressent à la Société Sucrière de la Comoé, particulièrement à Daouda Ouattara, Ahmed Coulibaly, Barnabé Ouédraogo, Lossi Parfait Traoré et Séraphin Dembélé pour leur franche collaboration.

Je remercie également les différents stagiaires dont leurs travaux ont contribué à la réalisation de cette thèse (Dieudonné Zerbo, Moumouni Traoré, Lecomte Delphine, Souzan Rassimova, Hilou Yacouba, Alima Traoré, Ollo Frédéric Palé, Carine Ilboudo).

Je salue l'accompagnement dans le processus de colette de données de l'Agence Universitaire de la Francophonie, du Centre pour la Coopération et le Développement (PACODEL), de l'Agence CORADE, de la Société Sucrière de la Comoé, de l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement du Burkina Faso et de la Direction des Etudes et de l'Information sur l'Eau du Burkina Faso.

Je tiens aussi à remercier les amis des maisons communautaires 149 et 157 de l'Université de Liège Arlon Campus Environnement : David Millogo, Adamou

Ibrahim, Simplicie Yaméogo, Larissa Bambara, Abdoulaye Togora, Estelle Ouédraogo, Jefferson Konchié, Rasmata Sankara, Ferdinand Sawadogo, Oussama Ayed, Issa Hassane Abdelhamid, Adama Dembélé, Firmin Adandedji, Dieudonné Mulopo, Winnie Louise...ainsi que l'ensemble des compatriotes résidant à Arlon, Adolphe Kaboré et tous les membres de l'Association des ressortissants Burkinabè résidant à Arlon et au Luxembourg.

Mes sincères reconnaissances à Feu Vincent Sanou, qui de son vivant, nous accompagnait toujours dans les activités de recherche sur le terrain. Je salue également l'âme du défunt Amidou Savadogo, ancien Directeur Général des Aménagements Hydrauliques et du Développement de l'Irrigation du Ministère en charge de l'agriculture du Burkina Faso, brutalement rappelé par le Créateur en 2018.

Merci également aux amis, Issa Wonni, Aziz Diouf, Souleymane Konaté, Cléophas Zerbo, Martine Nikiéma, Idriss Serme, Moussa Kambiré, Yéri Pooda et Abou Ouattara qui ont par moment consacré une partie de leur temps à la lecture de ce document.

J'exprime ma gratitude à toutes ces personnes ressources avec qui les échanges ont parfois permis d'éclairer ma lanterne : Eveline Compaoré, Bakary Djaby, Philippe Orban, Eric Hallot, Professeur Serge Bruyère, Professeur Aurore Degré...

Mes remerciements s'adressent également aux familles d'Hoop et Wellens pour leur amitié renouvelée.

J'exprime ma profonde gratitude, à Alassane Guiré ancien Secrétaire Général du Ministère de l'Agriculture, Chef du Département de la gouvernance du développement rural de la Primature, au Professeur Hassan Bismarck Nacro de l'Université Nazi Boni de Bobo-Dioulasso et au Professeur Charles Bielders (UCLouvain) pour leur disponibilité à nous accompagner dans ce processus de formation.

Aussi dois-je remercier sincèrement Catherine Heyman pour son professionnalisme dans l'organisation logistique de nos voyages vers le Burkina Faso.

Il me sera impossible de remercier toutes les personnes qui m'ont soutenu à l'occasion de cette thèse à travers ces paragraphes. Je sollicite l'indulgence de tous ceux dont les noms n'ont pu être cités ici. Soyez-en remercier.

Enfin mes chaleureux remerciements à mon épouse, à ma fille, à ma famille toute entière et à mes proches qui, se reconnaîtront à travers ces lignes.

RESUME

L'importance de l'eau pour l'agriculture n'est plus à démontrer dans un pays sahélien comme le Burkina Faso. C'est pourquoi depuis des décennies, plusieurs initiatives de recherche de solutions à la problématique de gestion non rationnelle de l'eau ont été conduites. Cependant, les solutions proposées demeurent toujours peu utilisées par les administrations locales pour impacter significativement le développement agricole. Cette recherche s'inscrit dans ce cadre et a pour objet de contribuer à l'amélioration de la gestion des ressources en eau au Burkina Faso. Après une analyse du contexte qui a permis d'identifier les besoins des acteurs de l'eau du sous-bassin versant de la Haute-Comoé dans le Sud-Ouest du pays, leurs difficultés, les forces et faiblesses du système d'information sur la gestion de l'eau, elle s'est particulièrement focalisée sur les outils libres de télédétection satellitaire et les plateformes de communication *open source* notamment les applications libres de messagerie instantanée, pour examiner leur apport dans l'amélioration de la gestion de l'eau. Pour ce faire, un système d'information basé sur l'application *WhatsApp* a d'abord été expérimenté dans la zone d'étude où les difficultés de communication entre les parties prenantes de la GIRE impactaient négativement la valorisation efficiente des ressources en eau de surface. Ce système a ensuite été renforcé par une méthode d'évaluation des surfaces cultivées irriguées le long des berges de la rivière Comoé, à partir de la plateforme *Google Earth Engine*. L'ensemble des méthodes proposées forme un outil de suivi hydro-agricole à la disposition du Comité Local de l'Eau pour améliorer l'équité et la transparence dans la gestion de l'eau.

L'étude du contexte a été réalisée à travers une enquête sur les outils de gestion de l'eau précédemment promus par les projets de recherche et une analyse-diagnostic de la problématique de gestion de l'eau et du système d'information sur la gestion de l'eau dans la région. Elle montra une faible utilisation des outils de gestion expérimentés dans le sous-bassin. Elle indiqua par ailleurs qu'une parfaite intégration de l'outil dans la structure bénéficiaire améliorera le taux d'utilisation au

niveau individuel qui, était de 47 % pour les outils promus par les Projets GEeau et BF 102 (N=106). Aussi, elle souligne que les défis relatifs à la gestion de l'eau sont notamment le manque de connaissances précises pour planifier les usages, la faible efficacité d'utilisation de l'eau, l'accroissement fulgurant des emblavures alors que les productions agricoles restent faibles, et le déséquilibre entre l'offre et la demande en eau. Enfin, elle a aussi révélé que la communication entre les acteurs de l'eau reste un maillon faible dans la gestion et que le système d'information sur l'eau du Comité Local de l'Eau (CLE) constitue un dispositif efficace pour la production d'informations. Cependant, ces informations restent limitées au Comité technique en charge de son élaboration et n'atteignent pas tous les membres du CLE en l'absence d'un canal approprié de diffusion.

Un nouveau système d'information basé sur l'application *WhatsApp* a donc été conçu en guise d'amélioration de celui du CLE après une enquête de base pour évaluer les besoins en information. Deux autres enquêtes évaluatives ont été réalisées au cours de l'expérimentation. Les données collectées sur les débits de la rivière Comoé ont constitué essentiellement les informations du système. Ils ont été déterminés à partir des mesures de hauteurs d'eau auprès de stations hydrométriques installées en des sections droites du cours d'eau.

La méthode d'évaluation des surfaces cultivées irriguées est basée sur le classificateur d'images satellitaires *Classification and Regression Tree* (CART) avec une combinaison à la fois d'images *Sentinel-1 et 2* et des indices spectraux (NDVI, NBR2, MNDWI). Cette méthode a été élaborée à partir d'un script du type *Javascript* composé sur la plateforme *Google Earth Engine* qui utilise comme données d'entrée des collections d'images *Sentinel-1 et 2*.

L'adéquation d'allocation de l'eau, un indicateur qui compare les débits alloués aux usagers et leurs besoins, a été le critère ciblé pour apprécier le niveau d'allocation de l'eau. Pour déterminer ce critère, les besoins en eau des cultures de

chaque groupe d'utilisateurs ont donc été préalablement déterminés suivant la méthode à coefficient culturel unique proposée par le manuel 'FAO-56.'

Cette thèse a démontré que des outils libres d'accès peuvent être utilisés dans un mécanisme coordonné, simplifié, intuitif et peu coûteux pour résoudre des problèmes spécifiques de gestion de l'eau au Burkina Faso. Elle a aussi suggéré des pistes pour faire le lien entre les connaissances scientifiques et leurs applications pratiques.

Mots-clés : gestion de l'eau agricole, images Sentinel, irrigation, *WhatsApp*, *Google Earth Engine*, Haute-Comoé, Burkina Faso, Afrique de l'Ouest.

SUMMARY

Water is an important resource for agriculture in Sahelian region countries like Burkina Faso. Therefore, several agricultural development projects seek to address challenges related to water management. To this day, uptake of available opportunities and solutions by local administrations remains limited, as exemplified by The Upper-Comoé river basin in southwest Burkina Faso. Without improved water management, there is limited possibility of increasing productivity in a region where agriculture remains the main economic engine. The research for thesis aimed to contribute to enhanced management of surface water for agriculture in the Upper-Comoé basin. Focusing on open source satellite remote sensing tools and communication platforms (instant open messaging apps), the study examined their potential for improving water management. Having ascertained that challenges in communication and information access, a *WhatsApp* based information system was tested in the river basin. The system was enhanced by a *Google Earth Engine* based vegetable irrigated plots evaluation method established along Comoé river, and a water delivered adequacy metric, that allowed us to compare water discharges delivered to different user groups with their water needs, thereby enabling an identifying of water wasters. The suite of methods and measures constitute a hydro-agricultural monitoring tool, which was provided to the Local Water Committee for purposes of improving equity and transparency in water management.

The information system was developed based on findings from a baseline study of water users' needs. Two others data collection and analysis activities carried out during the fieldwork. Areas of small irrigated vegetable holdings were estimated by way of a Classification and Regression Tree (CART) algorithm, a satellite images classifier. This method simultaneously combines Sentinel-1 and Sentinel-2 images and spectral indices (NDVI, NBR2, MNDWI) for classification. It is based on a Javascript script elaborated from Google Earth Engine platform.

Before developing the research design, a reconnaissance survey was conducted to assess the potential for utilisation of the water management tools proposed by research to gain a basic understanding of the water management system and issues in the region. Results showed that the level of utilisation of the water management tools in question is low. It likewise suggested that the perfect institutionalisation of such tool may improve their utilisation by workers. It revealed that main challenges related to water management were, lack of accurate information that would enable users to plan allocation, low efficiency of water usage, expansion of planted areas despite productivity remaining low, and the gap between water demand and supply. Finally, we found that communication among stakeholders is a weak link in water management. While the Local Water Committee provided a vehicle for disseminating information about water resources, such information often did not go beyond it technical sub-committee charged with elaborating water allocation plans.

This thesis demonstrated that open source tools could serve as a simple, low cost, user-friendly mechanism to address water challenges in Burkina Faso. It also suggested ways of bridging scientific knowledge with practical applications.

Keyword: agricultural water management, Sentinel images, irrigation, *WhatsApp*, *Google Earth Engine*, Upper-Comoé, Burkina Faso, West Africa.

LISTE DES SIGLES, ABREVIATIONS ET SYMBOLES

| | |
|------------------|---|
| AEC | Agence de l'Eau des Cascades |
| AEDE | Association Eau Développement et Environnement |
| APEFE | Association pour la Promotion de l'Education et la Formation à l'Etranger |
| BIRIZ | Besoin en eau d'irrigation des rizières |
| BNDT | Base Nationale de Données Topographiques |
| BDOT | Base de Données d'Occupation des Terres |
| CLE | Comité Local de l'Eau |
| CLE-HC | Comité Local de l'Eau de la Haute Comoé |
| CNID-B | Comité National des Irrigations et du Drainage du Burkina Faso |
| CST | <i>Comoé Simulation Tool</i> |
| CTA | Centre Technique de coopération Agricole et rurale |
| DGAHDI | Direction Générale des Aménagements Hydro-agricoles et du Développement de l'Irrigation |
| DRAAH | Direction Régionale de l'Agriculture et des Aménagements Hydro-agricoles |
| DPAAH | Direction Provinciale de l'Agriculture et des Aménagements Hydro-agricoles |
| DREA | Direction Régionale de l'Eau et de l'Assainissement |
| ESA | <i>European Space Agency</i> |
| FAO | Organisation des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation |
| FLDAS | <i>Farming Early Warming Systems Network Land Data Assimilation System</i> |
| FP-IT | <i>Forward Processing for Instrument Teams</i> |
| GB | Giga Byte |
| GEeau | Gestion de l'eau pour l'agriculture |
| 3G | Réseau de téléphonie mobile numérique de troisième génération |
| GLDAS | <i>Global Land Data Assimilation System</i> |
| GMAO | <i>Global Modeling and Assimilation Office</i> |
| HYDRAM | HYDRo-Aménagements |
| GIS | <i>Geographic Information System</i> |
| GEOS | <i>Goddard Earth Observing System model</i> |
| GIRE | Gestion Intégrée des Ressources en Eau |
| HYSIM | <i>Hydrological Simulation Model</i> |
| ICT | <i>Information and Communication Technologies</i> |
| IDI | <i>ICT Development Index</i> |
| IHE-Delft | <i>Delft Institute for Water Education</i> |
| ILMS | <i>Software Platform for Integrated Environmental Management</i> |

| | |
|-----------------------|---|
| INSD | Institut National de la Statistique et de la Démographie |
| ISSeP | Institut Scientifique de Service Public (Belgique). |
| IWMI | <i>International Water Management Institute</i> |
| MAAH | Ministère de l’Agriculture et des Aménagements Hydro-agricoles du Burkina Faso |
| MEA | Ministère de l’Eau et de l’Assainissement du Burkina Faso |
| Mm³ | Million de m ³ |
| MERRA | <i>Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications</i> |
| MODIS | <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i> |
| OHADA | Organisation pour l’Harmonisation en Afrique du Droit des Affaires |
| ONEA | Office National de l’Eau et de l’Assainissement |
| OSGIS | <i>Open Source Geographic Information System</i> |
| OSSIM | <i>Open Source Software Image Map</i> |
| OSRS | <i>Open Source Remote Sensing</i> |
| PADI-BF 102 | Programme d’Appui au Développement de l’Irrigation au Burkina Faso, Projet-BF 102 |
| PAGIRE | Plan d’Action de Gestion Intégrée des Ressources en Eau |
| PIB | Produit Intérieur Brut |
| PNDES | Plan National de Développement Economique et Social |
| PNSR | Programme National du Secteur Rural |
| PTF | Partenaire Technique et Financier |
| QGIS | <i>Quantum Geographic Information System</i> |
| RAM | <i>Random Access Memory</i> |
| SEMA | <i>Sensors Empowerment and Accountability</i> |
| SNAP | <i>Sentinel Application Platform</i> |
| SNIEau | Système National d’Informations sur l’Eau |
| SPOT | Système Probatoire d’Observation de la Terre |
| SNDDAI | Stratégie Nationale de Développement Durable de l’Agriculture Irriguée |
| SOSUCO | Société Sucrière de la Comoé |
| SST | <i>Sea Surface Temperature</i> |
| UCEPAK | Union des Coopératives des Exploitants du Périmètre Aménagé de Karfiguéla |
| UNB | Université Nazi Boni (Bobo Dioulasso, Burkina Faso) |
| UNESCO | Organisation des Nations Unies pour l’Education, la Science et la Culture |
| VITO | <i>Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek</i> , Institut flamand pour la recherche technologique |
| WBI | Wallonie-Bruxelles International |
| ZAT | Zone d’Appui Technique |

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|-------|
| REMERCIEMENTS | iii |
| RESUME..... | viii |
| SUMMARY | xi |
| LISTE DES SIGLES, ABREVIATIONS ET SYMBOLES..... | xiii |
| LISTE DES TABLEAUX | xviii |
| LISTE DES FIGURES | xx |
| GLOSSAIRE | xxii |
| Chapitre 1 . Introduction générale | 1 |
| 1.1. Contexte général et justification | 1 |
| 1.1.1. L'eau, une ressource au centre des préoccupations | 1 |
| 1.1.2. L'eau une ressource précieuse pour le secteur agricole..... | 1 |
| 1.1.3. Importance de l'eau pour l'agriculture au Burkina Faso | 2 |
| 1.1.4. Des outils de gestion peu adoptés dans un contexte d'irrigation en mosaïque | 4 |
| 1.1.5. De la nécessité de recourir à des outils en libre accès, moins complexes et à moindre coût pour la production et la diffusion de l'information sur l'eau..... | 5 |
| 1.1.6. Peu de plateformes de communication et de télédétection satellitaires libres exploitées en matière de gestion de l'eau à l'échelle périmétrale..... | 7 |
| 1.2. Objectifs | 10 |
| 1.3. Structure du document..... | 11 |
| Chapitre 2 . Méthodologie générale | 12 |
| 2.1. Résumé des différentes méthodes et techniques utilisées..... | 12 |
| 2.2. Fondements des méthodes et techniques utilisées | 14 |
| 2.2.1. Méthodes d'analyse, de diagnostic et d'évaluation de système | 14 |
| 2.2.2. Méthodes d'estimation des surfaces par classification d'images satellites..... | 17 |
| 2.2.3. Méthodes d'estimation des débits de rivière | 19 |
| 2.2.4. Méthodes de prédiction de variable quantitative | 20 |

| | |
|--|----|
| Chapitre 3 . Généralités sur la zone d'étude | 23 |
| 3.1. Localisation, climat et organisation administrative | 23 |
| 3.2. Hydrologie | 27 |
| 3.3. Occupation des terres | 30 |
| 3.4. Acteurs et principaux usagers de l'eau | 31 |
| 3.4.1. Cadre institutionnel de la gestion de l'eau..... | 31 |
| 3.4.2. Principaux usagers de l'eau | 35 |
| Chapitre 4 . Étude du contexte de la gestion de l'eau dans la Haute-Comoé | 39 |
| 4.1. Utilisation des outils de gestion de l'eau | 39 |
| 4.2. Analyse de la problématique de gestion de l'eau dans la Haute-Comoé..... | 45 |
| 4.2.1. Synthèse bibliographique | 46 |
| 4.2.2. Synthèse des échanges des ateliers multi-acteurs..... | 55 |
| 4.3. Diagnostic du système d'information en gestion de l'eau | 62 |
| 4.3.1. Outil et mécanisme du système d'information du CLE-HC..... | 64 |
| 4.3.2. Forces et faiblesses du système | 67 |
| Chapitre 5 . A <i>WhatsApp</i> based information system to support agricultural water management in the Upper-Comoé river basin, Burkina Faso..... | 71 |
| 5.1. Steps in setting up the information system | 76 |
| 5.1.1. Information needs assessment | 77 |
| 5.1.2. System set-up..... | 78 |
| 5.2. Field trials..... | 80 |
| 5.3. System evaluation..... | 81 |
| 5.4. Results | 82 |
| 5.4.1. Information needs on water availability | 82 |
| 5.4.2. Stakeholders and problem analysis outcomes | 84 |
| 5.4.3. Hierarchy of objectives and implementation strategy | 85 |
| 5.4.4. Information system logic | 86 |
| 5.4.5. "Cause and effect" analysis outcomes..... | 87 |
| 5.4.6. Information system usability and functionality | 89 |

| | |
|--|-------|
| 5.4.7. Towards more rational management of the reservoir water | 90 |
| 5.4.8. Information system sustainability | 91 |
| Chapitre 6 . Méthode d'estimation instantanée des surfaces cultivées irriguées le long des berges de la rivière Comoé à l'aide de <i>Google Earth Engine</i> | 94 |
| 6.1. Images satellites utilisées..... | 98 |
| 6.2. Traitement des images | 102 |
| 6.2.1. Extraction de bandes et calcul d'indices..... | 102 |
| 6.2.2. Création de masques et classifications supervisées | 104 |
| 6.2.3. Evaluation de la classification supervisée | 108 |
| 6.3. Superficies estimées | 108 |
| Chapitre 7 . Adéquation de la fourniture d'eau aux groupes d'utilisateurs..... | 115 |
| 7.1. Estimation des débits de la rivière Comoé | 116 |
| 7.2. Évaluation des besoins en eau des cultures | 121 |
| 7.2.1. Calcul de l'évapotranspiration de référence | 122 |
| 7.2.2. Besoins en eau des utilisateurs..... | 122 |
| 7.3. Calcul de l'adéquation de la fourniture d'eau..... | 128 |
| 7.4. Vers une approche <i>open data</i> | 134 |
| Chapitre 8 . Conclusion générale et perspectives | 141 |
| 8.1. Principaux résultats | 141 |
| 8.2. Indices de durabilité | 142 |
| 8.3. Limites des études réalisées..... | 144 |
| 8.4. Perspectives | 145 |
| 8.4.1. Perspectives pour la recherche | 145 |
| 8.4.2. Perspectives pour le développement..... | 146 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 149 |
| ANNEXES | xxiii |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|-----|
| Tableau 3.1. Principaux plans d'eau de la zone d'étude..... | 29 |
| Tableau 4.1. Outils promus dans le cadre des Projets GEeau et PADI-BF 102. | 41 |
| Tableau 4.2. Hypothèses sur les liens éventuels entre les variables d'intérêt. | 42 |
| Tableau 4.3. Relations entre les variables explicatives et l'utilisation des outils : test de χ^2 de Pearson avec la correction de la continuité de Yates ou coefficient C de contingence de Pearson. | 44 |
| Tableau 4.4. Disponibilité et demande en eau des principaux usagers selon les estimations du CLE. | 49 |
| Tableau 4.5. Outils techniques de gestion de l'eau proposés par la recherche dans le sous-bassin..... | 51 |
| Tableau 4.6. Liste des structures présentes aux ateliers d'échanges du 26 juillet 2017, des 01 février et 02 mars 2018 sur la problématique de la gestion de l'eau dans la Haute-Comoé..... | 54 |
| Tableau 4.7. Difficultés relatives à la gestion de l'eau, évoquées par les usagers. | 56 |
| Tableau 4.8. Solutions proposées aux difficultés ci-avant évoquées par les acteurs..... | 57 |
| Tableau 4.9. Besoins en informations exprimés par les acteurs. | 60 |
| Tableau 4.10. Voies et moyens pour satisfaire les besoins exprimés en informations hydro-agricoles. | 61 |
| Tableau 4.11. Dispositif d'information du CLE-HC pour une répartition équitable de l'eau. | 66 |
| Table 5.1. Members of the WhatsApp group in 2018 and 2019..... | 80 |
| Table 5.2. Farmers answers related to water information needs (N = 286)..... | 83 |
| Table 5.3. Logical framework matrix of the Upper-Comoé river basin information system. | 86 |
| Table 5.4. Number of times per participant, the bulletin information was downloaded, read, and perceived to be useful. N=16 (2018), N=18 (2019). | 89 |
| Tableau 6.1. Caractéristiques d'une image Sentinel-2 (Bandes spectrales, résolutions spatiales et utilité)..... | 100 |
| Tableau 6.2. Caractéristiques d'une image <i>Sentinel-1</i> | 101 |
| Tableau 6.3. Nombre d'images <i>Sentinel-1</i> (S1) et <i>Sentinel-2</i> (S2) traitées pour la campagne sèche 2019. | 102 |
| Tableau 6.4. Collections de données d'entraînement et de validation..... | 106 |
| Tableau 6.5. Méthodologie d'estimation des surfaces cultivées dans les berges du fleuve Comoé..... | 107 |
| Tableau 6.6. Surfaces de la classe 'Culture' et performances de la classification..... | 110 |
| Tableau 6.7. Surfaces occupées par la classe 'Bas-fonds' et performances de la classification. | 110 |

| | |
|---|-----|
| Tableau 6.8. Evolution des terres cultivables nues et des surfaces occupées par les classes ‘Bas-fonds’ et ‘Cultures’ au cours de la campagne sèche 2019 (en ha)... | 110 |
| Tableau 6.9. Matrice de confusion des classes Bas-fonds/Cultures, janvier 2019 à titre d'exemple (pixels)..... | 111 |
| Tableau 7.1. Equations des courbes de jaugeage aux cinq points de mesure de la zone d'étude. | 118 |
| Tableau 7.2. Valeurs de Kc de la canne à sucre dont la coupe est réalisée en novembre. | 124 |
| Tableau 7.3. Kc moyens journaliers en fonction des stades de développement du riz irrigué. | 125 |
| Tableau 7.4. Kc moyen des cultures du périmètre maraîcher informel, estimé en fonction des taux d'occupation et des stades culturaux en 2018 et en 2019. | 126 |
| Tableau 7.5. Besoins en eau des trois usagers agricoles en mm/j, campagne 2018 et 2019. | 126 |
| Tableau 7.6. Besoins en eau des trois usagers agricoles en l/s/ha, campagne 2018 et 2019. | 127 |
| Tableau 7.7. Besoins en eau des trois usagers agricoles en m ³ /s, campagnes 2018 et 2019 suivant les emblavures actuelles dans la zone d'étude. | 129 |
| Tableau 7.8. Besoins en eau des trois usagers agricoles en m ³ /s, campagnes 2018 et 2019 avec une emblavure totale des surfaces cultivables du périmètre rizicole. . | 129 |
| Tableau 7.9. Méthodologie d'estimation des indices d'adéquation de la desserte en eau des usagers agricoles. | 130 |
| Tableau 7.10. Adéquation débits fournis/besoins, campagne sèche 2018 et 2019 suivant le scénario actuel : le périmètre rizicole cultive la moitié de ses surfaces. | 133 |
| Tableau 7.11. Adéquation débits fournis/besoins, campagne sèche 2018 et 2019 suivant le scénario 2 : le périmètre rizicole cultive la totalité de ses surfaces..... | 134 |
| Tableau 7.12. Comparaison des distributions de données de NASA POWER et FAO WaPOR avec les données observées de terrain pour la période allant du 01 janvier 2000 au 31 décembre 2019. | 137 |
| Tableau 7.13. Résumé des statistiques du test de corrélation entre les variables ET0 observées et ET0 <i>open data</i> | 137 |
| Tableau 7.14. Résultats du modèle de régression linéaire de ET0 observées en fonction de ET0 FAO WaPOR. | 138 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|-----|
| Figure 2.1. Différentes étapes de la recherche menée. | 14 |
| Figure 3.1. Localisation du sous-bassin versant de la Haute-Comoé au Burkina Faso. | 25 |
| Figure 3.2. Exemple de diagramme ombrothermique de la zone d'étude : année 2016, extrait de Palé <i>et al.</i> (2019)..... | 26 |
| Figure 3.3. Évolution de la pluviométrie de 1996 à 2016 dans la région d'étude. . | 26 |
| Figure 3.4. Positions des trois principaux lacs, des barrages et des stations hydrométriques de l'agrosystème de la Haute-Comoé..... | 29 |
| Figure 3.5. Carte d'occupation des sols de la Haute-Comoé en 2012, source : BDOT (2002)..... | 31 |
| Figure 3.6. Organes de gestion de l'Agence de l'Eau des Cascades, extrait de Palé <i>et al.</i> (2019). | 34 |
| Figure 3.7. Proportion (%) des parties prenantes de la GIRE au sein du CLE-HC, extrait de Palé <i>et al.</i> (2019)..... | 35 |
| Figure 3.8. Réservoirs, stations hydrométriques, principaux groupes d'utilisateurs de l'eau dans le sous-bassin versant de la Haute-Comoé. | 37 |
| Figure 4.1. Ressources mobilisées pour l'autofinancement de la GIRE et taux de recouvrement des cotisations financières au sein du CLE-HC..... | 69 |
| Figure 5.1. Rate of individuals using internet in Burkina Faso. | 74 |
| Figure 5.2. Most popular mobile instant messaging apps in Africa in 2016..... | 74 |
| Figure 5.3. Schematic of the agricultural water users in the Upper-Comoé river basin..... | 76 |
| Figure 5.4. Water information system for the Upper-Comoé river basin..... | 81 |
| Figure 5.5. Example of bulletin disseminated through the information system. | 81 |
| Figure 5.6. Funding participants are willing to pay in order to get water information. | 83 |
| Figure 5.7. Frequencies of notifications requested by farmers..... | 84 |
| Figure 5.8. Outcomes of irrigation water problem analysis for the Upper-Comoé river basin. | 85 |
| Figure 5.9. The Upper-Comoé irrigation water issue objective tree. | 85 |
| Figure 5.10. A fishbone diagram of evaluation results for the Upper-Comoé information system. | 89 |
| Figure 5.11. Variability in discharges before and after the establishment of the information system (N=362). | 91 |
| Figure 6.0. Editeur de codes de la plateforme <i>Google Earth Engine</i> | 98 |
| Figure 6.1. Image médiane S2 de la plaine alluviale de janvier 2019 non encore classifiée. | 105 |

| | |
|--|-----|
| Figure 6.2. Dispersion des valeurs de NDVI de la classe culture de l'image médiane S2 de janvier 2019..... | 105 |
| Figure 6.3 a. Surfaces occupées par les classes 'Cultures' et 'Bas-fonds' en janvier 2019..... | 112 |
| Figure 6.3 b. Portion agrandie de la figure 6.3 a présentant les classes 'Cultures' et 'Bas-fonds'..... | 112 |
| Figure 6.4. Surface occupée par la classe 'Cultures' en janvier 2019, à titre d'exemple de sortie de la méthode d'analyse..... | 113 |
| Figure 7.1. Débits moyens journaliers par mois au cours de la campagne sèche 2018..... | 120 |
| Figure 7.2. Débits moyens journaliers par mois au cours de la campagne sèche 2019..... | 120 |
| Figure 7.3. Droite de régression de calibration de ET0 observées en fonction de ET0 WaPOR..... | 138 |
| Figure 7.4. Droite de régression de validation de ET0 observées en fonction de ET0 WaPOR..... | 138 |

GLOSSAIRE

| | |
|--|--|
| Agrosystème du sous-bassin versant de la Haute-Comoé | L'agrosystème du sous bassin versant de la Haute-Comoé est constitué de l'ensemble des usagers exploitant les ressources naturelles (en particulier l'eau à usage agricole) en aval des trois réservoirs de ce bassin et des interactions qui lient ces usagers. |
| Bas-fonds | Les bas-fonds en région intertropicale sont « des fonds plats ou concaves des vallons et petites vallées, axes de convergences préférentiels des écoulements des eaux de surface et des écoulements de subsurface » (Raunet, 1985). Dans la zone d'étude, ils représentent de vastes zones humides ou inondées, parsemées de végétations herbacées qui s'assèchent au fur et à mesure que la campagne agricole sèche progresse dans le temps. |
| Débit | Exprimé par unité de temps, le débit d'une rivière est le flux d'eau traversant une section transversale (OMM, 1994). |
| Campagne agricole de saison sèche | La campagne agricole de saison sèche dans la partie Sud-Ouest du Burkina Faso, correspond à l'intervalle de temps allant d'octobre à avril, au cours duquel la pluviométrie est nulle ou insignifiante ; la production végétale n'est pas envisageable sans l'irrigation. Les dates précises de début et de fin de campagnes agricoles sèches sont très variables d'une année à l'autre. La campagne agricole sèche s'étale donc entre deux années civiles. Pour simplifier, est appelée 'campagne sèche 2018', la campagne sèche qui a débuté en 2017 et a pris fin en 2018. Est appelée 'campagne sèche 2019', la campagne sèche qui a démarré en 2018 et s'est achevée en 2019. |
| Gestion plus rationnelle de l'eau | Une gestion plus rationnelle de l'eau signifie qu'il y a moins de gaspillage d'eau, les volumes d'eau prélevés pour l'irrigation n'excèdent pas les besoins des cultures. |
| Plaine alluviale de Karfiguéla | Une plaine alluviale est un espace géographique de relief plat dont le sol est constitué de sédiments appelés alluvions qui sont déposées lors des crues du cours d'eau environnant. |
| Sous-bassin versant | Le sous-bassin versant, par définition, est l'ensemble de l'espace drainé par un cours d'eau et ses affluents. |

Chapitre 1 . Introduction générale

1.1. Contexte général et justification

1.1.1. L'eau, une ressource au centre des préoccupations

L'eau est un maillon essentiel pour l'atteinte des objectifs du développement durable fixés par la communauté internationale en 2015. Le sixième objectif est entièrement dédié à l'eau. Il vise entre autres à garantir son accès à tous et à assurer sa gestion durable. En effet, en 2010, la demande mondiale en eau pour les multiples usages socio-économiques était de 4600 km³ et cette demande augmentera d'au moins 20 % à l'horizon 2050 (Burek *et al.*, 2016). Si la croissance actuelle de la population ainsi que les modes de gestion demeurent inchangés d'ici à 2030, l'humanité fera face à un manque d'eau de 40 % (World Bank Group Water Global Practice, 2018). D'ici à 2025, 1.8 milliard de personnes vivront dans des régions sujettes à des pénuries totales d'eau, à cause de l'augmentation de la demande, qui est principalement liée à la croissance exponentielle de la population mondiale, d'après la source précédente. Le rapport mondial 2019 des Nations Unies sur l'eau indique que l'amélioration de la gestion des ressources hydriques est indispensable pour réduire les inégalités socio-économiques au sein de l'humanité (UNESCO, 2019). L'efficacité d'utilisation de l'eau, la démographie, l'urbanisation, l'industrialisation et les changements climatiques seraient les facteurs sur lesquels il faut agir pour diminuer la compétition sur les ressources en eau, notamment dans le domaine de l'agriculture (World Bank Group Water Global Practice, 2017).

1.1.2. L'eau une ressource précieuse pour le secteur agricole

L'eau « verte » définie par Wang *et al.* (2006) comme l'eau du sol disponible pour alimenter les plantes (par opposition à l'eau « bleue » qui regroupe l'ensemble des eaux des aquifères, des lacs, des réservoirs et rivières), représente deux tiers des précipitations mondiales (Leenhardt *et al.*, 2020). Le secteur agricole consomme en moyenne 70 % des eaux mobilisées à partir des aquifères, des rivières et des lacs

(FAO, 2011a) pour l'irrigation de 330 million d'hectares soit environ 20 % de terres cultivées dans le monde ; ces surfaces irriguées contribuent à 40 % dans la production alimentaire mondiale (World Bank Group Water Global Practice, 2017). Bien que déjà relativement importante en général, la consommation en eau du secteur agricole est très variable selon les régions du monde et devrait augmenter dans les prochaines années. En effet, pour nourrir une population de neuf milliards d'individus attendus en 2050, une augmentation de 15 % des quantités d'eau jusqu'ici mobilisées pour l'agriculture sera nécessaire (World Bank Group Water Global Practice, 2018 ; Khokhar, 2017). Alors que l'eau d'irrigation aux Etats-Unis représente 85 % la consommation annuelle totale d'eau du pays (McNabb, 2019), l'Afrique sub-saharienne, ne prélève pour l'heure que trois pour cent des ressources en eau renouvelables pour l'agriculture à cause du fait que peu de terres sont équipées pour être irriguées (FAO, 2011b). Cependant, certains pays comme le Burkina Faso ne disposant pas pour l'heure d'assez de ressource en eau renouvelable pour transformer toutes les terres cultivées en production irriguée, utilisent une petite fraction de leur potentiel d'irrigation (Kumar *et al.*, 2020).

1.1.3. Importance de l'eau pour l'agriculture au Burkina Faso

Au Burkina Faso, un pays sahélien d'Afrique, l'agriculture de type pluvial, occupe près de 80 % de la population active et contribue à environ 30 % à la formation du Produit Intérieur Brut (Gouvernement du Burkina Faso, 2016). Cette agriculture est fortement sujette aux aléas du climat. Elle est caractérisée par une pression accrue sur les ressources naturelles foncières et hydriques. Face à l'irrégularité des précipitations observée ces dernières années au cours des campagnes agricoles humides qui a entraîné des baisses de rendements des cultures, face à la dégradation des sols, l'État a développé une politique de développement durable de l'agriculture irriguée, en sus de celle relative à l'agriculture pluviale en se fondant sur un potentiel de 233 500 hectares de terres irrigables et de 500 000 ha de bas-fonds aménageables (Gouvernement du Burkina Faso, 2018). La maîtrise de

l'eau est l'un des fondements du Programme National du Secteur Rural (PNSR) adopté en 2011 et de la Stratégie Nationale de Développement Durable de l'Agriculture Irriguée (SNDDAI) de 2004. Depuis les années 2000, les superficies couvertes par les cultures irriguées croissent d'année en année à la faveur des aménagements hydro-agricoles de surfaces moyennes (20-100 ha) réalisés par l'État et ses partenaires, autour des retenues d'eau (Gouvernement du Burkina Faso, 2006). Selon les statistiques de la Direction Générale des Etudes et des Statistiques Sectorielles du Ministère en charge de l'Agriculture, rapportées par Kambou (2019) les périmètres irrigués formels occupaient 25 058 ha avant 2004, en 2018 ils s'évaluaient à 77 446 ha soit une augmentation de près de 200 % en 15 ans. L'engouement pour cette nouvelle forme d'agriculture a révélé des avantages certains mais aussi des difficultés. En effet, la gestion concertée des ressources en eau autour de ces aménagements hydro-agricoles engendre des impacts tant positifs que négatifs. Au titre des avantages on peut citer entre autres l'amélioration de la production agricole globale (avec un apport additionnel de la production sèche qui a atteint 13 % de celle-ci en 2016 (Gouvernement du Burkina Faso, 2018)) et par voie de conséquence de la sécurité alimentaire. Les conséquences négatives sont notamment l'exploitation inappropriée des ressources en eau, marquée par une faible efficacité d'utilisation de l'eau, qui met en cause la durabilité des agrosystèmes, engendre la baisse de la productivité des sols et conduit à des conflits sociaux qui émanent de la mauvaise organisation des usagers.

La Politique Nationale de Gestion Intégrée des Ressources en Eau adoptée en 2003, qui prône une gestion concertée de ces ressources, à travers l'approche bassin versant, devrait entre autres contribuer à résoudre de façon durable les problématiques de gestion rationnelle et équitable de la ressource eau. Plusieurs acquis sont engrangés dans la mise en œuvre de cette politique tant au niveau institutionnel, réglementaire que juridique, cependant quelques défis subsistent dans son opérationnalisation au niveau des bassins versants. Ces défis sont notamment le

financement durable des instruments de mise en œuvre de la politique au niveau local, la gestion durable des ressources en eau et terre par l'amélioration des pratiques de gestion, l'appropriation par les usagers de l'approche bassin versant, et la valorisation efficiente et durable des écosystèmes.

1.1.4. Des outils de gestion peu adoptés dans un contexte d'irrigation en mosaïque¹

L'amélioration de la gestion de l'eau nécessite le développement d'outils qui fournissent des informations précises aux usagers et aux gestionnaires, en particulier sur les seuils de consommation (FAO, 2011b). Pour ce faire, plusieurs outils ont été développés dans le secteur agricole, reconnu comme l'un des domaines le plus consommateur en eau (FAO, 2011a). Ce sont pour la plupart des programmes informatiques conçus et mis à la disposition de potentiels utilisateurs pour améliorer l'utilisation de l'eau agricole. C'est le cas du modèle d'estimation des besoins en eau *AquaCrop* de la FAO calibré par Wellens *et al.* (2013) sur le chou au Burkina Faso et du modèle hydrologique du bilan d'eau de surface, *Hydrological Simulation Model* (HYSIM) (Manley, 2003), mis en œuvre par Wellens (2009) dans le bassin versant du Kou. Ces initiatives bien qu'utiles demeurent relativement complexes aux yeux des potentiels utilisateurs. Elles ne tiennent pas nécessairement compte de la compétence et de la capacité d'action de ces derniers (Wellens, 2007), de leurs perceptions vis-à-vis des modèles et de la satisfaction de leurs besoins (Dupont *et al.*, 1998), qui doivent être adaptées et actualisées grâce à la communication et aux interactions entre les utilisateurs finaux et les promoteurs de ces initiatives (Tonneau *et al.*, 2019; Fresco, 2015; Adolph, 2015). Aussi la plupart des extrants de ces outils se limitent aux résultats bruts sans se préoccuper de la manière dont ceux-ci peuvent être appropriés par les non spécialistes. Si produire des résultats scientifiques reste une énorme tâche, en faire bénéficier les communautés en est une autre toute aussi

¹ L'irrigation en mosaïque consiste en plusieurs petites zones irriguées, localisées et dispersées en mosaïque dans le paysage (Paydar *et al.*, 2011, p. 2).

importante. Le passage d'un résultat de recherche à son utilisation pratique dans la vie quotidienne, constitue un chemin non négligeable à parcourir. Un des défis est donc de trouver les formes sous lesquelles il faut transmettre ces outils et/ou leurs extrants aux destinataires finaux de telle sorte qu'ils puissent leur être utiles dans la gestion pratique de l'eau (Car et Moore, 2011).

1.1.5. De la nécessité de recourir à des outils en libre accès, moins complexes et à moindre coût pour la production et la diffusion de l'information sur l'eau

S'offrir des instruments fiables et abordables pour la fourniture en continu des informations aidant à une gestion plus rationnelle de l'eau agricole constitue un élément crucial pour les pays africains (Car et Moore, 2011). L'orientation vers des alternatives qui 'réduisent les distances' telles que les plateformes de communication en libre accès combinées aux plateformes de télédétection satellitaires moins complexes augmenteraient les chances d'utilisation de ces instruments. En effet, des recherches antérieures exécutées par l'unité de recherche « Eau Environnement Développement » de l'Université de Liège Arlon Campus Environnement (Wellens, 2014; Traoré, 2012), il ressort que les outils de gestion de l'eau proposés aux administrations agricoles ont plus de chances d'être utilisés s'ils sont simples d'utilisation, routiniers et s'ils ne demandent pas beaucoup d'investissement de leur part en termes d'apprentissage. Les plateformes en l'occurrence de télédétection (pour la production de l'information spatiale) et de communication (pour la diffusion de cette information) constituent des espaces où ces possibilités sont envisageables.

La télédétection, en particulier le recours aux images optiques du visible et de l'infra-rouge, peut être utilisée pour la définition d'indicateurs de performance d'utilisation de l'eau en agriculture, à travers la mise en place de démarches permettant le calcul de l'évapotranspiration réelle et potentielle à l'échelle de parcelles (Colin, 2006). Certains outils tels le *Satellite Monitoring of Irrigation* (Simonneaux *et al.*, 2009) ou le SAT IRR (*Satellite for irrigation scheduling*) permettent la spatialisation de l'évapotranspiration des cultures irriguées et des

besoins en eau en utilisant des images satellitaires (Le Page *et al.*, 2014). Cependant, pendant longtemps les traitements de données de télédétection nécessitaient l'acquisition d'ordinateurs ou de serveurs puissants. Ce qui retardait l'accès des pays africains à ressources financières limitées aux données de la télédétection satellitaire (Tonneau *et al.*, 2019; Bégué *et al.*, 2016). Le développement de l'internet en particulier du *Web 2.0*, a facilité la création de plateformes qui offrent des possibilités de concevoir et de proposer aux praticiens de terrain des procédures ou produits moins complexes d'utilisation, intuitifs, automatisés et simplifiés. La seconde génération de la technologie Web (*Web 2.0*), encore appelé *Web* participatif ou *Web* de la lecture et de l'écriture, est une collection de technologies qui permettent plus d'interaction et de collaboration, contrairement à son prédécesseur le *Web 1.0*. (Murugesan, 2007). Elle permet aux utilisateurs en plus d'avoir accès au contenu d'un site web, d'y contribuer. Son avènement a facilité le développement de plusieurs applications parmi lesquelles les applications de messagerie instantanées des smartphones : *Facebook Messenger, WhatsApp, Viber, Instagram, Telegram...* La disponibilité des plateformes dites de type *cloud-computing* permettant un traitement rapide des données en ligne, ouvre des portes à l'élaboration des produits facilement utilisables dans ces pays. Ces plateformes comprennent des outils en accès libres permettant de proposer des solutions presque gratuites. Une publication est en libre accès selon l'UNESCO (2017) « si : (i) son contenu est universel et accessible sans restriction et sans coûts pour le lecteur via Internet ou tout autre accès ; (ii) l'auteur ou le titulaire des droits d'auteur accorde irrévocablement à tous les utilisateurs le droit d'utiliser, de copier ou de distribuer l'article pour une période indéfinie et à condition que son nom soit dûment mentionné ; (iii) la publication est immédiatement déposée, dans sa totalité ou dans un format électronique adéquat, sur au moins une archive ouverte reconnue internationalement et dédiée au libre accès ». Cependant Dacos (2014) souligne qu'il faut faire une distinction entre les concepts accès libre (en anglais « *libre open access* ») et accès ouvert (« *gratis open access* »).

Selon lui, « un document en accès ouvert est consultable sans barrière autre que la capacité d'avoir un accès à internet et un navigateur web. Il ne faut donc pas payer ni s'identifier pour avoir accès au texte intégral ». Cependant il n'est pas autorisé d'un point de vue strictement juridique de republier le texte intégral ni d'utiliser les métadonnées qui sont également protégées. Le « *libre open access* » est une combinaison de l'accès ouvert et d'une licence libre, permettant la réutilisation selon certaines exigences comme par exemple la non utilisation commerciale (licence CC BY NC ND), la citation de la source (licence Creative Commons CC BY) (Dacos, 2014).

1.1.6. Peu de plateformes de communication et de télédétection satellitaires libres exploitées en matière de gestion de l'eau à l'échelle périmétrale

L'avènement récent des plateformes libres d'accès offre des possibilités de mettre en place des services informationnels opérationnels, fiables et en adéquation avec les besoins des acteurs du secteur de l'eau, à partir des archives d'images satellites disponibles gratuitement et d'accès rapides. Cependant peu de plateformes de télédétection satellitaires libres sont exploitées en matière de gestion de l'eau agricole à l'échelle périmétrale, notamment dans la production des informations visant une meilleure utilisation de l'eau. La plupart des plateformes mises en œuvre si elles ne sont pas payantes, sont dimensionnées à l'échelle globale ou nécessitent un travail permanent de maintenance ou encore sont peu flexibles. C'est le cas par exemple de la plateforme commerciale *Rheticus*® (Drimaco *et al.*, 2018) utilisée entre autres pour le suivi des risques naturels et la qualité des eaux marines en Italie, de ILMS (*Integrated Land Management System*), mis au point en Allemagne, qui permet de produire des données environnementales notamment des cartes d'utilisation des sols et leurs profils (Kralisch *et al.*, 2012), de TerraGIS, une plateforme de système d'information géographique basé sur le *Web* permettant d'établir des cartes numériques de sol destinées à la gestion des propriétés physiques,

chimiques de ces sols dans les zones cotonnières en Australie (Huang *et al.*, 2017), de *Hydrosense*, un système de monitoring de la qualité de l'eau basé sur des sondes et utilisant un interface *web* (Prescott *et al.*, 2016)...

Des outils souples sont cependant nécessaires pour produire de l'information aidant les agriculteurs à une meilleure gestion de l'eau, à partir des données satellitaires libres d'accès. L'utilisation de la télédétection satellitaire libre est une voie idéale pour trouver des solutions adaptées au contexte des petits irrigants africains qui ne peuvent pas profiter des produits de la télédétection commerciale.

Une distinction est cependant à faire entre les plateformes libres de télédétection satellitaires OSRS (*Open Source Remote Sensing*) et les plateformes OSGIS (*Open Source Geographic Information System*) (Kpienbaareh *et al.*, 2019). Dans cette étude, nous nous focalisons sur les OSRS dont la vocation première est de traiter des données de type '*raster*'.

La plupart des outils OSRS de traitement de données satellitaires disponibles sont des logiciels téléchargeables à installer sur un ordinateur et ne sont pas directement liés à un catalogue d'images satellitaires. Leur utilisation requiert donc au préalable leur installation, un téléchargement et un stockage d'images. C'est le cas du logiciel gratuit *Orfeo Toolbox* de l'Agence spatiale Française (Christophe et Inglada, 2009), du *Open Source Software Image Map* (OSSIM) (Madrid *et al.*, 2009), d'*Opticks* (Tsou et Smith, 2011) et d'*InterImage* (Kpienbaareh *et al.*, 2019). Le logiciel SNAP (*Sentinel Application Platform*) est également un outil OSRS développé par l'Agence Spatiale Européenne qui peut traiter plusieurs types d'images satellitaires (données *Sentinel*, *RapidEye*, *SPOT*, *MODIS*...), cependant il requiert aussi d'être téléchargé et installé sur un ordinateur ayant au moins une capacité de 16 GB de RAM et possédant un processeur *multicore* (Kpienbaareh, *et al.*, 2019). De plus les images à exploiter nécessitent un traitement préliminaire et doivent préalablement être téléchargées. C'est également le cas de l'*OSGIS Quantum GIS* qui, bien que libre d'accès, requiert une installation préalable sur un

ordinateur. Une version libre *SIG-web* de QGIS couplée au langage de programmation Python existe mais elle demeure relativement complexe, et nécessite d'importants investissements pour être adaptée à un autre contexte (Prescott *et al.*, 2016).

HidroMap est un système d'aide à la décision mis en place pour le contrôle des activités agricoles notamment dans les grandes emblavures (Piedelobo *et al.*, 2018). Le logiciel d'analyse orientée objet non commercial *Spring* a été utilisé pour la cartographie des étangs d'aquaculture au Vietnam (Kpienbaareh, *et al.*, 2019), cependant il demeure un outil semi-automatique installable sur un ordinateur et son utilisation nécessite une certaine connaissance en télédétection satellitaire.

En somme l'utilisation de la plupart des plateformes OSRS demeure relativement complexe pour les non experts car présentant peu de possibilités de réaliser des automatisations simplifiées. C'est dans ce contexte que notre choix s'est orienté vers des plateformes hébergeant des bases de données gratuites et qui servent à la fois d'outils de traitement, comme la plateforme *Google Earth Engine*, qui demeure de nos jours un des outils les plus puissants du domaine.

À côté de ces plateformes de télédétection satellitaires, une autre forme de plateforme est apparue avec le développement des réseaux de téléphonie mobile numérique de troisième génération (3G) en Afrique (Bégué *et al.*, 2016). Ce sont les plateformes dites de communication, parmi lesquelles figurent notamment les *open source internet-based messaging apps* (les applications libres de messagerie instantanée). Ce sont des outils potentiels pour transformer le système de diffusion de l'information en réduisant la distance entre les agriculteurs et les vulgarisateurs (Wadkar *et al.*, 2016). Ces applications qui ont connu un accroissement fulgurant en Afrique, offre des possibilités de relever les défis communicationnels qui se posent dans la gestion de l'eau. Cependant jusqu'ici, la plupart des applications mobiles de messagerie instantanées libres, utilisées comme outils de communication pour la gestion des ressources naturelles concernent la gestion des sols (Mills *et al.*, 2019),

les pratiques agricoles (Nesheim *et al.*, 2017) et, très significativement, la gestion des catastrophes naturelles (Badri *et al.*, 2018; Anbarasi et Mayilvahanan, 2017; Basu *et al.*, 2017). Des expériences formelles utilisant ces types de plateformes *open source* pour expérimenter des systèmes de communication visant à améliorer la gestion de l'eau sont rares.

C'est dans ce contexte que se pose alors la question fondamentale ci-après : quel outil de suivi hydro-agricole serait facilement utilisable par des comités d'administration de l'eau à l'échelle de sous-bassin versant dans un pays comme le Burkina Faso pour une meilleure gestion des ressources en eau agricole ? En plus d'être facilement utilisable par les bénéficiaires, un tel outil doit faciliter le partage d'informations entre ces derniers et être capable d'évaluer objectivement l'utilisation agricole de l'eau. De cette question essentielle, découlent donc plusieurs sous-questions de recherche à savoir :

1. Quel système de diffusion d'informations sur la gestion de l'eau faut-il mettre en place pour améliorer la gestion de l'eau à l'échelle de sous-bassin versant ?
2. Quelle procédure peu coûteuse et aisément reproductible faisant appel à la télédétection satellitaire peut être utilisée par des non spécialistes en télédétection pour cartographier des surfaces irriguées mosaïques de maraîchage au Burkina Faso ?
3. Comment suivre les performances d'utilisation de l'eau des différents groupes d'utilisateurs agricoles au cours de la campagne sèche ?

1.2. Objectifs

L'objectif général de cette thèse est de contribuer à l'amélioration de la gestion de l'eau à usage agricole à l'échelle de sous-bassins versants au Burkina Faso à travers le développement d'un outil souple et approprié de suivi hydro-agricole. On entend par 'outil souple et approprié de suivi hydro-agricole', tout outil de

production et de diffusion d'informations agricoles exploitables par les comités de l'eau dans le but d'améliorer la rationalité, la transparence et l'équité dans la gestion de l'eau de surface. De manière spécifique, il s'agissait de :

1. Mettre en place un système de diffusion d'informations sur la gestion de l'eau dans le sous-bassin versant de la Haute-Comoé ;
2. Élaborer une méthode permettant de cartographier les surfaces irriguées mosaïques de maraîchage tout au long des berges du fleuve Comoé ;
3. Déterminer un indicateur de suivi des performances d'utilisation de l'eau des différents groupes d'usagers agricoles au cours de la campagne sèche.

1.3. Structure du document

Le présent document qui fait la synthèse des différentes recherches menées, envisage de répondre aux questions ci-avant posées. Il est structuré en huit chapitres. Le chapitre 1 (*supra*) a été consacré à l'introduction générale qui situe la problématique générale de la recherche. Dans le chapitre 2, la méthodologie générale de la recherche est présentée. Le chapitre 3 présente la zone d'étude. Le chapitre 4 est consacré à l'étude du contexte de la gestion de l'eau dans le sous-bassin versant de la Haute-Comoé. Il est centré sur l'analyse des contraintes et des voies d'amélioration de la gestion multi-acteurs de l'eau. Le chapitre 5 est relatif au développement d'une plateforme de communication basée sur *WhatsApp*, un canal de diffusion des informations sur la gestion de l'eau. À partir de la plateforme *Google Earth Engine*, une méthode d'estimation instantanée des surfaces irriguées le long des berges d'une rivière est proposée (Chapitre 6). Le chapitre 7 est consacré à la détermination d'un indicateur de suivi des performances d'utilisation de l'eau. Enfin, le chapitre 8 est dédié à la conclusion générale et aux perspectives.

Chapitre 2 . Méthodologie générale

2.1. Résumé des différentes méthodes et techniques utilisées

La recherche a été menée essentiellement en deux étapes (Figure 2.1). Dans un premier temps une étude du contexte de la gestion de l'eau dans la zone d'étude a été effectuée. Cette étude a permis ensuite de développer un outil de suivi hydro-agricole comprenant : une méthode permettant l'estimation des surfaces cultivées irriguées, un système de diffusion de l'information hydro-agricole et un indicateur de suivi des usagers de l'eau.

L'étude du contexte de la gestion de l'eau, a consisté en une série d'études préliminaires relatives au contexte spécifique de la recherche dans le but de mieux cerner la problématique. Il s'est agi de l'analyse de la problématique de gestion de l'eau agricole, de l'évaluation de l'utilisation des outils de gestion promus dans le cadre de précédents projets de gestion de l'eau pour l'agriculture au Burkina Faso et du diagnostic du système d'information dédié à la gestion de l'eau dans le sous-bassin versant de la Haute-Comoé. Elle a été réalisée à partir d'enquêtes de terrain, de revues documentaires et d'analyses d'échanges issus d'ateliers multi-acteurs. Cette étude contextuelle a permis de développer un outil de suivi hydro-agricole en guise de solutions aux problèmes identifiés.

Le développement de l'outil de suivi hydro-agricole a consisté notamment à mettre en œuvre un nouveau système d'information sur la gestion de l'eau, à élaborer une méthode d'évaluation de surfaces cultivées irriguées et à déterminer un indicateur pour le suivi des performances d'utilisation de l'eau en campagne sèche. Il s'agit précisément de l'indicateur d'adéquation de la fourniture d'eau, calculé à partir des variables 'besoins en eau des cultures' et 'débits alloués aux usagers'. Ces méthodes ont été développées à partir des traitements réalisés sur des plateformes libres de télédétection satellitaires et de communication (voir Chapitres 5 et 6).

La figure 2.1 résume les différentes étapes de la méthodologie. La mise en œuvre de ces étapes, a nécessité le recours à divers outils méthodologiques dont notamment :

- les interviews semi-structurées et l'enquête par questionnaire, pour l'étude sur les outils de gestion de l'eau précédemment promus par les projets de recherche ;
- la revue documentaire, l'observation de terrain et la synthèse des échanges d'ateliers multi-acteurs pour l'analyse-diagnostic de la problématique de gestion de l'eau ;
- le *focus group* et l'analyse SWOT (*Strenghts-Weaknesses-Opportunities-Threats*) pour le diagnostic du système d'information dédié à la gestion de l'eau ;
- les jaugeages pour l'estimation des débits de rivière, l'application de l'approche du cadre logique et de l'analyse cause-effet pour la mise en œuvre et l'évaluation du nouveau système d'information basé sur l'application *WhatsApp*.
- l'interprétation et la classification d'images satellites pour l'estimation des surfaces cultivées irriguées.
- la prédiction des besoins en eau des cultures à l'aide de données libres.

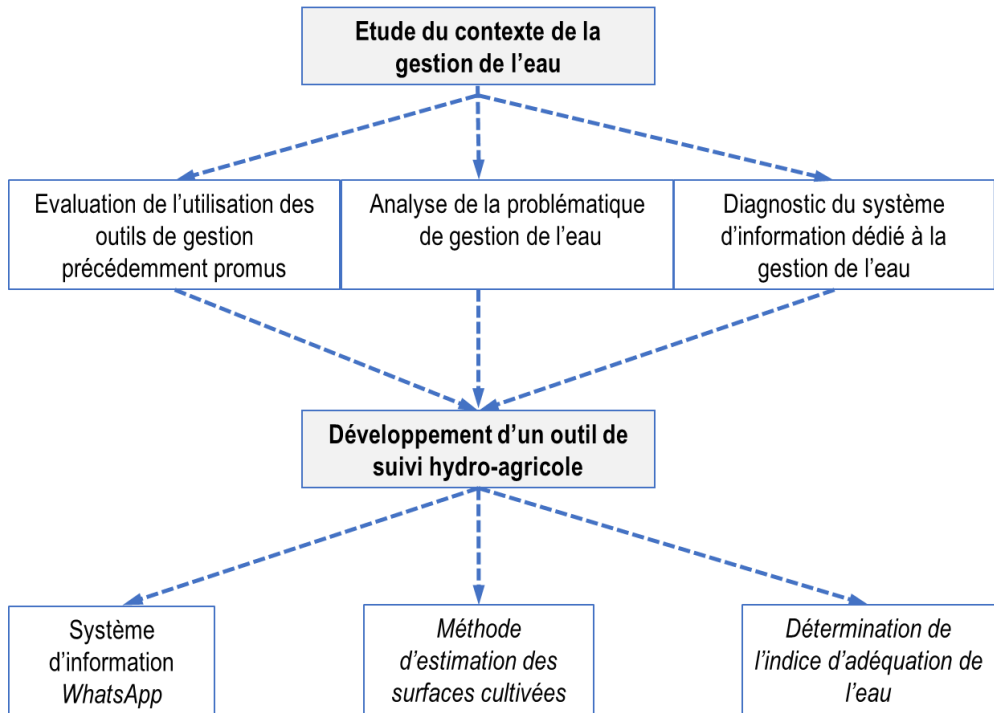


Figure 2.1. Différentes étapes de la recherche menée.

2.2. Fondements des méthodes et techniques utilisées

Les bases théoriques sur lesquelles s'appuient les méthodes utilisées dans le présent document sont présentées dans les sections ci-après. La première section traite des méthodes d'analyse, de diagnostic et d'évaluation des systèmes. La deuxième concerne les méthodes d'estimation des surfaces par classification d'images satellites et les deux dernières sections présentent les méthodes d'estimation de débits de rivière et de prédiction de variable quantitative.

2.2.1. Méthodes d'analyse, de diagnostic et d'évaluation de système

Un diagnostic est « un jugement porté sur une situation à partir de l'analyse d'indicateurs ou de paramètres » (Mergeai, 2010, p. 58). Combinant observations,

enquêtes et exploitation des ressources documentaires, le diagnostic permet une meilleure connaissance des réalités et facteurs défavorables d'une situation afin de proposer des actions idoines visant à les changer (Mergeai, 2010). La littérature scientifique fait état de plusieurs approches méthodologiques de diagnostic des systèmes. Elles diffèrent principalement en fonction de l'objet d'étude auquel elles sont appliquées.

La méthode DPRP (Diagnostic Participatif Rapide et Planification des Actions d'Amélioration) mise au point par l'Institut International de Gestion de l'Eau et appliquée à l'évaluation des performances des systèmes irrigués en Afrique de l'Ouest, comprend divers outils de collecte de données et de planification comme l'interview semi-structurée, le calendrier saisonnier, le diagramme de Venn, le transect (marches d'observation sur le terrain), l'arbre à problème, le plan d'action... (IIMI (Institut International du Management de l'Irrigation), 1997).

Le Diagnostic Participatif des Contraintes et des Potentialités (DPCP) relatives à la gestion des sols et des nutriments des plantes, au niveau des communautés, est une approche mise en place par la FAO (FAO, 2000). Elle consiste entre autres à l'évaluation des pratiques de gestion des ressources naturelles et leurs potentialités en vue de proposer des scénarios d'amélioration de la productivité de ces ressources. L'approche utilise une série d'outils et de méthodes dont les cartes sociales de la communauté, les cartes d'utilisation des terres et des ressources, les diagrammes des systèmes agricoles, les profils historiques, l'évaluation des connaissances, des attitudes et des pratiques par la méthode de classement... (FAO, 2000).

D'autres méthodes de diagnostic participatif sont les *focus group*. « Les focus groups sont des discussions de groupe ouvertes, organisées dans le but de cerner un sujet ou une série de questions pertinentes pour une recherche » (Kitzinger *et al.*, 2004, p. 237). Formalisées dans les années 1940, les méthodes *focus group* ont progressivement été utilisées dans les études commerciales et sur les marchés et

dans les recherches en sciences sociales (Bloor *et al.*, 2002). C'est une méthode dominante pour aborder des sujets d'études dans les sociétés qui sont moins ouvertes aux méthodes d'observations (Bloor *et al.*, 2002). Cependant comme le souligne l'auteur c'est plutôt une méthode idéale pour acquérir la base contextuelle d'une étude. C'est pourquoi elle a été utilisée en combinaison avec des enquêtes individuelles (Chapitre 4 section 4.3) et des observations participantes qui consistent à « l'insertion prolongée du chercheur dans le milieu de vie des enquêtés, autrement dit côtoyer les gens, bavarder avec eux, vivre avec eux » (Olivier de Sardan, 2003, p. 5 et 32). Trois principales étapes caractérisent la méthode *focus group*, la phase pré-discussion qui se caractérise par l'organisation pratique de la discussion par la composition du ou des groupes, la définition du mode de recrutement des membres, le choix de la population et des lieux de discussion, la précision de la taille des groupes ; vient ensuite la gestion des discussions et enfin l'analyse des données issues des discussions (Kitzinger *et al.*, 2004).

Le modèle d'analyse SWOT encore appelé 'analyse situationnelle' est un cadre d'analyse proposé par Weihrich (1982) permettant d'identifier d'une part les points de forces et de faiblesses d'une organisation, les opportunités et menaces pouvant influencer son évolution d'autre part. L'auteur recommande deux approches d'analyse de la situation. L'une consiste à démarrer par l'analyse de l'environnement externe de l'organisation, l'autre consiste plutôt à s'appesantir d'abord sur son environnement interne en identifiant ses problèmes importants. C'est partant de cette approche conceptuelle que le diagnostic du système d'information du Comité Local de l'Eau (Chapitre 4 section 4.3) a été mené. Il s'est particulièrement focalisé sur les forces et faiblesses du système à travers la matrice d'analyse SWOT, après le recueil des données préliminaires grâce à la méthode accélérée de recherche participative, le *focus group* décrite *supra*. La méthode SWOT a la particularité de mettre rapidement et explicitement en exergue les problèmes que l'on cherche à identifier dans l'objet d'étude (Weihrich, 1982).

L'approche du cadre logique (*Logical Framework Approach* en anglais) est un processus analytique intégrant plusieurs outils d'analyse qui sont utilisés pour la conception, le suivi et l'évaluation des projets (Buttigieg *et al.*, 2016; Chang, 2015; Jacobs *et al.*, 2010). Développée par l'Agence Internationale pour le Développement des États-Unis d'Amérique en 1979, cette approche est largement utilisée dans la préparation des projets dans le but d'établir la logique hiérarchique permettant d'atteindre les objectifs établis des dits projets (Practical Concepts Inc., 1979). L'approche implique une série d'étapes dont l'analyse des parties prenantes, l'analyse des problèmes, l'analyse des solutions, la construction de l'arbre à objectifs, l'analyse des stratégies et l'établissement du cadre logique à proprement parler (Buttigieg *et al.*, 2016). Cette approche a été appliquée dans la conception du système d'information hydro-agricole basé sur *WhatsApp* (Chapitre 5).

L'analyse 'cause-et-effet', encore connu sous le nom de méthode du diagramme en arêtes de poisson '*fishbone diagram*' en anglais (Ishikawa, 1996), est un outil graphique qui permet d'identifier les causes réelles et potentielles d'un effet donné (Li & Lee, 2011). Elle permet de résumer les potentielles causes de l'effet en question ou d'un problème donné en classant les causes possibles en catégories (Tague, 2005) qui comportent le facteur central, les principales causes, les sous-causes... Les causes sont ainsi hiérarchisées en fonction de leur niveau d'importance ou de leur niveau de détail ce qui permet d'avoir finalement une représentation des relations et une hiérarchisation des événements (Ishikawa, 1996).

2.2.2. Méthodes d'estimation des surfaces par classification d'images satellites

La classification d'images satellites est le processus utilisé pour produire des cartes thématiques à partir de ces images (Schowengerdt, 2007). Elle consiste en la conversion des données brutes des pixels de ces images en une ou des cartes comprenant plusieurs classes ou thèmes relatifs à l'agriculture, la végétation, l'eau,

le milieu urbain... (Borra *et al.*, 2019). De nos jours, le processus de production de ces cartes est facilité par des algorithmes dits de classification que Schowengerdt (2007) et Borra *et al.* (2019) distinguent respectivement en deux principales catégories suivant le critère mis en avant : les algorithmes paramétriques ou non paramétriques, les algorithmes de classification supervisée ou non supervisée, les algorithmes de classification basée sur les pixels ou sur les objets. Les algorithmes paramétriques contrairement aux non paramétriques reposent sous l'hypothèse de la normalité des distributions des classes d'entraînement. C'est le cas par exemple de l'algorithme 'maximum de vraisemblance' en anglais '*Maximum-likelihood*' (Schowengerdt, 2007). Le classificateur 'des plus proches voisins' en anglais '*Nearest-Neighbors Classifier*' est un exemple de modèles non paramétriques (Schowengerdt, 2007). Dans ce cas précis, les pixels non encore classifiés sont catégorisés en fonction des étiquettes des pixels voisins.

Les algorithmes de classification non supervisée sont par exemple le partitionnement en k-moyennes, *k-means clustering* et la technique d'analyse itérative des données auto-organisées (ISODATA, *Iterative Self-Organising Data Analysis Technique*) (Borra *et al.*, 2019). Le partitionnement en k-moyennes s'effectue d'abord par le regroupement des pixels en k groupes et leur classification ensuite sur la base de leur distance par rapport à la moyenne des groupes (Borra *et al.*, 2019).

Recommandées pour des régions très homogènes, les méthodes de classification basées sur les pixels s'exécutent en traitant chaque pixel comme un objet auquel est attribué une étiquette de classe. Dans l'approche de classification basée sur les objets, l'image est d'abord segmentée en plusieurs régions hétérogènes de taille variable et chacune d'elle est ensuite traitée par le classificateur avant de se voir attribuer une étiquette de classe. Elle est recommandée pour être utilisée avec des images à hautes résolutions (Borra *et al.*, 2019). Bien que considérés intéressants parce qu'ils fonctionnent bien pour une grande variété de distribution de classes, les

classificateurs non paramétriques ne permettent pas une estimation théorique de l'erreur de classification (Schowengerdt, 2007). Aussi, Ünsalan & Boyer (2011) soulignaient que les approches permettant de déduire l'occupation des terres des images satellites, intègrent de plus en plus des informations multidimensionnelles provenant de la réduction des données brutes (exemple sélection de bandes appropriées), la transformation de celles-ci (Analyse en composantes principales, calcul de bandes ratios), le démêlage spectral (*spectral unmixing*) ...

Quelle que soit la méthode adoptée, cinq étapes essentielles interviennent dans la classification automatique d'une image satellite : la sélection des échantillons et de l'algorithme, le prétraitement de l'image, l'extraction des caractéristiques, l'évaluation de la précision et les traitements 'post-classification' notamment le peaufinage de la classification (« *fine-tuning* ») et l'édition cartographique (Borra *et al.*, 2019). Ce sont ces étapes qui ont été suivies dans le traitement des images satellites dans le Chapitre 6, intitulé 'Évaluation des surfaces cultivées irriguées à l'aide de *Google Earth Engine*'.

2.2.3. Méthodes d'estimation des débits de rivière

Les conditions d'écoulement ne permettent pas toujours d'appliquer les techniques de mesure directes du débit des rivières, c'est pourquoi il est très souvent fait recours aux approches indirectes qui consistent à mesurer un ou plusieurs paramètres permettant d'établir un lien avec la variable 'débit' (Puechberty *et al.*, 2017). Quatre grands groupes de méthodes permettent de mesurer indirectement le débit d'un écoulement à « surface libre » (cours d'eau, canal, déviation...) : les méthodes « d'exploration du champ de vitesses », les méthodes volumétriques permettant de calculer le débit en faisant le rapport entre le volume d'eau pénétré dans un récipient et le temps mis pour le remplir, la méthode par dilution d'un traceur « qui consiste à injecter dans le cours d'eau un traceur en solution et à suivre l'évolution de sa concentration au cours du temps » et les méthodes hydrauliques qui

font recours aux formules hydrauliques après implantation de seuils permanents ou temporaires de mesure perpendiculairement à l'écoulement (Puechberty *et al.*, 2017).

Les méthodes « d'exploration du champ de vitesses consistent à mesurer la géométrie de la section objet de mesure, à déterminer la vitesse de l'écoulement en différents points et à en déduire le débit » (Puechberty *et al.*, 2017, p. 26). On y distingue les méthodes dites 'traditionnelles' d'exploration du champ de vitesses à l'aide de flotteurs ou de moulinets, et les méthodes de plus en plus sophistiquées basées sur les technologies acoustiques, électromagnétiques et radar (Puechberty *et al.*, 2017). Relativement rapide, peu coûteuse et aisée à mettre en œuvre dans le contexte d'étude du sous-bassin versant de la Haute-Comoé, la méthode d'exploration du champ de vitesses à l'aide de moulinet a été utilisée dans l'estimation des débits dans le chapitre 5.

2.2.4. Méthodes de prédiction de variable quantitative

Les méthodes quantitatives de prédiction sont basées soit sur des modèles mathématiques soit sur des modèles statistiques ; elles sont alors dites déterministes pour le premier groupe ou probabilistes (stochastiques) pour le deuxième groupe (Abraham & Ledolter, 1983). Parmi ces derniers (modèles statistiques), il faut distinguer les modèles paramétriques de séries chronologiques et les modèles de régression qui constituent un des outils fondamentaux des statistiques (Abraham & Ledolter, 1983). Définis par Lilja (2016) comme une des techniques pour générer un modèle mathématique à partir de données mesurées, les modèles de régression sont distinguables en plusieurs groupes dont celui des régressions linéaires : la régression linéaire simple ou régression à un facteur et la régression linéaire multiple. Utile pour la compréhension du système à modéliser et pour prédire des résultats, la régression linéaire est une forme spécifique de régression par modélisation qui fait l'hypothèse que la valeur de sortie du modèle peut être expliquée en réalisant une combinaison linéaire des valeurs d'entrée (Lilja, 2016). Le modèle de régression linéaire simple

est l'un des modèles couramment utilisés pour prédire une variable quantitative à partir d'une autre. C'est une droite représentée mathématiquement par la relation $y = a_0 + a_1 * x_1$ où x_1 est la valeur d'entrée dans le modèle, a_0 est l'ordonnée à l'origine de la droite, a_1 est la pente de la droite et y est la valeur de sortie prédite par le modèle (Lilja, 2016). Il a été utilisé dans le chapitre 7 pour l'expression des valeurs d'ETO observées en fonction des valeurs ETO provenant des données *open source*, et en suivant la démarche méthodologique indiquée par le précédent auteur :

- diviser les données disponibles en deux ensembles de manière aléatoire ;
- utiliser la première partie des données appelée jeu d'entraînement pour spécifier le modèle par la détermination des valeurs spécifiques des coefficients du modèle ;
- utiliser la deuxième partie des données comme jeu de test pour examiner dans quelle mesure le modèle ajusté par le premier jeu de données prédit bien les résultats.

Cette démarche méthodologique générale ci-dessus présentée a été appliquée dans l'espace géographique 'bassin versant de la Haute-Comoé' plus précisément dans sa partie où est pratiquée intensément l'agriculture irriguée dénommée ici 'agrosystème'. Dans cet espace, les questions relatives aux usages quotidiens de l'eau sont gérées par le Comité Local de l'Eau dit de la Haute-Comoé (CLE-HC). La triangulation (à travers les multiples outils d'investigation, les sources variées d'information et le recours à plusieurs investigateurs), la participation, la concertation et la visualisation ont été au cœur de la méthodologie générale suivie dans le cadre de cette recherche. Après la description de cette démarche méthodologique qui, en résumé, a consisté d'abord à une étude du contexte de la gestion de l'eau et ensuite au développement d'un outil de suivi hydro-agricole qui tient compte de ce contexte, il sied maintenant de présenter la zone d'étude. Le chapitre suivant (Chapitre 3) est consacré à la présentation de cette zone d'étude. Il

comprend quatre sections. La première décrit la localisation, le climat et l'organisation administrative de la zone, dans la deuxième et la troisième sont présentées respectivement l'hydrologie et l'occupation des terres du sous-bassin versant de la Haute-Comoé. Enfin le cadre institutionnel de l'eau ainsi que les principaux usagers de cette ressource sont décrits dans la dernière section.

Chapitre 3 . Généralités sur la zone d'étude²

3.1. Localisation, climat et organisation administrative

Le sous-bassin versant de la Haute-Comoé, situé dans le Sud-Ouest du Burkina Faso, est la zone d'étude. Il a été sélectionné en raison de son importance socio-économique dans cette région du pays et surtout à cause du fait qu'il soit marqué par des usages conflictuels des ressources en eau de surface. L'attention est particulièrement portée sur l'eau de surface dans le cadre de cette recherche, car jusqu'ici, peu d'usagers agricoles s'intéressent à l'eau de nappes, en témoigne la rareté des puits maraîchers dans la zone. La non maîtrise des techniques de réalisation de ces puits et l'opinion générale selon laquelle la ressource en eau souterraine est prioritairement destinée à l'utilisation domestique peuvent expliquer cette attitude des irrigants à ne pas exploiter suffisamment ce type de ressource.

D'une superficie estimée à 1981 km², le sous-bassin versant de la Haute-Comoé, est situé dans la région administrative des Cascades, précisément dans la province de la Comoé dont la ville de Banfora est le Chef-lieu (Longitude 10.64° ; latitude -4.76°) (Figure 3.1). Le climat, tropical de type sud-soudanien, est caractérisé par l'alternance d'une saison sèche allant d'octobre à avril et une saison pluvieuse qui s'étale de mai à septembre (Fontes et Guinko, 1995). Pendant la période sèche, la production agricole n'est possible que grâce à l'irrigation. Dans cette région du pays, il pleut environ 1000 mm d'eau par an. Cette pluviométrie, bien qu'élevée, y est cependant très variable d'une année à l'autre et au cours de la saison. Les températures moyennes mensuelles y varient entre 20 et 40°C (Figure 3.2 et 3.3). Durant les quatre dernières années (2016 à 2019), la moyenne journalière de l'évapotranspiration de référence de saison sèche était de 6.84 ± 1.51 mm/jour.

² Adapté de Palé, S., Traoré, F., Wellens J. et Tychon B. (2019). Diagnostic d'un système d'information de gestion de l'eau à usage agricole dans le sous-bassin versant de la Haute-Comoé, Burkina Faso, *GEO-ECO-TROP*, 43(3, n.s.), pp. 433–443.

L'humidité relative moyenne est de 47 % en saison sèche ; elle est de l'ordre de 81 % en saison humide (Ba *et al.*, 2005).

La population du sous-bassin versant avoisine 200 000 habitants, selon une estimation réalisée à partir des effectifs du recensement général de la population du Burkina Faso de 2006.

Le sous-bassin versant comprend 13 communes et 53 villages qui exploitent principalement les terres agricoles en aval de trois réservoirs d'eau : les réservoirs de Moussodougou, de la Lobi et de Toussiana. Il englobe les communes de Banfora, de Bérégadougou, de Moussodougou, de Péni et de Toussiana. Dans la partie aval des réservoirs est localisée une vaste plaine de 45.68 km², appelée plaine alluviale de Karfiguéla où est pratiquée l'agriculture irriguée de campagne sèche. Elle s'étend des falaises des Cascades du village de Karfiguéla vers les villages de Kribina-Lèna et Diarabakoko, en passant par la ville de Banfora. Sa longueur est estimée à 20 km et sa largeur moyenne est d'environ un kilomètre (Agence de l'Eau des Cascades, 2015). Bordé à l'Ouest par le périmètre aménagé de Karfiguéla et au Nord-Est par le périmètre sucrier de la SOSUCO, elle a été délimitée en 2012 par Compaore *et al.* (2016) à la suite des investigations hydrogéomorphologiques menées dans le cadre du Projet PADI-BF101. Le Projet PADI-BF 101 était la composante « Gestion durable des eaux souterraines pour l'agriculture irriguée » du Programme d'Appui au Développement de l'Agriculture Irriguée au Burkina Faso (PADI). La plaine alluviale de Karfiguéla présente des sols du type ferrugineux tropical ayant une texture argilo-limoneuse à la surface (Compaoré *et al.*, 2017). Sur cette partie du sous-bassin se concentre une forêt galerie, la ripisylve, le long des rives de la Comoé et de vastes bas-fonds dans les zones de dépressions. Entre ces deux unités paysagères existent des vergers et des champs dont leur mise en valeur agricole se font au détriment de ces unités. Jusqu'ici aucune étude n'a révélé l'étendue précise de ces unités paysagères.

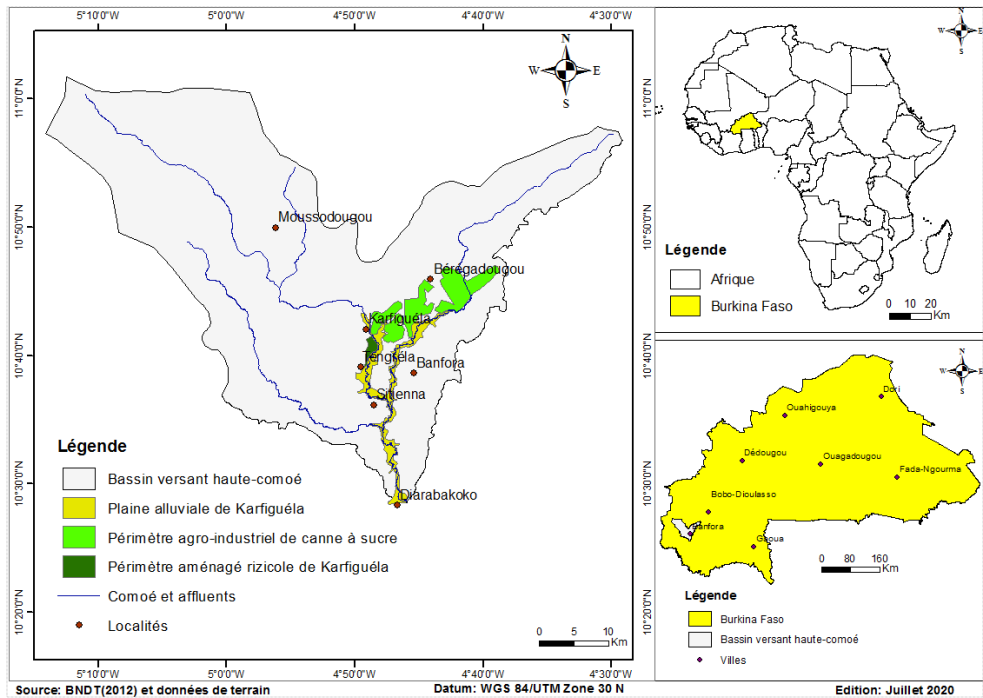


Figure 3.1. Localisation du sous-bassin versant de la Haute-Comoé au Burkina Faso.

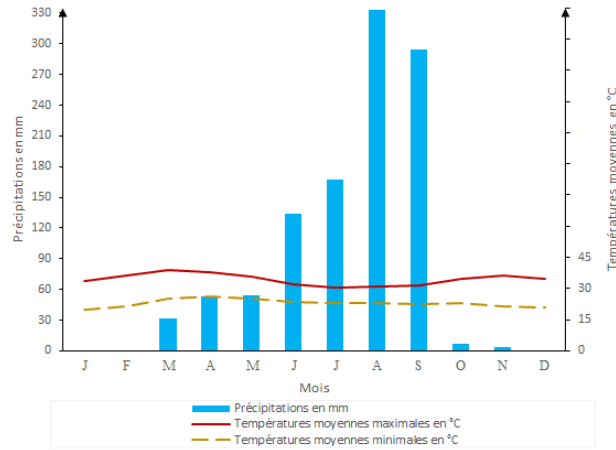


Figure 3.2. Exemple de diagramme ombrothermique de la zone d'étude : année 2016, extrait de Palé *et al.* (2019).

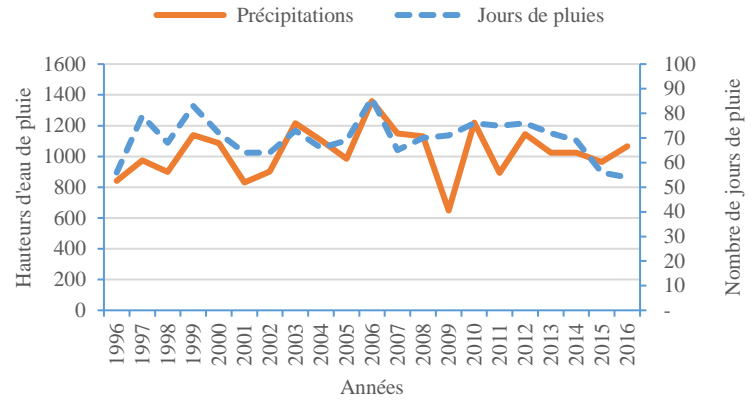


Figure 3.3. Évolution de la pluviométrie de 1996 à 2016 dans la région d'étude.

3.2. Hydrologie

Quatre principaux cours d'eau se distinguent dans le sous-bassin versant de la Haute-Comoé : la Comoé, la Lobi, le Yanon et le Mou. Parmi ceux-ci, un seul est pérenne, le fleuve Comoé.

Selon nos observations faites sur le terrain depuis décembre 2016, deux régimes hydrologiques s'observent dans le bassin de la Haute-Comoé : le régime de saison pluvieuse au cours de laquelle tous les affluents de la Comoé contribuent à son fonctionnement (la Lobi, le Yanon et le Mou), le régime de saison sèche pendant laquelle les contributions de ses affluents sont presque nulles. En effet pendant cette saison, une compagnie sucrière, la Société Sucrière de la Comoé (SOSUCO) prélève la totalité de l'eau encore disponible sur le Yanon, à travers le réservoir de Toussiana et ses canalisations. Le Yanon est parfois alimenté temporairement sur certaines sections par les eaux de drainage des champs de canne à sucre de la SOSUCO. Les cours d'eau Comoé et Yanon sont régulés par trois retenues d'eau qui fournissent de l'eau pour l'irrigation, l'usage domestique, l'usage industriel et pour les besoins écologiques. En campagne sèche, les ressources en eau de surface sont constituées essentiellement par les eaux des trois retenues d'eau : les réservoirs de Moussodougou, de la Lobi et de Toussiana (Figure 3.4).

En plus des trois réservoirs d'eau construits dans le sous-bassin de la Haute-Comoé, (réservoirs de Moussodougou, de la Lobi et de Toussiana), l'agrosystème de la Haute-Comoé, dispose également de trois petits lacs naturels. Il s'agit notamment du lac de Tengrela, du lac de Lemourdougou et du lac de Karfiguéla. Les principales caractéristiques de ces plans d'eau sont résumées dans le tableau 3.1 et leur position dans le sous-bassin versant est indiquée sur la figure 3.4. La figure 3.4 indique également l'emplacement des différentes stations hydrométriques : station de Bodadiougou, de KarfiguélaCanal, de KarfiguélaFleuve, de Tengrela et de Diarabakoko. Le réservoir de Moussodougou, le plus récent, est construit sur le

fleuve Comoé, a la plus grande capacité de stockage et draine la plus grande superficie. Construit sur la rivière Yanon, le réservoir de Toussiana d'une morphologie très étalée qui favorise les pertes par évaporation, se vide précocement. Il contribue très peu à la couverture des besoins en eau de l'agrosystème (Dezetter *et al.*, 1998). La retenue d'eau de la Lobi, la plus ancienne, avait une capacité de stockage initiale de six millions de m³. Cependant ces dernières années, il se vide également prématurément à cause de la défectuosité de certaines parties des infrastructures du réservoir. Les deux petits réservoirs (Lobi et Toussiana) détériorés et stockant moins de six million m³ d'eau par an sont essentiellement dédiés aux débits environnementaux. Entre 2016 et 2019, les volumes d'eau stockés dans le principal réservoir (Moussodougou) au début de chaque campagne agricole de saison sèche, était relativement constant : 33.77 ± 4.84 Mm³.

Tableau 3.1. Principaux plans d'eau de la zone d'étude.

| Plans d'eau | Type | Date de construction | Capacités de stockage initiale en million de m ³ | Superficie du bassin versant associé en km ² |
|--------------|-------------|----------------------|---|---|
| Moussodougou | Réservoir | 1991 | 38.5 | 560 |
| Lobi | Réservoir | 1976 | 6.06 | 120 |
| Toussiana | Réservoir | 1982 | 6.10 | 130 |
| Tengrela | Lac naturel | - | - | - |
| Lemourdougou | Lac naturel | - | 0.4 | - |
| Karfiguéla | Lac naturel | - | 0.8 | - |

Source : adapté de Etkin *et al.* (2015) et Dezetter *et al.* (1998).

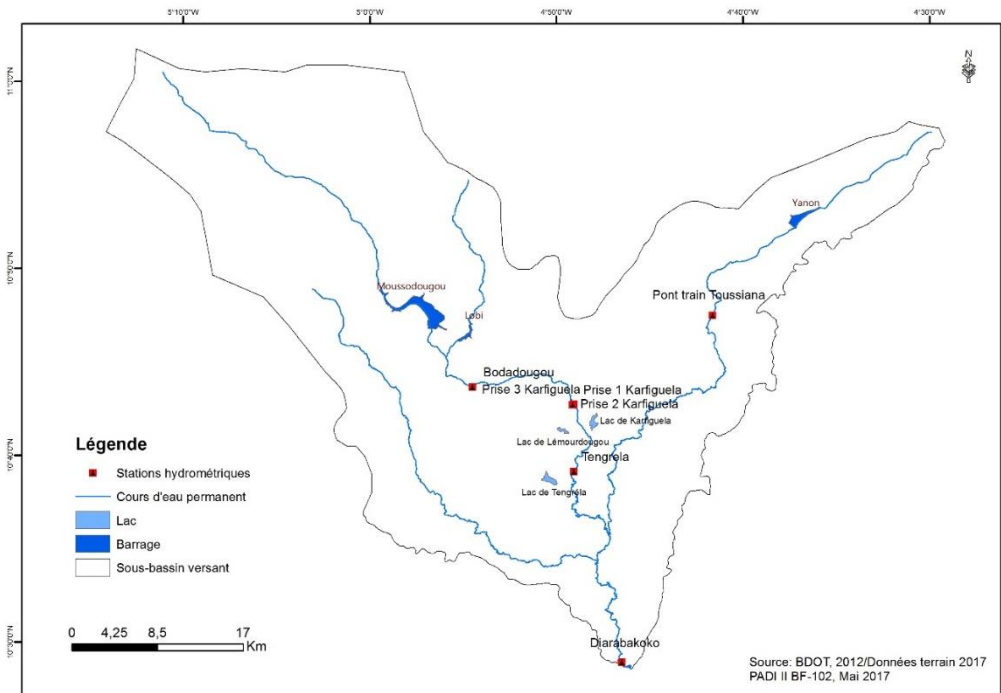


Figure 3.4. Positions des trois principaux lacs, des barrages et des stations hydrométriques de l'agrosystème de la Haute-Comoé.

3.3. Occupation des terres

Les unités d'occupation du sol du bassin versant de la Haute-Comoé sont principalement, les zones agricoles irriguées, les zones d'agriculture pluviale, les forêts galeries (riveraines), les zones de savane, les plans d'eau, les sols dénudés, les zones latéritiques et les zones urbanisées (Figure 3.5). Les activités agricoles occupent la plus grande partie du sous-bassin versant. Les surfaces totales irriguées en aval des trois réservoirs d'eau du sous-bassin versant étaient évaluées en moyenne à 5067.71 ± 238 ha par an entre 2016 et 2019, selon les statistiques de la Direction Régionale en charge de l'Agriculture et de la SOSUCO. À côté des champs, on retrouve de la végétation naturelle assez importante constituée de forêts galeries et d'une savane caractérisée par l'abondance des espèces ligneuses et un tapis herbacé de graminées naturelles. L'agroforesterie notamment l'arboriculture, une activité légendaire de la zone est matérialisée d'une part, par de nombreux vergers de bananiers, de papayers, de manguiers, d'agrumes et par des peuplements de rôniers, des plantations de *Jatropha curas*, d'*Eucalyptus camaldulensis*, d'*Anacardium occidentale* et d'*Elaeis guineensis* d'autre part.

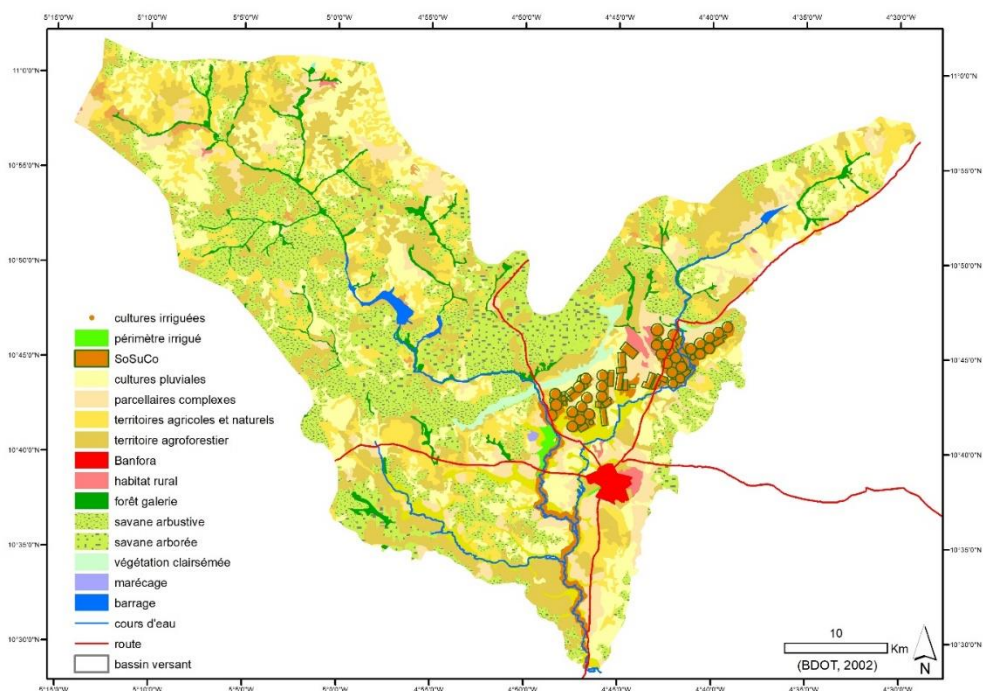


Figure 3.5. Carte d'occupation des sols de la Haute-Comoé en 2012, source : BDOT (2002).

3.4. Acteurs et principaux usagers de l'eau

3.4.1. Cadre institutionnel de la gestion de l'eau

Plusieurs auteurs ont décrit le cadre de gestion de l'eau du Burkina Faso, depuis l'avènement de la GIRE (Wellens *et al.*, 2019 ; Orlove *et al.*, 2015; Venot *et al.*, 2014 ; Douchamps *et al.*, 2014 ; Baron et bonnassieux, 2013; Sally *et al.*, 2011 ; Petit et baron, 2009). Bien que des divergences existent sur son fonctionnement, tous les acteurs sont unanimes sur le fait que le socle institutionnel, juridique et réglementaire est en place : organes de gestion (Conseil National de l'Eau, Comité Technique de l'Eau, Agences de l'Eau, Comités de Bassin, Comités locaux de l'Eau...), documents de référence (Plan d'Action de Gestion Intégré des Ressources en Eau), instruments juridiques (lois, décrets d'application, arrêtés...),

outils de planification (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion de l'Eau, Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau) et outils de mobilisation des ressources financières (les taxes de prélèvement de l'eau brute, de pollution et de modification du régime de l'eau).

Venot *et al.* (2014) notaient un dynamisme institutionnel élevé, ponctué par une spatialisation de l'approche GIRE à travers les bassins-versants. Orlove *et al.* (2015), ont décrit le cadre de gestion de l'eau depuis l'époque de la révolution, dans les années 1980, jusqu'à la mise en oeuvre du premier Plan d'Action de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PAGIRE) de 2003 à 2009. Baron et Bonnassieux (2013), ont analysé le cadre juridique de l'eau et indiqué que le Burkina Faso a respecté ses engagements internationaux, en mettant en place un dispositif institutionnel et politique innovant. D'après le document du Ministère de l'Eau et de l'Assainissement du Burkina Faso (2016), le pays a fait d'importants efforts pour mettre en œuvre son plan d'action GIRE, en réformant dans un premier temps sa politique de l'eau, pour prendre en compte les principes de la GIRE. Ainsi, 641 millions de dollars américains, soit environ 567 millions d'euros ont été investis dans la gestion de l'eau agricole, entre 1970 et 2009 (AEC, 2014).

Cependant, malgré tous ces efforts, le grand défi demeure la concrétisation des actions programmées dans les documents de planification (AEC, 2014) notamment celles relatives au financement et au fonctionnement des agences de l'eau. En effet, l'État Burkinabè a choisi la tarification comme instrument financier principal pour mobiliser les ressources financières en faveur d'une bonne gestion de l'eau. Si la taxe de prélèvement de l'eau brute est opérationnelle dans les domaines de la production de l'eau potable, des productions industrielle et minière, des travaux de génie civil, elle ne l'est pas encore dans le domaine agricole, où le consensus entre les acteurs, tarde à se faire.

Dans le bassin versant de la Comoé, le groupement d'intérêts public « Agence de l'Eau des Cascades » (AEC), créé en mars 2010 (DGRE, 2010), est l'arbitre

institutionnel dans le partage équitable des ressources en eau à l'échelle du bassin versant de la Comoé, et a en charge la mise en place des instruments financiers qui devaient permettre de financer le fonctionnement de ses différents organes. Cependant, face à un taux de recouvrement relativement bas des taxes prévues pour le financement de l'Agence, la tenue des instances bien que régulière, est tributaire des appuis budgétaires de l'État et ceux des Partenaires Techniques et Financiers (PTF).

L'AEC comprend plusieurs organes (Figure 3.6) dont les plus opérationnels, sont les comités locaux de l'eau, au nombre de 10 : les Comités locaux de l'eau de Noula, du Sinlo, de la Comoé-Léraba, de la Comoé-Codoun, de Baboué, d'Iringou, de la Comoé 1, de la Comoé 5, de la Comoé 8 et de la Haute-Comoé (DGRE, 2010). Les Comités locaux de l'eau, sont composés de trois collèges d'acteurs : les représentants de l'État via des collectivités territoriales (les régions et les communes), des usagers de l'eau et des organisations de la société civile dans leur espace de compétence (DGRE, 2010). Le comité de bassin Comoé est l'Assemblée générale de l'Agence de l'Eau des Cascades qui, a pour rôle de mettre en œuvre la politique nationale de l'eau dans le bassin versant de la Comoé. Le conseil d'administration est l'organe exécutif du bassin chargé notamment d'exécuter les délibérations du comité du bassin. La Direction générale de l'Agence de l'Eau assure quant à elle assure le fonctionnement quotidien de l'Agence sous l'autorité du Conseil d'administration et dans les conditions fixées par le Comité de bassin (Gouvernement du Burkina FASO, 2010). Les CLE sont des instances locales de concertation, de promotion, d'animations et d'échanges associant tous les acteurs intervenant localement dans la gestion des ressources en eau.

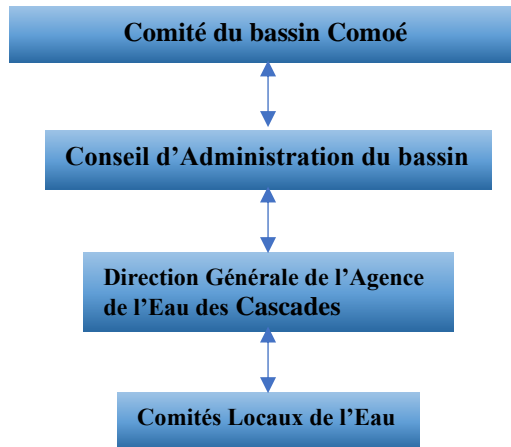


Figure 3.6. Organes de gestion de l'Agence de l'Eau des Cascades, extrait de Palé *et al.* (2019).

Le Comité local de l'eau de la Haute-Comoé en particulier, est composé de 52 membres, parmi lesquels les directions régionales en charge de l'agriculture et de l'eau (Représentants de l'État), le Conseil régional et les communes de la région (Collectivités territoriales), les comités d'irrigants, les coopératives rizicoles, la Société sucrière de la Comoé, l'Office national de l'eau et de l'assainissement, l'Association féminine *Munyu*, la Chambre régionale d'agriculture (usagers et société civile) (Figure 3.7). Il a été créé le 05 Mars 2008 par un arrêté conjoint des Gouverneurs des régions des Cascades et des Hauts-Bassins. Son espace de compétence est le sous-bassin versant de la Haute Comoé. Ses principaux rôles sont de faciliter d'une part l'organisation concertée des acteurs dans l'exploitation durable et responsable de la ressource en eau à travers la sensibilisation, l'information, la formation, et la facilitation de l'accès équitable de l'eau aux différents usagers du sous-bassin, d'autre part. De manière concrète, à chaque début de campagne agricole de saison sèche, le CLE-HC, par l'entremise d'un comité ad hoc institué, planifie la répartition de l'eau des réservoirs de Moussodougou, de la Lobi et de Toussiana entre les différents usagers en procédant successivement à l'estimation de la ressource en eau disponible dans les réservoirs, au calcul des

besoins des différents usagers et à la proposition d'une répartition des quantités d'eau disponible.

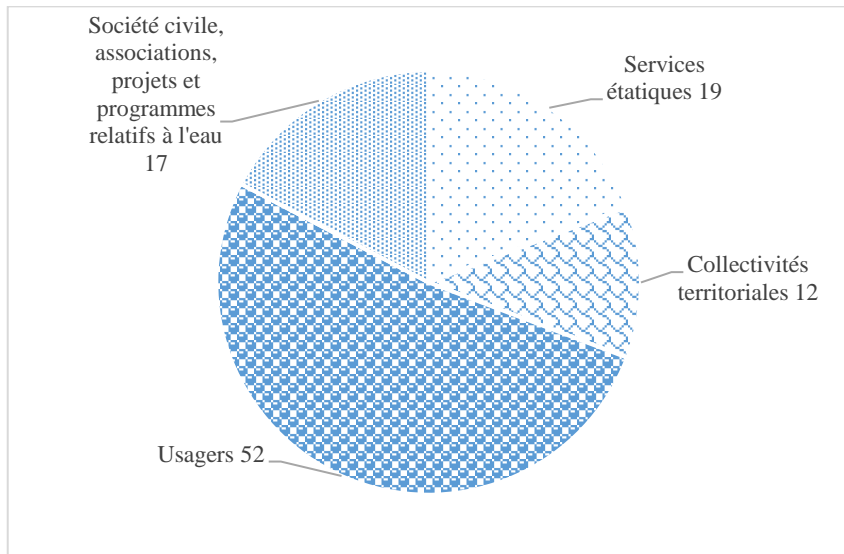


Figure 3.7. Proportion (%) des parties prenantes de la GIRE au sein du CLE-HC, extrait de Palé *et al.* (2019).

3.4.2. Principaux usagers de l'eau

Trois grands usages de l'eau de surface se distinguent dans le sous-bassin versant de la Haute-Comoé pendant la saison sèche à savoir : l'utilisation domestique en termes d'eau potable, l'utilisation industrielle et l'usage agricole. Les principaux usagers des ressources en eau agricole pour l'irrigation sont : la Société Sucrière de la Comoé (SOSUCO), une agro-industrie qui produit et transforme de la canne à sucre ; l'Union des Coopératives des Exploitants du Périmètre Aménagé de Karfiguéla (UCEPAK) qui exploite le périmètre rizicole dudit village ; les maraîchers installés le long du fleuve Comoé, exploitants les berges de ladite rivière, sous la coordination de leurs comités d'irrigants respectifs (Figure 3.8). Les comités d'irrigants sont des regroupements d'agriculteurs facilités par l'État Burkinabè en vue de promouvoir la petite irrigation villageoise. Installés hors des périmètres aménagés rizicole et de la canne à sucre (périmètres formels), ces maraîchers sont encore appelés 'agriculteurs informels'. Les trois grands groupes d'usagers agricoles

se partagent l'eau destinée à l'irrigation qui provient des réservoirs. Les volumes d'eau utilisés par ces usagers au cours de la campagne agricole de saison sèche étaient de 15 404 m³/ha pour la riziculture, 12 418 m³/ha dans les périmètres informels et 8141 m³/ha pour les cultures de canne à sucre (Palé *et al.*, 2019) (7 800 m³/ha pour la canne à sucre selon Cour (2010)). Des usagers non agricoles de l'eau existent, il s'agit entre autres des orpailleurs, des pasteurs, des transhumants, des pêcheurs, l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA)... Cependant pour cette recherche nous nous sommes focalisés sur les usages agricoles qui sont les plus problématiques. Nos recherches se sont donc dirigées vers les trois groupes d'usagers agricoles c'est-à-dire le périmètre rizicole de Karfiguéla, le périmètre informel de maraîchage le long des berges de la Comoé et le périmètre de cannes à sucre de la SOSUCO.

La SOSUCO emploie 3000 salariés dont 800 permanents, 400 emplois saisonniers et 1800 travailleurs journaliers dans la région (SN-SOSUCO, 2020) demeurant ainsi le premier employeur de la région après l'État. Exploité à partir de 1992 pour la production du riz en saison sèche (350 ha) avec la construction du réservoir de Moussodougou, le périmètre aménagé rizicole de Karfiguéla, comptait en 2009, 730 exploitants issus de huit villages riverains du périmètre qui ont assuré une production de campagne sèche de 1400 tonnes de riz (CNID-B, 2009), faisant ainsi du périmètre le premier pourvoyeur en riz de la région des Cascades après le périmètre aménagé de la ville de Douna situé à 50 km à l'Ouest de Banfora. En 2018, on dénombrait 162 exploitants selon les données recueillies auprès du Service d'Appui-Conseil du périmètre. Des contraintes relatives à la gestion de l'eau occasionnant la sous-exploitation du périmètre ont ramené respectivement la production rizicole de campagne sèche du périmètre de 302.5 tonnes en 2018, à 211.5 tonnes en 2019 et à 130.5 tonnes en 2020, selon ce même Service.

Promue à la faveur de la politique nationale de l'agriculture irriguée, la petite irrigation villageoise s'est considérablement développée ces 10 dernières années

avec la demande croissante en produits maraîchers dans les pays limitrophes du Burkina Faso. Avec une production qui était de 16 887 tonnes en campagne sèche 2015 sur l'ensemble du territoire régional selon la Direction Régionale en charge de l'Agriculture, le maraîchage est à l'origine d'une importante économie informelle dans la région.

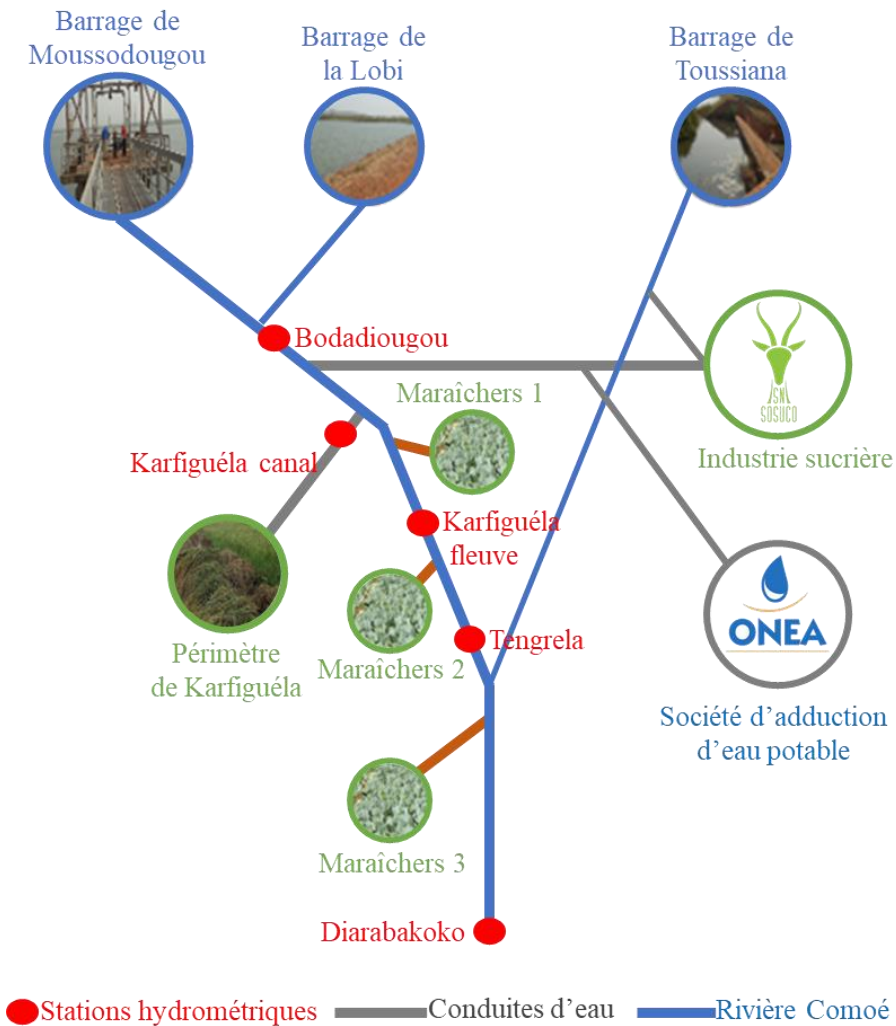


Figure 3.8. Réservoirs, stations hydrométriques, principaux groupes d'utilisateurs de l'eau dans le sous-bassin versant de la Haute-Comoé.

La zone d'étude ciblée est donc le sous-bassin versant de la Haute-Comoé, précisément la partie aval des réservoirs de Moussodougou, Lobi et Toussiana où se concentre l'agriculture irriguée. Cette partie abrite la plaine alluviale de Karfiguéla, le périmètre aménagé rizicole de Karfiguéla et le périmètre sucrier de la Société Sucrière de la Comoé (SOSUCO). Dans ce chapitre, les principales parties prenantes dans la gestion de l'eau ont également été présentées ainsi que l'espace géographique dans lequel elles se côtoient. Le chapitre 4 s'appesantira sur les problèmes spécifiques liés à la gestion de l'eau agricole dans ce microenvironnement.

Chapitre 4 . Étude du contexte de la gestion de l'eau dans la Haute-Comoé

L'étude du contexte de la gestion de l'eau dans le sous-bassin versant de la Haute-Comoé, vise à mieux comprendre les contraintes liées à la gestion de l'eau dans le sous-bassin versant et à proposer des solutions idoines. De manière chronologique, elle a tenté de répondre aux questions suivantes qui constituent les grands points de ce chapitre :

1. qu'est ce qui explique l'utilisation ou non des outils d'aide à la décision promus par les Projets visant l'amélioration de la gestion de l'eau pour l'agriculture au Burkina Faso ?
2. quels sont les problèmes de gestion de l'eau à usage agricole dans le sous-bassin versant de la Haute-Comoé ?
3. quels sont les problèmes spécifiques au système d'information sur la gestion de l'eau dans la Haute-Comoé ?

4.1. Utilisation des outils de gestion de l'eau

Dans le cadre de la mise en œuvre de la Stratégie Nationale de Développement Durable de l'Agriculture Irriguée (SNDDAI) du Burkina Faso, un partenariat a été établi entre le Ministère en charge de l'Agriculture de ce pays et trois institutions belges : l'Université de Liège, l'Association pour la Promotion de l'Éducation et de la Formation à l'Étranger (APEFE) et Wallonie-Bruxelles International (WBI). Ce partenariat s'est matérialisé par la mise en œuvre d'un Projet de Gestion de l'eau pour l'agriculture (Projet GEeau 2005-2010), devenu plus tard une des composantes du Programme d'Appui au Développement de l'Irrigation au Burkina Faso (PADI 2011-2017). Le Programme PADI a été exécuté suivant deux axes : la recherche/développement pour la conception et la mise en œuvre d'outils opérationnels visant à améliorer la gestion des eaux à usage agricole ; le

renforcement des capacités techniques et organisationnelles des acteurs intervenant dans le sous-secteur de l'irrigation. Le premier axe comprend quatre projets dont le Projet PADI-BF102 sur lequel est articulé le présent projet de thèse. L'objectif du PADI-BF102 est de contribuer à l'amélioration de la gestion de l'eau à usage agricole à l'échelle de sous-bassins. Ses objectifs spécifiques concernent le renforcement des capacités des cadres et agents du Ministère en charge de l'Agriculture à concevoir et mettre en œuvre des outils de gestion rationnelle de l'eau à usage agricole dans les sous-bassins versants des zones du Kou, de Karfiguéla (Sud-Ouest du Burkina Faso) et de Mogtêdo (Centre-Est) du Burkina Faso.

Le PADI-BF102 a mis à la disposition de certaines structures centrales et déconcentrées du Ministère de l'Agriculture (la Direction Générale des Aménagements Hydrauliques et du Développement de l'Irrigation (DGAHDI), les Directions régionales en charge de l'eau et de l'agriculture des Cascades, des Hauts-Bassins et du Plateau Central), des outils opérationnels de gestion de l'eau à usage agricole, pour accompagner la politique de gestion rationnelle de l'eau à usage agricole. Dans le tableau 4.1 est synthétisé l'ensemble de ces outils qui sont pour la plupart des modèles d'aide à la décision en matière de gestion de l'eau. Après plus d'une décennie de mise en œuvre des Projets, aucune investigation n'est cependant jusque-là réalisée, pour en savoir davantage sur le devenir des outils au sein des structures. Un sentiment général est que les outils n'ont pas été appropriés par les bénéficiaires. La présente étude se situe dans ce contexte et vise à déterminer le niveau d'utilisation des outils promus et à comprendre les raisons qui expliquent ce niveau d'appropriation, dans la perspective de proposer des modèles d'utilisation plus concluants et réalistes. Il s'agit précisément de répondre à la question suivante : qu'est ce qui explique l'utilisation ou non des outils d'aide à la décision promus par les Projets GEeau et PADI-BF 102 au Burkina Faso ?

Tableau 4.1. Outils promus dans le cadre des Projets GEeau et PADI-BF 102.

| Nom de l'outil | Projets | Utilité |
|--|----------|--|
| AquaCrop | GEeau II | Outil d'optimisation de l'utilisation de l'eau à l'échelle de la parcelle irriguée (à travers l'élaboration des calendriers d'irrigation) et d'estimation de rendement, expérimenté à la vallée du Kou par Wellens <i>et al.</i> (2014) |
| Budget | GEeau I | Modèle pour la gestion à la parcelle de l'état hydrique des cultures en pluvial ou en irrigué, remplacé plus tard par le modèle AquaCrop |
| Logiciel ArcGIS | GEeau I | A travers le système d'information géographique, il facilite l'analyse spatiale des observations, il permet la réalisation de cartes devant servir à diffuser les résultats, constituant ainsi un outil de communication avec les acteurs et utilisateurs de l'eau d'un bassin (Wellens, 2009) |
| Méthode de suivi de l'extension des zones irriguées, développée dans le Kou | PADI II | Estimation des superficies irriguées, Suivi de l'extension des zones irriguées |
| Méthode d'estimation des superficies irriguées dans la zone de Mogtédo | PADI II | Estimation des superficies irriguées (Traoré <i>et al.</i> , 2019) |
| SIMIS (Mateos <i>et al.</i> , 2002) | GEeau I | Outil pour la gestion des périmètres irrigués (droits d'eau, tours d'eau, choix des cultures adaptées aux disponibilités en eau réelle, expérimenté à la vallée du Kou par Wellens <i>et al.</i> (2014) |
| AgroMetShell | PADI I | Logiciel de prévision des rendements agricoles |
| Google Earth | PADI I | Outil utilisé pour la cartographie des périmètres irrigués |
| Suivi hydraulique local | PADI II | Dispositif hydraulique d'estimation et de suivi des des débits du fleuve Comoé dans la partie Haute-Comoé |
| Hysim (Manley, 2003) | GEeau II | Un modèle de simulation hydrologique à réservoirs permettant de déterminer les écoulements générés par des précipitations sur un bassin versant |
| AVSwat | GEeau I | Modélisation des bilans hydriques à l'échelle de bassin versant |
| Biriz (Raes et Deckers, 1995) | GEeau I | Modélisation des bilans d'eau à la parcelle rizicole irriguée logiciel de calcul des besoins en eau et d'évaluation des calendriers d'irrigation |
| Biriz intégré à un SIG | GEeau I | Suivi de la gestion du périmètre irrigué de la Vallée du Kou |
| Approche intégrée de suivi de l'extension des activités agricoles dans un bassin | GEeau II | Suivi de l'extension des activités agricoles dans le bassin du Kou, à partir d'une carte d'occupation des sols, réalisée à partir de prises de vue aériennes amateur basse altitudes, à une fréquence de deux ou trois ans Wellens <i>et al.</i> (2014) |
| Suivi des activités hydroagricoles du Kou (Wellens, 2009) | GEeau II | Recensement des activités hydroagricoles |

Pour répondre à la question de recherche posée ci-dessus (qu'est ce qui explique l'utilisation ou non des outils d'aide à la décision promus par les deux Projets de gestion de l'eau pour l'agriculture précédemment promus au Burkina Faso ?), une enquête qualitative a été menée dans un premier temps, auprès des bénéficiaires des Projets (structures, individus et facilitateurs) en s'inspirant de la méthode décrite par Quivy et Campenhoutd (1995) : formulation de la question de départ, lecture exploratoire, entretiens semi-structurés, formulation de la problématique. S'inspirant des écrits de Dupont *et al.* (1998) et de Wellens *et al.* (2007), quatre hypothèses de recherches ont été formulées au terme de l'enquête exploratoire. Elles stipulent qu'il existerait une relation entre les variables ci-après (Tableau 4.2).

Tableau 4.2. Hypothèses sur les liens éventuels entre les variables d'intérêt.

| Variable 1 | Variable 2 | Modalités |
|---|---|------------------|
| Utilisation de l'outil (Oui/Non) | Compétence des bénéficiaires | Oui/Non |
| | Satisfaction ³ des besoins des bénéficiaires | Oui/Non |
| | Capacité d'action ⁴ en faveur de l'utilisation de l'outil | Oui/Non |
| | Intégration des outils dans l'organisation structurelle des bénéficiaires | Oui/Non |

Une enquête exhaustive par questionnaire a ensuite été conduite auprès des bénéficiaires des Projets, pour vérifier les hypothèses supra mentionnées. Elle a concerné trois groupes distincts : le groupe des structures bénéficiaires des outils des projets (10 structures), le groupe des facilitateurs qui sont des personnes ressources des projets (22 facilitateurs) et le groupe des individus bénéficiaires des outils des projets (129 individus). Parmi les individus bénéficiaires, 111 personnes ont accepté de répondre aux questions et 106 individus ont donné des réponses valides. Les

³ *Les outils satisfont les besoins des bénéficiaires*

⁴ *Les bénéficiaires ont la possibilité de prendre des actions en vue d'utiliser les outils*

questionnaires au nombre de trois ont été soumis aux facilitateurs, aux individus ayant bénéficié des outils et aux structures d'appartenance de ces individus. Ils ont porté sur : (i) 'l'identification et l'utilisation des outils', (ii) 'les compétences du bénéficiaire', (iii) 'la satisfaction des besoins du bénéficiaire par les outils', (iv) 'la capacité d'action du bénéficiaire en faveur de l'utilisation des outils, (v) 'l'intégration des outils dans l'organisation structurelle des bénéficiaires' et (vi) 'l'utilisation des outils par ces derniers'.

Des analyses statistiques visant à déterminer des relations éventuelles entre la variable-réponse (Utilisation) et les variables explicatives (Compétence, Satisfaction, Intégration, Capacité d'action), ont été réalisées. Il s'agit notamment du test de χ^2 de Pearson avec la correction ou non de la continuité de Yates. En effet, Grosjean et Dommergues (2012, p. 142) suggèrent d'appliquer la correction de la continuité de Yates dans le cas d'un tableau de contingence 2x2. Parmi les individus bénéficiaires, 111 personnes ont répondu aux questions et 106 individus ont donné des réponses valides. Les réponses non valides sont dues, soit à un décès (un cas), soit à des situations où les personnes concernées ont quitté leur structure d'origine et ont décliné de répondre aux questionnaires pour convenance personnelle. Nonobstant ces contraintes prises en compte dans l'analyse des données, les enquêtes ont permis d'obtenir les résultats ci-après.

70 % des structures interrogées (N=10) ont déclaré utiliser les outils tandis que 30 % n'en utilisaient pas. 47 % des individus enquêtés ont déclaré utiliser les outils mis à leur disposition par les Projets, alors que 52.83 % n'en utiliseraient pas (N=106). Cette différence de taux d'utilisation des outils entre les individus et les structures pourraient s'expliquer par le fait que les structures considèrent que l'outil est utilisé si au moins un de leurs agents l'utilise.

Parmi les 15 outils qui ont été promus par les Projets, 80 % ont été utilisés au moins une fois ; 20 % n'ont jamais été utilisés, selon les déclarations des structures bénéficiaires. Ces 20 % concernent notamment les outils Biriz intégré au SIG, Budget et Hysim. À l'opposé, *Google Earth* (16.67 % des structures), ArcGIS (14.29 %) sont utilisés au quotidien.

Le tableau 4.3 indique que seules les variables 'intégration des outils dans les structures des bénéficiaires' et 'utilisation des outils' sont significativement liées, selon le test de Khideux suivi de la correction de la continuité de Yates au seuil de rejet $\alpha = 0.05$. La variable « satisfaction des besoins » semblent être en relation avec « l'utilisation des outils », avec une probabilité très proche du seuil de signification (p-value = 0.0586). Par contre, l'utilisation des outils n'est pas liée à la capacité d'action des bénéficiaires ($C^5 = 0.18$), ni à la compétence de ces derniers (Tableau 4.3).

Tableau 4.3. Relations entre les variables explicatives et l'utilisation des outils : test de χ^2 de Pearson avec la correction de la continuité⁶ de Yates ou coefficient C de contingence de Pearson.

| Variables | Utilisation des outils |
|--|---|
| Compétences | $\chi^2(1) = 2.032e-30$ p-value = 1 |
| Satisfaction des besoins | $\chi^2(1) = 3.5765$ p-value = 0.0586 |
| Intégration des outils dans les structures des bénéficiaires | $\chi^2(1) = 8.2771$ p-value = 0.004015 |
| Capacité d'action du bénéficiaire | C = 0.18 |

⁵ C'est le coefficient de contingence de Pearson, plus il est proche de 1, plus il existe une relation forte entre les deux variables. Masuy-Stroobant et Costa (2013, p. 86), indiquent que la stabilité du Khi-deux suppose qu'aucune fréquence absolue du tableau de contingence (fréquences théoriques) ne compte moins de cinq unités ; si cela est le cas, ils conseillent d'utiliser le coefficient de contingence de Pearson, qui neutralise l'effet du nombre d'unités d'observations.

⁶ Grosjean et Dommergues (2012:p.142) suggèrent d'appliquer la correction de la continuité de Yates dans le cas d'un tableau de contingence 2x2.

La parfaite intégration des outils dans les dispositifs des structures d'accueil est donc la condition première pour leur utilisation effective. Aussi si l'on s'en tient aux déclarations des enquêtés, le sentiment général laissant présupposer que les outils ne sont pas du tout utilisés apparaît inexact. 47 % des individus enquêtés ont déclaré utiliser les outils promus. Il n'en demeure pas moins que ce taux aurait pu être meilleur au regard des efforts consentis par les projets de mise en œuvre de ces outils.

Pour terminer, ces analyses de données de l'enquête indiquent que le taux d'utilisation déclaré des outils est de 70 % au niveau des structures. 47 % des individus enquêtés ont déclaré utiliser les outils mis à leur disposition par le projet. La parfaite intégration de l'outil dans la structure bénéficiaire améliorerait le taux d'utilisation au niveau individuel.

Pour une meilleure appropriation de ces outils de gestion de l'eau à usage agricole, il apparaît qu'il faut absolument prendre en compte l'intérêt réel des structures et des individus bénéficiaires, en faisant une analyse approfondie de leurs besoins spécifiques en la matière et des possibilités d'intégration parfaite de ceux-ci au sein de ces structures. Ces tâches ne sont toujours pas efficacement réalisées par le 'premier venu'. L'intérêt et la motivation des potentiels bénéficiaires des outils devraient constituer un critère essentiel dans leur choix pour les formations.

4.2. Analyse de la problématique de gestion de l'eau dans la Haute-Comoé

La présente section analyse la problématique de la gestion de l'eau agricole dans l'agrosystème de la Haute-Comoé. Elle comprend deux parties : la première est une revue bibliographique. La deuxième partie constitue une synthèse des résultats des échanges issus de trois ateliers multi-acteurs tenus respectivement les 16 juillet 2017, le 01 février 2018 et le 02 mars 2018 à Banfora. Au cours du premier atelier, les réflexions ont d'abord été menées au sein de trois groupes de travail. Le premier

avait en charge de traiter les difficultés relatives à la gestion de l'eau. Le deuxième groupe de travail a réfléchi sur les besoins en informations hydro-agricoles des usagers et le dernier groupe a examiné les voies et moyens possibles pour satisfaire ces besoins. Les travaux de groupe ont été suivis d'une restitution en plénière pendant laquelle chaque groupe a pris connaissance du travail des autres et a apporté ses amendements. Ces travaux de groupe ont été modérés par des facilitateurs externes en vue de minimiser les formes sociales de contrôle qui apparaissent au sein de ces types de regroupements (Olivier de Sardan, 2003). Les deux autres ateliers d'échanges, présidés par le Gouvernorat de la région des Cascades, ont consisté en des discussions en plénière autour des solutions envisageables pour faire face à la problématique de la gestion rationnelle de l'eau dans l'agrosystème de la Haute-Comoé. Quant à la revue documentaire, elle nous a renseigné davantage sur plusieurs problèmes spécifiques portant sur la gestion de l'eau dans le sous-bassin versant. Le manque de connaissances précises pour planifier les usages, le gaspillage de l'eau, le déséquilibre entre l'offre et la demande en eau sont entre autres des faits récurrents dans la littérature scientifique.

4.2.1. Synthèse bibliographique

Cette section relative à la revue documentaire sur la problématique de gestion de l'eau dans la Haute-Comoé, est traitée essentiellement en quatre points : (i) manque de connaissances précises pour planifier les usages, (ii) faible efficacité d'utilisation de l'eau, (iii) accroissement fulgurant des emblavures et faibles productions agricoles, et (iv) déséquilibre entre l'offre et la demande en eau.

Manque de connaissances précises pour planifier les usages

Deux grands défis majeurs se posent dans la gestion de l'eau agricole dans le sous-bassin versant de la Haute-Comoé : la production d'informations pour orienter les gestionnaires des réservoirs d'eau dans leurs prises de décision notamment sur les débits à lâcher (Etkin *et al.*, 2015 ; Ouattara, 2007) et

l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau pour l'irrigation. Ce manque d'informations conduit à l'estimation très approximative des disponibilités en eau des réservoirs en début de campagne (Roncoli *et al.*, 2016 ; Roncoli *et al.*, 2009), ressources à partir desquelles le plan d'allocations annuel de l'eau aux différents usagers, est établi. L'amélioration des connaissances scientifiques sur les ressources en eau du bassin versant devra permettre de mieux préciser les planifications, ce qui pourrait contribuer à l'économie de ces ressources.

Faible efficacité d'utilisation de l'eau

La ressource en eau de surface manque à cause de sa mauvaise utilisation. En effet, les efficacités d'irrigations dans le sous-bassin versant sont faibles. L'efficacité d'apport d'eau aux parcelles maraîchères par pompage des eaux du fleuve Comoé serait de l'ordre de 0.60 (Agence de l'Eau des Cascades, 2014), de 0.48 ± 0.28 selon GEeau (2013). Selon Etkin *et al.* (2015) l'efficacité de transport d'eau était de 0.75 pour le périmètre sucrier et de 0.65 pour le périmètre aménagé de Karfiguéla. L'efficacité moyen d'apport d'eau au niveau des périmètres irrigués collectifs de l'ensemble de la région des Cascades serait de 0.35 (Agence de l'Eau des Cascades, 2014).

Accroissement fulgurant des emblavures et faibles productions agricoles

La production maraîchère est en pleine expansion dans la région d'étude avec l'existence d'importants réseaux de commercialisation des produits vers l'intérieur et l'extérieur du pays. L'accroissement des demandes en produits horticoles (piment, oignon, chou...) dans les marchés frontaliers est une réalité. Initialement dimensionnées pour la production de canne à sucre (4000 ha) et la production rizicole d'hivernage (350 ha de périmètre aménagé de Karfiguéla), les capacités des trois retenues d'eau en amont de la plaine alluviale de Karfiguéla, se sont révélées insuffisantes pour satisfaire l'ensemble des besoins des usagers, depuis

l'expansion de la production maraîchère de saison sèche dans la zone, grâce au soutien de l'État. En effet, sur une superficie estimée à quelques centaines d'hectares dans les années 2000, les superficies maraîchères sont de nos jours de l'ordre de 2000 ha selon la Direction Régionale en charge de l'Agriculture. L'exacerbation de la variabilité pluviométrique, a obligé les agriculteurs à s'orienter davantage vers les productions agricoles sur les terres basses plus sécurisantes à cause des remontées capillaires. Cependant bien que les surfaces agricoles croissent d'année en année, les productions agricoles ont cependant augmenté marginalement, d'où la faible productivité agricole observée dans les périmètres. Au cours de la campagne agricole de saison sèche 2017 par exemple, les rendements du riz irrigué variaient entre 2 et 7 t/ha dans le périmètre irrigué de Karfiguéla, avec une fréquence plus élevée des rendements de 3 t/ha selon la Direction Régionale en charge de l'Agriculture, alors que les rendements potentiels des variétés les plus cultivées sont : 5-7 t/ha pour la variété FKR 62N (Farakoba riz 62N), 5-6 t/ha pour la FKR 19 et 6-7 t/ha pour la FKR 64 (Sanou *et al.*, 2017). Selon les statistiques de cette Direction Régionale, les rendements des quatre principales cultures maraîchères (tomates, chou, oignon bulbe, piment) sont passés respectivement de 20, 20, 25 et 12 t/ha en campagne sèche 2015 à 18, 22, 25 et 14 t/ha en 2017 pour la province de la Comoé.

Déséquilibre entre l'offre et la demande en eau

En raison des facteurs ci-dessus mentionnés (faible efficacité d'utilisation de l'eau, accroissement des surfaces cultivées, faible productivité agricole) et de la variabilité pluviométrique qui entraîne des taux de remplissage des réservoirs qui sont très souvent en deçà des attentes, l'eau de surface disponible pour l'ensemble des usagers ne satisfait pas leur demande (Tableau 4.4).

Le déséquilibre entre l'offre et la demande entraîne des conflits de plus en plus récurrents entre usagers autour de la ressource eau. Plusieurs conflits ont été signalés par Roncoli *et al.* (2016). Aussi au cours de la campagne agricole sèche de

2018, des tensions ont été notées par l'équipe du présent projet de thèse. En plus des actions menées par les projets de recherche GEeau, PADI-BF 102 pour améliorer l'utilisation de l'eau, des expériences de mise à disposition aux usagers d'outils opérationnels de gestion ont été conduites dans le sous-bassin versant par plusieurs chercheurs. La section suivante présente une synthèse de ces outils qui semblent être faiblement adoptés par les bénéficiaires.

Tableau 4.4. Disponibilité et demande en eau des principaux usagers selon les estimations du CLE⁷.

| Campagne | Volumes d'eau disponibles⁸ en million de m³ | Besoins des usagers en million de m³ |
|-----------------|--|--|
| 2015 | 45.58 | 47.26 |
| 2016 | 47.35 | 47.19 |
| 2017 | 44.09 | 47.94 |
| 2018 | 33.63 | 46.32 |
| 2019 | 40.83 | 49.87 |

Faible appropriation des outils de gestion de l'eau expérimentés dans le sous-bassin

Quelques outils recensés dans la littérature scientifique, ayant pour objectif de favoriser une gestion rationnelle de l'eau dans le sous-bassin versant de la Haute-Comoé, sont synthétisés dans le tableau 4.5. Il s'agit des outils d'évaluation et de planification de la ressource en eau de surface qui tiennent compte des besoins des différents usagers. Ils proposent des scénarios d'allocations de l'eau aux usagers en fonction du contexte environnemental. Ce sont notamment HYDRAM (*HYDRo-Aménagements*), CST (*Comoé Simulation Tool*), MSLP (*Multistage Stochastic Linear Program*) ... À l'exception d'un tableau basé sur le tableur Excel proposé par l'Association Eau Développement Environnement au profit du CLE-HC (GEeau, 2012), ces outils de gestion de l'eau précédemment expérimentés dans le sous-bassin

⁷ Usagers agricoles + ONEA

⁸ Réservoirs + apports du fleuve

versant de la Haute-Comoé, n'ont pas été véritablement appropriés par les gestionnaires de l'eau, à cause de leur relative complexité (GEeau, 2012). En effet bien que ces outils visent une bonne gestion de l'eau à travers une meilleure planification des allocations, ils apportent peu de réponse à la mauvaise gestion de l'eau observée dans les périmètres formels et informels (Roncoli *et al.*, 2016).

Tableau 4.5. Outils techniques de gestion de l'eau proposés par la recherche dans le sous-bassin.

| Outils | Rôle | Utilisateur | Niveau d'appropriation/appréciation | Raisons probables qui expliquent le niveau d'appropriation | Source |
|---|--|--------------------------------------|--|---|------------------------------|
| CST (Comoé simulation Tool) | Aide à l'élaboration des programmes d'allocation en tenant compte des ressources des trois réservoirs et des différents usagers | AEDE (à l'époque secrétariat du CLE) | Pas été approprié par les gestionnaires de l'eau | Complexité | (Etkin <i>et al.</i> , 2015) |
| Outil Excel proposé par l'AEDE | Aide à l'élaboration des plans d'allocation des ressources en eau de surface | CLE-HC | Approprié par le CLE-HC | Simple | (GEeau, 2012) |
| HYDRAM (HYDRO-Aménagement) | Pour la planification et la gestion des ressources en eau par confrontation ressources-besoins en tenant compte du système d'aménagement et des règles de gestion des réservoirs | Néant | Pas été approprié par les gestionnaires de l'eau | Complexité, Manque de compétence en programmation notamment sous Unix | (Ouédraogo, 1997) |
| MSLP (Multistage Stochastic Linear Program) | C'est un modèle d'optimisation stochastique Vise à minimiser le risque de pénurie d'eau Utilisé par décade pour ajuster les volumes d'eau à lâcher des réservoirs en fonction des conditions qui prévalent et les prédictions des écoulements des cours d'eau. Le modèle donne les volumes d'eau initiaux stockés dans les barrages en m ³ et en pourcentage, les débits d'entrées espérés dans ces réservoirs au cours de la saison pluvieuse, les sorties prescrites et le stockage final espéré. | Néant | Pas été approprié par les gestionnaires de l'eau | - | (Etkin <i>et al.</i> , 2015) |

Disfonctionnements au sein des organisations d'usagers

Tous les membres des organisations d'agriculteurs ne partagent pas toujours les mêmes valeurs. CNID-B (2009), a noté un dysfonctionnement au sein de l'Union Générale des Coopératives des Exploitants du Périmètre Aménagé de Karfiguéla (UCEPAK), qui s'est traduit par une mauvaise gestion administrative et financière, en occurrence l'utilisation des redevances d'eau à d'autres fins, et le non-respect des dispositions des textes réglementaires de l'Union. Aussi le refus de certains agriculteurs de participer aux travaux communautaires d'intérêt commun constitue-t-il une réalité ainsi que le retard et le non-paiement des contributions de certains membres (Yéré, 2015), qui ne perçoivent pas les retombées immédiates d'un tel investissement.

Chez les agriculteurs informels, on note l'occupation des berges de part et d'autre du fleuve par endroits par certains irrigants et l'érection par moment de micro-barrages dans le lit du fleuve conduisant à la modification de son régime et la destruction de l'écosystème aquatique. En effet, selon un recensement de l'Agence de l'Eau des Cascades en 2016, on dénombrait 1367 agriculteurs maraîchers installés dans la bande de servitude du fleuve Comoé dans la plaine alluviale de Karfiguéla. Cette bande située à l'intérieur des 100 m de part et d'autre du lit mineur du cours d'eau, est une norme instituée par l'Autorité pour protéger les cours d'eau de l'ensablement (Assemblée des Députés du Peuple du Burkina Faso, 1996). Aussi en 2012, 70 % des exploitants enquêtés tout au long de cette rivière, étaient-ils installés à moins de 100 m du lit du fleuve (GEeau, 2012).

Faible capacité du CLE-HC a joué pleinement son rôle de modérateur

Le Comité Local de l'Eau de la Haute-Comoé (CLE-HC) est l'un des premiers comités de gestion intégrée de l'eau mis en place par l'État Burkinabè, en 2008, à cause d'une succession de sévères conflits d'usage de l'eau. Depuis lors il a

été mandaté d'élaborer, à chaque début saison sèche, un plan consensuel d'allocation de l'eau pour l'ensemble des usagers présentés ci-avant (Roncoli *et al.*, 2016).

Les infrastructures des réservoirs sont entretenues et gérées par la compagnie sucrière qui lâche périodiquement l'eau des réservoirs pour les besoins de l'ensemble des usagers. En principe, les volumes d'eau lâchés à partir des réservoirs sont effectués suivant le plan d'allocation de l'eau élaboré par le CLE-HC aux termes des négociations avec l'ensemble des membres. Cependant dans la pratique, le respect de ce plan est rarement vérifié car le CLE manque des équipements nécessaires et de capacités techniques et logistiques (Roncoli *et al.* 2016). Dans ce contexte, renforcer les capacités du CLE à suivre la disponibilité de l'eau et à contrôler sa distribution est essentiel pour assurer la transparence, l'équité et par conséquent la prévention ou la mitigation des conflits d'usage de l'eau.

C'est pour s'imprégner davantage des différentes problématiques ci-dessus évoquées que les trois ateliers (évoqués plus haut) regroupant l'ensemble des parties prenantes de la gestion de l'eau dans le sous-bassin versant de la Haute-Comoé (Tableau 4.6) ont été organisés.

Tableau 4.6. Liste des structures présentes aux ateliers d'échanges du 26 juillet 2017, des 01 février et 02 mars 2018 sur la problématique de la gestion de l'eau dans la Haute-Comoé.

| Type de structures | Structures | N. (juillet 2017) | N. (février 2018) | N. (mars 2018) |
|--|--|-------------------|-------------------|----------------|
| Autorités administratives représentant l'État | Gouvernorat des Cascades | 0 | 2 | 2 |
| | Haut-Commissariat de la Comoé | 0 | 1 | 1 |
| Collectivités territoriales | Commune de Banfora | 0 | 1 | 0 |
| | Conseil Régional des Cascades | 0 | 1 | 1 |
| Organisations paysannes | Chambre Régionale d'Agriculture des Cascades | 1 | 1 | 1 |
| | Comité d'irrigant, représentant des agriculteurs informels | 1 | 10 | 12 |
| | Union des Coopératives des Exploitants du Périmètre Aménagé de Karfiguéla | 1 | 1 | 5 |
| Services techniques de l'État | Direction Régionale de l'Agriculture et des Aménagements Hydro-agricoles des Cascades | 3 | 2 | 5 |
| | Direction Provinciale de l'Agriculture et des Aménagements Hydro-agricoles de la Comoé | 3 | 1 | 1 |
| | Direction Régionale de l'Eau et de l'Assainissement des Cascades | 1 | 2 | 1 |
| | Direction Régionale de l'Environnement de l'Économie Verte et du Changement Climatique | 0 | 1 | 1 |
| | Agence de l'Eau des Cascades | 1 | 2 | 1 |
| | Bureau régional de l'Office Nationale de l'Eau et de l'Assainissement | 1 | 1 | 1 |
| | Service de conseil agricole du périmètre irrigué de Karfiguéla | 2 | 2 | |
| | Zones ⁹ d'Appui Technique | 9 | 0 | 0 |
| | Direction Générale des Aménagements Hydrauliques et du Développement de l'Irrigation | 8 | 1 | 1 |
| Secrétariat Général de l'Agriculture et des Aménagements Hydro-agricoles | 1 | 0 | 0 | |
| Société privée | Société Sucrière de la Comoé | 1 | 3 | 1 |
| Comité inter-structure | Comité Local de l'Eau de la Haute-Comoé | 2 | 1 | 1 |
| Société civile | Association Eau Développement Environnement | 1 | 0 | 0 |
| | Total | 36 | 33 | 35 |

⁹ Les Zones d'Appui Techniques sont des Services déconcentrés de Conseil Agricole des Directions Provinciales de l'Agriculture et des Aménagements Hydro-agricoles.

4.2.2. Synthèse des échanges des ateliers multi-acteurs

Au terme des ateliers multi-acteurs, plusieurs points ont été évoqués par l'ensemble des participants. Il s'agit notamment des difficultés relatives à la gestion de l'eau, des stratégies d'adaptation et des besoins en informations agricoles.

Difficultés relatives à la gestion de l'eau

Plusieurs difficultés majeures évoquées par les acteurs de terrain (les agriculteurs, les agents d'appui-conseils, l'administration et les services techniques) sont résumées dans le tableau 4.7. Il s'agit premièrement du fait que certains agents sont distants des producteurs soit à cause de l'absence ou de la vétusté des moyens de déplacement sur le terrain, soit à cause de l'insuffisance des frais de fonctionnement permettant leurs présences effectives et régulières auprès des agriculteurs. Aussi les conseillers sont-ils non outillés sur les dernières innovations en matière de conseil à l'irrigation (voir Tableau 4.7).

Tableau 4.7. Difficultés relatives à la gestion de l'eau, évoquées par les usagers.

| Difficultés évoquées | Nombre de fois que le sujet a été évoqué dans les discussions |
|---|---|
| <p>Insuffisance d'eau de surface pour l'irrigation dans le sous-bassin pendant la campagne sèche, alors qu'une grande quantité d'eau de pluie s'y déverse pendant la saison pluvieuse, à cause de :</p> <ul style="list-style-type: none"> -l'augmentation chaque année de la demande en eau des différents usagers en particulier des maraîchers ; -la mauvaise gestion de l'eau pour l'irrigation (surdosage de l'irrigation, non-respect des calendriers culturaux) ; -la dégradation du fleuve Comoé, de jour en jour, notamment par le rétrécissement des lits, la diminution chaque année de sa quantité d'eau et des ressources en eau de surface connexes, son tarissement précoce en certains endroits en aval, à cause entre autres du non-respect des espaces de protection des berges. | 12 |
| <p>Analphabétisme des producteurs</p> | 1 |
| <p>Les agents sont distants des producteurs soit : à cause de l'absence ou de la vétusté de moyens de déplacement de terrain de certains agents d'encadrement, soit à cause de l'insuffisance des frais de fonctionnement pour leur présence régulière auprès des agriculteurs (absence totale en saison sèche)</p> | 10 |
| <p>Absence d'outils et de compétence pour identifier et prendre en charge les attaques parasitaires et de nuisibles, récurrentes ces derniers temps, sur les cultures</p> | 3 |
| <p>Les conseillers sont non outillés ou non à jour des dernières innovations, notamment pour conseiller l'irrigation (volume, fréquence)</p> | 2 |
| <p>Non disponibilité des engrais (subventionné par l'État et non subventionné par l'État)</p> | 2 |
| <p>Insuffisance des tubes en polychlorure de vinyle pour l'irrigation</p> | 1 |

Solutions proposées aux difficultés évoquées

Les solutions proposées aux différents problèmes évoqués ci-avant d'après les panélistes sont résumées dans le tableau 4.8.

Tableau 4.8. Solutions proposées aux difficultés ci-avant évoquées par les acteurs.

| Problèmes | Solutions |
|--|--|
| Insuffisance d'eau | <ul style="list-style-type: none">-Rapprocher les conseillers des producteurs pour leur apprendre la pratique ;-Réaménager le périmètre rizicole : « le mauvais planage est l'une des causes du problème d'eau » ;-Réaliser des tours d'eau au niveau des maraîchers ;-Semer à la même date au sein de chaque bloc du périmètre irrigué afin de recevoir, la même quantité d'eau au même moment ;-Elargir le lit du fleuve en le curant du début du canal de Karfiguéla (voir Figure 3.8 plus haut) jusqu'au réservoir de Moussodougou ;-Aménager un canal pour permettre l'avancée rapide de l'eau vers les maraîchers ;-Réaliser une petite retenue d'eau au niveau de la prise de Karfiguéla ;-Convoyer l'eau des lacs de Lemourdougou et de Tengrela (voir Figure 3.4 plus haut) vers le lit du fleuve. |
| Agents sont distants des producteurs | Doter à temps les Directions Régionales chargées de l'agriculture en moyens logistiques et en frais de déplacement |
| Connaissances et outils non actualisées pour conseiller l'irrigation | Renforcer régulièrement les capacités des conseillers sur les dernières innovations |

En attendant de trouver des solutions définitives aux difficultés *supra* mentionnées, les usagers de l'eau agricole ont adopté des stratégies d'adaptation face à la rareté de la ressource. La section suivante énumère quelques stratégies observées sur le terrain.

Stratégies d'adaptation des usagers à la rareté de l'eau agricole

Les stratégies d'adaptation des usagers de l'eau agricole de l'agrosystème de la Haute-Comoé, face à la rareté de l'insuffisance de l'eau dans le sous-bassin, sont multifformes. Il s'agit principalement de la réalisation de tours d'eau, un

programme alternatif de partage d'eau entre les usagers horticulteurs et riziculteurs au cours de la campagne sèche qui suit une année de faible pluviométrie. Elle s'effectue à partir de la prise de partage d'eau appelée 'prise de Karfiguéla' : les mardi, mercredi et jeudi, la priorité est accordée au périmètre rizicole de Karfiguéla (ouverture de la vanne en direction du périmètre rizicole et fermeture de la vanne sur le cours d'eau). Tous les samedi, dimanche et lundi, la priorité est accordée aux horticulteurs installés le long du cours d'eau Comoé. La journée de vendredi est partagée entre les deux groupes : la priorité est accordée aux riziculteurs le matin, et le soir elle revient aux horticulteurs.

La deuxième stratégie d'adaptation à la rareté de la ressource en eau est la scission de la coopérative rizicole du périmètre de Karfiguéla en cinq coopératives semi-autonomes. Cela facilite et améliore la collecte des 'redevances eau' et autres contributions des membres en faveur d'une meilleure planification dans la mobilisation et l'utilisation de l'eau.

La rotation entre les coopératives exploitant le périmètre irrigué rizicole de Karfiguéla dans son exploitation est la troisième stratégie. Ainsi, au cours de la campagne agricole de saison sèche 2017, l'exploitation du périmètre est confiée aux coopératives 1, 2, et 3 de l'UCEPAK. Au cours de la campagne agricole de saison sèche suivante (2018), les coopératives 1, 2 et 3 ont cédé la place aux coopératives 4 et 5.

Enfin, l'option de produire en saison sèche pour le marché et en saison pluvieuse pour l'autoconsommation, l'établissement mensuel par le Comité Local de l'Eau (CLE) d'un programme de partage d'eau (programme de lâchers d'eau, à partir des trois principaux réservoirs d'eau) entre les principaux usagers, la conduite des actions d'informations, d'éducation et de communication auprès des usagers à travers les comités de protection des berges mis en place dans les villages riverains

de la rivière Comoé par l'Agence de l'Eau des Cascades, constituent d'autres stratégies d'adaptation.

Besoins en informations hydro-agricoles et solutions envisageables

Les besoins majeurs évoqués par les acteurs sur le terrain sont relatifs aux informations pour mieux gérer l'eau disponible, notamment les techniques d'économie d'eau, les spéculations à cultiver pour s'adapter au volume d'eau disponible, les besoins spécifiques en eau des plantes en fonction de la phase de croissance, les moyens de mesure des apports pour conseiller et contrôler ces apports en eau d'irrigation, les techniques de production de riz en période de rareté de l'eau. L'ensemble de ces besoins sont synthétisés dans le Tableau 4.9.

Tableau 4.9. Besoins en informations exprimés par les acteurs.

| Besoins exprimés | Nombre de fois que le sujet a été évoqué dans les discussions |
|---|---|
| Informations pour mieux gérer l'eau disponible, notamment les techniques d'économie d'eau, les spéculations à cultiver pour s'adapter au volume d'eau disponible, les besoins spécifiques en eau des plantes en fonction de la phase de croissance, les moyens de mesure des apports pour conseiller et contrôler ces apports en eau d'irrigation, la production de riz en période de rareté de l'eau | 10 |
| Informations régulières sur les changements climatiques, calendriers climatiques, en particulier les informations sur la météo notamment, les périodes de fin des pluies pour adapter les calendriers culturaux : « avant quand on était petit, on cultivait le fonio en septembre, maintenant si tu cultives le fonio en septembre, la pluie va s'arrêter » a déclaré un agriculteur. | 2 |
| Accès à des informations actualisées en matière d'arboriculture fruitière, de production végétale, de mécanisation agricole, d'hydrogéologie | 1 |
| Moyens techniques pour identifier les ravageurs et parasites des cultures | 1 |
| Conseils et formations pratiques approfondies des producteurs sur « comment il faut se comporter devant les pesticides » | 1 |
| Gestion de la production/récolte | 1 |
| Fertilité des sols/lutte contre la dégradation des terres. | 1 |
| Élaboration de projets | 1 |
| Informations sur l'acte uniforme de l'OHADA relatif aux droits des sociétés coopératives (textes visant à harmoniser les droits de ces sociétés en Afrique) | 1 |

Les réflexions ont également porté sur les solutions qui peuvent être envisagées pour satisfaire les besoins exprimés en informations hydro-agricoles. Sur le principal besoin à savoir « les informations pour mieux gérer l'eau disponible », trois types d'outils ont été proposés : des outils d'estimation des besoins en eau et de

planification des assolements, des instruments de mesure de débits (Échelles limnimétriques, moulinet, capteurs de pression pour la mesure de la charge de l'eau...) et un outil d'estimation de la ressource en eau. Les méthodes pour la mise en œuvre de ces outils, sont essentiellement, l'installation de stations hydrométriques, la réalisation de jaugeages et l'établissement des canaux de communication (Tableau 4.10).

Tableau 4.10. Voies et moyens pour satisfaire les besoins exprimés en informations hydro-agricoles.

| Besoins exprimés | Quels outils innovants ? | Quelles méthodes ? |
|---|--|--|
| -Informations pour mieux gérer l'eau disponible, notamment s'adapter au volume d'eau disponible, -Connaître les besoins spécifiques en eau, -Disposer des moyens de mesure des apports pour conseiller et contrôler ces apports en eau d'irrigation | - Outils d'estimation des besoins - Instruments de mesure de débits (Échelles limnimétriques, sondes, thalimèdes, ...) - Outil d'estimation de la ressource en eau | -Formations/ sensibilisations des acteurs, élaboration de fiches simplifiées, déclaration/ inventaires cultureux - Installation des stations, réalisation de jaugeages, formations et suivi |
| Accès à des informations actualisées en matière d'hydrogéologie | Rapports d'études, articles, revues scientifiques, | Canaux de communication, sensibilisation/ formation, conseil/appui technique |

En définitive, il s'agissait à travers cette étude de mieux cerner la problématique de la gestion rationnelle de l'eau dans le sous-bassin versant de la Haute-Comoé, afin de réfléchir sur les pistes de solutions envisageables. Au regard de la situation ci-avant décrite et des recommandations des ateliers, les idées d'actions ci-après apparaissaient en termes de solutions : (i) la mise en place d'un dispositif pérenne qui permet d'évaluer les besoins en eau et l'utilisation de l'eau de chaque groupe d'utilisateurs, en relation avec le disponible, (ii) la mise à disposition de l'information sur les besoins en eau et les prélèvements des trois groupes d'utilisateurs à travers divers canaux ; (iii) la transmission aux conseillers des calendriers d'irrigation simplifiés à appliquer sur le terrain à travers les instances régulières ; (iv) la transmission des informations aux irrigants et aux conseillers sur

l'accessibilité (lieux, prix) des intrants (engrais, semences) dans la région ; (v) la réalisation de campagnes de communication sur l'utilité de la contribution des usagers à la gestion des ressources en eau etc. Il est également ressorti clairement dans l'analyse ci-dessus que la plupart des faits à l'origine de la mauvaise gestion de l'eau sont aussi d'ordre communicationnelles (« chacun fait ce qu'il veut » a déclaré un usager). Il faut donc trouver une solution à ce problème communicationnel, pour qu'il y ait moins de gaspillage d'eau dans la pratique agricole. C'est pourquoi la question de la communication a été ciblée pour être examinée plus profondément dans la section suivante. Dans cette dynamique, le système d'information dédié à la gestion de l'eau dans le sous-bassin versant de la Haute-Comoé, porté par le CLE, a été diagnostiqué.

Cette analyse de la problématique de la gestion de l'eau dans la Haute-Comoé suggère également les hypothèses suivantes : (i) les problèmes liés à l'eau s'exacerbent au fil des années ; (ii) une meilleure communication entre les acteurs de l'eau améliorerait sa gestion ; (iii) les compétences organisationnelles doivent être associées aux compétences techniques pour améliorer la qualité de la gestion de l'eau.

4.3. Diagnostic du système d'information en gestion de l'eau¹⁰

Il est évident que l'accès à des données hydrologiques de qualité est un prérequis essentiel pour parvenir à prendre des décisions judicieuses dans la gestion des ressources en eau (World Meteorological Organisation, 2012). Conscient de cette situation, le Burkina Faso, a créé en 2003, à travers son premier Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PAGIRE 2003-2008), le Système

¹⁰ Adapté de Palé, S., Traoré, F., Wellens, J., et Tychon, B. (2019). Diagnostic d'un système d'information de gestion de l'eau à usage agricole dans le sous-bassin versant de la Haute-Comoé, Burkina Faso, *GEO-ECO-TROP*, 43(3, n.s.), pp. 433–443.

National d'Informations sur l'Eau (SNIEau), qui a pour objet de suivre qualitativement et quantitativement les ressources en eau du pays (Pieyns, 2017). Si de nos jours des avancées notoires sont observées tant au niveau institutionnel, réglementaire que juridique, la circulation de l'information technique qui devrait alimenter le fonctionnement des institutions de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE), n'est pas optimale. En effet, selon une enquête menée en 2016 (Pieyns, 2017), seulement 3 % des personnes enquêtées sont satisfaites du SNIEau. L'insuffisance en ressources humaines et en moyens financiers et matériels, en serait une des causes principales (Pieyns, 2017). De plus, la distribution actuelle des stations hydrométriques ne répond pas aux besoins réels des acteurs de terrain, qui ont difficilement accès à l'information au moment opportun pour leurs usages (Roncoli *et al.*, 2009).

Pour faire face à ce défi, certains organes de la GIRE ont développé leurs propres initiatives. Le Comité Local de l'Eau (CLE) du sous-bassin versant de la Haute-Comoé, qui produit et partage l'information entre ses membres en vue d'une gestion plus rationnelle de l'eau agricole dans ce sous-bassin versant, en est un exemple. Cette section analyse premièrement ce dispositif d'information du sous-bassin versant de la Haute-Comoé et propose ensuite des perspectives d'améliorations.

Le diagnostic du système d'information du CLE dédié à la répartition équitable de l'eau, a consisté premièrement en une analyse documentaire approfondie de différents ouvrages collectés sur le terrain : rapports d'activités, comptes rendus de réunion, procès-verbaux de rencontre... Une série d'entretiens semi-structurés ont ensuite été effectués auprès de l'administration publique, des collectivités territoriales, des usagers de l'eau, des autorités politiques et des organisations d'agriculteurs, membres du Comité Local de l'Eau de la Haute-Comoé (CLE-HC), à travers deux *focus groups* et 20 entretiens individuels. Des observations participantes dans le sous-bassin versant, telles que suggérées par Olivier de Sardan

(2003), ont été régulièrement réalisées lors de la campagne sèche 2017 pour confirmer ou infirmer certains propos recueillis lors des entretiens. La synthèse des résultats de l'analyse du système d'information est présentée ci-après.

4.3.1. Outil et mécanisme du système d'information du CLE-HC

Les interviews réalisées dans la zone d'étude auprès des acteurs de la GIRE et l'analyse des documents fournis par le CLE-HC, indiquent que son système actuel d'informations, est fondé sur le plan d'allocation des ressources en eau. Ce plan d'allocation est établi en début de campagne agricole de saison sèche (octobre-décembre), au cours d'une réunion d'un comité dit 'restreint', qui comprend des représentants des services techniques et des usagers. Son établissement démarre par l'évaluation sur le terrain des volumes d'eau stockés dans les trois principaux réservoirs du sous-bassin versant. L'évaluation des volumes d'eau stockés par réservoir se fait de la manière suivante : (i) lecture du niveau d'eau du réservoir à partir d'une échelle limnimétrique, (ii) conversion de la hauteur d'eau en volume à partir de la relation établie entre les deux variables (courbe de remplissage du réservoir).

La connaissance des volumes d'eau stockés dans les trois réservoirs, permet alors de négocier autour d'une table, les superficies à emblaver après une estimation de l'ensemble des besoins en eau des usagers, les débits à lâcher au niveau de chaque réservoir, les débits à délivrer à chaque groupe d'usagers en fonction des mois de la campagne sèche. Une fois les négociations abouties, les représentants de chaque groupe d'acteurs au sein du Comité restreint sont en charge de la diffusion des décisions du comité, auprès de son organisation.

Ce système comprend également un instrument de contrôle des décisions prises : la vérification des débits préconisés par le comité restreint se fait de façon ponctuelle lors de sorties sur le terrain, notamment lors de tensions perceptibles entre les usagers.

La concertation est donc au centre du système d'information du CLE-HC pour veiller au partage équitable des ressources en eau de surface, tandis que le plan d'allocation des ressources en eau, couramment appelé "programme de lâchers d'eau", reste le principal outil d'informations pour les différents usagers, au cours de la campagne agricole de saison sèche (Tableau 4.11).

Tableau 4.11. Dispositif d'information du CLE-HC pour une répartition équitable de l'eau.

| Étapes | Quoi ? | Qui ? | Quand ? | Comment ? | Pour qui ? | Par quel support ? |
|---|--|-------------------------|--|---|------------|------------------------------------|
| Production et diffusion de l'information | -Volume d'eau des réservoirs -Débits mensuels à délivrer -Superficies à emblaver | Comité restreint du CLE | Début de campagne sèche | Observations sur le terrain et négociation autour de l'arbre à palabres | CLE | Procès-verbal de réunion |
| Contrôle des décisions | Débit mensuel à délivrer à chaque groupe d'usagers | Comité restreint du CLE | De façon inopinée ou en cas de tension | Lectures des échelles limnimétriques sur le terrain | CLE | Compte rendu de mission de terrain |

4.3.2. Forces et faiblesses du système

En permettant aux usagers de s'informer mutuellement sur le partage de l'eau, le système d'information du CLE-HC joue un rôle important dans la prévention des conflits d'usage. En effet, même si des tensions conflictuelles ont été signalées après la date de sa création en 2008 notamment en 2011, 2012 (Roncoli *et al.*, 2016) et 2017, elles ont toutefois été de moindre envergure que les conflits majeurs de 1995 et de 2007. Les usagers ont trouvé un interlocuteur direct à qui s'adresser en cas de problème et ne sont plus prompts à organiser des manifestations de protestation de grande envergure comme ce fût le cas auparavant. Ces conflits qui se manifestent sous forme de protestation, de marche-meetings auprès de l'Autorité ou sous forme de révolte, de sabotage du plan d'allocation de l'eau, surviennent lorsque l'un ou l'autre groupe d'usagers estime que les volumes d'eau lâchés sont insuffisants ou encore lorsque des soupçons pèsent sur le non-respect du calendrier de partage et du plan d'allocation par certains groupes d'usagers.

Le maillon 'diffusion' du système d'information demeure cependant faible. L'information est diffusée aux représentants des acteurs de la GIRE au Comité restreint d'élaboration des programmes de lâchers, qui devront à leur tour rendre compte à leurs membres, avec le risque d'omission que cela comporte. Au sein du Comité local de l'eau, en effet, il est mis en place un groupe restreint dont le rôle est de proposer les plans d'allocation des ressources en eau. Tous les usagers agricoles et non agricoles ne sont malheureusement pas touchés par le plan de diffusion de ces informations.

Le contrôle du plan d'allocation des ressources est par ailleurs assez peu rigoureux. Les décisions prises par le comité restreint, concernant les débits d'eau à délivrer à chaque usager, ne sont pas fréquemment contrôlées. Aussi en l'absence d'un mécanisme automatisé de collecte et de traitement des données, les procédures de production de l'information par le CLE sont-elles lentes.

Enfin, le financement du dispositif d'information est réalisé en partie par des contributions financières des parties prenantes dans la GIRE au niveau régional, notamment par les recettes de la taxe de prélèvement de l'eau brute et les cotisations annuelles des institutions membres du CLE. Entre 2009 et 2016, une valeur monétaire médiane de 1625 € (environ 1 066 000 F CFA) a été mobilisée par an par le CLE (minimum 145 €, maximum 6287 €) (Figure 3.10). Les taxes de prélèvement de l'eau brute versés par les usagers de l'eau au CLE (dont les montants varient entre 0.0015 € et 0.19 € par m³ d'eau prélevé en fonction du type d'usage), représentaient 33 % tandis que les cotisations des membres du CLE-HC étaient de 67 % ; la contribution/cotisation saisonnière par membre (SOSUCO, Conseil régional, maraîchers, riziculteurs, Communes...) était comprise entre 38 € et 3049 € (38 € venant de l'Association Munyu et 3049 € venant de la SOSUCO). La durabilité du système d'information actuel reste tributaire des recouvrements des cotisations des membres du CLE-HC. Le taux de recouvrement cependant variait énormément d'une année à l'autre : 75 % en 2009, 3 % en 2012 et en 2013. Le taux moyen de recouvrement annuel est de 32 % de 2009 à 2016. D'une manière générale, les taux de recouvrement semblent être plus élevés au cours des années de faible disponibilité en eau dans les réservoirs, années au cours desquelles la compétition devient rude autour de la ressource 'eau'. Cette situation de compétition vient rappeler aux usagers la nécessité de doter le CLE-HC de moyens financiers conséquents pour un meilleur arbitrage de la distribution de l'eau. La non perception par les usagers des retombées immédiates et tangibles des cotisations est certainement une des raisons qui expliquent les fluctuations énormes des montants perçus par le Comité de gestion d'une année à l'autre (Figure 4.1).

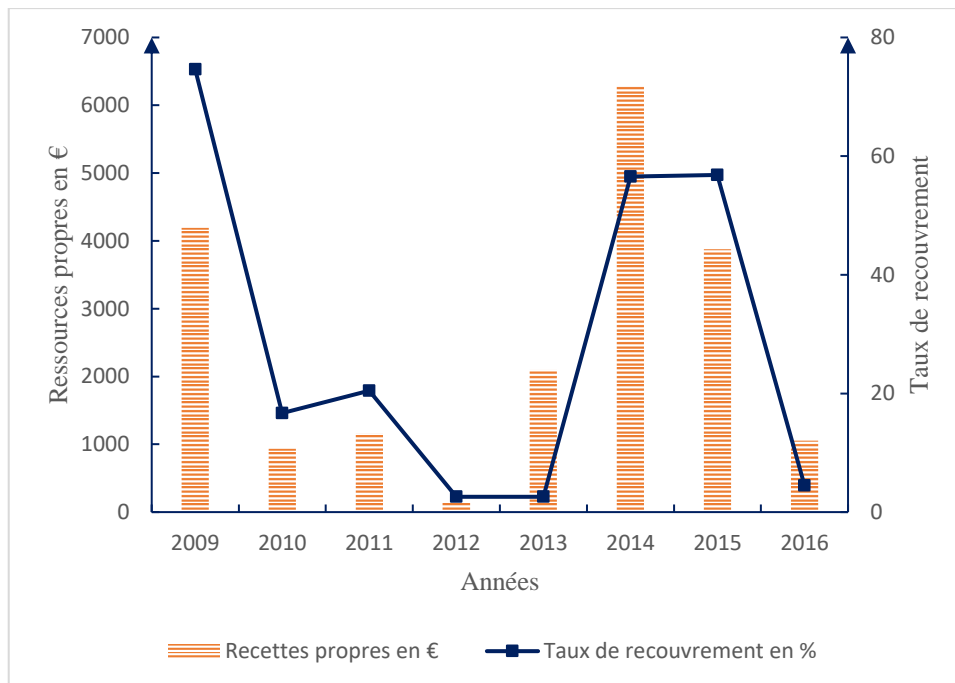


Figure 4.1. Ressources mobilisées pour l'autofinancement de la GIRE et taux de recouvrement des cotisations financières au sein du CLE-HC.

En somme, le système d'information du Comité Local de l'Eau de la Haute-Comoé, est un système dynamique de production d'informations mais la dissémination n'atteint pas l'ensemble des parties prenantes de la GIRE. L'information n'est directement accessible qu'à la dizaine de membres du Comité restreint chargé d'élaborer les plans d'allocation de l'eau. Les représentants des usagers de l'eau au sein de ce comité ne font pas toujours les restitutions des décisions prises, au sein du comité, à leur organisation. La communication demeure cependant un moyen important pour l'adhésion totale de l'ensemble des usagers de l'eau du sous-bassin versant à la GIRE. Nonobstant ces faiblesses, il n'en demeure pas moins que le cas de la Haute-Comoé reste un exemple mis en place dont plusieurs acteurs de la GIRE aux niveaux national et international s'inspirent, lors des

nombreuses visites d'échanges de résultats d'études sur le terrain que le Comité accueille fréquemment.

Cette section montre l'exemple d'un organe de gestion intégrée des ressources en eau qui, face à une mauvaise gestion de la ressource et aux conséquences inhérentes, s'est doté d'un système d'information dans la perspective de parvenir à une gestion plus rationnelle de celle-ci. Très utile aux acteurs, des améliorations peuvent toutefois y être apportées en particulier sur le volet diffusion de l'information. Il s'agira de recourir à des moyens de communication à large spectre, afin de sensibiliser le grand public qui ne doit pas être en marge de la problématique de gestion de l'eau dans le sous-bassin versant. Sa conscientisation facilitera les futures discussions au sein des différents organes de la GIRE, ses membres étant constitués majoritairement des personnes issues de ce public. Ce sont notamment les affichages sur panneaux, la communication à travers les médias de masse, les radio communautaires (Ngouambe, 2016), les annonces aux mégaphones, aux microphones et aux sifflets dans les villages (AEC, 2015).

Le renforcement du système d'information du CLE-HC par des stations hydrométriques à mesures continues (pour préciser davantage les informations, réduire la pénibilité et la lenteur du processus de collecte des données), et par un nouveau canal de diffusion de l'information, a été proposé dans le chapitre 5 suivant. Il a été effectué en restant dans l'esprit d'une co-construction avec les membres du CLE-HC pour une meilleure appropriation du dispositif. Ce système d'information hydro-agricole renforcé, fournira au Comité local de l'eau, bénéficiaire du système, des indications pour le suivi de l'usage de l'eau. Il instaurera ainsi l'équité et la transparence dans l'accès à l'information par ses membres en les aidant à prendre de bonnes décisions.

Chapitre 5 . A *WhatsApp* based information system to support agricultural water management in the Upper-Comoé river basin, Burkina Faso¹¹.

¹¹ Adapted from Palé S., Wellens J., Traoré F., Roncoli C., Sallah A-H. M., Zangré B.V.C A., and Tychon, B. A *WhatsApp* based information platform to support agricultural water management in Burkina Faso, West Africa. Submitted to *Water International*.

Chapitre 6 . Méthode d'estimation instantanée des surfaces cultivées irriguées le long des berges de la rivière Comoé à l'aide de *Google Earth Engine*¹⁴

¹⁴ Adapté de Palé, S., Wellens, J., Traoré, F., et Tychon, B. Estimation instantanée des surfaces irriguées ripariennes à l'aide de *Google Earth Engine* (Burkina Faso). Soumis à *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*.

Chapitre 7 . Adéquation de la fourniture d'eau aux groupes d'utilisateurs

L'étude comparative des besoins en eau des cultures irriguées et l'approvisionnement en eau de ces cultures s'avère très utile pour une gestion rationnelle et durable des ressources en eau à l'échelle de bassin versant (Wang *et al.*, 2019). En effet, la connaissance des besoins en eau permet d'ajuster les débits alloués par rapport aux besoins réels. Cela requiert donc la détermination préalable des besoins en eau des cultures d'une part et des volumes d'eau délivrés à ces cultures d'autre part. Dans un contexte de concurrence exacerbée autour de la ressource eau comme celui du sous-bassin versant de la Haute-Comoé, la mise en place d'un indicateur de suivi rapproché des usages d'eau constitue un précieux outil de modération pour le Comité Local de l'Eau dont l'une des missions principales est d'assurer la transparence, l'équité et la durabilité dans l'exploitation de la ressource eau. Il lui permettra de s'appuyer sur des faits tangibles pour juger les utilisateurs de l'eau, ce qui pourrait impacter positivement leur comportement dans l'exploitation de cette ressource. En effet, en l'absence de cet indicateur d'observation, les groupes d'utilisateurs sont prompts à s'accuser mutuellement : les uns reprochant aux autres d'utiliser moins rationnellement l'eau à leur détriment et vice-versa. Dans le cas spécifique de l'agrosystème de la Haute-Comoé, ce sont les crises répétées de plus en plus violentes autour des ressources en eau agricole de surface dans cette partie du Burkina Faso, qui ont conduit l'État à précipiter la création du Comité local en 2008. Celui-ci s'est progressivement imposé aux acteurs de l'eau mais manque visiblement d'un outil scientifique consensuel qui lui permet d'apprécier objectivement la bonne ou mauvaise utilisation de l'eau par les usagers du domaine agricole qui est reconnu comme l'un des secteurs le plus consommateur en eau. La mise en place d'un tel outil viendra donc renforcer sa position de facilitateur dans la gestion de l'eau au niveau du sous-bassin versant.

Plusieurs indicateurs de suivi des performances de l'utilisation de l'eau agricole à l'échelle périmétrale ont été proposés dans la littérature scientifique. Ce sont notamment la productivité, l'équité, l'efficacité, l'adéquation de la desserte en eau (Rath & Swain, 2020)... Deux des indicateurs les plus utilisés pour l'évaluation des systèmes de distribution d'eau sont l'indice d'efficacité et l'indice d'adéquation (Barkhordari *et al.*, 2020). Le critère d'adéquation défini par Molden *et al.* (1990) comme le rapport entre le volume d'eau livré et la quantité requise au cours d'une période donnée dans une zone ciblée, a été adopté pour examiner le niveau de satisfaction des besoins en eau des usagers. Une valeur de l'adéquation supérieure à 1, indiquerait qu'il y a un gaspillage d'eau tandis qu'une valeur inférieure à 1 signifierait que les besoins en eau des cultures ne sont pas satisfaits. Il y a une adéquation parfaite entre les débits alloués aux usagers et le volume requis pour les cultures, si la valeur de l'adéquation est égale à 1. Les trois groupes d'usagers agricoles de l'eau (périmètre agro-industriel de canne à sucre, périmètre aménagé rizicole et périmètre informel de maraîchage) ont-ils la possibilité de satisfaire les besoins en eau des cultures à partir des quantités d'eau qui leur sont délivrées ? Pour répondre à cette question les débits moyens journaliers délivrés aux trois groupes d'usagers ont d'abord été estimés (section 7.1) et ont ensuite été respectivement comparés à leurs besoins en eau (section 7.2) par le calcul de l'adéquation de fourniture d'eau (section 7.3). La section ci-après traite d'abord de l'estimation des débits moyens journaliers de la rivière Comoé de décembre à avril en 2018 et en 2019. Les sections 7.2 et 7.3 ont ensuite été développées à la suite de cette section.

7.1. Estimation des débits de la rivière Comoé

Les débits moyens journaliers de la rivière Comoé au cours des mois de décembre à avril ont été déterminés à partir des débits instantanés estimés au chapitre 5. En rappel, les débits instantanés ont été évalués en utilisant des hauteurs d'eau mesurées par des sondes. Cinq stations hydrométriques étaient installées dans le

sous-bassin versant de la Haute-Comoé. Chaque station hydrométrique était placée à l'entrée des zones exploitées par chaque groupe d'usagers, afin de pouvoir déterminer la quantité d'eau délivrée à l'utilisateur. Une station hydrométrique est équipée d'une échelle limnimétrique et de deux sondes : une sonde de mesure de hauteurs d'eau et une sonde barométrique. La sonde de mesure de hauteurs d'eau mesure en continu la pression d'eau au-dessus d'elle toutes les 15 minutes. Les pressions atmosphériques mesurées par les sondes barométriques sont soustraites des pressions enregistrées par la sonde. Les stations hydrométriques étaient placées dans des sections stables sur la rivière pour permettre l'estimation des débits d'eau à travers des relations établies entre les hauteurs d'eau mesurées et les débits. Dans un premier temps, une relation était déterminée entre la hauteur d'eau mesurée par la sonde et celle mesurée à l'aide de l'échelle limnimétrique. Les relations hauteurs-débits (Tableau 7.1), ont ensuite été établies par jaugeage auprès de chaque station hydrométrique.

La méthode de jaugeage par exploration du champ de vitesse au moulinet, la plus utilisée par les Services techniques de la région est celle qui a été utilisée. Le jaugeage au moulinet consiste en la détermination du débit d'un cours d'eau en mesurant, dans une section droite, la vitesse du courant en un certain nombre de points dont on mesure également la profondeur, et en faisant la somme des produits des vitesses moyennes par les aires élémentaires auxquelles elles s'appliquent.

Tableau 7.1. Equations des courbes de jaugeage aux cinq points de mesure de la zone d'étude.

| Stations | Equations hauteurs-débits | Coefficient de détermination R² |
|------------------|---|---|
| Bodadiougou | Q= 0.0326*H+0.3937 Avec : Q : débit estimé (m ³ /s) H = hauteur d'eau lues sur l'échelle limnimétrique (cm) | 0.98 |
| Tengrela | Q= 0.0229*H-0.8915 Avec : Q : débit estimé (m ³ /s) H = hauteur d'eau lues sur l'échelle limnimétrique (cm). | 0.98 |
| Diarabakoko | Q= 0.0784*exp(0.0396*H) Avec : Q : débit estimé (m ³ /s) H = hauteurs d'eau lues sur l'échelle limnimétrique (cm) | 0.87 |
| KarfiguélaCanal | Q=0.6804*H ² +0.0331*H+0.0043 Avec : Q : débit estimé (m ³ /s) | 0.99 |
| KarfiguelaFleuve | Q = 0.0002*H ² -0.0089*H+0.161 Avec : Q : débit estimé (m ³ /s) H = hauteur d'eau lues sur l'échelle limnimétrique (cm) | 0.99 |

En termes de résultats, l'évolution chronologique des valeurs moyennes journalières des débits de la saison sèche 2018 et celle de la campagne sèche 2019 sont présentées respectivement par les figures 7.1 et 7.2. Au cours de la campagne agricole sèche de 2019, on a observé des débits variant entre 0.047 m³/s en janvier à la station de KarfiguélaCanal et 2.02 m³/s en mars à la station de Bodadiougou. En 2018, les débits moyens journaliers se situaient entre 0.07 m³/s en janvier à la station de Diarabakoko et 1.60 m³/s en février à la station de Bodadiougou.

D'une manière générale, au cours de la campagne sèche, bien que les débits estimés tout au long de la rivière Comoé fluctuent en fonction des lâchers d'eau à partir du réservoir de Moussodougou (ouvertures ou fermetures de la vanne du réservoir), les débits des stations les plus en amont de l'exutoire doivent être supérieurs aux débits des stations les plus proches de l'exutoire. Les tendances

observées pour la campagne 2019 semblent normales à l'exception des valeurs de la station de Diarabakoko, pour la période allant de décembre 2018 à début février 2019, qui sont supérieures aux débits de la station de Tengrela (station plus en amont). Cette situation pourrait s'expliquer par le fait que particulièrement cette campagne-là, une section du fleuve aux environs de la station de Diarabakoko, a durant cette période longtemps été alimentée par un affluent avant de s'assécher. Les valeurs des débits de la saison sèche 2018 semblent normales. L'année 2017 a été marquée par un arrêt précoce des pluies, ce qui justifierait entre autres raisons la faiblesse générale des débits lâchés au cours de la campagne sèche 2018, comparativement à ceux de 2019. L'estimation des débits sur toutes les stations de mesure suivies dans le bassin indiquaient des valeurs extrêmes moyennes journalières par mois de l'ordre de 2 m³/s à la station le plus en amont de l'exutoire et de l'ordre de 0.20 m³/s à l'exutoire (Figures 7.1 et 7.2).

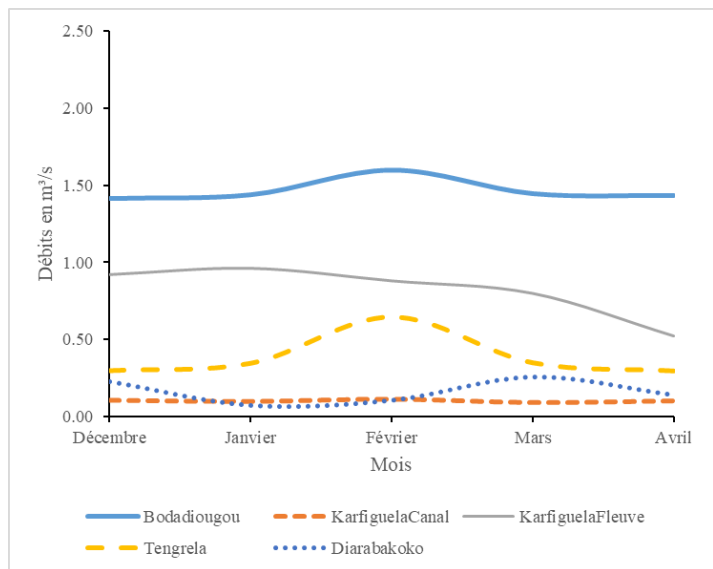


Figure 7.1. Débits moyens journaliers par mois au cours de la campagne sèche 2018.

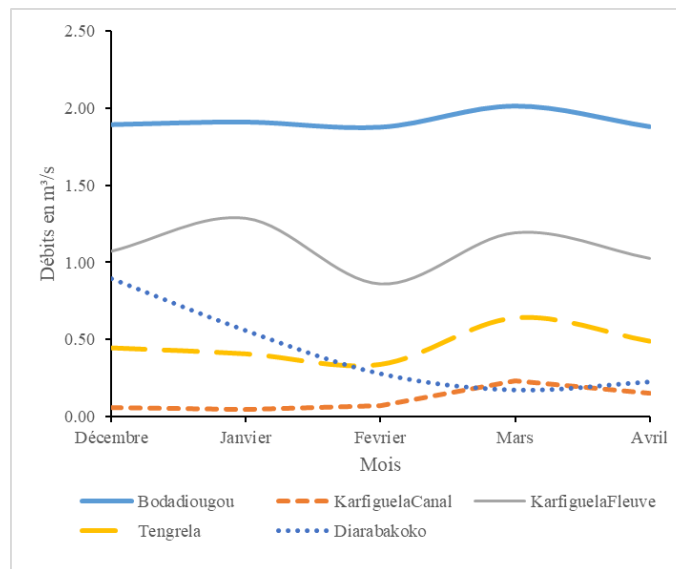


Figure 7.2. Débits moyens journaliers par mois au cours de la campagne sèche 2019.

7.2. Évaluation des besoins en eau des cultures

Les besoins en eau des cultures représentent le volume d'eau qui est consommé par le phénomène de l'évapotranspiration du couvert végétal dans les conditions agronomiques optimales de développement (Wellens et Compaoré, 2003). Dans le sous-bassin versant de la Haute-Comoé, l'ampleur des demandes en eau des usagers en général, et en particulier celui des agriculteurs riverains en aval de la plaine alluviale de Karfiguéla, est très peu connu par manque d'instrumentations scientifiques (Roncoli *et al.*, 2009). En rappel, trois principaux groupes d'usagers de l'eau installés en aval du sous-bassin versant, se partagent les ressources en eau de surface destinées à l'agriculture. Ce sont notamment les agriculteurs dits informels installés hors des périmètres aménagés, les riziculteurs du périmètre aménagé de Karfiguéla et la Société Sucrière de la Comoé (SOSUCO), producteur et transformateur de cannes à sucre. L'industrie sucrière (SOSUCO) cultive 4000 ha de canne à sucre par an, irrigué par aspersion en saison sèche tandis que le périmètre rizicole aménagé occupe 350 ha. À cause des pénuries d'eau seulement 175 ha de terres en moyenne sont emblavées en riz irrigué de manière gravitaire à chaque campagne sèche. La surface occupée par les agriculteurs informels, qui est également irriguée gravitairement en saison sèche, est estimée en moyenne à 1341.61 ha (Chapitre 6).

L'évaluation des besoins en eau des cultures a consisté d'abord en la détermination des évapotranspirations de référence pour les différentes périodes concernées (section 7.2.1) puis aux calculs des besoins en eau à proprement parler (section 7.2.2). Si pour les périmètres formels les procédures de calcul sont relativement moins complexes, dans les périmètres irrigués informels du Burkina Faso, la diversité des soles et l'application des dates de semis non uniformes par les agriculteurs, ne favorisent pas une évaluation très précise des besoins en eau des

cultures (Traoré, 2012). L'hypothèse du démarrage effectif des semis au mois de décembre pour l'ensemble des cultures a donc été considérée en tenant compte des taux d'occupation des sols par les cultures en question au cours de la campagne agricole de saison sèche. Les spéculations ayant un cycle cultural court sont supposées être ressemées à la fin du premier cycle cultural. Ces taux d'occupation des sols ont été déterminés à partir des rapports mensuels de la Direction provinciale en charge de l'agriculture et de l'irrigation qui font régulièrement état de la situation agricole dans la région.

7.2.1. Calcul de l'évapotranspiration de référence

Les évapotranspirations de référence ont été déterminées à partir des données d'évaporations 'BAC classe A' recueillies auprès de la station agrométéorologique de Bérégadougou. Les calculs ont été effectués au pas de temps journalier, en multipliant les valeurs d'évaporation Bac classe A correspondant à ce même pas de temps par les coefficients 'BAC classe A' de la période d'après l'équation 7.1 (Allen *et al.*, 1998). Les coefficients 'Bac classe A' variaient de 0.60 en décembre à 0.70 en avril. Les données d'évapotranspiration de référence (ET_0) calculées couvraient la campagne agricole de saison sèche de l'année 2018 et celle de 2019 qui s'étalent de décembre à avril.

$ET_0 = Ev * K_b$ (Equation 7.1) où :

ET_0 représente l'évapotranspiration de référence en mm/j ; Ev Représente l'évaporation BAC A en mm/j et K_b et coefficient BAC A.

7.2.2. Besoins en eau des usagers

La méthode à coefficient cultural unique proposée par le manuel *Irrigation and Drainage Paper 56* de la FAO (Allen *et al.*, 1998) pour déterminer les besoins en eau des cultures a été utilisée. Selon ces auteurs, l'évapotranspiration maximum

d'une culture donnée dans les conditions agronomiques optimales (environnements exempts de maladie avec une fertilisation adéquate et une disponibilité suffisante de l'eau du sol), qui représente ses besoins en eau, est calculée selon la formule ci-après :

$ET_c = ET_0 * K_c$ (Equation 7.2) où :

- ET_0 est l'évapotranspiration de référence ;
- K_c est le coefficient cultural de la culture dans les conditions optimales d'exploitation ;
- ET_c représente l'évapotranspiration de la culture dans ces conditions.

Les valeurs d'évapotranspiration de référence (ET_0) calculées à la section précédente ont servi au calcul des besoins en eau de chaque groupe d'utilisateurs en multipliant ces valeurs par les coefficients culturaux respectifs des cultures d'intérêts : canne à sucre (Tableau 7.2), riz irrigué (Tableau 7.3), cultures maraîchères (Tableau 7.4). L'évaluation des besoins en eau a été effectuée durant la période cruciale de la campagne sèche (décembre à avril), période pendant laquelle la compétition sur l'eau est forte. En général, le démarrage effectif de la saison pluvieuse à partir du mois de mai freine la compétition sur les ressources en eau de surface pour l'irrigation.

Les valeurs de coefficients culturaux utilisées pour la canne à sucre sont celles déterminées par Monteny *et al.* (1985) dans la même zone d'étude (Tableau 7.2) tandis que celles du riz ont été extraites du manuel *Irrigation and Drainage Paper* 56 de la FAO (Allen *et al.*, 1998). L'Organisation Mondiale pour l'Alimentation et l'Agriculture a établi des valeurs standards de K_c de différentes cultures à différents stades pour la zone climatique subhumide. Ces valeurs devront être adaptées dans les régions d'intérêt en fonction du climat. Allen *et al.* (1998) suggèrent d'ajuster les coefficients culturaux $K_{c_{mid}}$ et $K_{c_{end}}$ dans les climats où l'humidité relative minimale est différente de 45 % ou où la vitesse du vent à 2 m du sol est supérieure ou inférieure à 2.0 ms^{-1} , suivant les formules suivantes.

$$Kc_{mid} = Kc_{mid}(Tab) + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}$$

(Equation 7.3)

$$Kc_{end} = Kc_{end}(Tab) + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}$$

(Equation 7.4)

- $Kc_{mid}(Tab)$ est la valeur de Kc de la mi-saison tirée de la table du manuel FAO 56 ;
- Kc_{mid} représente le Kc_{mid} ajusté ;
- Kc_{end} représente le Kc_{end} ajusté ;
- $Kc_{end}(Tab)$ est la valeur de Kc de l'arrière-saison tirée de la table du manuel FAO 56 ;
- u_2 est la valeur moyenne journalière de la vitesse du vent à 2 m de hauteur pendant la phase de 'développement concernée (mi-saison ou arrière-saison) ;
- RH_{min} représente la valeur moyenne journalière de l'humidité relative minimale lors de la phase de développement concernée.
- h est la hauteur moyenne de la culture pendant la phase de développement concernée.

Cet ajustement donne les valeurs de coefficients cultureux ci-dessous qui tiennent compte du cycle cultural du riz irrigué dans le périmètre de Karfiguéla (Tableau 7.3).

Tableau 7.2. Valeurs de Kc de la canne à sucre dont la coupe est réalisée en novembre.

| Mois | Décembre | Janvier | Février | Mars | Avril |
|----------------|----------|---------|---------|------|-------|
| Valeur du Kc | 0.3 | 0.4 | 0.8 | 1 | 1.2 |

Source : extrait de Monteny *et al.* (1985).

Tableau 7.3. Kc moyens journaliers en fonction des stades de développement du riz irrigué.

| Phases | Phase initiale | Phase de croissance | Phase de mi-saison | Phase de fin de cycle |
|-----------|----------------|---------------------|--------------------|-----------------------|
| Mois | Décembre | Janvier | Février, Mars | Avril |
| Kc | 1.05 | 1.17 | 1.28 | 0.98 |

Source : Allen *et al.* (1998).

Pour le cas spécifique des cultures maraîchères présentant une diversité de spéculations et d'opérations culturales, pour prendre en compte, la variabilité du taux d'occupation du sol par ces cultures d'un mois à l'autre et la variabilité de la durée des cycles culturaux, un Kc moyen a été calculé en tenant compte de la fraction de sol couverte par chaque culture et de son coefficient cultural extrait de Allen *et al.* (1998). Le Kc global du champ est ainsi obtenu en pondérant le Kc de chaque culture en fonction de la fraction de surface couverte par celle-ci (équation 7.5). Le Kc du champ maraîcher à une période donné est donc égal au rapport entre d'une part la somme des produits des Kc des cultures par leurs taux de couverture du sol et la somme de leur taux de couverture du sol d'autre part.

$$Kc_{\text{champ}} = \frac{f_1 Kc_1 + f_2 Kc_2}{f_1 + f_2} \text{ (Equation 7.5) où :}$$

- f_1 et f_2 sont les fractions de surface de terre couvertes respectivement par les cultures 1 et 2 ;
- Kc_1 et Kc_2 sont les valeurs de Kc respectivement pour les cultures 1 et 2.

Au total 12 cultures : la tomate, l'oignon bulbe, la carotte, l'oignon feuille, le chou, le gombo, la courgette, le poivron, le concombre, l'aubergine, la laitue et le piment ont été identifiées et considérées dans ce cas d'étude. Leurs taux de couvertures du sol au fil de la campagne sèche ont été estimés à partir des rapports mensuels de la Direction Régionale en charge de l'agriculture. Les détails des calculs sont annexés

au présent document (Annexe 3). Les hypothèses selon lesquelles les premiers semis ont lieu en décembre et les cultures ayant un cycle cultural court comme la laitue ont été ressemées à la fin du premier cycle cultural ont été admises. Les calculs donnent les valeurs de Kc ci-dessous (Tableau 7.4).

Tableau 7.4. Kc moyen des cultures du périmètre maraîcher informel, estimé en fonction des taux d'occupation et des stades culturaux en 2018 et en 2019.

| Mois | Kc champ 2018 | Kc champ 2019 |
|----------|---------------|---------------|
| Décembre | 0.64 | 0.64 |
| Janvier | 0.84 | 0.85 |
| Février | 1.02 | 1.02 |
| Mars | 1.01 | 1.01 |
| Avril | 0.80 | 0.81 |

Les résultats indiquent que les besoins eau des différents groupes d'utilisateurs pour la campagne 2018 sont en moyenne de 4.66 mm/j pour les champs de canne à sucre, de 7.10 mm/j pour le périmètre rizicole et de 5.34 mm/j pour le périmètre informel de maraîchage (Tableau 7.5). En moyenne le périmètre rizicole a des besoins en eau plus élevés que ceux du périmètre maraîcher dont les besoins sont un peu plus élevés que ceux des parcelles de canne à sucre : respectivement 0.82, 0.62 et 0.54 l/s/ha pour les campagnes agricoles sèches de 2018 et 2019 (Tableau 7.6).

Tableau 7.5. Besoins en eau des trois usagers agricoles en mm/j, campagne 2018 et 2019.

| Mois | Périmètre sucrier | | Périmètre rizicole | | Périmètre informel | |
|----------------|-------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
| | 2018 | 2019 | 2018 | 2019 | 2018 | 2019 |
| Décembre | 1.70 | 1.45 | 5.94 | 5.09 | 3.62 | 3.13 |
| Janvier | 2.31 | 2.31 | 6.74 | 6.76 | 4.84 | 4.88 |
| Février | 5.09 | 5.23 | 8.15 | 8.37 | 6.50 | 6.70 |
| Mars | 6.63 | 7.38 | 8.49 | 9.44 | 6.70 | 7.42 |
| Avril | 7.58 | 7.14 | 6.19 | 5.83 | 5.05 | 4.74 |
| Moyenne | 4.66 | 4.70 | 7.10 | 7.10 | 5.34 | 5.37 |

Tableau 7.6. Besoins en eau des trois usagers agricoles en l/s/ha, campagne 2018 et 2019.

| Mois | Périmètre sucrier | | Périmètre rizicole | | Périmètre informel | |
|----------------|-------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
| | 2018 | 2019 | 2018 | 2019 | 2018 | 2019 |
| Décembre | 0.20 | 0.17 | 0.69 | 0.59 | 0.42 | 0.36 |
| Janvier | 0.27 | 0.27 | 0.78 | 0.78 | 0.56 | 0.56 |
| Février | 0.59 | 0.61 | 0.94 | 0.97 | 0.75 | 0.78 |
| Mars | 0.77 | 0.85 | 0.98 | 1.09 | 0.78 | 0.86 |
| Avril | 0.88 | 0.83 | 0.72 | 0.68 | 0.59 | 0.55 |
| Moyenne | 0.54 | 0.54 | 0.82 | 0.82 | 0.62 | 0.62 |

À titre indicatif, Baran (1982) dans les champs de canne irriguée par aspersion à Morondava en Madagascar (climat désertique) avait trouvé une valeur moyenne de besoin en eau de 5.38 mm/j.

Pour le cas spécifique du riz irrigué, les résultats se situent dans la plage de ceux de Wang et *al.* (2019) dans le bassin versant de Tarim au Nord-Ouest de la Chine (6.09 mm/j soit 609 mm pour 100 jours de cycle) et de Fowe et *al.*, (2015) à Boura dans le Sud du Burkina Faso (8600 m³/ha entre mi-février et mi-juin soit environ 7.16 mm/j).

D'une manière générale les besoins eau de chaque culture n'ont pas varié entre les campagnes sèches de 2018 et de 2019, les conditions agro-climatiques n'ayant pas changé très significativement entre ces deux périodes. C'est particulièrement le cas dans le périmètre informel de maraîchage où le taux d'occupation du sol des cultures en 2018, le facteur le plus déterminant dans le calcul des besoins en eau des cultures en assolement, est presque le même que celui de 2019. Peu de recherches se sont cependant intéressées à l'évaluation des besoins en eau de cultures maraîchères en assolement. En 2014, une évaluation menée par l'Agence de l'Eau des Cascades sur un échantillon de 405.03 ha donnait un besoin en eau des cultures du périmètre irrigué informel de 6.96 mm/j c'est-à-dire 6.77

millions de m³ d'eau entre les mois d'octobre et mai. Ces résultats semblent corroborer ceux trouvés *supra*.

7.3. Calcul de l'adéquation de la fourniture d'eau

Pour le calcul de l'adéquation de la desserte en eau, les besoins en eau déterminés ci-dessus ont d'abord été convertis en débits fictifs continus en m³/s suivant les surfaces respectives emblavées par chaque groupe d'utilisateurs : conversion des besoins exprimés en l/s/ha en m³/s/ha : 1 l d'eau = 1 dm³ d'eau = 0.001 m³ d'eau, puis multiplication du débit à l'hectare par la surface totale cultivée par le groupe (Tableau 7.7 et 7.8). La formule de Molden *et al.* (1990) (Equation 7.6) a ensuite été utilisée pour la détermination des indices d'adéquation. Deux scénarios ont été considérés dans la détermination de ces indices : le scénario 1 qui correspond à la situation actuelle dans la zone d'étude où chaque groupe d'utilisateurs cultive toutes ses surfaces à l'exception du périmètre rizicole qui en cultive la moitié (175 ha) et le scénario 2 qui décrit la situation où tous les utilisateurs mettent en valeur leur surface. Aménagé initialement pour être exploité uniquement en saison pluvieuse, le périmètre rizicole de Karfiguéla a aussi basculé dans la production de campagne sèche à cause de la volonté affichée de l'État de développer l'agriculture irriguée pour faire face aux aléas pluviométriques. Cependant le dimensionnement initial du réservoir de Moussodougou, réservoir à partir duquel il est alimenté ne prenait pas en compte l'option de production de campagne sèche. Cela a contraint les utilisateurs à réduire le taux d'exploitation du périmètre à environ 50 % au cours de cette période.

$P_A = Q_D / Q_R$ (Equation 7.6) où :

- P_A est l'indice d'adéquation ;
- Q_D le débit délivré et Q_R le débit requis.

Tableau 7.7. Besoins en eau des trois usagers agricoles en m³/s, campagnes 2018 et 2019 suivant les emblavures actuelles dans la zone d'étude.

| Mois | Périmètre sucrier | | Périmètre rizicole | | Périmètre informel | |
|----------------|-------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
| | 2018 | 2019 | 2018 | 2019 | 2018 | 2019 |
| Décembre | 0.79 | 0.67 | 0.12 | 0.10 | 0.56 | 0.49 |
| Janvier | 1.07 | 1.07 | 0.14 | 0.14 | 0.75 | 0.76 |
| Février | 2.36 | 2.42 | 0.17 | 0.17 | 1.01 | 1.04 |
| Mars | 3.07 | 3.42 | 0.17 | 0.19 | 1.04 | 1.15 |
| Avril | 3.51 | 3.31 | 0.13 | 0.12 | 0.78 | 0.74 |
| Moyenne | 2.16 | 2.18 | 0.14 | 0.14 | 0.83 | 0.83 |

Si le périmètre rizicole devait mettre en valeur l'ensemble de ses surfaces cultivables, ses besoins en eau passeraient en moyenne de 0.14 m³/s à 0.29 m³/s (Tableau 7.8). Le tableau 7.9 décrit les différentes étapes méthodologiques suivies dans le calcul des indices d'adéquation.

Tableau 7.8. Besoins en eau des trois usagers agricoles en m³/s, campagnes 2018 et 2019 avec une emblavure totale des surfaces cultivables du périmètre rizicole.

| Mois | Périmètre sucrier | | Périmètre rizicole | | Périmètre informel | |
|----------------|-------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
| | 2018 | 2019 | 2018 | 2019 | 2018 | 2019 |
| Décembre | 0.79 | 0.67 | 0.24 | 0.21 | 0.56 | 0.49 |
| Janvier | 1.07 | 1.07 | 0.27 | 0.27 | 0.75 | 0.76 |
| Février | 2.36 | 2.42 | 0.33 | 0.34 | 1.01 | 1.04 |
| Mars | 3.07 | 3.42 | 0.34 | 0.38 | 1.04 | 1.15 |
| Avril | 3.51 | 3.31 | 0.25 | 0.24 | 0.78 | 0.74 |
| Moyenne | 2.16 | 2.18 | 0.29 | 0.29 | 0.83 | 0.83 |

Tableau 7.9. Méthodologie d'estimation des indices d'adéquation de la desserte en eau des usagers agricoles.

| Étapes | Activités |
|--------|---|
| 1 | Évaluation des volumes d'eau délivrés aux groupes d'utilisateurs |
| 2 | Détermination des ET_0 à partir des valeurs d'évaporations BAC A ($ET_0 = E_v * K_b$) |
| 3 | Calcul des besoins en eau (Besoins en eau = $ET_0 * K_c$) en mm/j |
| 4 | Conversion des besoins (mm/j) en l/s/ha (1 mm/j = 0.115740 l/s/ha), en effet 1 l/s/ha = 8.640 mm/jour (Allen <i>et al.</i> , 1998) |
| 5 | Conversion des besoins en l/s/ha en m ³ /s/ha : 1 l d'eau = 1 dm ³ d'eau = 0.001 m ³ d'eau, puis multiplication du débit à l'hectare par la surface totale cultivée par chaque groupe d'utilisateurs |
| 6 | Calculs des indices d'adéquation selon l'équation de Molden <i>et al.</i> (1990) |
| 7 | Comparaison et interprétation des différents indices |

Les résultats indiquent que les débits alloués au périmètre agro-industriel ont satisfait ses besoins à hauteur de 92 % en 2018 et 128 % en 2019. Pour la campagne sèche 2019 les débits livrés étaient légèrement au-dessus des besoins du périmètre. Cependant, les débits fournis au périmètre rizicole n'ont pas satisfait ses besoins respectifs au cours des deux campagnes ni dans le scénario de mise en valeur partielle du périmètre rizicole (Tableau 7.10) ni dans le scénario de mise en valeur totale du périmètre (Tableau 7.11). À titre indicatif, Wellens (2014) pour le périmètre aménagé rizicole de la vallée du Kou (Sud-Ouest du Burkina Faso), avait trouvé des indices d'adéquation de la desserte en eau dudit périmètre de 0.75 en 2009 et de 0.72 en 2010.

Le périmètre informel de maraîchage n'a pu satisfaire ses besoins qu'au cours de la campagne 2018. Les utilisateurs installés plus en amont de la rivière (Comoé) semblent avoir plus de chance d'assurer leurs besoins en eau dans le scénario actuel de l'agrosystème. À l'exception du périmètre informel, le niveau de satisfaction des besoins en eau des utilisateurs pendant la campagne agricole de saison sèche 2018 est

en deçà de celle de 2019. Les débits lâchés au cours de la campagne 2018 sont inférieurs à ceux de la campagne 2019. Une gestion plus parcimonieuse des lâchers d'eau semble avoir été adoptée par le gestionnaire du réservoir de Moussodougou au cours de cette campagne 2018.

Ces résultats semblent confirmer les propos de Dezetter *et al.* (1998) qui avaient déjà signalé en 1998 que les ressources en eau de surface dans le sous-bassin sont limitées alors que les demandes sont croissantes. De même Roncoli *et al.* (2016) stipulaient qu'après la construction du réservoir de Moussodougou les débits lâchés dans la rivière Comoé étaient insuffisants pour irriguer le périmètre rizicole dans son entièreté. Enfin, Etkin *et al.* (2015) constataient que la gestion des réservoirs était très conservatrice, très prudente, en dépit d'une saison pluvieuse bien arrosée. Cette situation pourrait expliquer les faibles débits délivrés aux usagers par rapport aux besoins en campagne sèche quel que soit le volume d'eau précipitée pendant de la saison pluvieuse qui précède la campagne sèche. L'inégalité des indices d'adéquation de la fourniture d'eau aux usagers signifierait aussi que le plan d'allocation de l'eau, en dépit des ajustements qui ont lieu très souvent pour tenir compte des disponibilités en eau dans le réservoir de Moussodougou, n'est pas strictement respecté. En effet, les débits y sont proportionnellement alloués aux usagers en fonction de leurs besoins. C'est dans ce sens que le système d'information proposé *supra* peut aider à une distribution plus équitable des ressources en eau de surface.

Il existerait donc un facteur limitant 'eau' qui impacte négativement à des degrés divers les systèmes de cultures irrigués de la région. Ceci pourrait expliquer la relative faiblesse des rendements des cultures par rapport à leurs potentialités réelles. En effet, entre 2005 et 2019, le rendement moyen de la canne à sucre était de 70.31 t/ha alors qu'il est susceptible d'atteindre 100.20 t/ha (Cour, 2010). De même, le déficit d'apport en eau observé au niveau de la riziculture est probablement à l'origine des faibles rendements observées comparativement aux potentialités

agronomiques des variétés. En effet, un rendement moyen de 4.5 t/ha a été observé en 2018 et 2019, ce qui est relativement distant du potentiel de 7 t/ha de la plupart des variétés cultivées dans le périmètre en campagne sèche (Sanou *et al.*, 2017).

Les résultats indiquent par ailleurs que toutes les surfaces actuelles cultivées ne peuvent être irriguées à partir des réservoirs d'eau. S'il faut maintenir et accroître la production agricole pour assurer une sécurité alimentaire durable comme le promeut la politique nationale de promotion de l'agriculture irriguée, il est impératif d'explorer d'autres sources d'approvisionnement pour satisfaire les agriculteurs de la localité, engagés et motivés par un marché sous-régional florissant. L'orientation vers les eaux souterraines peut être une alternative durable. En effet, d'après Compaoré *et al.* (2017), la plaine alluviale de Karfiguéla disposerait d'une recharge annuelle en eau souterraine de 1 885 000 m³ et dont seulement 10 % sont jusqu'ici exploités. Si une solution 'eau souterraine n'est pas trouvée dans un proche avenir, les conflits d'usage autour de la ressource en eau de surface vont s'accroître car les agriculteurs informels continueront d'augmenter les emblavures malgré la pénurie d'eau. De même la croissance démographique galopante est également un facteur qui augmentera les besoins en eau potable dans la zone dans un proche avenir. Selon les recensements généraux de la population et de l'habitat des années 1985, 1996 et 2006, la ville de Banfora comptait respectivement 35 319, 49 724 et 75 917 habitants (Institut National de la Statistique et de la Démographie du Burkina Faso, 2019). Ces facteurs combinés à la variabilité climatique qui aggraveront de plus en plus les déficits d'eau dans les réservoirs montrent la nécessité de trouver des alternatives immédiates à la pénurie d'eau de surface pour prévenir l'amplification des conflits d'usage. En effet entre les années 1970 et 2000, la variabilité climatique aurait engendré une baisse des précipitations d'au moins 14 % et du régime des cours d'eau d'au moins 44 % dans le bassin transfrontalier de la Comoé (Kouakou *et al.*, 2007).

L'amélioration des indices d'adéquation de la fourniture d'eau passe également par l'amélioration des efficacités de transport d'eau des réservoirs aux usagers. En effet, selon Etkin *et al.* (2015) elles étaient de 75 % pour le périmètre sucrier et de 65 % pour le périmètre aménagé de Karfiguéla. Cet état de fait influe sur la disponibilité globale de l'eau pour l'irrigation à l'entrée des champs à cause des pertes élevées au cours du transport. Une réflexion profonde et inclusive qui débouche sur l'amélioration des recouvrements de la taxe de prélèvement de l'eau brute et des cotisations annuelles des membres statutaires du CLE-HC, des cotisations annuelles des membres des comités d'irrigants des agriculteurs informels et des 'redevances eau' au niveau du périmètre rizicole, devrait permettre de financer le renforcement du réseau de transport et améliorer substantiellement l'approvisionnement en eau pour le riz et le maraîchage.

Tableau 7.10. Adéquation débits fournis/besoins, campagne sèche 2018 et 2019 suivant le scénario actuel : le périmètre rizicole cultive la moitié de ses surfaces.

| Mois | Périmètre sucrier | | Périmètre rizicole | | Périmètre informel | |
|----------------|-------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
| | 2018 | 2019 | 2018 | 2019 | 2018 | 2019 |
| Décembre | 1.76 | 2.76 | 0.88 | 0.58 | 1.63 | 0.37 |
| Janvier | 1.32 | 1.75 | 0.72 | 0.37 | 1.27 | 0.96 |
| Février | 0.66 | 0.76 | 0.68 | 0.41 | 0.87 | 0.56 |
| Mars | 0.46 | 0.58 | 0.53 | 1.20 | 0.77 | 0.89 |
| Avril | 0.40 | 0.56 | 0.82 | 1.27 | 0.66 | 1.09 |
| Moyenne | 0.92 | 1.28 | 0.73 | 0.77 | 1.04 | 0.77 |

Tableau 7.11. Adéquation débits fournis/besoins, campagne sèche 2018 et 2019 suivant le scénario 2 : le périmètre rizicole cultive la totalité de ses surfaces.

| Mois | Périmètre sucrier | | Périmètre rizicole | | Périmètre informel | |
|----------------|-------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
| | 2018 | 2019 | 2018 | 2019 | 2018 | 2019 |
| Décembre | 1.76 | 2.76 | 0.44 | 0.29 | 1.63 | 0.37 |
| Janvier | 1.32 | 1.75 | 0.36 | 0.18 | 1.27 | 0.96 |
| Février | 0.66 | 0.76 | 0.34 | 0.21 | 0.87 | 0.56 |
| Mars | 0.46 | 0.58 | 0.27 | 0.60 | 0.77 | 0.89 |
| Avril | 0.40 | 0.56 | 0.41 | 0.63 | 0.66 | 1.09 |
| Moyenne | 0.92 | 1.28 | 0.36 | 0.38 | 1.04 | 0.77 |

7.4. Vers une approche *open data*

Le difficile accès à l'information et/ou aux données de terrain indispensables à la bonne gestion de l'eau destinée à l'agriculture au Burkina Faso, requiert la recherche d'alternatives efficaces. C'est dans cette perspective que le potentiel des données *open sources* (notamment celui des données NASA/POWER, FAO WaPOR) à évaluer les besoins en eau des cultures et par voie de conséquence l'indice d'adéquation de la desserte en eau, a été exploré dans cette section.

Il s'est agi précisément de comparer respectivement une distribution de données ETO observées sur le terrain aux échantillons de données ETO NASA/POWER et FAO WaPOR. Ces deux derniers échantillons ont été téléchargés aux coordonnées (-4.73° longitude, 10.75° latitude) qui sont celles de la station agrométéorologique de la zone d'étude. Avec le développement exponentiel de la télédétection, plusieurs produits d'évapotranspiration de référence ont été mis au point et sont directement accessibles librement. Cependant, s'ils n'ont pas une couverture temporelle limitée, leur résolution temporelle se situe au-delà du pas de temps journalier ; c'est le cas par exemple des produits MOD 16 A2 (huit jours) (Running *et al.*, 2017), FLDAS (mensuel) (McNally *et al.*, 2017) et GLDAS également au format mensuel (Rodell *et al.*, 2004).

La banque de données NASA/POWER (*Prediction Of Worldwide Energy Resources*) est un produit du Projet « *Power Project* » de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*, l'agence gouvernementale américaine en charge de la recherche spatiale et aéronautique) qui met à la disposition de potentiels utilisateurs en libre accès entre autres diverses séries chronologiques de données météorologiques incluant plusieurs variables à différents pas de temps (températures, pluviométrie, humidités relatives, évapotranspirations...). Ces données dérivées des modèles d'assimilation GMAO MERRA-2 et GEOS 5.12.4 FP-IT de la NASA, sont disposées en maille de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ de longitude et de latitude (NASA Langley Research Center, 2020). Elles ont une résolution temporelle initiale d'une heure. Les valeurs moyennes journalières qui proviennent des valeurs horaires ont servi aux calculs des valeurs moyennes mensuelles. Toutes ces trois types de données sont mises à la disposition du public.

La base de données FAO WaPOR élaborée par la FAO sous le financement du Ministère des Affaires Etrangères des Pays-Bas et en collaboration avec des institutions comme IHE-Delft, IWMI, VITO, l'Université de Twente, la fondation *WaterWatch*, possède plusieurs sous-bases de données sur la productivité de l'eau, l'évaporation, la transpiration, l'occupation du sol, la production de biomasse au-dessus du sol (FAO, 2018)... D'une résolution spatiale de 0.17° soit approximativement 20 km, la sous-base de données 'évapotranspiration de référence' couvre l'Afrique et le Moyen-Orient (FAO, 2018). Elle est disponible sous plusieurs échelles temporelles dont le pas de temps journalier. Elle serait constituée à travers l'équation de FAO Penman-Monteith (qui intègre le rayonnement solaire incident, les données météorologiques comme la température, l'humidité relative et la vitesse du vent) et en tenant compte du caractère spatial des données d'entrée de télédétection (FAO, 2018).

Les données d'ET0 considérées dans cette analyse sont des valeurs journalières couvrant la période allant du 01 janvier 2000 au 31 décembre 2019 pour ce qui est des bases de données observées et NASA/POWER. Les données FAO WaPOR s'étendaient du 01 janvier 2009 au 31 décembre 2019. Les valeurs observées ont été déterminées suivant la procédure décrite à la section 7.2.1. Les distributions *open source* ont été extraites de leur base de données initiales au moyen de scripts, soit via l'interface *R* (pour ce qui est de la base NASA/POWER) soit via la plateforme *Google Earth Engine* (pour ce qui est de la base FAO WaPOR). La comparaison de chaque distribution *open data* à la distribution observée a été effectuée en utilisant le test statistique de *Mann-Whitney-Wilcoxon* et celui de *Kolmogorov-Smirnov*. L'hypothèse nulle était d'affirmer *a priori* que les deux distributions sont égales avec un rejet possible si la p-valeur déterminée est inférieure au seuil de significativité de 0.05. À l'issue des comparaisons, un examen d'éventuelles corrélations qui existeraient entre les variables observées et *open source* a été effectué à travers le coefficient *r* de Bravais-Pearson (coefficient statistique qui exprime l'intensité et le sens de la relation linéaire en deux variables quantitatives (Rakotomalala, 2017)) en vue d'établir une régression linéaire entre les variables significativement corrélées.

Les résultats semblent indiquer qu'aucune distribution ET0 d'*open data* n'est significativement identique à la distribution d'ET0 observées. En revanche, la distribution des données FAO WaPOR qui semblent être mieux corrélée à la distribution observée a été utilisée pour effectuer une régression linéaire simple (Tableau 7.12, 7.13) en vue de la prédiction des valeurs ET0 observées. La capacité des données *open source* FAO WaPOR à prédire les valeurs ET0 de terrain s'est avérée satisfaisante avec des coefficients de détermination de 0.71 (Calibration) et 0.70 (validation) et des erreurs quadratiques moyennes de 1.04 (calibration) et 1.07 (validation) (Tableau 7.14, Figures 7.3 et 7.4).

Tableau 7.12. Comparaison des distributions de données de NASA POWER et FAO WaPOR avec les données observées de terrain pour la période allant du 01 janvier 2000 au 31 décembre 2019.

| Echantillons | N | Statistique W de Wilcoxon | Statistique D de Kolmogorov-Smirnov | P-Valeur | Alpha |
|--------------|------|---------------------------|-------------------------------------|-----------|-------|
| NASA POWER | 7306 | 8677044 | 0.51 | < 2.2e-16 | 0.05 |
| FAO WaPOR | 4017 | 11210699 | 0.29 | < 2.2e-16 | 0.05 |

Tableau 7.13. Résumé des statistiques du test de corrélation entre les variables ET0 observées et ET0 *open data*.

| Distributions | Coefficient r de spearman | Statistique t | P-valeur | Intervalle de confiance à 95 % | Ddl |
|---------------|---------------------------|---------------|-----------|--------------------------------|------|
| NASA POWER | 0.76 | 61.36 | < 2.2e-16 | [0.75 ; 0.78] | 4870 |
| FAO WaPOR | 0.84 | 80.61 | < 2.2e-16 | [0.83 ; 0.85] | 2676 |

NB : Ici H_0 du test t est $r = 0$.

Tableau 7.14. Résultats du modèle de régression linéaire de ET0 observées en fonction de ET0 FAO WaPOR.

| | Calibration | Validation |
|--|-------------|------------|
| <i>Ddl</i> | 2554 | 1459 |
| <i>Intercept</i> | 0.79 | - |
| <i>Coefficient de x, ET0_WaPOR</i> | 0.90 | - |
| <i>P-valeur associée à l'Intercept</i> | <2e-16 | - |
| <i>P-valeur associée au coefficient de x</i> | <2e-16 | - |
| <i>Coefficient de détermination R² ajusté</i> | 0.71 | 0.70 |
| <i>Erreur quadratique moyenne RMSE</i> | 1.04 | 1.07 |
| <i>Statistique F de Fisher</i> | 6123 | - |
| <i>P-valeur associée à la statistique F</i> | < 2.2e-16 | - |

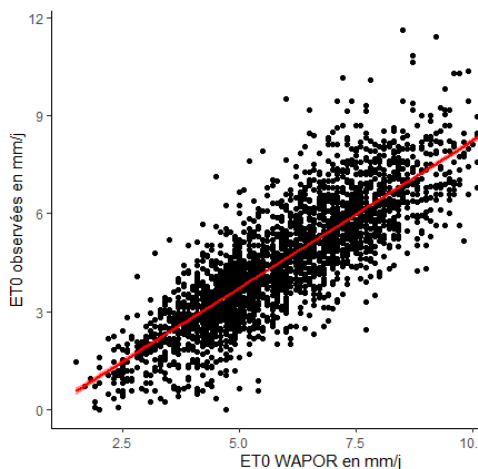


Figure 7.3. Droite de régression de calibration de ET0 observées en fonction de ET0 WaPOR.

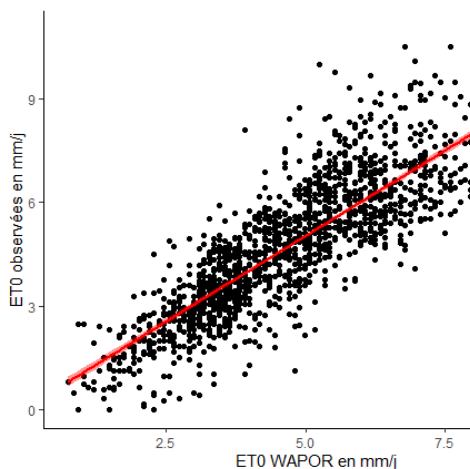


Figure 7.4. Droite de régression de validation de ET0 observées en fonction de ET0 WaPOR.

En vue d'examiner si l'on pouvait utiliser les données ET0 NASA POWER, FAO WaPOR à la place des données ET0 de terrain pour évaluer les besoins en eau

des cultures dans l'agrosystème de la Haute-Comoé, une comparaison des deux distributions de données aux données de terrain a été effectuée à travers les tests de *Mann-Whitney-Wilcoxon* et de Kolmogorov-Smirnov. Les résultats montrent que ces deux distributions sont respectivement différentes des données ET₀ de terrain et ne peuvent donc être utilisées à la place de ces données pour évaluer les besoins en eau des cultures (P-valeur < 2.2e-16). En revanche, une corrélation positive de nature linéaire et forte ($r = 0.84$) existe entre les variables ET₀ WaPOR et ET₀ observées, ce qui a permis d'établir sous l'hypothèse de normalité, une régression linéaire simple ($ET_0 \text{ observées en mm/j} = 0.90 * ET_0 \text{ WaPOR} + 0.79$) qui devra permettre d'estimer les valeurs ET₀ de terrain en fonction des valeurs ET₀ WaPOR. Avec des coefficients de détermination ajustés R^2 égalent à 0.71 (calibration) et 0.70 (validation) et des erreurs quadratiques moyennes (RMSE) de 1.04 mm/j (calibration) et 1.07 mm/j (validation), le modèle demeure une alternative pour le CLE-HC pour estimer les besoins en eau des usagers agricoles en cas d'inaccessibilité des données de terrain. Le produit ET₀ WaPOR peut donc être potentiellement utilisé pour élaborer des modèles linéaires de prédiction des valeurs ET₀ de terrain. Ce résultat semble corroborer ceux de Weerasinghe *et al.* (2020) qui, bien qu'utilisant un pas de temps annuel, mentionnaient que le produit ET₀ WaPOR était classé en troisième position parmi une dizaine de produits d'évapotranspiration évalués à travers l'Afrique. L'écart entre les valeurs observées de terrain et leurs valeurs prédites par les modèles de télédétection semble s'amenuiser au pas de temps mensuel et annuel (compensation d'erreurs).

Dans ce chapitre, les besoins en eau des cultures ont été comparés aux débits fournis aux différents groupes d'usagers agricoles, à travers l'indicateur 'adéquation de l'allocation de l'eau', un outil à la disposition du CLE-HC pour guider les actions de partage équitable et transparent de l'eau grâce à la production en temps opportun d'informations pertinentes. Il contribuera à une gestion plus efficace des ressources

en eau et par voie de conséquence à l'amélioration de la production agricole et de la sécurité alimentaire. Selon les analyses réalisées, le déséquilibre entre les besoins et l'approvisionnement en eau est réel et l'amplitude de l'écart est fonction du type de périmètre irrigué. Ce déséquilibre tend vers la non satisfaction des besoins des usagers les plus en aval de l'agrosystème pour plusieurs raisons *supra* évoquées. Cela occasionne des crises d'eau pouvant constituer un obstacle majeur au développement durable de l'agrosystème de la Haute-Comoé. La politique nationale de promotion de l'agriculture irriguée qui se caractérise par l'accroissement des superficies agricoles irriguées d'année en année pourrait être contrariée à cause du manque d'eau si d'autres sources d'approvisionnement telles les ressources en eau souterraines ne sont pas explorées. Cet outil pourra par ailleurs servir à :

- la réalisation de scénarios prospectifs au regard des indicateurs antérieures de l'adéquation de la desserte en eau et des trois facteurs évoqués plus haut (Augmentation des emblavures, accroissement des besoins en eau potable et implication de la variabilité climatique) ;
- l'anticipation de potentiels conflits ultérieurs.

Il a aussi été examiné l'apport probable des données de télédétection dans la mise en œuvre de cet outil en cas d'inaccessibilité des données de terrain. Il ressort des analyses que la base de données ET0 WaPOR de la FAO pouvait aider à l'évaluation des besoins en eau des cultures lorsque les données d'évapotranspiration de terrain sont inaccessibles.

Chapitre 8 . Conclusion générale et perspectives

8.1. Principaux résultats

L'objectif de cette recherche était d'élaborer un outil de suivi hydro-agricole dans le sous-bassin versant de la Haute-Comoé dans la perspective de contribuer à la résolution de la problématique de la gestion peu rationnelle et durable des ressources en eau de surface, dans le domaine de l'agriculture.

Pour ce faire, dans un premier temps, l'analyse qualitative de la problématique générale de gestion de l'eau a été effectuée. Cette analyse-diagnostic a permis de déceler des problèmes à savoir : la diminution des quantités d'eau des réservoirs, la défectuosité des infrastructures et des réseaux d'irrigation, la faible efficacité de l'irrigation, le manque de connaissances précises et de cadre fluide de communication entre les usagers entraînant le gaspillage de l'eau, le manque d'adéquation entre la plupart des outils proposés par les structures et projets chargés d'appuyer à la résolution du problème de la gestion efficace de l'eau agricole et les besoins des acteurs de l'eau.

Au terme de l'analyse-diagnostic, plusieurs pistes paraissaient évidentes pour la recherche de solutions à la problématique de gestion l'eau. La réhabilitation des infrastructures, la formation des agriculteurs, l'amélioration des connaissances étaient entre autres des alternatives. La solution 'amélioration des connaissances' permettant d'agir sur les comportements et paraissant prioritaire, a fait l'objet de la présente recherche. Pour ce faire, trois méthodes ont été développées, pour pallier le manque d'information et de communication qui entravent la bonne gestion de l'eau : un système d'information basé sur la plateforme de communication *WhatsApp*, une méthode instantanée d'estimation des surfaces irriguées de maraîchage le long des berges, basée sur *Google Earth Engine* et une méthode de détermination de l'indice d'adéquation de l'allocation de l'eau pour le suivi des trois grands groupes d'usagers agricoles. L'ensemble de ces trois méthodes forme un outil de suivi hydro-agricole

mis à la disposition du Comité Local de l'Eau de la Haute-Comoé. La première méthode sert principalement de moyen de vérification des lâchers d'eau programmés et des débits effectifs convenus par les parties prenantes de la gestion intégrée de la ressource en eau dans un contexte de précarité. La deuxième constitue un outil automatisé d'estimation des emblavures dans le contexte spécifique de la Haute-Comoé.

En produisant les informations à diffuser, en établissant les canaux de diffusion et le cadre relationnel (identification des besoins, premières expérimentations), les premiers jalons pour opérationnaliser une nouvelle approche de suivi de la gestion de l'eau dans le sous-bassin versant de la Haute-Comoé, sont posés. Le Comité Local de l'Eau dispose donc désormais d'un outil transparent de travail en matière de gestion de l'eau notamment pour le suivi des usages de la ressource eau dans son bassin versant. Les démarches méthodologiques ayant conduit à l'élaboration de cet outil au terme de l'analyse globale de la problématique de l'eau ont été décrites *supra*. Elles ont consisté essentiellement à la mise au point de scripts permettant de calculer de manière intuitive et rapide des indicateurs de suivi hydro-agricole. Ces scripts ont été élaborés à la suite d'enquêtes et d'analyse de données qui ont permis d'identifier les besoins des bénéficiaires et la bonne manière d'y répondre. La singularité de la méthodologie développée dans ce travail réside surtout dans les données et outils en libres accès utilisés et la prise en compte des besoins réels des acteurs de terrain. Elle constitue une nouvelle contribution dans la gestion de l'eau agricole au Burkina Faso, qui est répliquable à l'échelle des dizaines de sous-bassins versants que compte le pays.

8.2. Indices de durabilité

Le Comité Local de l'Eau de la Haute-Comoé (CLE-HC) est le destinataire de l'outil proposé. Il dispose d'un secrétariat permanent qui comprend entre autres des hydrologues, des hydrauliciens et des agronomes, issus de différentes structures

membres (Direction Générale de l'Agence de l'Eau des Cascades, Direction Régionale de l'Agriculture, Direction Régionale de l'Eau, Chambre Régionale d'Agriculture...) capables d'opérationnaliser le système et de le pérenniser. Il continuera à mettre à jour les données dans l'outil et ses différentes composantes : les cartographies via *Google Earth Engine*, la détermination de débits et la diffusion des messages *WhatsApp* à l'attention de ses membres. Si les techniques d'évaluation des surfaces et des besoins en eau d'irrigation sont rendues relativement simple d'utilisation, la technique de production des débits mérite cependant d'être davantage simplifiée pour en faciliter l'appropriation. L'accompagnement du CLE-HC pendant un certain temps par la cellule SIG de la Direction Générale des Aménagements Hydro-agricoles et de l'Irrigation, devrait lui permettre de renforcer davantage ses capacités sur les différents segments de l'outil et de pérenniser l'ensemble du système. La mise en avant du CLE-HC assurera dans une certaine mesure la durabilité de l'outil.

Plusieurs indices de durabilité de l'outil mis en place au terme de la présente recherche sont visibles à savoir premièrement la reprise par la Direction Générale de l'Agence de l'Eau des Cascades (membre du CLE-HC), du système d'information basé sur *WhatsApp Messenger*. Aussi, tout porte à croire que les dépenses courantes du système d'information qui comprennent les frais de jaugeage, de maintenance des stations et de collectes des données qui s'élèvent, à titre d'exemple pour la campagne agricole sèche 2018 à 1 109 000 FCFA, soit environ 1 691 euros, peuvent être pris en charge par les irrigants si l'on s'en tient à leur volonté manifeste de payer deux euros par campagne pour faire fonctionner le système (voir Chapitre 5). La question financière pourrait donc ne pas être le goulot d'étranglement pour la pérennisation de l'outil proposé. Du reste, les plateformes utilisées sont *open source*. L'automatisation du processus de construction du bulletin d'informations et l'amélioration de l'infographie sont également susceptibles de favoriser la durabilité de l'outil mis en place.

8.3. Limites des études réalisées

Le choix a été fait de se focaliser sur les ressources en eau agricole de surface, parce que non seulement l'agriculture est l'un des secteurs les plus consommateurs en eau mais c'est aussi autour de ce secteur que se pose, pour l'heure, avec acuité, les problèmes de gestion de la ressource 'eau'. Cependant devant l'accroissement et la multiplicité des usages et demandes ces dernières années pour l'orpaillage, l'élevage, la consommation domestique, il sera nécessaire de réfléchir dans un proche avenir, autour d'une approche globale qui tiennent compte des usagers non agricoles et des ressources en eau souterraines. Bien qu'actuellement peu valorisées dans la zone d'étude (Compaoré *et al.*, 2017), les ressources en eau souterraines pourraient constituer une alternative pérenne si les habitudes d'utilisation de l'eau s'orientent vers ces ressources. En effet, d'après les précédents auteurs, seulement 10 % des volumes d'eau souterraine renouvelable est extrait annuellement de l'aquifère de la plaine alluviale de Karfiguela, la recharge étant estimée à 1 885 000 m³ soit environ 4 % de la pluviométrie moyenne annuelle. Cette étude a révélé par ailleurs que seulement quatre villages (Karfiguéla, Kitobama, Lemourdougou et Siniena) des 12 que compte la plaine alluviale s'intéressent aux eaux souterraines. Quoique le forage de puits maraîchers de bonne qualité susceptible de durer dans le temps, exige une certaine compétence (Compaoré *et al.*, 2017), les facteurs culturels pourraient également justifier le faible intérêt des villages pour les eaux souterraines.

Une des limites de l'approche méthodologique proposée à travers cette étude, réside aussi dans le fait qu'elle a été conduite uniquement dans une zone agroécologique, le Sud-Ouest du Burkina Faso, ce qui n'offre pas la possibilité de réaliser une analyse comparative de plusieurs expériences de terrain et d'en tirer des leçons. Comme mentionné *supra*, la réplification de l'approche proposée dans d'autres zones du pays devra être une des perspectives immédiates de ce travail.

Les analyses spatiales et hydrométriques ont été conduites à l'échelle périmétrale. À défaut de réaliser une analyse par parcelle, une approche par secteur devrait permettre de mieux localiser les dysfonctionnements relatifs à la gestion de l'eau et d'en faciliter leur résolution. Cependant le défi était de proposer des méthodes souples facilement actualisables et basées sur des données libres d'accès. L'avènement de ce type de données plus fines devrait permettre de résorber cette limite.

Enfin, malgré les mesures prises (triangulation, choix d'enquêteurs neutres...) pour minimiser les faiblesses de l'approche 'enquête', les biais de courtoisie en particulier, il n'en demeure pas moins qu'elles puissent impacter les résultats des études réalisées par enquête.

Nonobstant ces faiblesses, un outil de suivi des usages de l'eau qui est susceptible d'impacter positivement la gestion de l'eau, a été proposé au terme du projet de recherche.

8.4. Perspectives

8.4.1. Perspectives pour la recherche

D'un point de vue scientifique, cette recherche a proposé un outil permettant d'arbitrer de manière scientifique des usages multi-acteurs de l'eau dans le domaine agricole. Cet outil représente également un moyen d'accès à l'information scientifique relative à l'eau. Ceci est d'une importance capitale pour un pays comme le Burkina Faso où l'accès à l'information utile et pertinente dans ce domaine demeure relativement difficile.

Il a été montré également dans les pages précédentes comment les données et outils relatifs à la télédétection satellitaire et les plateformes *open source* de communication (applications de messageries instantanées libres) peuvent aider à une meilleure gestion de l'eau, à travers la simplification, la communication et l'automatisation des procédures, une des voies pour réduire le fossé entre les produits

de la Science et leurs utilisations par les praticiens du terrain. Ce travail constitue par ailleurs un exemple qui montre comment des problèmes spécifiques de gestion de l'eau dans un pays sahélien comme le Burkina Faso, peuvent être pris en charge à travers de nouveaux canaux de communication, de nouvelles technologies de l'information et le numérique.

Conscient de l'importance d'associer le 'social' au 'technique' pour une meilleure opérationnalisation de ce dernier, la présente recherche a tenté de prendre en compte ces aspects sociaux non tangibles qui entourent la gestion de l'eau et qui conditionnent très souvent la réussite des promotions technologiques dans ce domaine, en étudiant les besoins des irrigants, l'utilisation des précédents outils promus dans la région d'étude, les difficultés socio-économiques relatives à la gestion de l'eau... Il n'en demeure pas moins que ce volet reste un vaste champ d'investigation sur lequel devraient s'orienter les prochaines recherches. L'une des questions qui demeure également est : comment exploiter les ressources naturelles du fleuve Comoé en général tout en maintenant ses fonctions socio-économiques et environnementales, notamment dans un contexte de variabilité climatique de plus en plus perceptible ?

8.4.2. Perspectives pour le développement

Du point de vue du développement, le modèle de transmission d'informations aux irrigants et autres acteurs de la GIRE proposé, est un système qui renforce la communication et l'information sur la gestion de l'eau dans l'agrosystème de la Haute-Comoé. C'est aussi un outil de surveillance du prélèvement anarchique de l'eau. L'outil proposé en permettant de détecter à tout moment le ou les groupes d'utilisateurs fautifs conformément au plan d'allocation convenu, va permettre de réduire les gaspillages d'eau, d'améliorer indirectement les rendements agricoles et ainsi que la sécurité alimentaire et l'économie de la région d'étude, qui est essentiellement basée sur l'agriculture. Du point de vue social, c'est

un des instruments qui continuera de jouer son rôle dans l'apaisement du climat social par la prévention des conflits car il facilite le dialogue entre les membres du CLE.

Aussi grâce aux résultats de cette recherche, les décideurs politiques disposent-ils désormais de plus d'informations pour gérer la problématique de l'eau dans la Haute-Comoé. Ils guideront notamment les acteurs dans la prise de décision sur la gestion de la ressource en eau de la zone d'étude. Cette recherche pourrait constituer par ailleurs un tremplin pour le développement d'un système d'information général, pour l'agriculture irriguée à l'échelle nationale au Burkina Faso, fondé sur une base de données spatialisées et facilement actualisables.

Au titre de la taxe de prélèvement de l'eau brute, la détermination automatique des emblavures dans le sous-bassin versant de la Haute-Comoé au cours des saisons sèches de production, va permettre au CLE-HC de vérifier les superficies déclarées et d'estimer les montants financiers globaux à payer par les groupes d'irrigants. L'outil défini constitue également un instrument de télécontrôle, c'est-à-dire de vérification à distance de l'application des consignes convenues au sein du Comité Local de l'Eau. Ces facteurs vont contribuer à une distribution plus équitable de l'eau. En effet, cet outil, en renseignant les usagers et autres acteurs de l'eau sur les débits et les besoins en eau, contribue au respect du cadre réglementaire (règles des tours d'eau, plan d'allocation de l'eau) mis en place par les acteurs eux-mêmes sur la distribution de l'eau. La perception de l'utilité de l'outil par les acteurs de l'eau, grâce à sa contribution au respect de ce cadre, peut contribuer à sa pérennisation.

Enfin, ce modèle d'appui à la gestion de l'eau agricole dans le sous-bassin versant de la Haute-Comoé ne résoudra cependant pas l'épineuse question du comment discipliner et contrôler l'assiduité des agriculteurs formels et informels dans l'application des opérations culturales dans les périmètres irrigués formels et informels. Une meilleure connaissance de ce sujet devra nécessiter une étude

approfondie. De même de véritables études d'impact devront être menées à moyen terme pour analyser l'impact de l'outil hydro-agricole mis en place sur la gestion de l'eau dans la zone d'étude.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abraham, B., & Ledolter, J. (1983). *Statistical Methods for Forecasting*. Hoboken, New Jersey, United States of America: John Wiley & Sons, Inc., Publication. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Agence de l'Eau des Cascades. (2014). *Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion de l'Eau de l'Espace de Compétence de l'Agence de l'Eau Des Cascades (2014-2030)*. Agence de l'Eau des Cascades, Banfora, Burkina Faso.
- Agence de l'Eau des Cascades. (2015). *Rapport Final Inventaire des occupants des berges du fleuve Comoé et estimation des besoins en eau des usagers agricoles*. Agence de l'Eau des Cascades, Banfora, Burkina Faso.
- Aharony, N. (2015). Why do students use What 's App ? – an exploratory study. *Aslib Journal of Information Management*, 67(2), 136–158.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)*. Rome, Italy: FAO, Water Resources, Development and Management Service. <https://doi.org/10.1130/REG15-p257>
- Alonso, A., Kennedy, R. E., & Murcia, C. (2016). Wetland landscape spatio-temporal degradation dynamics using the new Google Earth Engine cloud-based platform: opportunities for non-specialists. *Transactions of the ASABE*, 59, 1333–1344. <https://doi.org/10.13031/trans.59.11608>
- Anbarasi, C., & Mayilvahanan, P. (2017). Humanitarian Assistance Ontology Implementation during Disaster Management in Chennai Flood-2015 Using Text Mining Techniques. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 116(21), 729–739.
- Assemblée des Députés du Peuple du Burkina Faso. Loi N°014/96/ADP du 23 mai 1996 portant Réorganisation Agraire et Foncière au Burkina Faso (1996). Ouagadougou, Burkina Faso. Retrieved from <https://www.ecolex.org/details/legislation/loi-no-01496adp-portant-reorganisation-agraire-et-fonciere-au-burkina-faso-lex-faoc015009/>
- Ba, M., & Dakouo, D. (2005). Survival strategy of the African Rice Gall Midge, *Orseolia oryzivora* Harris & Gagné (Diptera, Cecidomyiidae) parasitoids in South-Western

- Burkina Faso. *Agronomie Africaine, N° Spécial(5)*, 11.
- Badri, M., Lubis, D. P., & Suharjito, D. (2018). Communication Risk of Stakeholders in Preventing Forest and Land Fires in Riau Province. *Jurnal Ilmiah Peuradeun*, 6(2), 179–198.
- Bakshi, S. G. (2018). WhatsApp: Is it a solution to daily human resources management in institutional practice? *Indian Journal of Anesthesia*, 62(3), 86.
- Barkhordari, S., Hashemy Shahadany, S. M., Taghvaeian, S., Firoozfar, A. R., & Maestre, J. M. (2020). Reducing losses in earthen agricultural water conveyance and distribution systems by employing automatic control systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 168(2020), 105122. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105122>
- Baron, C., & Bonnassieux, A. (2013). Gouvernance hybride, participation et accès à l'eau potable: Le cas des associations d'usagers de l'eau (AUE) au Burkina Faso. *Annales de Géographie*, 123(693), 525–548. <https://doi.org/10.3917/ag.693.0525>
- Basu, M., Ghosh, S., Jana, A., Bandyopadhyay, S., & Singh, R. (2017). Resource mapping during a natural disaster: A case study on the 2015 Nepal earthquake. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 24(2017), 24–31.
- Bégué, A., Leroux, L., Lo Seen, D., Tonneau, J. P., & Morant, P. (2016). *Observation spatiale pour l'agriculture en Afrique: potentiels et défis*. NOTES TECHNIQUES N°12, CIRAD, Janvier 2016, PARIS.
- Beloufa, F. (2016). *Conception d'un classifieur à base des règles floues*. Thèse présentée à la Faculté des Sciences-Département d'informatique, Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, Algérie.
- Berti, F. (2013). Approche du cadre logique. La méthode du cadre logique. Unité d'Economie et Développement Rural, Gembloux Agro-Bio-Tech, Gembloux Belgique.
- Bloor, M., Frankland, J., Thomas, M., & Robson, K. (2002). *Focus Groups in Social Research*. London · Thousand Oaks · New Delhi: SAGE Publications. <https://doi.org/10.4135/9781849209175>
- Borra, S., Thanki, R., & Dey, N. (2019). *Satellite image analysis: Clustering and classification*. Singapore: Springer.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45, 5–32. https://doi.org/10.1007/978-3-662-56776-0_10

- Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A., & Stone, C. J. (1984). *Classification and regression trees* (Taylor & F). CHAPMAN & HALL/CRC Boca, Boca Raton London New York Washington, D.C.
- Burek, P., Satoh, Y., Fischer, G., Kahil, M. T., Scherzer, A., Tramberend, S., Nava, L., F., Wada, Y., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., Magnuszewski, P., Cosgrove, B., Wiberg, D. (2016). *Water Futures and Solution* (Fast Track Initiative – Final Report ADA Project Number 2725-00/2014 No. WP-16-006). Schlossplatz.
- Burges, C. J. C. (1998). A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2, 121–167.
- Buttigieg, S. C., Dey, P. K., & Cassar, M. R. (2016). Combined quality function deployment and logical framework analysis to improve quality of emergency care in Malta. *International Journal of Health Care Quality Assurance*, 29(2), 123–140. <https://doi.org/10.1108/IJHCQA-04-2014-0040>
- Car, N. J., & Moore, G. A. (2011). Bridging the gap between modelling advice and irrigator solutions through empirical reasoning techniques. *MODSIM 2011 - 19th International Congress on Modelling and Simulation - Sustaining Our Future: Understanding and Living with Uncertainty*, (December), 767–773.
- Chang, H. (2015). Evaluation framework for telemedicine using the logical framework approach and a fishbone diagram. *Healthcare Informatics Research*, 21(4), 230–238. <https://doi.org/10.4258/hir.2015.21.4.230>
- Cherlet, J., & Venot, J. P. (2013). Structure and agency: Understanding water policy changes in West Africa. *Water Policy*, 15(3), 479–495. <https://doi.org/10.2166/wp.2013.086>
- CLE-HC. (2017). *Programme de lâchers d'eau/Campagne 2017-2018*. Banfora.
- CLE-HC. (2019). *Programme de lâchers d'eau/Campagne 2018-2019*. Banfora.
- CNID-B. (2009). *Diagnostic participatif et planification des actions du Périmètre Irrigué de Karfiguéla Province de la Comoé-Burkina Faso*. Projet d'Irrigation en Afrique de l'Ouest, WAIPRO, United States Agency for International Development (USAID) Burkina Faso.
- Colbert, G. B., Topf, J., Jhaveri, K. D., Oates, T., Rheault, M. N., Shah, S., Hiremath, S., Sparks, M. A. (2018). The Social Media Revolution in Nephrology Education. *Kidney International Reports*, 3(3), 519–529.

- Colin, J. (2006). *Apport de la télédétection optique à la définition d'indicateurs de performance pour l'utilisation de l'eau en agriculture*. Thèse présentée pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Louis Pasteur – Strasbourg I, Electronique, Electrotechnique, Automatique (Spécialité), Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection UMR : Télédétection). Retrieved from <https://www.theses.fr/2006STR13144>
- Compaoré, N. F., Dara, A. E., Ko, M., Dao, M. D., & Yonli, H. F. (2017). Assessment of the Exploitation Rate and Sustainability of an Alluvial Plain in Southwestern Burkina Faso. *Journal of Natural Sciences*, 6(1), 16–22. <https://doi.org/10.15640/jns.v5n2a2>
- Compaore, Y. N. F., Brouyere, S., Orban, P., & Zoundi, M. (2016). Etude des ressources en eau souterraine sur le site pilote de Karfiguéla. Programme d'Appui au Développement de l'Irrigation (PADI) Résultat 1 : Gestion durable des eaux souterraines pour l'agriculture irriguée Ouagadougou, Burkina Faso.
- Coulibaly, N. (2017). Agro-alimentaire. Comment l'Aga Khan a redressé le Burkinabè SOSUCO. Retrieved September 13, 2017, from <http://www.jeuneafrique.com/mag/450937/economie/agroalimentaire-laga-khan-a-redresse-burkinabe-sosuco/>
- Cour, J. (2010). *Gestion des eaux du bassin de la Haute-Comoé (Burkina Faso)*. Projet WAIPRO (USAID), Institut International de Gestion de l'eau (IWMI) Ouagadougou, Burkina Faso.
- Curry, E., Degeler, V., Clifford, E., Coakley, D., Costa, A., Van andel, S., Van de giesen, N., Kouroupetroglou, C., Messervey, T., Mink, J., Smit, S. (2014). Linked water data for water information management. In *11th International Conference on Hydroinformatics HIC 2014*. New York City, USA.
- D'Almeida, E. (2015). Technologies : quand WhatsApp bouscule les codes de la communication politique en Afrique. Retrieved July 19, 2018, from www.jeuneafrique.com/232769/politique/technologies-quand-whatsapp-bouscule-les-codes-de-la-communication-politique-en-afrique
- Dacos, M. (2014). Accès libre, accès ouvert, quelques précisions basiques. Retrieved April 14, 2020, from <https://bn.hypotheses.org/11434>
- Defourny, P., Bontemps, S., Bellemans, N., Cara, C., Dedieu, G., Guzzonato, E., Hagolle,

- O., Inglada, J., Nicola, L., Rabaute, T., Savinaud, M., Udroui, C., Valero, S., Bégué, A., Dejoux, J. F., El Harti, A., Ezzahar, J., Kussul, N., Labbassi, K., Lebourgeois, V., Miao, Z., Newby, T., Nyamugama, A., Salh, N., Shelestov, A., Simonneaux, V., Traore, P. S., Traore, S. S., Koetz, B. (2019). Near real-time agriculture monitoring at national scale at parcel resolution: Performance assessment of the Sen2-Agri automated system in various cropping systems around the world. *Remote Sensing of Environment*, 221(2019), 551–568. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.007>
- Demerre, S. (2013). *Recensement des activités hydro-agricoles dans le bassin versant de la Haute Comoé, Province de la Comoé, Régions des Cascades, Burkina Faso*. Travail de Fin d'Etudes en vue de l'obtention du titre de Bachelier en Agronomie, Haute Ecole Provinciale de Hainaut-Condorcet, Département Agronomie des Régions Chaudes, Belgique.
- Denis, A. (2013). *Travaux Pratiques de télédétection spatiale*. Unité Eau Environnement Développement (EED), Arlon Campus Environnement, Université de Liège, Belgique.
- Dezetter, A., Traore, S., & Bicaba, K. (1998). Gestion intégrée et variabilité des ressources en eau dans le sud-ouest du Burkina Faso. In *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century* (pp. 387–394). Proceedings of the Abidjan'98 Conference held at Abidjan, Cote d'Ivoire, November 1998). IAHS Publ.
- Direction Générale des Ressources en Eau Burkina Faso. (2010). *Les Comités Locaux de L'Eau (CLE). Maillons de base du cadre institutionnel de Gestion Intégrée des Ressources en Eau au Burkina Faso. Document Guide de Conception, Création et Fonctionnement*. DGRE, Ministère de l'Eau et de l'Assainissement Burkina Faso.
- Douxchamps, S., Ayantunde, A., & Barron, J. (2014). Taking stock of forty years of agricultural water management interventions in smallholder systems of Burkina Faso. *Water Resources and Rural Development*, 3, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.wrr.2013.12.001>
- Dowd-Uribe, B., Sanon, M., Roncoli, C., & Orlove, B. (2018). Grounding the nexus: Examining the integration of small-scale irrigators into a national food security programme in Burkina Faso. *Water Alternatives*, 11(2), 375–393.
- Dreyfus, G., Martinez, J.-M., Samuelides, M., Gordon, M. B., Badran, F., & Thiria, S. (2008). *Apprentissage statistique* (Troisième). ÉDITIONS EYROLLES 61, bd Saint-Germain

75240 Paris Cedex 05 www.editions-eyrolles.com.

- Drimaco, D., Abbattista, C., & Zotti, M. (2018). A cloud-based platform for geo-analytics production from big satellite data: Rheticus®. In *Proceedings of the International Astronautical Congress*. 69th International Astronautical Congress: Involving Everyone, Germany; 1 October 2018 through 5 October 2018.
- Dupont, J., Smitz, J., Rousseau, A. N., Mailhot, A., & Gangbazo, G. (1998). Utilisation des outils numériques d'aide à la décision pour la gestion de l'eau. *Revue Des Sciences de l'eau*, 11(1998), 5–18. <https://doi.org/10.7202/705326ar>
- Easelly. (2017). Easelly. Retrieved December 5, 2017, from www.easel.ly
- ESA. (2014). Sentinel-1 SAR GRD: C-band Synthetic Aperture Radar Ground Range Detected, log scaling. Retrieved April 29, 2020, from https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S1_GRD#bands
- Etkin, D., Kirshen, P., Watkins, D., Roncoli, C., Sanon, M., Some, L., Dembele, Y., Sanfo, J., Zoungrana, J., Hoogenboom, G. (2015). Stochastic Programming for Improved Multiuse Reservoir Operation in Burkina Faso, West Africa. *Water Resources Planning and Management*, 141(3), 1–12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000396](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000396).
- European Space Agency. (2015). *Sentinel-2 User Handbook*. ESA Standard Document. <https://doi.org/10.1021/ie51400a018>
- European Space Agency. (2020). Sentinel-1 Observation Scenario. Retrieved April 29, 2020, from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/observation-scenario>
- FAO. (2000). *Guide diagnostic participatif des contraintes et des potentialités pour la gestion des sols et des éléments nutritifs des plantes* (AGL/MISC/3). Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture Rome, 2002.
- FAO. (2011a). *L'état des ressources en terres et en eau pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde. Gérer les systèmes en danger*. Rome, Italie.
- FAO. (2011b). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW). Managing systems at risk*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92049-8_31

- FAO. (2018). *WaPOR Database Methodology: Level 2 Data Using Remote Sensing in Support of Solutions To Reduce Agricultural Water Productivity Gaps*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome Italy. Retrieved from <http://www.fao.org/3/i7315en/i7315en.pdf>
- Fontes, J., & Guinko, S. (1995). *Carte de végétation et de l'occupation d'un sol du Burkina Faso*. Notice explicative. Ministère de la coopération française, Projet campus (8813101). Toulouse: Université Paul Sabatier.
- Fowe, T., Karambiri, H., Paturel, J. E., Poussin, J. C., & Cecchi, P. (2015). Water balance of small reservoirs in the volta basin: A case study of Boura reservoir in Burkina Faso. *Agricultural Water Management*, 152, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.006>
- Gao, B.-C. (1996). NDWI- A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. *Remote Sens. Environ*, 72(2)(April), 257–266.
- Gao, Q., Zribi, M., Escorihuela, M. J., & Baghdadi, N. (2017). Synergetic use of sentinel-1 and sentinel-2 data for soil moisture mapping at 100 m resolution. *Sensors (Switzerland)*, 17(9). <https://doi.org/10.3390/s17091966>
- GEeau. (2012). *Renforcement des capacités de la DGADI et des DRAH des Cascades, des Hauts-Bassins et du Plateau Central à concevoir et à mettre en œuvre des outils opérationnels de gestion rationnelle de l'eau à usage agricole Etat des lieux–Cas des Cascades*. Ministère de l'agriculture et de l'Hydraulique, Direction Générale des Aménagements et du Développement de l'Irrigation, Burkina Faso. Retrieved from <http://www.ge-eau.org>
- GEeau. (2013). *Recensement hydro-agricole Rapport préliminaire Banfora – Novembre 2012 / Juillet 2013*. Banfora, Projet de Gestion de l'Eau Agricole, Ministère de l'Agriculture et de l'Hydraulique Burkina Faso.
- Gouvernement du Burkina Faso. (2006). *Politique Nationale de Développement Durable de l'Agriculture Irriguée. Stratégie, plan d'action, plan d'investissement à l'horizon 2015. Rapport principal*. Ouagadougou, Burkina Faso.
- Gouvernement du Burkina Faso. (2016). *Plan National de Développement Economique et Social (PNDES) 2016-2020*. Ouagadougou, Burkina Faso.
- Gouvernement du Burkina Faso. (2018). *Deuxième Programme National du Secteur Rural*

- (PNSR II) 2016-2020. Ouagadougou. Retrieved from <http://spcpsa.bf/?p=2198>
- Gouvernement du Burkina FASO. (2010). Convention constitutive du Groupement d'intérêt public/Agence de l'eau des Cascades. Burkina Faso.
- Grosjean, F., & Dommergues, J.-Y. (2012). *La Statistique en clair* (Ellipses).
- Hamdy, A. (2015). Information and Communication Technologies in Smart Water Management. In *Sixth International Scientific Agricultural Symposium*. University of East Sarajevo, Jahorina.
- Hamtméd, A., Menda, R., Benslimane, M., & Bouabdellah, L. (2008). Cartographie de l'évapotranspiration réelle journalière dans les conditions semi-arides en Algérie à partir des données satellitaires Aster. *Sécheresse*, 19(4), 293–300. <https://doi.org/10.1684/sec.2008.0152>
- Herwig, C. (2018). *Google Earth Engine. Import, export & render*. 2018 Earth Engine User Summit California, United State of America.
- Horne, J. (2015). Water Information as a Tool to Enhance Sustainable Water Management-The Australian Experience. *Water*, 7, 2161. Retrieved from www.mdpi.com/2073-4441/7/5/2161
- Hotton, M., Vincent, C., & Bergeron, F. (2014). Assessing the Use, and Readiness for Internet Videoconferencing With Practitioners and Administrators of a Rehabilitation Program for Signing Deaf Adults. *Canadian Journal of Speech-Language Pathology and Audiology*, 38(4), 424–439.
- Huang, J., Buchanan, S. M., Bishop, T. F. A., & Triantafilis, J. (2017). terraGIS – a web GIS for delivery of digital soil maps in cotton-growing areas of Australia. *Soil Use and Management*, 33(4), 568–582. <https://doi.org/10.1111/sum.12383>
- IIMI (Institut International du Management de l'Irrigation). (1997). *Analyse-diagnostic et performances de 5 périmètres irrigues autour de barrages au Burkina Faso*. Rapport Final Tome 1. Projet d'appui institutionnel. Ministère de l'Environnement et de l'Eau Burkina Faso. Projet No F/BUF/DN-AI/DMI/90/3.
- Institut National de la Statistique et de la Démographie du Burkina Faso. (2019). *Annuaire statistique 2018* (Nov. 2019). Ouagadougou, Burkina Faso: Ministère de l'Economie, des Finances et du Développement. Retrieved from http://www.stat-guinee.org/images/Publications/INS/annuelles/Annuaire_INS_Draft_2018.pdf

- Ishikawa, K. (1996). *Guide to Quality Control*. Asian Productivity Organisation, Industrial Engineering and Technology Tokyo.
- ITU. (2017). *Measuring the Information Society Report 2017* (Vol. 1). Geneva: International Telecommunication Union.
- Jacobs, A., Barnett, C., & Ponsford, R. (2010). Three Approaches to Monitoring: Feedback Systems, Participatory Monitoring and Evaluation and Logical Frameworks. *IDS Bulletin*, 41(6), 36–44. <https://doi.org/10.1111/j.1759-5436.2010.00180.x>
- Jin, Z., Azzari, G., You, C., Di Tommaso, S., Aston, S., Burke, M., & Lobell, D. B. (2019). Smallholder maize area and yield mapping at national scales with Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, 228(March), 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.016>
- Jonoski, A., Almoradie, A., Khan, K., Popescu, I., & van Andel, S. J. (2015). Google Android mobile phone applications for water quality information management. *Journal of Hydroinformatics*, 15(4), 1137–1149.
- Kambou, D. (2019). *Évaluation des performances techniques de l'irrigation au Burkina Faso*. Essai présenté en vue de l'obtention du grade de docteur en sciences agronomiques et ingénierie biologique. Université de Liège, Gembloux Agro-bio-tech.
- Khokhar, T. (2017). Chart: Globally, 70% of Freshwater is Used for Agriculture. Retrieved April 23, 2020, from <https://blogs.worldbank.org/opendata/chart-globally-70-freshwater-used-agriculture>
- Kitzinger, J., Markova, I., & Kalampalikis, N. (2004). Qu'est-ce que les focus groups? *Bulletin de Psychologie*, 57(3), 237–243.
- Kouakou, K. E., Goula, B. T. A., & Savane, I. (2007). Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau de surface en zone tropicale humide: Cas du bassin versant transfrontalier de la Comoé (Côte D'ivoire -Burkina Faso). *European Journal of Scientific Research*, 16(1), 6–9.
- Kouroupetroglou, C., Curry, E., Smit, S., Tutusaus, M., Mink, J., Koole, W., Messervey, T., Reforgiato, D., Perfido, D. (2015). WATERNOMICS: ICT for Water Resource Management. In *12th European Semantic Web Conference (ESWC), 2015*. Retrieved from www.waternomics.eu/?page_id=91
- Kpienbaareh, D., Kansanga, M., & Luginaah, I. (2019). Examining the potential of open

- source remote sensing for building effective decision support systems for precision agriculture in resource-poor settings. *GeoJournal*, 84(6), 1481–1497. <https://doi.org/10.1007/s10708-018-9932-x>
- Kralisch, S., Böhm, B., Böhm, C., Busch, C., Fink, M., Fischer, C., Schwartz, C., Selsam, P., Zander, F., Flügel, W. A. (2012). ILMS - A software platform for integrated environmental management. In *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2012 International Congress on Environmental Modelling and Software Managing Resources of a Limited Planet, Sixth Biennial Meeting, Leipzig, Germany* R. Seppelt, A.A. Voinov, S. Lange, D. B (pp. 2864–2871). Retrieved from <http://www.iemss.org/society/index.php/iemss-2012-proceedings>
- Kumar, M. D., Bassi, N., & Singh, O. P. (2020). Rethinking on the methodology for assessing global water and food challenges. *International Journal of Water Resources Development*, 36(2–3), 547–564. <https://doi.org/10.1080/07900627.2019.1707071>
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Langat, P. K., Kumar, L., Koech, R., & Ghosh, M. K. (2019). Monitoring of land use/land-cover dynamics using remote sensing: a case of Tana River Basin, Kenya. *Geocarto International*. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1655798>
- Le Page, M., Toumi, J., Khabba, S., Hagolle, O., Tavernier, A., Hakim Kharrou, M., ... Jarlan, L. (2014). A life-size and near real-time test of irrigation scheduling with a sentinel-2 like time series (SPOT4-Take5) in Morocco. *Remote Sensing*, 6(11), 11182–11203. <https://doi.org/10.3390/rs6111182>
- Leenhardt, D., Voltz, M., & Barreteau, O. (2020). *L'eau en milieu agricole. Outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale* (Quæ). Versailles: Collection Synthèses.
- Lemoine, G., & Léo, O. (2015). *Crop mapping applications at scale: using google earth engine to enable global crop area and status monitoring using free and open data sources*. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Ispra, Italy.
- Leon, F. R., Lundgren, R., Huapaya, A., Sinai, I., & Jennings, V. (2007). Challenging the Courtesy Bias Interpretation of Favorable Clients Perceptions of Family Planning

- Delivery. *Evaluation Review*, 31(1), 24–42.
- Li, S. S., & Lee, L. C. (2011). Using fishbone analysis to improve the quality of proposals for science and technology programs. *Research Evaluation*, 20(4), 275–282. <https://doi.org/10.3152/095820211X13176484436050>
- Lilja, D. J. (2016). *Linear regression using R: An introduction to data modeling* (1.0 (2016)). University of Minnesota Libraries Publishing Minneapolis, Minnesota, USA. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1702-0_5
- Loyd, C. (2013). Landsat 8 Bands. Retrieved January 21, 2020, from <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-bands/>
- Mahdianpari, M., Salehi, B., Mohammadimanesh, F., Homayouni, S., & Gill, E. (2019). The first wetland inventory map of newfoundland at a spatial resolution of 10 m using sentinel-1 and sentinel-2 data on the Google Earth Engine cloud computing platform. *Remote Sensing*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/rs11010043>
- Manley, R. . (2003). *A guide to using HYSIM*. Water resource association Ltd. Great-Britain. 105 p.
- Masuy-Stroobant, G., & Costa, R. (2013). *Analyser les données en sciences sociales. De la préparation des données à l'analyse multivariée*. Bruxelles: P.I.E. Peter Lang.
- Mateos, L., López-Cortijo, I., & Sagardoy, J. A. (2002). SIMIS: The FAO decision support system for irrigation scheme management. *Agricultural Water Management*, 56(3), 193–206. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00035-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00035-5)
- McNabb, D. E. (2019). Agriculture and Inefficient Water Use. In *Global Pathways to Water Sustainability* (pp. 99–115). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-04085-7>
- McNally, A., Arsenault, K., Kumar, S., Shukla, S., Peterson, P., Wang, S., Funk, C., Peters-Lidard, C.D., Verdin, J. P. (2017). A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications. *Scientific Data*, 4(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.12>
- Mergeai, G. (2010). Analyse-Diagnostic et amélioration des systèmes de production agricole en régions tropicales (PC 302). Gembloux Agro Bio Tech, Notes de cours à usage strictement interne à l'ULg, Année académique 2009 - 2010.
- Mills, J., Reed, M., Skaalsveen, K., & Ingram, J. (2019). The use of Twitter for knowledge exchange on sustainable soil management. *Soil Use and Management*, 35(1), 195–203.

- Ministère de l'Eau et de l'Assainissement du Burkina Faso. (2016). *Programme National pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau 2016-2030 - PNGIRE - (version définitive)*. Ministère de l'Eau et de l'Assainissement, Ouagadougou, Burkina Faso.
- Mink, J., & Lu, Y. (2015). WATERNOMICS: Low cost sensors and systems for collecting water usage in three pilots. *36th IAHR World Congress (IAHR 2015)*, 1–7.
- Molden, B. D. J., Gates, T. K., & Members, A. (1990). Performance measures for evaluation of irrigation - water - delivery systems. *J. Irrig. Drain Eng.*, *116*(6), 804–823.
- Monteny, B. A., Zeller, B., & Hainnaux, G. (1985). Estimation des besoins en eau de la canne à sucre en region soudano-sahélienne pour la conduite de l'irrigation. In *Les besoins en eau des cultures*. (p. 13). Conférence internationale, Paris. 11-14 sept. 1984. INRA, Paris, 1985.
- Murugesan, S. (2007). Second-generation Web technologies. Understanding Web 2.0. *IT Professional*, *9*(4), 34–41. <https://doi.org/10.1109/MITP.2007.78>
- Mutanga, O., & Kumar, L. (2019). Google Earth Engine Applications. *Remote Sensing*, *11*(5), 11–14. <https://doi.org/10.3390/rs11050591>
- NASA Langley Research Center. (2020). NASA Prediction of Worldwide Energy resources. The Power Project. Retrieved June 24, 2020, from <https://power.larc.nasa.gov/>
- Navarro, J. A. (2017). First Experiences with Google Earth Engine. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management* (pp. 250–255). <https://doi.org/10.5220/0006352702500255>
- Nesheim, I., Barkved, L., & Bharti, N. (2017). What Is the Role of Agro-Met Information Services in Farmer Decision-Making? Uptake and Decision-Making Context among Farmers within Three Case Study Villages in Maharashtra, India. *Agriculture*, *7*(8), 70.
- Ngouambe, N. (2016). *De la vulgarisation rapprochée à l'encadrement à distance: le pouvoir des TIC à l'ouest du Cameroun* (ICTs for agriculture No. 16/04). CTA Working Paper 16/04 | Janvier 2016.
- Olivier de Sardan, J. P. (2003). L'enquête socio-anthropologique de terrain : synthèse méthodologique et recommandations à usage des étudiants. *Etudes et Travaux*. BP 12 901, Niamey, Niger – tél. (227) 72 37 80: Laboratoire d'études et recherches sur les dynamiques sociales et le développement local, Lasdel.

- Olivier, M. (2016). Technologie : comment Whatsapp a conquis l’Afrique. Retrieved July 19, 2018, from www.jeuneafrique.com/339107/societe/technologie-whatsapp-a-conquis-lafrique
- OMM. (1994). *Guide Des Pratiques Hydrologiques Omm-N° 168* (Cinquième). Genève, Suisse: Organisation Météorologique Mondiale. Retrieved from <http://hydrologie.org/BIB/Guide4/WMO168.pdf>
- Orlove, B., Roncoli, C., & Dowd-uribe, B. (2015). Fluid entitlements : constructing and contesting water allocations in Burkina Faso, West Africa. In *Waterworlds: Anthropology in Fluid Environments* (pp. 46–74).
- Ouattara, M. (2007). *Rapport d’activité du Service Exploitation. Nouvelle Société Sucrière de la Comoé*. SN-SOSUCO, Banfora.
- Ouédraogo, A. (1997). *Synthèse des travaux effectués sur HYDRAM*. ORSTOM, L’institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération, Burkina Faso, Ouagadougou.
- Palé, S., Traoré, F., Wellens, J., & Tychon, B. (2019). Diagnostic d’un système d’information de gestion de l’eau à usage agricole dans le sous-bassin versant de la Haute-Comoé, Burkina Faso. *GEO-ECO-TROP*, 43(3, n.s.), 433–443.
- Patel, S. J., Subbiah, S., Jones, R., Muigai, F., Rothschild, C. W., Omwodo, L., Ogolla, T., Kimenju, G., Pearson, N., Meadows, A., Nour, N. M. (2018). Providing support to pregnant women and new mothers through moderated WhatsApp groups : a feasibility study. *MHealth* 2018, 4(14), 1–8.
- Paydar, Z., Cook, F., Xevi, E., & Bristow, K. (2011). An overview of irrigation mosaics. *Irrigation and Drainage*, 60(4), 454–463. <https://doi.org/10.1002/ird.600>
- Petit, O., & Baron, C. (2009). Integrated Water Resources Management: From general principles to its implementation by the state. The case of Burkina Faso. *Natural Resources Forum*, 33(1), 49–59. https://doi.org/DOI_10.1111/j.1477-8947.2009.01208.x
- Piedelobo, L., Ortega-Terol, D., del Pozo, S., Hernández-López, D., Ballesteros, R., Moreno, M. A., Molina, J. L., González-Aguilera, D. (2018). HidroMap: A new tool for irrigation monitoring and management using free satellite imagery. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(6), 1–19.

<https://doi.org/10.3390/ijgi7060220>

- Pieyns, S. A. (2017). *Evaluation des ressources en eau et des demandes sectorielles bilan besoins-ressources. Amélioration de la Connaissance et de la Gestion des Eaux au Burkina Faso*. P162723 Rapport, Banque Mondiale, 1818 H Street NW, Washington, DC 20433, USA.
- Practical Concepts Incorporated. (1979). *The Logical Framework : A Managers Guide To A Scientific Approach To Design and Evaluation*. United States Agency for International Development, 1730 Rhode Island Avenue, NW 200 Washington, DC 20036 (202) 833-1040. Retrieved from <http://usaidprojectstarter.org/sites/default/files/resources/pdfs/The-Logical-Framework-A-Managers-Guide.pdf>
- Prescott, E., Rome, C., Heinzmann, C., Hawkins, M., Marchiori, A., & Hayes, B. R. (2016). *Hydrosense: An Open Platform for Hydroclimatic Monitoring*. Department of Electrical and Computer Engineering, Department of Computer Science, Watershed Sciences and Engineering Bucknell University Lewisburg, PA. <https://doi.org/10.1109/SMARTCOMP.2016.7501695>
- Puechberty, R., Perret, C., Pitsch, S. P., Battaglia, P., Belleville, A., Bompard, P., Chauvel, G., Cousseau, J., Dramais, G., Glaziou, G. (2017). *Charte qualité de l'hydrométrie. Guide de bonnes pratiques* (Hal-026069). Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, France. Retrieved from <https://hal.inrae.fr/hal-02606950>
- Puttinaovarat, S., & Horkaew, P. (2018). Oil-Palm Plantation Identification from Satellite Images Using Google Earth Engine. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, 8(3), 720–726.
- Quivy, R., & Campenhoudt, L. V. (1995). *Manuel de recherche en sciences sociales* (1ère éd.). DUNOD.
- Raes, D., & Deckers, B. (1995). Simulation of Irrigation Water Requirements of Rice Schemes in the Senegal River Delta and Valley. In K. M. Miézan, M. C. . Woporeis, M. Dingkuhn, J. Deckers, & T. F. Randolph (Eds.), *Irrigated Rice in the Sahel: Prospects for Sustainable Development*. (pp. 411-420.). WARDA, Dakar, Senegal.
- Rakotomalala, R. (2017). *Analyse de corrélation. Etude des dépendances - Variables quantitatives*. Lyon, France: Université Lumière Lyon 2. Retrieved from

- http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/cours/cours/Analyse_de_Correlation.pdf
- Rath, A., & Swain, P. C. (2020). Evaluation of performance of irrigation canals using benchmarking techniques –a case study of Hirakud dam canal system, Odisha, India. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 26(1), 51–58. <https://doi.org/10.1080/09715010.2018.1439777>
- Raunet, M. (1985). Bas-fonds et riziculture en Afrique: Approche structurale comparative. *L'AGRONOMIE TROPICALE*, 40(3), 181–201. <https://doi.org/10.1080/0143116031000139908>
- Rodell, M., P.R. Houser, U. Jambor, J. Gottschalck, K. Mitchell, C.-J. Meng, K. Arsenault, B. Cosgrove, J. Radakovich, M. Bosilovich, J.K. Entin, J.P. Walker, D. Lohmann, and D. T. (2004). The Global Land Data Assimilation System, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85(3), 381–394.
- Roncoli, C., Dowd-Uribe, B., Orlove, B., West, C. T., & Sanon, M. (2016). Who counts, what counts: representation and accountability in water governance in the Upper Comoé sub-basin, Burkina Faso. *Natural Resources Forum*, 40(1–2), 6–20.
- Roncoli, C., Kirshen, P., Etkin, D., Sanon, M., Somé, L., Dembélé, Y., Sanfo, B. J., Zoungrana, J., Hoogenboom, G. (2009). From Management to Negotiation: Technical and Institutional Innovations for Integrated Water Resource Management in the Upper Comoé River Basin, Burkina Faso. *Environmental Management*, 44(4), 695–711.
- Roncoli, C., Orlove, B., Ungemach, C., Dowd-uribe, B., West, T. C., Milch, K., & Sanon, M. (2018). Enough is Enough : How West African Farmers Judge Water Sufficiency. *Regional Environmental Change*, 19(2), 573–585.
- Running, S., Mu, Q., & Zhao, M. (2017). MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.
- Sally, H., Léвите, H., & Cour, J. (2011). Local Water Management of Small Reservoirs : Lessons from Two Case Studies in Burkina Faso. *Water Alternatives*, 4(3), 365–382. Retrieved from <http://www.water-alternatives.org/index.php/alldoc/articles/Vol4/v4issue3/147-a4-3-6/file>
- Sanou, A. G., Dembele, K. D., Ouedraogo, I., & Dakouo, D. (2017). Problématique de mise en oeuvre du système de riziculture intensif dans les périmètres rizicoles irrigués de

- Karfiguéla et de la vallée du Kou au Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 10(6), 2693. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v10i6.23>
- Schlumberger Water Services. (2014). Manuel du Diver. Giesbeek, The Netherlands: Schlumberger Water Services. Retrieved from www.swstechnology.com
- Schowengerdt, R. A. (2007). *Remote sensing: Models and methods for image processing* (Third Edit). University of Arizona Tucson, Arizona: Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-21902-7>
- Simonneaux, V., Lepage, M., Helson, D., Metral, J., Thomas, S., Duchemin, B., Cherkaoui, M., Kharrou, H., Berjami, B., Chehbouni, A. (2009). Estimation spatialisée de l'évapotranspiration des cultures irriguées par télédétection : application à la gestion de l'irrigation dans la plaine du Haouz (Marrakech, Maroc). *Sécheresse*, 20(1), 123–130. <https://doi.org/10.1684/sec.2009.0177>
- SN-SOSUCO. (2020). SN-SOSUCO, vue d'ensemble. Retrieved July 22, 2020, from <https://snsosuco.com/fr/qui-sommes-nous/vue-densemble>
- Soto-Garcia, M., Del-Amor-Saavedra, P., Martin-Gorritz, B., & Martínez-Alvarez, V. (2013). The role of information and communication technologies in the modernisation of water user associations' management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 98, 121–130.
- Srivastava, S., Vaddadi, S., & Sadistap, S. (2018). Smartphone-based System for water quality analysis. *Applied Water Science*, 8(5), 1–13.
- Ssozi-Mugarura, F., Blake, E., & Rivett, U. (2015). Designing for Sustainability : Involving Communities in Developing ICT Interventions to Support Water Resource Management. In P. Cunningham & M. Cunningham (Eds.), *IST-Africa 2015 Conference Proceedings* (pp. 1–8). IIMC International Information Management Corporation.
- Tague, N. R. (2005). *The Quality Toolbox* (Second Edi). American Society for Quality, Quality Press, Milwaukee 53203: William A. Tony. <https://doi.org/10.1198/tech.2008.s900>
- Tonneau, J.-P., Bégué, A., Leroux, L., Augusseau, X., Faure, J.-F., Mertens, B., Pinet, C., Tomasini, L. (2019). *L'information géospatiale au service de l'agriculture africaine, un investissement essentiel pour les politiques agricoles*. Cirad, Montpellier,

- Perspective 51. <https://doi.org/https://doi.org/10.19182/agritrop/00067>
- Traoré, F. (2012). *Optimisation de l'utilisation des ressources en eau du bassin du Kou pour des usages agricoles*. Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences. Département des Sciences et Gestion de l'Environnement. Université de Liège.
- Traoré, F., Bonkougou, J., Compaoré, J., Kouadio, L., Wellens, J., Hallot, E., & Tychon, B. (2019). Using Multi-Temporal Landsat Images and Support Vector Machine to Assess the Changes in Agricultural Irrigated Areas in the Mogtedo Region, Burkina Faso. *Remote Sensing*, *11*(12), 1442. <https://doi.org/10.3390/rs11121442>
- Traoré, F., Cornet, Y., Denis, A., Wellens, J., & Tychon, B. (2013). Monitoring the evolution of irrigated areas with Landsat images using backward and forward change detection analysis in the Kou watershed, Burkina Faso. *Geocarto International*, *28*(8), 733–752. <https://doi.org/10.1080/10106049.2012.744100>
- Tsou, M., & Smith, J. (2011). *Free and Open Source Software for GIS education*. Department of Geography, San Diego State University: National Geospatial Technology Center of Excellence - Funded in part by the National Science Foundation DUE ATE #0801893, GeoTech Center.
- UNESCO. (2017). Qu'est-ce que le libre accès? Retrieved April 14, 2020, from <https://fr.unesco.org/open-access/qu'est-ce-que-le-libre-acces>
- UNESCO. (2019). *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2019. Ne laisser personne de côté*. Paris France: Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture.
- Ünsalan, C., & Boyer, K. L. (2011). *Multispectral satellite image understanding. From land classification to building and road detection*. *Advances in Computer Vision and Pattern Recognition*. Springer London Dordrecht Heidelberg New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2458-0>
- Vanino, S., Nino, P., De Michele, C., Falanga Bolognesi, S., D'Urso, G., Di Bene, C., Pennelli, B., Vuolo, F., Farina, R., Pulighe, G., Napoli, R. (2018). Capability of Sentinel-2 data for estimating maximum evapotranspiration and irrigation requirements for tomato crop in Central Italy. *Remote Sensing of Environment*, *215*(July), 452–470. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.06.035>

- Venot, J.-P., Torou, B. M., & Daré, W. (2014). Territorialisation ou spatialisation: Les agences et comités locaux de l'eau au Burkina Faso. *Espace Geographique*, 43(2), 148–163. <https://doi.org/10.3917/eg.432.0148>
- Vogels, M. F. A., de Jong, S. M., Sterk, G., Douma, H., & Addink, E. A. (2019). Spatio-temporal patterns of smallholder irrigated agriculture in the horn of Africa using GEOBIA and Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/rs11020143>
- Wadkar, S. K., Singh, K., Mohammad, A., Malhotra, R., & Kale, R. B. (2016). Identifying the factors governing attitude towards the e-Agriservice among dairy farmers in Maharashtra, India. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics*, 117(1), 1–10.
- Waldner, F., Lambert, M. J., Li, W., Weiss, M., Demarez, V., Morin, D., Marais-Sicre, C., Hagolle, O., Beret, F., Defourny, P. (2015). Land cover and crop type classification along the season based on biophysical variables retrieved from multi-sensor high-resolution time series. *Remote Sensing*, 7(8), 10400–10424. <https://doi.org/10.3390/rs70810400>
- Wang, D., Cai, X., & Wang, D. (2006). The New Blue and Green Water Paradigm: Breaking New Ground for Water Resources Planning and Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132(3), 129–132. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2006\)132](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132)
- Wang, F., Chen, Y., Li, Z., Fang, G., Li, Y., & Xia, Z. (2019). Assessment of the irrigation water requirement and water supply risk in the Tarim River Basin, Northwest China. *Sustainability (Switzerland)*, 11(18). <https://doi.org/10.3390/su11184941>
- Wang, Y. M., Traore, S., & Kerh, T. (2009). Applying evapotranspiration reference model and rainfall contribution index for agricultural water management plan in Burkina Faso. *African Journal of Agricultural Research*, 4(12), 1493–1504. Retrieved from <http://www.academicjournals.org/AJAR>
- Weerasinghe, I., Bastiaanssen, W., Mul, M., Jia, L., & Van Griensven, A. (2020). Can we trust remote sensing evapotranspiration products over Africa. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(3), 1565–1586. <https://doi.org/10.5194/hess-24-1565-2020>
- Wehrich, H. (1982). The TOWS Matrix - A Tool for Situational Analysis. *Long Range*

- Planning*, 15(2), 54–66. <https://doi.org/10.1136/bcr-2017-222123>
- Wellens, J., & Compaoré, N. F. (2003). *Renforcement de la capacité de gestion des ressources en eau dans l'agriculture moyennant des outils de suivi-évaluation*. Rapport annuel N°1: Décembre 2001-Novembre 2002 (Janvier 2003), Bobo-Dioulasso, Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques, Burkina Faso.
- Wellens, J., Derouane, J., Palé, S., Sall, M. T., & Tychon, B. (2019). Integrated Water Resources Management: past, present and future. *Geo-Eco-Trop*, 43(3, n.s.), 309–316.
- Wellens, J., Traoré, F., Diallo, M., & Tychon, B. (2013). A framework for the use of decision-support tools at various spatial scales for the management of irrigated agriculture in West-Africa. *Agricultural Sciences*, 4(8A), 9–15. <https://doi.org/10.4236/as.2013.48A002>
- Wellens, J. (2007). *Renforcement structurel de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou. Rapport technique*. Bobo-Dioulasso, Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques, Burkina Faso. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Wellens, J. (2009). *Renforcement structurel de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou (Rapport technique) (Vol. 2)*. Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques, Burkina Faso. Retrieved from www.GE-eau.org
- Wellens, J. (2014). *Un cadre pour l'utilisation des outils d'aide à la décision à diverses échelles spatiales pour la gestion de l'agriculture irriguée en Afrique de l'Ouest*. Faculté des Sciences, Université de Liège.
- Wellens, J., Traoré, F., Diallo, M., & Tychon, B. (2013). A framework for the use of decision-support tools at various spatial scales for the management of irrigated agriculture in West-Africa. *Agricultural Sciences*, 04(08), 9–15. <https://doi.org/10.4236/as.2013.48A002>
- Wesselink, A., Hoppe, R., & Lemmens, R. (2015). Not Just a Tool. Taking Context into Account in the Development of a Mobile App for Rural Water Supply in Tanzania. *Water Alternatives*, 8(2), 57–76.
- World Bank Group Water Global Practice. (2017). Water in Agriculture. Retrieved January

- 13, 2019, from <http://www.worldbank.org/en/topic/water-in-agriculture>
- World Bank Group Water Global Practice. (2018). Water. Retrieved January 13, 2019, from <http://www.worldbank.org/en/topic/water/overview>
- World Meteorological Organisation. (2012). *Technical material for water resources assessment. Technical Report Series. WMO 1095.*
- Xiong, J., Thenkabail, P. S., Gumma, M. K., Teluguntla, P., Poehnelt, J., Congalton, R. G., Yadav, K., Thau, D. (2017). Automated cropland mapping of continental Africa using Google Earth Engine cloud computing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 126, 225–244. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.01.019>
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Yéré, M. (2015). Société. Comité local de l'eau de la Haute-Comoé :le programme d'activités 2016 adopté. Retrieved May 26, 2016, from <http://news.aouaga.com/h/76166.html>

ANNEXES

Annexe 1. Exemple de programme d'allocation de l'eau établi par le CLE-HC, campagne sèche de 2018.

| Période | Karfiguéla | Maraîchers | ONEA | SOSUCO | Qrest | TOTAL | |
|--------------|------------------|------------------|----------------|-------------------|------------------|-------|-------------------|
| | m ³ | m ³ | m ³ | m ³ | m ³ | l/s | m ³ |
| Déc | 0 | 324 000 | 79 056 | 5 118 422 | 129 600 | 2 288 | 3 208 896 |
| Jan | 550 000 | 999 000 | 149 990 | 5 118 422 | 267 840 | 2 743 | 7 882 531 |
| Février | 800 000 | 1 864 000 | 145 325 | 4 760 640 | 250 560 | 3 186 | 7 799 933 |
| Mars | 600 000 | 2 000 000 | 163 382 | 5 118 422 | 267 840 | 3 143 | 8 779 795 |
| Avril | 800 000 | 500 000 | 160 704 | 4 953 312 | 259 200 | 2 670 | 7 371 648 |
| Mai | 550 000 | 300 000 | 155 347 | 4 596 134 | 267 840 | 2 289 | 6 398 698 |
| Juin | 0 | 0 | 142 560 | 4 367 520 | 259 200 | 1 935 | 4 885 920 |
| TOTAL | 3 300 000 | 5 987 000 | 996 365 | 34 032 874 | 1 702 080 | | 46 327 421 |

Source : CLE-HC (2017). Qrest = débit sanitaire du cours d'eau.

Annexe 2. Liste des membres du comité restreint/technique d'établissement du programme annuel d'allocation de la ressource eau, campagnes sèches 2018 et 2019.

| Structures | N. (2018) | N. (2019) |
|---|-----------|-----------|
| Direction Régionale de l'Eau et de l'Assainissement des Cascades | 1 | 1 |
| Direction Générale de l'Agence de l'Eau des Cascades | 1 | 1 |
| Direction Provinciale de l'Agriculture et des Aménagements Hydrauliques de la Comoé | 1 | 1 |
| Société Sucrière de la Comoé | 1 | 1 |
| Bureau régional de l'Office Nationale de l'Eau et de l'Assainissement | 1 | 1 |
| Union des Coopératives des Exploitants du Périmètre Irrigué de Kafiguéla | 1 | 1 |
| Direction Régionale de l'Environnement, de l'Économie Verte et des Changements Climatiques des Cascades | 1 | 0 |
| Chambre Régionale d'Agriculture des Cascades | 1 | 0 |
| Association pour la Gestion des Ressources des ressources naturelles et de la Faune Comoé-Léraba | 1 | 1 |
| Comités d'irrigants des villages/ Représentant des maraîchers | 1 | 2 |
| Total | 10 | 9 |

Source : CLE-HC (2017; 2019).

Annexe 3. Exemple de détermination des coefficients culturaux pour la campagne agricole sèche de 2018.

| Proportion de surfaces occupées par les cultures (f) | | | | | | | | | | | | |
|--|--------|--------------|---------|----------------|---------|-------|-----------|---------|-----------|-----------|--------|--------|
| Mois | Tomate | Oignon bulbe | Carotte | Oignon feuille | Chou | Gombo | Courgette | Poivron | Concombre | Aubergine | Laitue | Piment |
| Décembre | 0.05 | 0.17 | 0.03 | 0.06 | 0.14 | 0.02 | 0.07 | 0.02 | 0.06 | 0.19 | 0.04 | 0.15 |
| Janvier | 0.06 | 0.14 | 0.00 | 0.09 | 0.12 | 0.02 | 0.10 | 0.02 | 0.09 | 0.12 | 0.04 | 0.21 |
| Février | 0.06 | 0.14 | 0.00 | 0.09 | 0.11 | 0.02 | 0.09 | 0.02 | 0.09 | 0.11 | 0.05 | 0.21 |
| Mars | 0.06 | 0.15 | 0.00 | 0.08 | 0.11 | 0.02 | 0.09 | 0.02 | 0.08 | 0.11 | 0.05 | 0.21 |
| Avril | 0.06 | 0.15 | 0.00 | 0.09 | 0.11 | 0.02 | 0.09 | 0.02 | 0.08 | 0.11 | 0.05 | 0.21 |
| Kc | | | | | | | | | | | | |
| Mois | Tomate | Oignon bulbe | Carotte | Oignon feuille | Chou | Gombo | Courgette | Poivron | Concombre | Aubergine | Laitue | Piment |
| Décembre | 0.60 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.70 | 0.65 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.70 | 0.60 |
| Janvier | 0.88 | 0.88 | 0.88 | 0.85 | 0.88 | 0.75 | 0.80 | 0.83 | 0.80 | 0.83 | 1.00 | 0.83 |
| Février | 1.15 | 1.05 | 1.05 | 1 | 1.05 | 1.03 | 1.00 | 1.05 | 1.00 | 1.05 | 0.70 | 1.05 |
| Mars | 0.93 | 1.05 | 1.00 | 1 | 1.05 | 1.12 | 0.88 | 1.05 | 0.88 | 1.05 | 1.00 | 1.05 |
| Avril | 0.6 | 0.9 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.64 | 0.60 | 0.98 | 0.60 | 0.98 | 0.70 | 0.98 |
| Durée cycle en jour | Tomate | Oignon bulbe | Carotte | Oignon feuille | Chou | Gombo | Courgette | Poivron | Concombre | Aubergine | Laitue | Piment |
| | 120 | 150 | 90 | 140 | 120-140 | 150 | 120 | 120-160 | 120 | 120-160 | 60 | 150 |

| Somme des f*Kc | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|--------|--------------|---------|----------------|------|-------|-----------|---------|-----------|-----------|--------|--------|-------|
| Mois | Tomate | Oignon bulbe | Carotte | Oignon feuille | Chou | Gombo | Courgette | Poivron | Concombre | Aubergine | Laitue | Piment | Somme |
| Décembre | 0.03 | 0.12 | 0.02 | 0.04 | 0.10 | 0.02 | 0.04 | 0.01 | 0.04 | 0.11 | 0.03 | 0.09 | 0.64 |
| Janvier | 0.05 | 0.12 | 0.00 | 0.07 | 0.10 | 0.01 | 0.08 | 0.01 | 0.07 | 0.10 | 0.04 | 0.17 | 0.84 |
| Février | 0.07 | 0.15 | 0.00 | 0.09 | 0.12 | 0.02 | 0.09 | 0.02 | 0.09 | 0.12 | 0.04 | 0.22 | 1.02 |
| Mars | 0.06 | 0.15 | 0.00 | 0.08 | 0.12 | 0.02 | 0.08 | 0.02 | 0.07 | 0.12 | 0.05 | 0.22 | 1.01 |
| Avril | 0.04 | 0.13 | 0.00 | 0.06 | 0.08 | 0.01 | 0.05 | 0.02 | 0.05 | 0.11 | 0.04 | 0.20 | 0.80 |

| Somme des f | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------------|---------|----------------|------|-------|-----------|---------|-----------|-----------|--------|--------|-------|
| Mois | Tomate | Oignon bulbe | Carotte | Oignon feuille | Chou | Gombo | Courgette | Poivron | Concombre | Aubergine | Laitue | Piment | Somme |
| Décembre | 0.05 | 0.17 | 0.03 | 0.06 | 0.14 | 0.02 | 0.07 | 0.02 | 0.06 | 0.19 | 0.04 | 0.15 | 1.0 |
| Janvier | 0.06 | 0.14 | 0.00 | 0.09 | 0.12 | 0.02 | 0.10 | 0.02 | 0.09 | 0.12 | 0.04 | 0.21 | 1.0 |
| Février | 0.06 | 0.14 | 0.00 | 0.09 | 0.11 | 0.02 | 0.09 | 0.02 | 0.09 | 0.11 | 0.05 | 0.21 | 1.0 |
| Mars | 0.06 | 0.15 | 0.00 | 0.08 | 0.11 | 0.02 | 0.09 | 0.02 | 0.08 | 0.11 | 0.05 | 0.21 | 1.0 |
| Avril | 0.06 | 0.15 | 0.00 | 0.09 | 0.11 | 0.02 | 0.09 | 0.02 | 0.08 | 0.11 | 0.05 | 0.21 | 1.0 |

| Mois | Kc champ |
|----------|----------|
| Décembre | 0.64 |
| Janvier | 0.84 |
| Février | 1.02 |
| Mars | 1.01 |
| Avril | 0.80 |

Annexe 4. Matrice d'analyse SWOT d'après Wehrich (1982).

| | | |
|-----------------------|------------------------------|----------------------------------|
| | <u>Forces</u> : | <u>Faiblesses</u> : |
| <u>Opportunités</u> : | <u>Forces Opportunités</u> : | <u>Faiblesses Opportunités</u> : |
| <u>Menaces</u> : | <u>Forces Menaces</u> : | <u>Faiblesses Menaces</u> : |

Annexe 5. Fiche d'enquête socio-économique auprès des maraîchers.

Enquête socio-économique auprès des maraîchers de la plaine alluviale de Karfiguela

Janvier 2018 - DRAAH-Cascades

Aval des barrages de Moussodougou, Lobi & Toussiana

I-Identité & volet social

| | | | |
|--|----------------------|---|----------------------|
| 1. Date de l'enquête | <input type="text"/> | 7. Structure d'appartenance | <input type="text"/> |
| 2. Nom de l'enquêteur | <input type="text"/> | 8. Localité où siège la structure d'appartenance | <input type="text"/> |
| 3. Nom du répondant | <input type="text"/> | 9. Quel est votre statut matrimonial? <input type="radio"/> 1. Marié(e) <input type="radio"/> 2. Célibataire <input type="radio"/> 3. Veuf/veuve | |
| 4. Sexe <input type="radio"/> 1. Masculin <input type="radio"/> 2. Féminin | | 10. Combien de femmes avez-vous? | <input type="text"/> |
| 5. Village d'appartenance | <input type="text"/> | 11. Nombre d'enfants | <input type="text"/> |
| 6. Niveau d'instruction le plus élevé <input type="radio"/> 1. Alphabétisé <input type="radio"/> 2. Non alphabétisé <input type="radio"/> 3. Primaire <input type="radio"/> 4. Secondaire <input type="radio"/> 5. BAC <input type="radio"/> 6. Université | | 12. Quel est le nombre d'enfants scolarisés | <input type="text"/> |
| | | 13. Catégorie sociale <input type="radio"/> 1. Vieux <input type="radio"/> 2. Jeune <input type="radio"/> 3. Enfant | |

II-Volet économique

| | | | |
|--|----------------------|---|----------------------|
| 14. Quelles spéculations maraîchères avez-vous cultivées cette campagne? | <input type="text"/> | 22. Combien de fois avez-vous cultivé vos terres maraîchères au cours de la campagne passée? | <input type="text"/> |
| 15. Quelle est la superficie totale de vos parcelles de cette campagne? | <input type="text"/> | 23. Combien de personnes travaillent avec vous dans le maraîchage? <i>Homme; Femme;</i> | <input type="text"/> |
| 16. Quelle superficie totale avez-vous emblavée l'année passée? | <input type="text"/> | 24. D'après vous, pourquoi il y a un engouement pour la production dans votre région ces dernières années? | <input type="text"/> |
| 17. Quelle quantité avez-vous récoltée la campagne passée? | <input type="text"/> | 25. Combien de personnes avez-vous en charge? <i>Homme; Femme;</i> | <input type="text"/> |
| 18. Qu'avez-vous fait des récoltes de l'année passée? <input type="checkbox"/> 1. Vendue <input type="checkbox"/> 2. autoconsommée <input type="checkbox"/> 3. dons <input type="checkbox"/> 4. autres <i>Vous pouvez cocher plusieurs cases.</i> | | 26. Utilisez-vous une motopompe? <input type="radio"/> 1. Oui <input type="radio"/> 2. Non | |
| 19. Quelle est la quantité vendue? | <input type="text"/> | 27. Si 'Oui', précisez la capacité: | <input type="text"/> |
| 20. Qu'avez-vous obtenu des ventes en termes monétaires? | <input type="text"/> | 28. Combien de fois irriguez-vous vos parcelles au cours de la semaine? | <input type="text"/> |
| 21. A combien estimez-vous les bénéfices obtenus | <input type="text"/> | 29. Combien de temps prenez-vous généralement pour irriguer la totalité de vos parcelles? | <input type="text"/> |
| | | 30. J'arrive à satisfaire mes besoins en eau d'irrigation <input type="radio"/> 1. Toujours <input type="radio"/> 2. parfois <input type="radio"/> 3. jamais | |

III-Exploitations des Ressources en eau souterraines

31. Utilisez-vous les ressources en eau souterraines?

1. Oui 2. Non

32. Pourquoi?

33. Quelle source d'eau utilisez-vous pour vos activités de maraîchage?

1. Fleuve Comoé 2. rivière Yannon
 3. lac tengrela 4. lac karfiguela
 5. lac lemourougou 6. puits
 7. forage 8. autre (précisez)

Vous pouvez cocher plusieurs cases (4 au maximum).

IV-Usage des TIC & communication

34. Possédez-vous un ordinateur?

1. Oui 2. Non

35. Si 'oui', pour quoi faire?

36. Possédez-vous un cellulaire?

1. Oui 2. Non

37. Si 'Oui', pour quoi faire?

38. J'utilise Facebook.

1. Vrai 2. Faux

39. Si 'Vrai', Pour quoi faire?

40. J'utilise Whats:App.

1. Vrai 2. Faux

41. Si Vrai, pourquoi faire?

42. J'utilise le courrier électronique (email).

1. Vrai 2. Faux

43. Si 'Vrai pour quoi faire'?

44. Pensez-vous utile de vous informer régulièrement, sur les volumes d'eau disponibles dans les barrages et les débits réels arrivant, chez chaque usager de l'eau agricole y compris vous ?

1. Oui 2. Non

45. Si 'Oui pourquoi, si non pourquoi':

46. Seriez-vous prêt à contribuer financièrement pour que cela soit possible ?

1. Oui 2. Non

47. De combien par exemple par campagne?

48. Si oui, à quelle fréquence souhaiteriez-vous avoir l'information?

1. Chaque heure 2. chaque jour
 3. chaque trois jours 4. chaque semaine
 5. chaque deux semaine 6. chaque mois
 7. autre (précisez)

Annexe 6. Exemple de fiche d'enquête par questionnaire pour l'évaluation du bulletin d'information, campagne sèche 2019.

| Evaluation du bulletin d'informations sur les débits d'eau de la Haute-Comoé | |
|---|--|
| <p>Mars 2019 - PAD1 EF102</p> <p>Enquête par questionnaire sur le bulletin diffusé.</p> | |
| I-Identité de l'enquêté | |
| <p>1. Date de l'enquête <input style="width: 100%;" type="text"/></p> | <p>4. Age <input style="width: 100%;" type="text"/></p> <p><i>La réponse doit être comprise entre 10 et 100.</i></p> |
| <p>2. Nom du répondant <input style="width: 100%;" type="text"/></p> | <p>5. Structure <input style="width: 100%;" type="text"/></p> |
| <p>3. Sexe <input type="radio"/> 1. M <input type="radio"/> 2. F</p> | |
| II-Recours aux bulletins | |
| <p>6. Recevez-vous le bulletin diffusé chaque semaine via WhatsApp? <input type="radio"/> 1. Oui <input type="radio"/> 2. Non</p> | <p>10. Combien de bulletins avez-vous lus? <input style="width: 100%;" type="text"/></p> |
| <p>7. Téléchargez-vous le bulletin quand il est envoyé dans le groupe? <input type="radio"/> 1. Toujours <input type="radio"/> 2. Parfois <input type="radio"/> 3. Rarement <input type="radio"/> 4. Jamais <i>Si non'fin de l'enquête.</i></p> | <p>11. Que pensez-vous de l'affirmation suivante: Le bulletin d'information m'a été utile au moins une fois. <input type="radio"/> 1. Vrai <input type="radio"/> 2. Faux</p> |
| <p>8. Combien de bulletins avez-vous téléchargés cette campagne? <input style="width: 100%;" type="text"/></p> | <p>12. Si vrai (suite question 11), combien de fois le bulletin vous a-t-il été utile? <i>Si faux' passer à la question 14</i></p> |
| <p>9. Quel mot choisirez-vous pour compléter la phrase suivante: 'Je lis le bulletin quand il est envoyé dans le groupe'. <input type="radio"/> 1. Toujours <input type="radio"/> 2. Parfois <input type="radio"/> 3. Rarement <input type="radio"/> 4. Jamais</p> | <p>13. Si vrai (suite question 11), à quelles occasions le bulletin vous a-t-il été utile? <input style="width: 100%;" type="text"/></p> |
| III-Perspectives & Effets immédiats | |
| <p>14. Y a-t-il un intérêt particulier pour vous de recevoir régulièrement ce bulletin? <input type="radio"/> 1. Oui <input type="radio"/> 2. Non</p> | <p>19. A quoi cela est dû? <input style="width: 100%;" type="text"/></p> <p><i>Suite question précédente</i></p> |
| <p>15. Pourquoi (suite question 14)? <input style="width: 100%;" type="text"/></p> | <p>20. La diffusion du bulletin d'informations a-t-elle occasionné des effets positifs dans la gestion de l'eau? <input type="radio"/> 1. Oui <input type="radio"/> 2. Non</p> |
| <p>16. D'après vous le volume d'eau lâché à partir du barrage de Mousso dougou a-t-il augmenté ou diminué ces derniers temps? augmenté/diminué? <input type="radio"/> 1. Augmenté <input type="radio"/> 2. diminué</p> | <p>21. Si oui lesquels? <input style="width: 100%;" type="text"/></p> <p><i>Suite question précédente</i></p> |
| <p>17. A quoi cela est dû? <input style="width: 100%;" type="text"/></p> <p><i>Suite question précédente</i></p> | <p>22. La diffusion du bulletin d'informations a-t-elle occasionné des changements négatifs dans la gestion de l'eau? <input type="radio"/> 1. Oui <input type="radio"/> 2. Non</p> |
| <p>18. D'après vous le volume d'eau à délivrer au périmètre de Karfiguèla est-il respecté? <input type="radio"/> 1. Très souvent <input type="radio"/> 2. souvent <input type="radio"/> 3. rarement <input type="radio"/> 4. jamais</p> | <p>23. Si oui lesquels? <input style="width: 100%;" type="text"/></p> <p><i>Suite question précédente</i></p> |
| | <p>24. Voulez-vous ajouter quelque chose pour terminer? <input style="width: 100%;" type="text"/></p> |

Annexe 7. Exemple de fiche d'enquête par questionnaire pour l'évaluation des outils promus par les Projets GEeau et PADI-BF 102.

QUESTIONNAIRE 2, adressé aux individus bénéficiaires directs.

Agents des différentes structures bénéficiaires, par lesquels les outils ont été introduits dans les structures.

Merci beaucoup pour votre disponibilité à renseigner ce questionnaire.

I-Identification et utilisation des outils

1. Nom et prénom du répondant

2. Niveau d'étude

1. Primaire 2. Secondaire 3. BAC 4. BAC+1 5. BAC+2 6. BAC+3 7. BAC+4 8. BAC+5
 9. BAC+6 10. Doctorat

3. Structure d'appartenance

4. Localité où siège la structure d'appartenance

5. Connaissez-vous le projet GEeau/PADI-BF-102?

1. Oui 2. Non

6. Savez-vous que le projet GEeau/PADI-BF102, a développé des outils d'aide à la décision pour la gestion de l'eau à usage agricole?

1. Oui 2. Non

7. Si oui, lesquels?

8. Avez-vous bénéficié de ces outils?

1. Oui 2. Non

9. Si oui, lesquels?

10. Utilisez-vous ces outils?

1. Oui 2. Non

11. Si oui, lesquels?

12. Comment ces outils vous servent-ils?

13. Si non, pourquoi n'utilisez-vous pas ces outils?

(Suite question 10)

14. Utilisez-vous d'autres outils d'aide à la décision?

1. Oui 2. Non

15. Si oui, lesquels?

16. Pour quoi faire?

17. Avez-vous bénéficié des formations du Projet GEeau/PADI/BF102?

1. Oui 2. Non

18. Si oui, lesquelles?

19. Avez-vous valorisé ces formations?

1. Oui 2. Non

20. Si oui comment?

21. Si non, pourquoi?

22. Avez-vous bénéficié du matériel du projet PADI/Projet GEeau

1. Oui 2. Non

23. Si oui, lesquels?

| |
|--|
| |
|--|

II-Compétences du bénéficiaire

Voici quelques affirmations à l'égard desquelles nous vous demandons d'exprimer votre degré d'accord ou de désaccord

| | 1 | 2 |
|--|-----------------------|-----------------------|
| 24. Nous avons les compétences nécessaires pour comprendre les outils CEau/PADI-BF102. | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 25. Nous avons les compétences nécessaires pour apprécier des outils CEau/PADI | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Pas du tout d'accord (1), Tout à fait d'accord (2).

III-Satisfaction des besoins du bénéficiaire par l'outil

L'outil mis à notre disposition satisfait à nos besoins.

| | 1 | 2 | 3 |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 26. AquaCrop | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 27. BUDGET | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 28. ArcGIS | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 29. QGIS | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 30. SIMS | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 31. ENVI | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 32. AgroMetShell | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 33. Google Earth | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 34. Suivi hydraulique | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 35. HYSIM | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 36. ArcSWAT | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 37. BIRIZ | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 38. BIRIZ Intégré à un SIG | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 39. Approche intégrée de suivi de l'extension des activités agricoles dans un bassin | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 40. Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle du bassin versant du Kou au Burkina Faso | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Vrai (1), Faux (2), Je ne connais pas l'outil (3).

IV-Capacité d'action du bénéficiaire en faveur de l'utilisation des outils

Comment appréciez-vous ces affirmations suivantes.

| | 1 | 2 |
|---|-----------------------|-----------------------|
| 41. Notre structure a les moyens financiers nécessaires pour mettre en oeuvre les outils. | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 42. Notre structure a les moyens techniques nécessaires pour mettre en oeuvre les outils. | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 43. Notre structure a les moyens humains nécessaires pour mettre en oeuvre les outils | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Vrai (1), Faux (2).

IV-Intégration/utilité de l'outil dans la mise en oeuvre de la lettre de mission du bénéficiaire

44. Les outils utilisés contribuent dans la mise en oeuvre de ma lettre de mission.

1. Vrai 2. Faux

A quelle fréquence utilisez-vous ces outils?

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 45. AquaCrop | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 46. BUDGET | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 47. ArcGIS | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 48. QGIS | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 49. SIMIS | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 50. ENVI | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 51. AgroMetShell | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 52. Google Earth | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 53. Suivi hydraulique | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 54. HYSIM | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 55. ArcSWAT | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 56. BIRIZ | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 57. BIRIZ intégré à un SIG | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 58. Approche intégrée de suivi de l'extension des activités agricoles dans un bassin | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 59. Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle du bassin versant du Kou au Burkina Faso | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Chaque jour (1), Une fois par semaine (2), Une fois par mois (3), Une fois par trimestre (4), Une fois tous les six mois (5), Une fois par an (6), Jamais utilisé (7).

Annexe 8. En image, deux des cinq stations hydrométriques installées dans la zone d'étude.

