

Développement d'un outil d'aide à la décision pour la mise en place de systèmes d'irrigation familiaux pressurisés dans la région de Huánuco, Pérou

Auteur : Magain, Cédric

Promoteur(s) : Wellens, Joost

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/15818>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Développement d'un outil d'aide à la décision pour la mise en place de systèmes d'irrigation familiaux pressurisés dans la région de Huánuco, Pérou

Magain Cédric

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DU MASTER
BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

Année académique 2021 - 2022

Promoteur : DR IR WELLENS JOOST

«© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.»

«Le présent document n'engage que son auteur.»

Développement d'un outil d'aide à la décision pour la mise en place de systèmes d'irrigation familiaux pressurisés dans la région de Huánuco, Pérou

Magain Cédric

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DU MASTER
BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

Année académique 2021 - 2022

Promoteur : DR IR WELLENS JOOST

Ce travail de fin d'études a été réalisé en collaboration avec les ONG Iles de Paix Belgique et Iles de Paix Pérou.

Le voyage réalisé dans le cadre du présent travail a été rendu possible grâce au soutien financier de l'Académie de recherche et d'enseignement supérieur de la Fédération Wallonie-Bruxelles, Belgique, dans le cadre de sa politique de Coopération au développement.

Remerciements

Je tenais tout d'abord, à remercier mon promoteur académique, le Professeur Joost Wellens pour sa disponibilité, sa confiance et ses conseils judicieux qui ont contribué à cadrer et alimenter ma réflexion.

Je remercie les ONG Iles de Paix Belgique et Pérou sans lesquelles ce travail de fin d'études n'aurait pu voir le jour. Je tiens à remercier particulièrement l'ONG Iles de Paix Pérou pour son accueil, son assistance, sa confiance et ses conseils de terrain.

Je tiens également à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :

Monsieur Mosclis Lucely Vela Cárdenas, directeur exécutif d'Iles de Paix Pérou, ainsi que Mesdames Maribel Dominguez Checa et Sadith Antonio Solís, assistantes de direction, pour leur accueil, leur bienveillance et sans qui la partie administrative n'aurait pu se dérouler.

Monsieur Gaël de Bellefroid, directeur d'Iles de Paix Belgique au Pérou, pour sa disponibilité, sa vision, son expérience et son aide quant au report du TFE (initialement stage) après la pandémie.

Ir Jesus Alva, directeur de zone d'Iles de Paix Pérou, pour sa gentillesse, son soutien et sans qui l'acquisition des terres aurait été impossible.

Monsieur Luis Edgardo Doria Herrera, alias Gacho, technicien de terrain d'Iles de Paix Pérou, pour ses conseils pratiques, son partage de connaissance et sans qui l'organisation logistique aurait été inimaginable. Merci de m'avoir permis de vivre ces expériences extraordinaires auprès des producteurs.

Ir Octavio Mayhua Quispe, chargé de programme d'Iles de Paix Belgique, pour ses conseils et partages de connaissances agronomiques, son partage de la conception de l'intervention dans la région et son aide contre les nuisibles.

L'ensemble des producteurs visités et plus particulièrement ceux qui m'ont accueilli, nourri et aidé lors de mes différents séjours dans les montagnes péruviennes. Ils ont permis de rendre ce TFE inoubliable.

Ma famille : ma marraine pour ses conseils et son soutien concernant la rédaction de ce travail, mes parents et frères pour leurs soutiens lors de ces 5 années, ma compagne pour ses conseils rédactionnels, son soutien et son sourire et enfin mon grand-père pour m'avoir insufflé l'amour du monde rural et agricole.

Mes cokoteurs pour l'ambiance saine qui a été instaurée lors de ces deux dernières années de vie commune.

**"Mana nunu kaqtinga manaya kawsay
kanmanchu"**

"S'il n'y avait pas d'eau, il n'y aurait pas de vie"

*Dicton campesino péruvien en Quechua tiré de
E. SHERBONDY, 1998*

**"Si sonamos solos, es solo un sueno ; si
sonamos juntos, comienza la realidad."**

"Lorsque l'on rêve seul, ce n'est qu'un rêve ;
lorque nous rêvons ensemble, c'est le
commencement de la réalité."

*Dom Helder Camara,
évêque catholique brésilien,
devise d'Iles de Paix Belgique au Pérou.*

Résumé

Description du sujet Sur base de l'évaluation des systèmes d'irrigation pressurisés implémentés par l'ONG Iles de Paix Pérou et des habitudes d'irrigation des producteurs, des améliorations d'installation des systèmes et l'utilisation de calendriers d'irrigation sont proposées.

Objectif Ce travail vise à améliorer l'efficacité de l'utilisation en eau dans la région d'étude. Pour ce faire, deux objectifs spécifiques sont appréhendés : améliorer l'installation des systèmes afin de permettre une plus grande uniformité de distribution de l'eau (UDE) sur parcelle, et mettre en place des calendriers d'irrigation afin d'optimiser les quantités d'eau irriguées dans la région.

Localisation La zone d'étude comprend les communes de Yacus et Yarumayo, zones rurales de la Cordillère des Andes situées au Sud-Ouest du district de Huánuco, Pérou, Amérique latine.

Méthode Des mesures de hauteur et position de l'asperseur par rapport au sol apprécient son installation tandis que la pression et sa variation indiquent son fonctionnement adéquat. La différence d'altitude entre l'asperseur et le réservoir ainsi que la longueur, les types et diamètres de tuyaux utilisés permettent de discerner la tendance générale d'installation. La mesure du débit est comparée à la capacité d'infiltration du sol afin de mettre en évidence d'éventuels ruissellements. Le rayon d'influence permet de déterminer la surface irriguée tandis que sa variation permet d'évaluer d'éventuelles variations dues à la pente. L'utilisation de récipients permet, enfin, de déterminer des paramètres d'UDE : coefficient d'uniformité de Christiansen (CU), distribution d'uniformité du quartile inférieur (DU_{lq}) et coefficient de variation (CV). Toutes ces variables et paramètres sont utilisés via une Analyse en Composante Principale (ACP) afin de déterminer les caractéristiques influençant le plus l'UDE de la région. Suite à ce résultat, différentes modalités d'installation sont testées. Enfin, les habitudes d'irrigation des producteurs sont comparées à des calendriers optimisés via AquaCrop-OSPy en vue de l'amélioration de l'utilisation de l'eau.

Résultats Les installations dans la région comprennent un asperseur, une ligne primaire et une prise de tête. Elles consistent en des réservoirs, des caisses brise charge, des ruisseaux et des canaux d'irrigation. Les paramètres d'UDE moyens de l'ensemble des systèmes sont de 52% (CU) de 0.44 (DU_{lq}) et de 0.63 (CV). L'ACP indique que la hauteur de l'asperseur, le rayon d'influence et la pression sont les paramètres les plus déterminants pour une amélioration de l'UDE. Le positionnement de l'asperseur à la perpendiculaire du sol améliore de 16% le CU. L'utilisation d'un asperseur dimensionné l'augmente encore de 14%. Enfin, l'utilisation de calendriers d'irrigation permettrait de réduire de 4 à 40% l'utilisation de l'eau pour des calendriers « fixes » et des systèmes non améliorés, de 6 à 52% pour des calendriers « fixes » et des systèmes améliorés et entre 74 et 89% pour des calendriers « libres ».

Conclusion L'amélioration de l'utilisation en eau dans la région passe par l'amélioration du dispositif des systèmes via (i) une installation de l'asperseur à la perpendiculaire de la pente, (ii) l'utilisation d'un asperseur dont les caractéristiques sont connues et correctement dimensionnées et (iii) l'implémentation de réservoir ou de caisse brise charge à des altitudes dimensionnées par rapport à la position de l'asperseur. Cela permet une augmentation de l'uniformité de distribution sur la parcelle. L'utilisation de l'eau est également améliorée via l'utilisation de calendriers d'irrigation permettant de réduire la quantité d'eau utilisée.

Mots-clés Amérique latine, Pérou, irrigation, gestion de l'eau, évaluation de terrain, consultation, AquaCrop

Abstract

Subject description Based on the evaluation of the pressurized irrigation systems implemented by the NGO Islands of Peace Peru and the irrigation habits of the producers, improvements in the installation of the systems and the use of irrigation calendars are proposed.

Objective This work aims to improve the efficiency of water use in the study area. To do so, two specific objectives are addressed : to improve the installation of systems to allow for greater uniformity of water distribution (UWD) on the plot and, to implement irrigation schedules to optimize the amount of water irrigated in the region.

Location The study area includes the municipalities of Yacus and Yarumayo, rural areas of the Andes located in the south-west of the district of Huánuco, Peru, Latin America.

Method Measurements of the height and position of the sprinkler in relation to the ground assess its installation, while the pressure and its variation indicate its proper functioning. The difference in elevation between the sprinkler and the tank, as well as the length, type and diameter of the pipes used, allow to discern the general installation trend. The flow rate measurement is compared to the infiltration capacity of the soil in order to identify possible runoff. The radius of influence makes it possible to determine the irrigated surface while its variation makes it possible to evaluate possible variations due to the slope. Eventually, the use of containers makes it possible to determine UWD parameters : Christiansen uniformity coefficient (CU), lower quartile uniformity distribution (DU_{lq}) and coefficient of variation (CV). All these variables and parameters are used via a Principal Component Analysis (PCA) to determine the characteristics that most influence the region's UWD. Following this result, different installation modalities are tested. Eventually, growers' irrigation patterns are compared to optimized schedules via AquaCrop-OSPy for water use improvement.

Results The facilities in the area include a sprinkler, primary line, and headwater intake. It consists in tanks, headboxes, streams and irrigation canals. The average UWD parameters for all systems are 52% (CU), 0.44 (DU_{lq}) and 0.63 (CV). The PCA indicates that sprinkler height, radius of influence and pressure are the most important parameters for improved UWD. Positioning the sprinkler perpendicular to the ground improves the CU by 16%. Using a sized sprinkler increases the CU by an additional 14%. Eventually, the use of irrigation schedules would reduce water use by 4 to 40% for « fixed » schedules and unimproved systems, 6 to 52% for « fixed » schedules and improved systems, and between 74 and 89% for « free » schedules.

Conclusion Improving water use in the region involves improving the installation of systems by (i) installing sprinklers perpendicular to the slope, (ii) using sprinklers whose characteristics are known and correctly sized, and (iii) implementing tanks or load-breaking boxes at altitudes that are sized in relation to the position of the sprinkler. This allows an increase in the uniformity of distribution on the plot. Water use is also improved through the use of irrigation schedules to reduce the amount of water used.

Key words Latin America, Peru, irrigation, water management, field evaluation, advisory services, AquaCrop

Resumen

Descripción del tema A partir de la evaluación de los sistemas de riego presurizado implementados por la ONG Islaz de Paz Perú y de los hábitos de riego de los productores, se proponen mejoras en la instalación de los sistemas y en el uso de los calendarios de riego.

Objetivo Este trabajo pretende mejorar la eficiencia del uso del agua en la zona de estudio. Para ello, se abordan dos objetivos específicos : mejorar la instalación de los sistemas para permitir una mayor uniformidad de la distribución del agua (UDA) en las parcelas y aplicar los calendarios de riego para optimizar las cantidades de agua regadas en la región.

Localización El área de estudio comprende los municipios de Yacus y Yarumayo, zonas rurales de los Andes ubicadas al suroeste del distrito de Huánuco, Perú, América Latina.

Método Las mediciones de la altura y la posición del aspersor en relación con el suelo evalúan su instalación, mientras que la presión y su variación indican su buen funcionamiento. La diferencia de elevación entre el aspersor y el depósito y la longitud, el tipo y el diámetro de la tubería utilizada pueden servir para discernir el patrón general de instalación. La medición del caudal se compara con la capacidad de infiltración del suelo para identificar una posible escorrentía. El radio de influencia permite determinar la superficie regada, mientras que su variación permite evaluar las posibles variaciones debidas a la pendiente. Por último, la utilización de contenedores permite determinar los parámetros de la UDA : coeficiente de uniformidad de Christiansen (CU), distribución de uniformidad del cuartil inferior (DUIq) y coeficiente de variación (CV). Todas estas variables y parámetros se utilizan mediante un análisis de componentes principales (ACP) para determinar las características que más influyen en la UDA de la región. Tras este resultado, se prueban diferentes modalidades de instalación. Por último, los hábitos de riego de los agricultores se comparan con los programas optimizados mediante AquaCrop-OSPy para mejorar el uso del agua.

Resultados Las instalaciones de la zona incluyen un aspersor, una línea primaria y una cabecera. Consta de embalses, rompecargas, arroyos y canales de riego. Los parámetros UDA medios de todos los sistemas son 52% (CU), 0,44 (DUIq) y 0,63 (CV). El ACP indica que la altura de los aspersores, el radio de influencia y la presión son los parámetros más importantes para mejorar la UDA. Colocar el aspersor perpendicular al suelo mejora la CU en un 16%. El uso de un aspersor dimensionado lo aumenta en un 14% más. Por último, el uso de programas de riego reduciría el consumo de agua entre un 4 y un 40% en el caso de los programas « fijos » y los sistemas no mejorados, entre un 6 y un 52% en el caso de los programas « fijos » y los sistemas mejorados, y entre un 74 y un 89% en el caso de los programas « libres ».

Conclusión La mejora del uso del agua en la región se consigue mediante la mejora de la instalación de los sistemas a través de (i) la instalación del aspersor en la perpendicular de la pendiente, (ii) la utilización de aspersores con características conocidas y correctamente dimensionados y (iii) la implantación de depósitos o cajas de ruptura de carga en alturas dimensionadas respecto a la posición del aspersor. Esto permite aumentar la uniformidad de la distribución en la parcela. El uso del agua también se mejora mediante el uso de programas de riego para reducir la cantidad de agua utilizada.

Palabras clave América Latina, Perú, riego, gestión del agua, evaluación de campo, servicios de asesoramiento, AquaCrop

Table des matières

1	Introduction	1
2	Matériel et méthode	5
2.1	Modélisation des besoins en eau	5
2.2	Description de la zone d'étude	6
2.2.1	Localisation	6
2.2.2	Topographie	7
2.2.3	Pédologie - type de sols	8
2.2.4	Données climatiques	9
2.2.5	Ressources hydriques	12
2.3	Description et caractérisation du sol	12
2.3.1	Texture du sol	12
2.3.2	Nombre d'échantillons	16
2.3.3	Estimation de la matière organique	18
2.3.4	Encodage des données dans une fonction de pédotransfert	18
2.4	Plantes cultivées	19
2.5	Systèmes d'irrigation	21
2.5.1	Caractéristiques des systèmes	21
2.5.2	Évaluation des systèmes	22
2.5.3	Tendance générale	28
2.6	Dimensionnement de systèmes	28
2.7	Calendrier d'irrigation	30
2.7.1	Dose d'irrigation	30
2.7.2	Optimisation du calendrier d'irrigation	31
3	Résultats et discussion	32
3.1	Évaluation des systèmes d'irrigation	32
3.1.1	Tendance générale	32
3.1.2	Analyse en Composantes Principales	34
3.2	Amélioration des systèmes d'irrigation	39
3.2.1	Modalités d'installation de l'asperseur	39
3.2.2	Positionnement de la prise de tête	41
3.2.3	Recouvrement	41
3.2.4	Maintenance des systèmes	42
3.3	Sols	43
3.3.1	Type de sols	43
3.3.2	Incertitude liée au sol	45
3.4	L'eau d'irrigation	47
3.4.1	Besoin en eau	47
3.4.2	Limite : utilisation du modèle	52
3.5	Réduction de la consommation en eau	52
4	Conclusion	54

5	Annexe	62
5.1	Partie matériel et méthode	62
5.1.1	Tables et figures	62
5.1.2	Erreur de mesure	65
5.1.3	Équation	66
5.2	Partie résultats et discussion	67

Liste des figures

1	Présentation des objectifs	4
2	Comparaison des différentes extensions d'AquaCrop.	5
3	Carte de la localisation de la zone d'étude.	6
4	Cartes topographiques de la zone d'étude.	7
5	Carte des textures de sols de la zone d'étude.	9
6	Diagramme ombrothermique pour la ville de Huánuco.	10
7	Effet de la vitesse du vent sur l'évapotranspiration de référence, tiré de G. ALLEN et al., 1998.	11
8	Triangle de texture de sol selon la classification USDA.	15
9	Matériels utilisés pour l'échantillonnage de sol.	16
10	Photo : tarière « fine » pliée après utilisation sur le terrain.	17
11	Différents types de captation pour la zone d'étude.	22
12	Évaluation de systèmes d'irrigation par aspersion selon la littérature.	24
13	Photo : réalisation du test d'uniformité adapté à la réalité du terrain.	25
14	Évaluation de systèmes d'irrigation par aspersion adaptée aux contraintes locales.	25
15	Photo : réalisation de la mesure de pression sur le système d'irrigation par aspersion à l'aide d'un manomètre positionné au niveau d'un raccord.	27
16	Photo : réalisation de la mesure du débit sur un asperseur à l'aide d'un tuyau d'arrosage connecté à la bouche de sortie.	28
17	Photo : caractéristiques d'un asperseur issues d'un des catalogues du fournisseur en matériel d'irrigation d'IDPP.	29
18	Diagramme de Moody, détermination du facteur de friction (f) à partir du nombre de Reynolds (Re) et de la rugosité relative.	30
19	Type de tuyaux utilisés par les producteurs dans la région.	33
20	Type d'asperseurs utilisés par les producteurs dans la zone d'étude.	33
21	Matrice des corrélations entre les différentes variables de l'Analyse en Composantes Principales	35
22	Sélection du nombre de dimensions pour l'Analyse en Composantes Principales.	36
23	Visualisation des systèmes examinés et des variables sur l'Analyse en Composantes Principales pour les dimensions 1 et 2.	37
24	Photo : asperseur décroché suite à une augmentation de pression trop importante.	38
25	Modalités d'installation de l'asperseur en vue de l'amélioration des paramètres d'uniformité.	40
26	Courbe de relation pression-débit pour l'asperseur dimensionné aux caractéristiques connues.	42
27	Position des différentes estimations de texture de sol réalisées via la méthode HFTE sur le triangle de texture USDA, classées par village.	45
28	Sélection de la texture de sol pour l'entrée du modèle selon les différentes populations de rendements obtenues pour une agriculture pluviale et un sol de type SandyLoam 0.3% de MO (SL/0.3) sur une modélisation de 10 ans.	46
29	Besoin en eau et rendement selon les doses d'irrigation utilisées par les producteurs, fréquence d'irrigation tous les 8 jours pour une texture de sol de type SandyLoam/0.3.	47
30	Sélection d'un calendrier « fixe » optimisé selon une maximisation du rendement, une minimisation de son écart-type et de la quantité d'eau d'irrigation nette utilisée dans le cadre de la culture de maïs pour un sol de type SL/0.3.	48
31	Évolution des différents flux d'eau totaux enregistrés sur une saison de production pour des sols argileux, limoneux et sableux pour la culture du maïs.	50

32	Sélection d'un calendrier « libre » optimisé selon une maximisation du rendement, une minimisation de son écart-type et de la quantité d'eau d'irrigation nette utilisée.	51
33	Triangle de texture de sol selon la classification française de l'Aisne, les 15 classes de texture sont regroupées selon les 5 classes définies par la FAO.	63
34	Variation de la valeur du coefficient d'uniformité de Christiansen du à l'outil de mesure, récipient gradué à 25ml.	65
35	P valeur des différentes corrélations entre les variables de l'Analyse en Composantes Principales.	67

Liste des tableaux

1	Comparaison des caractéristiques des différents outils utilisés pour l'échantillonnage de sol. . .	17
2	Qualité statistique de l'échantillonnage selon le nombre d'échantillons réalisé, tiré de CARTER & GREGORICH, 2008.	18
3	Fréquences et durées d'irrigation types utilisées par les producteurs de la région pour l'irrigation de la culture du maïs.	20
4	Doses d'irrigation employées par les producteurs de la région pour la culture du maïs selon différentes combinaisons de débit (L/h) et de temps d'irrigation (h).	20
5	Caractéristiques générales des systèmes évalués de la zone d'étude.	32
6	Amélioration des différents paramètres d'uniformité selon les modalités d'installation du système d'irrigation.	41
7	Textures de sols rencontrées pour les différents villages visités.	44
8	Calendriers « libres » optimisés proposés pour les deux types de sols conservés : SL/0.3 et L/0.3 pour la culture du maïs.	52
9	Amélioration de l'efficacité de l'eau dans la région.	53
10	Matrice de confusion : comparaison de classification entre la méthode HFTE et la méthode d'analyse en laboratoire, table tirée de RICHER-DE-FORGES et al., 2022.	62
11	Matrice de confusion : comparaison de classification entre la méthode HFTE et la méthode d'analyse en laboratoire, selon les classes proposées par l'INRAE pour le triangle de texture français, adapté de RICHER-DE-FORGES et al., 2022.	63
12	Estimation de la Matière Organique à l'aide des couleurs de Munsell, tiré de FAO, 2006. . . .	64
13	Coefficient de variation des différentes propriétés du sol tiré de CARTER & GREGORICH, 2008. . .	64
14	Variances expliquées des différentes dimensions de l'Analyse en Composantes Principales. . .	67

Liste des abréviations

ACP : Analyse en Composantes Principales

CU : Coefficient de Christiansen

CV : Coefficient de variation

DUIq : Distribution de l'uniformité du quartile inférieur

HFTE : Hand feel texture estimation

IDPP : Iles de paix Pérou

L : Loam

MNT : Modèle numérique de terrain

MO : matière organique

PE : Productivité de l'eau

RFU : Réserve facilement utilisable

RMSE : Root Mean Square Error

RU : Réserve utilisable

SCL : Sandyclayloam

SENHAMI : Service Nationale de Météorologie et d'Hydrologie du Pérou

SiL : Siltloam

SL : Sandyloam

UDE : Uniformité de distribution de l'eau

1 Introduction

L'adjectif « andin » s'applique à la zone et aux populations de la chaîne de montagnes de 7000 km qui court à travers l'Amérique latine (ALMEIDA VINUEZA, 1998). Ce sont ainsi 8 pays qui sont concernés. Tous ne sont cependant pas reconnus comme « andins ». En effet, seulement 3 le sont selon le contexte international : l'Équateur, le Pérou et la Bolivie. L'unique présence de montagnes ne suffit ainsi pas à qualifier un pays d'« andin ». La présence d'indigènes est également primordiale. Cet adjectif, « andin », représente ainsi une aire culturelle ou un principe de civilisation plutôt qu'une zone géographique. Ces populations sont multi-culturelles et multi-ethniques (ALMEIDA VINUEZA, 1998).

L'apogée de cette culture est atteinte dans les montagnes boliviennes et péruviennes. Un mode de vie basé sur des principes socio-économiques de réciprocité et de redistribution avec des complémentarités écologiques s'y est développé. Ces communautés andines, dans leurs visions, possèdent ainsi un véritable esprit de communauté. Ceci résulte en une manière d'être et de vivre : un grand respect entre hommes et femmes ainsi qu'envers la nature. Toutes ces personnes se laissent ainsi inspirer par le socialisme, la fraternité et le collectivisme de leurs ancêtres (ALMEIDA VINUEZA, 1998).

Les « puna andes » (subdivision du monde andin) correspondent au Pérou. Elles sont caractérisées par la chaîne de montagnes qui devient considérablement plus large, formant un vaste massif sec ainsi que d'immenses montagnes et plateaux montagneux. Ce toit authentique, cette « extension transversale colossale » empêchait tout contact immédiat entre les basses terres et les zones élevées, mais également toute communication entre la côte et l'Amazonie. Ce second monde aurait historiquement été basé sur un système impérial centralisé, poussé précisément par leurs habitants du besoin de maîtriser l'étendue des hautes terres en créant d'énormes travaux d'infrastructure (ALMEIDA VINUEZA, 1998). Ces comportements, tellement ancrés dans la culture, ont percolé jusqu'à ce jour malgré l'occupation espagnole.

Ces pays, dans les années 90, étaient considérés comme moins développés en termes économique et socio-politique. La pauvreté touchait ainsi presque 70% de la population. Cette situation semblait être due à la négligence de l'État entraînant une exclusion de la politique et une marginalisation socio-économique des peuples autochtones (ALMEIDA VINUEZA, 1998).

Ainsi, depuis l'époque coloniale, la production et la main-d'œuvre sont exploitées par les groupes économiques ruraux et urbains. Ces derniers n'ont pas seulement maintenu une exploitation économique mais également un mécanisme d'assujétissement, de dégradation et de dévaluation des indigènes. Aujourd'hui, même si ce phénomène est moins marqué, certains comportements de cette époque peuvent subsister dans la vie sociale (ALMEIDA VINUEZA, 1998).

Dans cette région, l'irrigation est ancienne, aussi vieille que l'agriculture (E. SHERBONDY, 1998; FAO, 2015). Des techniques diverses et variées y ont ainsi été développées. La majorité était basée sur des systèmes gravitaires qui amenaient l'eau vers les cultures. Seules deux méthodes amenaient les cultures vers l'eau : l'« irrigation by fog » utilisant l'eau contenue dans les nuages et les « excavated fields » utilisant l'eau de la nappe phréatique. La majorité des systèmes andins d'irrigation était des réseaux construits de canaux et fossés avec barrages et réservoirs (E. SHERBONDY, 1998).

L'âge d'or de l'irrigation dans cette région se situe il y a 1000 ans. La culture du maïs était alors le catalyseur pour la création de réseaux d'irrigation et de terrasses (E. SHERBONDY, 1998). Pour la première fois, dans les années 50, le secteur privé prend en charge la construction d'ouvrages d'irrigation (FAO, 2015). Ce n'est qu'en 1969, lors de la promulgation de la loi agraire que, pour la première fois, de lourds investissements sont réalisés par l'État (SENTILHES, 1970 ; FAO, 2015).

Ces systèmes, en plus de leurs aspects techniques, possédaient un fort caractère social (E. SHERBONDY, 1998 ; FAO, 2015). Ils étaient si fondamentaux pour l'agriculture andine qu'ils ont été l'objet de valeurs culturelles et de symboles qui exprimaient le cœur des croyances sur la vie elle-même dans les Andes (E. SHERBONDY, 1998, CARLIER, 2008). La gestion de ces canaux était alors régulée par des communautés cultivant un sens de parenté, de partage des ancêtres communs et d'origine des mêmes sources d'eau locales. Ainsi, la communauté avait des obligations et redistribuait les surplus au sein des différentes familles (E. SHERBONDY, 1998).

Aujourd'hui, ce sont les comités d'irrigation qui sont responsables de l'exploitation et de l'entretien des canaux ainsi que de l'organisation de petits systèmes qui s'y articulent. Il s'agit d'organisations d'irrigants de longue durée, numériquement très répandues : il existe probablement plusieurs milliers de comités d'irrigants à l'intérieur du Pérou. Cependant, peu d'irrigants bénéficient d'attention ou d'assistance de l'État, peu voire pas guidés concernant les normes légales relatives à la gestion (FAO, 2015). Depuis la réforme agraire, la construction, l'exploitation et l'entretien des infrastructures principales devaient être gérés par l'État avec l'aide des organisateurs d'utilisateurs directs. Or, seuls 50% des conseils d'utilisateurs parviennent à être indépendants financièrement et techniquement. Pour ce faire, des tarifs d'utilisation de l'eau sont instaurés pour couvrir les coûts de maintenance, d'entretien et de distribution. Cependant, dans les faits, la majeure partie de l'argent récolté (83%) sert aux activités des réunions d'utilisateurs des comités d'irrigation (FAO, 2015).

L'eau revêt une importance toute particulière pour ces sociétés. Il s'agit de l'élément le plus important du « cosmos andin ». C'est le principe dynamique qui explique les mouvements, la circulation et les forces du changement. L'eau est considérée comme l'essence de la vie elle-même. Ainsi, les droits à certains canaux spécifiques sont fondés sur ce principe originel et sur l'affirmation que la communauté a construit, entretenu et performé des rituels pour leur soin. Ce concept fondamental continue de définir les droits à l'eau à travers les Andes. Ainsi, quand un gouvernement construit un canal, les communautés peuvent être moins enclines à son entretien (E. SHERBONDY, 1998).

En 2015, pour l'ensemble du Pérou, la superficie potentielle d'irrigation, considérant l'aptitude des sols ainsi que les ressources climatiques, est estimée à 6 411 000 ha. En 1961 et 1972, la superficie réellement irriguée atteignait à peine 1 016 300 ha et 1 273 500 ha respectivement. En 1994, la superficie totale équipée en système d'irrigation atteint les 1 729 069 ha comprenant 792 059 utilisateurs. L'irrigation par gravité représentait alors 1 696 697 ha (780 305 utilisateurs), par aspersion 21 738 ha (7 872 utilisateurs) et localisée 10 634 ha (3 882 utilisateurs) (INEI, 1996). Ce n'est qu'en 2012 que la superficie totale équipée atteint les 2 579 900 ha dont 92% est irriguée par gravité, 3% par aspersion et 5% en localisé (FAO, 2015). Ces 25 dernières années, de grands projets ont été réalisés au niveau de la côte tandis que d'autres, de moins grande ampleur, ont été réalisés au niveau de la Sierra (zone d'étude).

Dans le même moment, cette extension massive a également vu l'apparition de perte de terre irriguée due à l'accumulation de sel (FAO, 2015). De plus, la majeure partie de l'eau extraite pour l'irrigation (65 %) est perdue en raison de la mise en place de systèmes d'irrigation inefficaces. L'efficacité totale de l'utilisation de l'eau dans les systèmes d'irrigation est estimée à environ 35%. Ceci est dû aux systèmes de distribution qui fuient et à l'utilisation extensive de méthodes d'irrigation par gravité ou d'inondation non améliorées, avec une efficacité totale estimée à 50%. Une mauvaise gestion de l'irrigation associée à des systèmes d'irrigation inefficaces conduit donc les agriculteurs à utiliser de l'eau au-delà des besoins des cultures et de la disponibilité en eau. (FAO, 2015).

En 2012, le produit intérieur brut (PIB) du Pérou s'élevait à 197 milliards de dollars et la contribution de l'activité agricole au PIB était alors de 6 % (FAO, 2015).

Malgré une participation relativement faible de l'agriculture au sein de l'économie péruvienne, en 2013, c'est près de 3.8 millions de personnes (23% de la population active) qui travaillent dans le secteur agricole (FAO, 2015).

L'agriculture péruvienne est principalement basée sur trois des quatre cultures importantes pour l'alimentation humaine au niveau mondial : la pomme de terre, le maïs et le riz. Les conditions sont également favorables pour le développement de la production de blé. À ces cultures, il faut ajouter la grande variété de légumes, tubercules, fruits (650 variétés), cultures industrielles (sucre, café, coton, palmier à huile), graines andines à haute valeur protéique (quinoa, maca, tarwi, kiwicha et autres), et la feuille de coca. (FAO, 2015).

Néanmoins, le secteur agricole semble exempt de décollage. Ainsi, il limite l'offre intérieure. Cela est principalement causé par la fragmentation des terres, l'accès limité au crédit, l'inefficacité de la gestion de l'eau et la chute des prix de gros des produits agricoles. Ainsi, l'accès limité à la nourriture malgré la baisse des prix de gros des produits agricoles est dû au faible pouvoir d'achat des personnes les plus démunies. En 2012, 35% et 12% des péruviens sont respectivement en situation de pauvreté totale et d'extrême pauvreté (FAO, 2015). En 2007, c'était 64,7% de la population qui était considérée en situation de pauvreté (moins de 1,5 dollars par jour). Cependant, la pandémie semble faire revenir les statistiques en arrière : en 2021, c'est en effet 30% de la population qui vit sous le seuil de pauvreté (BM, 2022). De manière globale, cette situation résulte du manque de conditions nécessaires au développement (santé, éducation, infrastructure, possibilités d'emploi, etc.). (FAO, 2015).

Toutefois, il est à noter que l'irrigation a joué un rôle déterminant dans l'amélioration de la sécurité alimentaire, de la croissance agricole et productive et du développement humain dans les zones rurales du pays. L'agriculture irriguée est de plus en plus importante dans le développement et la croissance du Pérou (FAO, 2015).

C'est dans ce contexte que l'ONG « Islas de Paz Peru » (Iles de Paix Pérou ; IDPP) vient s'ancrer. Avec des programmes comme « Santa Maria del Valle » en 2008 ou encore « Conchamarca » en 2019 et enfin « Kusy Kawsay » : être heureux à la campagne, débuté en 2016 et prolongé jusqu'en 2022. L'ONG a pour objectif d'améliorer les conditions de vie des paysans. En effet, après des années de dévalorisation suite au contexte présenté précédemment, il est ancré dans les esprits que vivre à la campagne est synonyme de vivre mal. Ainsi, IDPP travaille à améliorer ces conditions de vie en installant des sanitaires, des cuisines améliorées ainsi qu'en instaurant des principes agroécologiques.

Les techniques de culture ancestrales se sont, en effet, peu à peu perdues. Cela est dû en partie à la présence croissante des lobbies agrochimiques mais également à l'exode rural des jeunes générations. Afin de ne plus dépendre de ces lobbies et d'assurer une sécurité alimentaire et sanitaire, des principes agricoles plus respectueux ont été restaurés via les programmes menés ces dernières années. Ainsi, la diversification de la production agricole engendre une diversification de la consommation. De plus l'augmentation des prix des intrants chimiques a permis une augmentation du nombre d'adhérents au programme ainsi qu'une réelle prise de conscience. Peu à peu, la mauvaise gestion et utilisation de ces intrants tend à disparaître. Au sein de ces programmes, l'irrigation intervient comme renforcement de cette transition agricole plus saine et technifiée. Via l'irrigation par aspersion, il est notamment permis au producteur d'alléger sa charge de travail. Des systèmes d'irrigation ont été implémentés dans la région de Huánuco par l'ONG Iles de Paix Pérou. Après plusieurs années d'utilisation par les producteurs, une évaluation de ces systèmes est proposée afin de déterminer l'évolution prise par ces mêmes systèmes.

De ce contexte général, plusieurs objectifs ont ainsi pu être identifiés afin d'améliorer l'efficacité de l'irrigation dans la région (Figure 1).

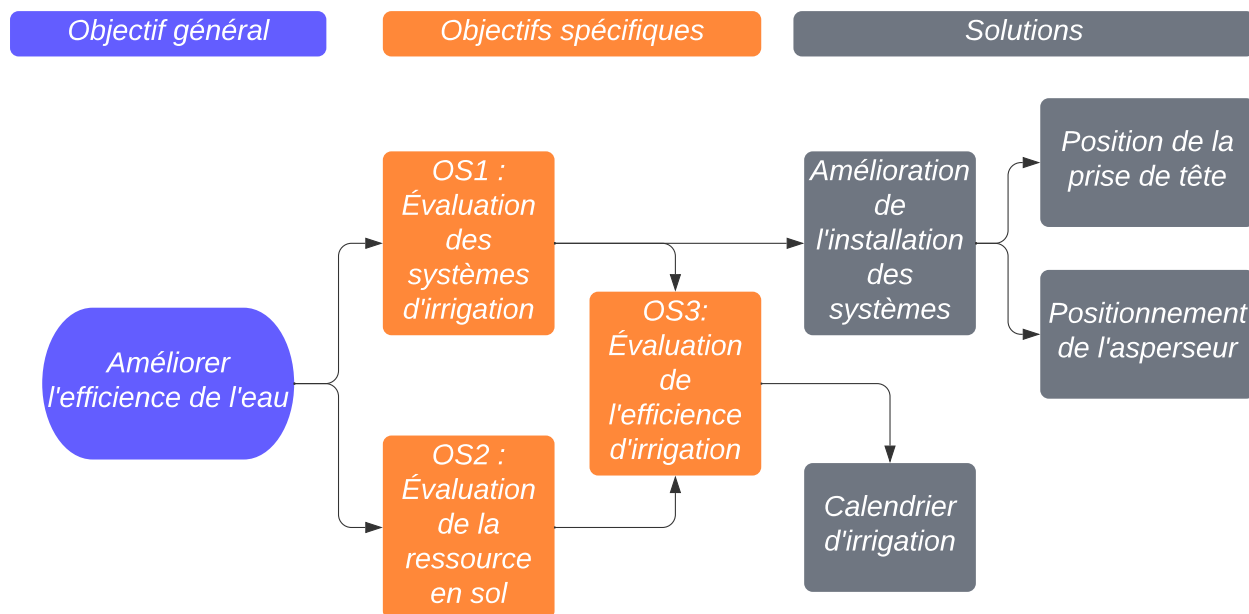


FIGURE 1 – Présentation des objectifs

2 Matériel et méthode

Afin d'améliorer l'efficacité d'utilisation en eau d'irrigation, la première étape consiste en l'évaluation des performances et caractéristiques actuelles des systèmes d'irrigation installés dans la région. À l'aide des résultats obtenus, des recommandations sur l'installation des systèmes sont proposées. Sur le même temps, les besoins en eau sont modélisés selon le climat local, le type de sol et les itinéraires d'irrigation utilisés dans la région.

2.1 Modélisation des besoins en eau

La modélisation est réalisée à l'aide d'AquaCrop-OSPy¹, extension en Python² basée sur AquaCrop³. Elle est préférée car elle permet d'inclure d'autres modules, de par la suite être plus facilement développée par l'ONG ou encore de réaliser une interface graphique. De plus, AquaCrop-OSPy offre des résultats similaires à ceux obtenus par AquaCrop (KELLY & FOSTER, 2021). En effet, des erreurs absolues de 20kg/ha ou moins sont obtenues pour la modélisation des rendements (Figure 2).

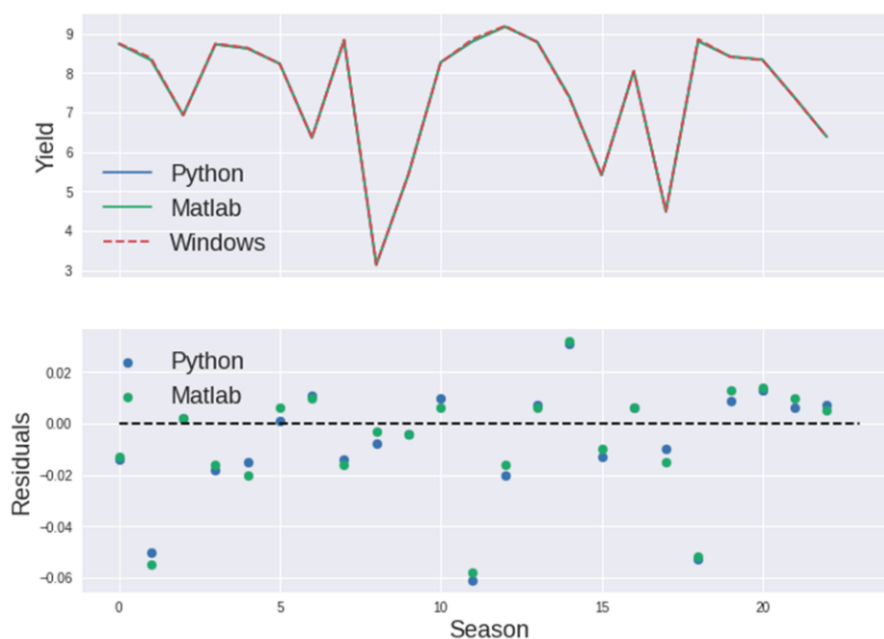


FIGURE 2 – Comparaison des différentes extensions d'AquaCrop avec l'extension python AquaCrop-OSPy, tiré de KELLY & FOSTER, 2021.

1. <https://pypi.org/project/aquacrop/>
 2. <https://www.python.org/>
 3. <https://www.fao.org/aquacrop/fr/>

2.2 Description de la zone d'étude

2.2.1 Localisation

La zone d'étude se localise dans la région de la Sierra (Figure 3). Les 2 communes concernées (Yacus et Yarumayo) font partie d'une série de communes appuyées lors du dernier programme d'IDPP. Les localités de Puquio, Chually, et Manuel Garcia se situent dans la commune de Yarumayo tandis que la localité de Gasgo se situe dans la commune de Yakus. L'entièreté des systèmes visités se situe donc dans cette zone.

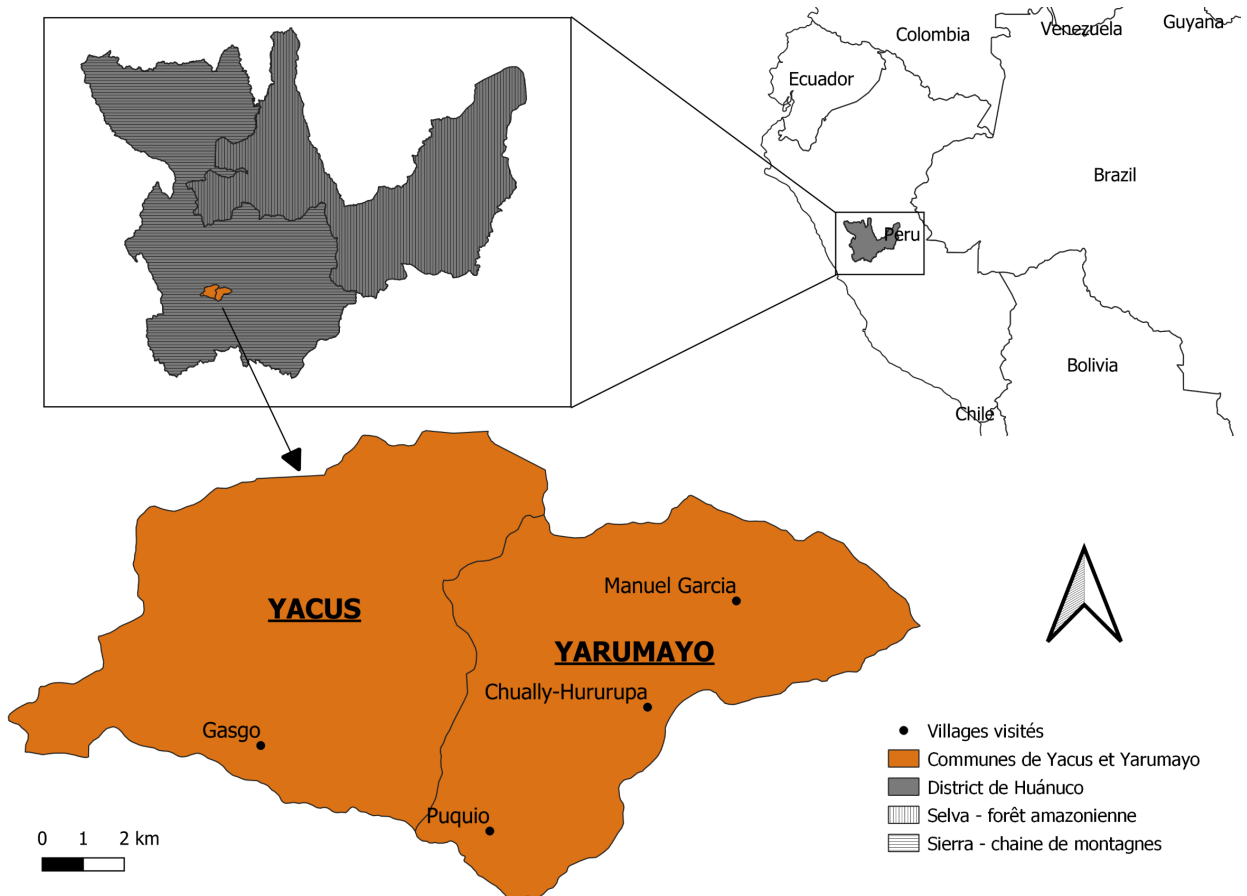
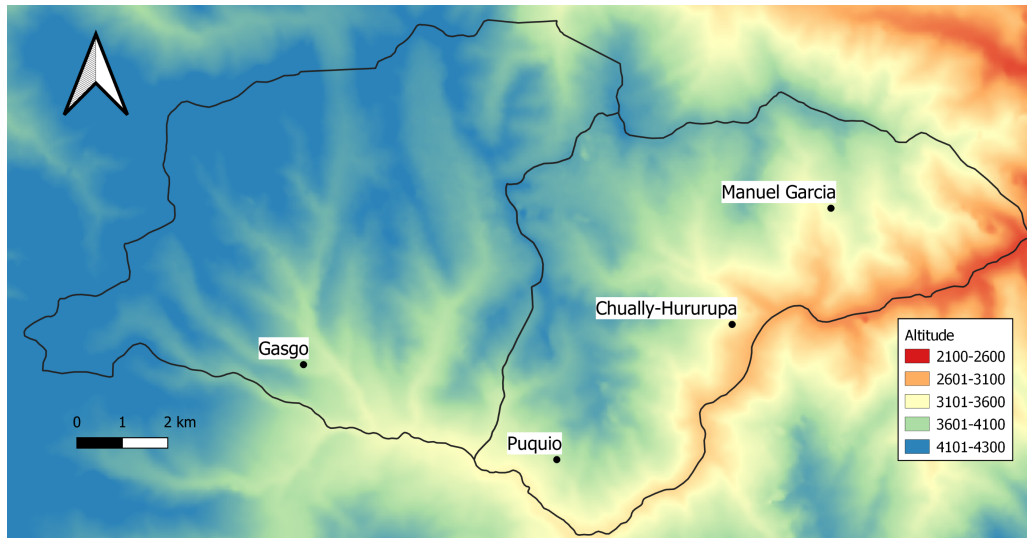


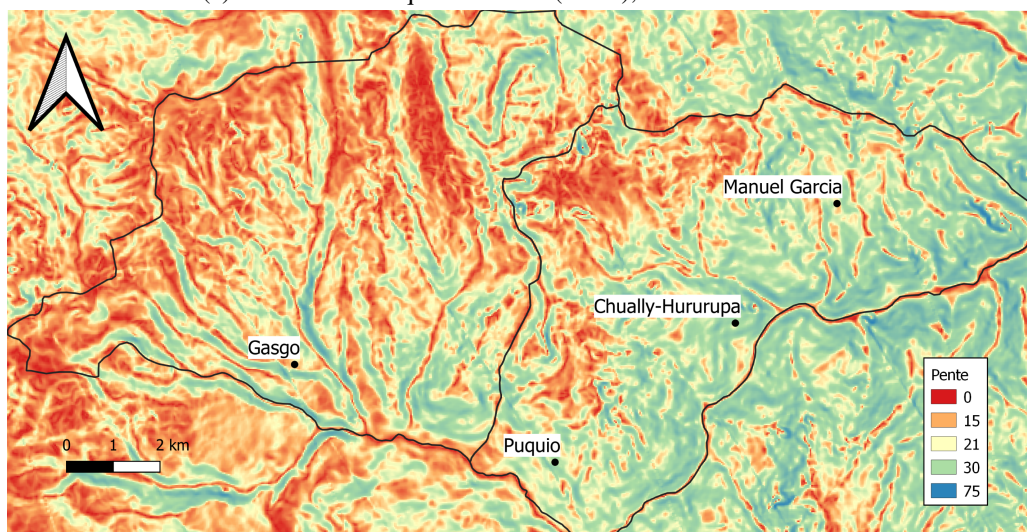
FIGURE 3 – Carte de la localisation de la zone d'étude.

2.2.2 Topographie

L'altitude de la zone d'étude est comprise entre 2100m et 4300m (Figure 4a). Les communautés visitées sont situées à 4000m (Gasgo), 3500m (Puquio et Manuel Garcia) et 2800m (Chually et Hururupa). La pente est dérivée du Modèle Numérique de Terrain⁴ (MNT) possédant une résolution de 30m. Les pentes de la zone d'étude vont de 0 à 70 degrés (Figure 4b).



(a) Modèle numérique de terrain (MNT), résolution de 30m.



(b) Pentés dérivées du modèle numérique de terrain, résolution de 30m.

FIGURE 4 – Cartes topographiques de la zone d'étude.

4. <https://www.geogpsperu.com/2018/08/descargar-imagenes-aster-gdem-aster.html>

2.2.3 Pédologie - type de sols

La carte de la texture de sol réalisée par l'Office National de l'Évaluation des Ressources Naturelles⁵ informe uniquement sur la présence de 3 types de sols dans la zone d'étude : Leptosol, Cambisol et Regosol. Ces 3 sols se répartissent dans la zone selon, respectivement, les proportions suivantes : 40, 30 et 30%. Cambisols et Regosols sont, en effet, généralement associés avec les Leptosols, sols caractéristiques des montagnes (NACHTERGAELE, 2010). Pour la zone étudiée, une couche unique est renseignée indiquant ces 3 types de sols. Il est donc impossible de déterminer leurs répartitions dans la zone d'étude.

Les Leptosols comprennent des sols minces positionnés sur des roches continues très riches en fragments grossiers. Le matériau parental peut débiter à moins de 25cm de la surface du sol où le volume de terre fine peut être inférieur à 20% du volume total sur, en moyenne, 75cm de profondeur (NACHTERGAELE, 2010; FAO, 2014). Ils sont les plus présents sur l'ensemble du globe (NACHTERGAELE, 2010; FAO, 2014). Ces sols sont favorables aux pâturages ou aux zones boisées. De plus, lorsque positionnés sur des versants, ils sont généralement plus fertiles que leurs homologues. Ainsi, certaines cultures peuvent y être cultivées à condition de retirer les plus gros fragments rocheux et/ou d'installer des terrasses. Enfin, le drainage excessif ainsi que le profil peu profond peuvent entraîner des sécheresses excessives (FAO, 2014).

Concernant les Régosols, ce sont des sols minéraux très peu développés sur un matériau parental non consolidé (matériau à grain fin). Ils ne sont pas particulièrement riches en fragments comme les Leptosols. Ils sont majoritairement situés sur des zones d'érosion, souvent montagneuses et recouvertes de forêts. Les Régosols, situés dans des zones où la pluviométrie est inférieure à 1000mm/an, ont besoin d'irrigation pour le passage à l'agriculture. La faible capacité de rétention de l'eau de ces types de sols engendre une fréquence d'irrigation plus élevée (FAO, 2014).

Enfin, les Cambisols comprennent des sols avec au moins une formation naissante dans le profil de sol. Une différenciation des différentes couches de sol est alors visible. La transformation du matériau parental est évidente : sol brun décoloré ou encore augmentation du pourcentage d'argile. Le matériau parental est généralement de texture fine ou moyenne, et issu de types de roches diverses. Ils sont généralement considérés comme de bonnes terres agricoles. (FAO, 2014)

Ces informations renseignent sur les profondeurs de sols attendues mais ne permettent cependant pas d'affiner les possibilités de texture de sols présentes dans la zone. Des cartes réalisées par les localités en collaboration avec des ONG locales montrent différentes textures de sols (Figure 5). Elles renseignent sur des caractéristiques générales : texture fine, grossière ou moyennement fine. Ces informations ne suffisent pas pour la modélisation des besoins en eau. De plus, NACHTERGAELE, 2010 ajoute que les sols montagneux ne sont généralement pas analysés. Une méthode dite de « Hand-Feel Texture Estimation » (HFTE) est alors utilisée (Paragraphe 2.3).

5. <https://www.geogpsperu.com/2015/10/mapa-de-suelos-onern.html>

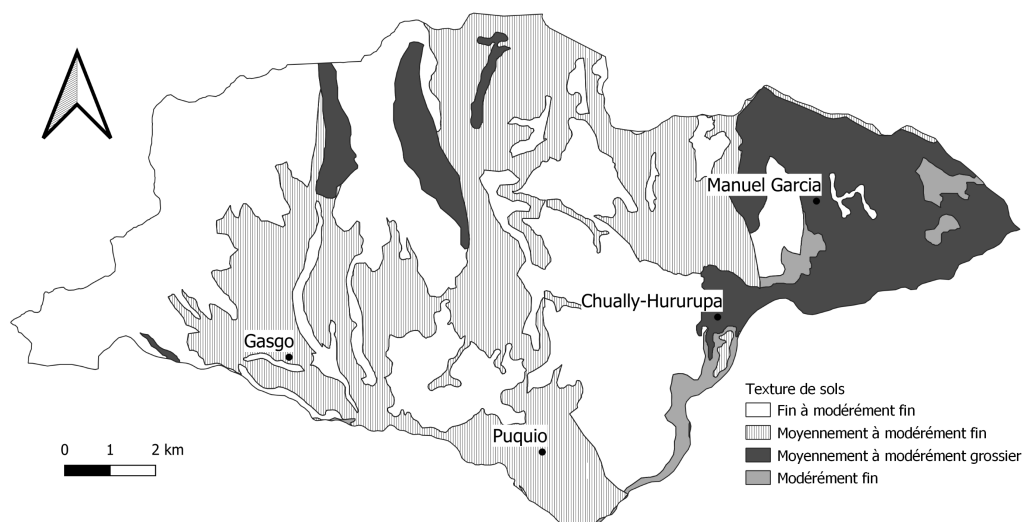


FIGURE 5 – Carte des textures de sols de la zone d'étude.

2.2.4 Données climatiques

Dans la région de la Sierra (de 500 à 6780m d'altitude), la latitude, l'altitude, la présence de vents locaux et l'effet écran de la chaîne de montagnes conduisent à des conditions climatiques très contrastées.

En général, les températures diminuent à mesure que l'altitude augmente, tandis que les précipitations se font du Nord au Sud et d'Est en Ouest. Pendant la saison humide, de décembre à mars, les précipitations les plus élevées se rencontrent au Nord et sur le flanc Est de la Cordillère. Les précipitations moyennes annuelles pour cette région sont de 600mm. De faibles variations sont cependant observées avec l'altitude. Dans les vallées interandines situées en dessous de 3000m au-dessus du niveau de la mer, les précipitations moyennes annuelles sont inférieures à 500mm. Elles sont supérieures à 700mm pour les zones situées 3000m au-dessus du niveau de la mer. L'évapotranspiration de référence, quant à elle, atteint les 1235mm annuels (FAO, 2015).

La température moyenne annuelle se situe entre 8 et 11°C. Les températures varient peu selon les saisons tandis que l'oscillation thermique quotidienne (jusqu'à 22°C en une seule journée) est élevée. La région présente deux saisons climatiques bien définies. Une période sèche, d'avril à octobre, caractérisée par des jours ensoleillés, des nuits très froides et l'absence de pluie. Et une période pluvieuse, de novembre à mars. (FAO, 2015).

Le diagramme ombrothermique, pour la station de Huánuco, située à 2000m d'altitude, (Figure 6) est réalisé à partir des données enregistrées par le SENHAMI⁶ (Service Nationale de Météorologie et d'Hydrologie du Pérou). Ces données couvrent une période de presque 50 ans (de 1947 à 2014). Elles exposent ainsi deux saisons pour la station de Huanuco : une pluvieuse, allant d'octobre à avril, et une sèche de mai à septembre. Les températures moyennes oscillent faiblement entre ces deux saisons. Elles y sont plus élevées que la température moyenne de la Sierra (de 500 à 6780m d'altitude).

6. <https://www.gob.pe/senamhi>

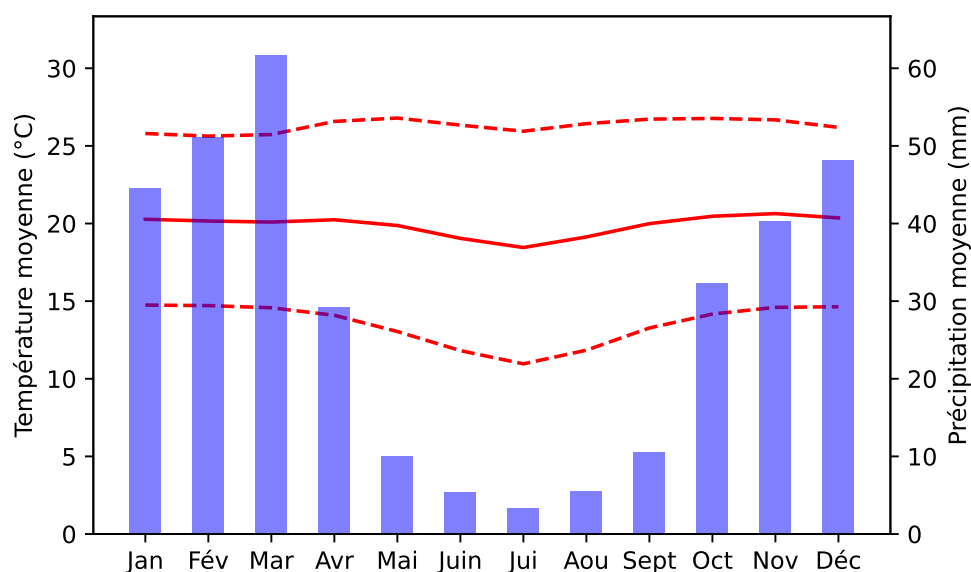


FIGURE 6 – Diagramme ombrothermique pour la ville de Huánuco, réalisé à partir des données climatiques enregistrées par le SENHAMI.

Enfin, avec des précipitations annuelles moyennes de 340mm, le bilan hydrique climatique (précipitations - évapotranspiration de référence) pour la région de Huánuco est négatif. Un déficit hydrique de -895mm d'eau annuel est alors apprécié.

Les données du SENHAMI servent d'entrée au modèle AquaCrop-OSPy. Les données journalières de température maximum et minimum et de précipitation sont utilisées pour modéliser l'évapotranspiration de référence (Équation 15 en annexe) et la croissance des plantes. La vitesse du vent, requise pour estimer l'évapotranspiration de référence, n'est pas disponible pour la région. Sa vitesse est donc estimée constante à 2m/s (G. ALLEN et al., 1998). Les données de radiation solaire ne sont pas non plus disponibles. Elles sont donc estimées à partir des températures (Équation 13 en annexe).

L'évapotranspiration de ce jeu de données est comparée avec celui de la NASA⁷, données extrapolées au niveau mondial. Ces données climatiques constituent une source d'information en libre accès, complètes, facilement accessibles et téléchargeables au sein du modèle à l'aide d'un module Python. L'évapotranspiration est calculée sans estimation de la vitesse du vent et radiation solaire. La comparaison est réalisée à l'aide d'une analyse de la variance (ANOVA), basée sur le test de Kruskal. Ce test ne nécessite pas que les distributions des populations soient normales, il est donc généralisable à tout type de population (OSTERTAGOVA et al., 2014). Un module d'analyse de la variance est alors ajouté au modèle AquaCrop-OSPy. Ce test détermine si des échantillons trouvent leur origine dans la même population ou non.

7. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Les deux populations sont significativement différentes en terme d'évapotranspiration, de besoin en eau et de rendement simulés par AquaCrop-OSPy. De plus, la droite de régression entre les valeurs de précipitations enregistrées par une station et celles prédites par le modèle d'extrapolation de la NASA possède un RMSE (Root Mean Square Error) de presque 8 mm⁸. Les précipitations semblent, ainsi, être le paramètre météorologique limitant du modèle. Les RMSE pour les autres paramètres sont dans des gammes similaires : 10% pour l'humidité relative ou encore 30 W/m² pour la radiation solaire⁹. Les données météorologiques locales enregistrées au niveau des stations sont finalement favorisées. Cependant, certaines années ne possédant pas de données, les modélisations sont réalisées de 2000 à 2010.

Une analyse de sensibilité concernant la vitesse du vent est également réalisée (Équation 1). En effet, l'évapotranspiration de référence est sensible à la variation de la vitesse du vent (Figure 7).

$$S_{et} = \frac{\frac{\Delta ETO}{ETO}}{\frac{\Delta w}{w}} \quad (1)$$

avec S_{et} : la sensibilité de l'évapotranspiration de référence vis-à-vis de la variation du vent, ΔETO : la variation de l'évapotranspiration de référence et ΔW : la variation de la vitesse du vent.

L'évapotranspiration est ainsi plus sensible pour une gamme de vitesse de vent entre 1 et 3 m/s. En effet, lorsque elle est comparée à l'évapotranspiration obtenue pour une vitesse de vent de 2m/s, elle varie en moyenne de 55 et 47% pour ces valeurs, respectivement. Des relevés des vitesses de vent sont seulement disponibles pour le site de l'aéroport¹⁰, et s'appliquent donc à une vallée dégagée. De telles données ne correspondent pas aux reliefs montagneux de la zone d'investigation. Une vitesse de 2m/s est conservée.

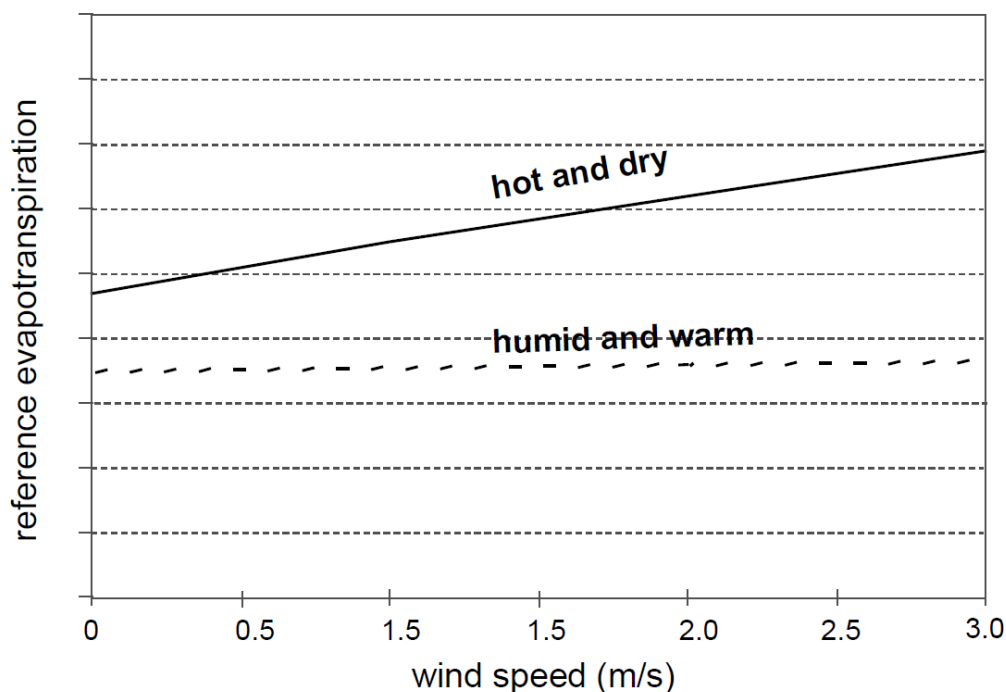


FIGURE 7 – Effet de la vitesse du vent sur l'évapotranspiration de référence, tiré de G. ALLEN et al., 1998.

8. <https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/meteorology/precipitation/>

9. <https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/meteorology/precipitation/>

10. https://www.windfinder.com/windstatistics/huanuco_aeropuerto

2.2.5 Ressources hydriques

À travers le Pérou, il existe une grande variabilité et discontinuité des ressources en eau dans le temps. Ceci entraîne un clivage sur la rareté de la disponibilité en eau, avec un versant de ressources en eau rares (Pacifique) et un autre de ressources abondantes (Amazonien). Par ailleurs, il existe une période courte d'abondance de 3 à 5 mois (décembre à mai) et une longue période d'étiage de 7 à 9 mois (mai à décembre) (FAO, 2015). La faiblesse des précipitations dans une partie de la Sierra entraîne des pénuries d'eau saisonnières et des sécheresses occasionnelles. Cependant, une géographie accidentée avec des formations naturelles propices à la construction de réservoirs régule les débits des fleuves et permet le stockage de l'eau pendant la période d'abondance. Ceci augmente ainsi la disponibilité d'eau à diverses fins pendant la période d'étiage (FAO, 2015). Concernant les types de ressources hydriques rencontrées, dans la Sierra, il existe des lagunes de tailles variables situées entre 4000 et 6000m d'altitude. La recharge de ces lagunes se fait via les précipitations sous forme de pluie, de dégel et de fuites provenant de bassins supérieurs. Les lagunes constituent des réservoirs naturels avec une disponibilité potentiellement exploitable (FAO, 2015)

Enfin, en 2008, le total des prélèvements d'eau de cette origine est de 13 662 km³, dont 88,7% pour l'agriculture, soit une extraction d'eau à des fins agricoles, de 12 119 km³. (FAO, 2015). La Belgique, en 2019, prélevait 0,0402 km³ d'eau pour le secteur agricole, soit 300 000 fois moins (FAO, 2019). Sur le total de l'eau péruvienne extraite, 86 % provient des eaux de surface et 13% des eaux souterraines (FAO, 2015).

2.3 Description et caractérisation du sol

2.3.1 Texture du sol

La texture du sol est définie comme la proportion relative de sable, de limon et d'argile. Il s'agit de l'une des caractéristiques du sol les plus fréquemment mesurées (FAO, 2006; SALLEY et al., 2018; RICHER-DE-FORGES et al., 2022). Elle peut être estimée par des mesures en laboratoire ou par des manipulations de terrain (RICHER-DE-FORGES et al., 2022). La texture du sol influence plusieurs propriétés ainsi que des processus pédologiques, physiques, chimiques, biologiques et hydrauliques. C'est un important facteur de contrôle de ces propriétés, dont celle de la capacité de rétention de l'eau (GUPTA & LARSON, 1979; PACHEPSKY & RAWLS, 1999; ARYA et al., 1999; WÖSTEN et al., 1999; MINASNY & MCBRATNEY, 2002; RITCHEY et al., 2015; SALLEY et al., 2018; ROMÁN DOBARCO et al., 2019b; ROMÁN DOBARCO et al., 2019a; RICHER-DE-FORGES et al., 2022 ainsi que BRIGGS & MCLANE, 1907; VEIHMAYER & HENDRICKSON, 1927; SALTER et al., 1966; SALTER & WILLIAMS, 1969; HALL et al., 1977; BOUMA, 1989; RAWLS et al., 1991; VAN LOOY et al., 2017; RUDIYANTO et al., 2021 cité par RICHER-DE-FORGES et al., 2022). De plus, à l'exception d'évènements extrêmes (érosion sévère, dépôts, inondations), la texture du sol est considérée comme une propriété du sol relativement stable à l'échelle de temps des processus de formation des sols (RICHER-DE-FORGES et al., 2022).

Dans le cadre de cette étude, la caractérisation du sol ne peut se faire à l'aide de techniques de laboratoire, trop coûteuses, difficiles d'accès et de mise en place. En effet, l'université de Huánuco n'est pas en capacité de réaliser ce type de mesure en laboratoire pour cause de pénurie de réactifs ou manque de matériel. Ainsi, une méthodologie dite de « Hand feel texture estimation » (HFTE) est développée. RICHER-DE-FORGES et al., 2022; SALLEY et al., 2018 et RITCHEY et al., 2015 soulignent que, pour les raisons évoquées précédemment, les estimations par HFTE sont les plus abondantes. Par ailleurs, VOS et al., 2016 suggère que les HFTE peuvent remplacer l'analyse en laboratoire.

De plus, même si l'estimation via des mesures en laboratoire est toujours plus exacte, des taux d'erreur persistent néanmoins pour ce type de mesure (RICHER-DE-FORGES et al., 2022). Ainsi, les taux d'erreurs signalés en laboratoire pour les méthodes de sédimentation (pipette et hydromètre) varient de 0 à 6%, avec des différences absolues plus élevées dans le sable et l'argile (6 et 4%, respectivement) que dans les classes de texture du limon (-1%) (KETTLER et al., 2001). Il est enfin important de noter qu'aucune méthode d'analyse de la taille des particules ne peut servir de référence universelle. Effectivement, toutes les méthodes (sédimentation, tamis et diffraction laser) souffrent de biais inhérents fondés sur la forme des particules, la sphéricité, la densité, la composition chimique et les méthodes de prétraitement (ESHEL et al., 2004)

L'estimation de la texture du sol à l'aide de la méthode HFTE est basée sur une technique qui consiste à mouler entre les doigts et le pouce un échantillon de sol. Elle consiste en une estimation des différentes fractions du sol grâce aux différentes tailles de particules qui le constituent (RITCHEY et al., 2015). Au préalable, les particules supérieures à 2mm doivent être retirées et le sol doit se trouver dans un état d'humidité (FAO, 2006). Cette technique est, entre autres, largement utilisée par les conseillers agricoles pour sa facilité de mise en place (FAO, 2006). Elle est également subjective et sa précision est fortement limitée par l'expérience de l'opérateur et sa connaissance locale du contexte (I) pédologique : le matériau d'origine du sol, les conditions de sédimentation (CHRETIEN, 1971 cité par RICHER-DE-FORGES et al., 2022), l'altération et la pédogénèse (ROBERT et al., 1991; HARDY, 1993) et (II) minéralogique : présence de particules non-argileuses dans la fraction fine (HARDY, 1992; HARDY et al., 1999) ou encore la forme des particules plus grossières (CHRETIEN, 1971 et CHRETIEN & BISDOM, 1983 cité par RICHER-DE-FORGES et al., 2022). Elle peut également être influencée par d'autres facteurs comme la matière organique (RICHER-DE-FORGES et al., 2022)

Plusieurs auteurs se sont intéressés à la pertinence de ce type d'essais. Ils ont ainsi été comparés avec des essais réalisés en laboratoire. L'exactitude globale est définie comme une correspondance exacte avec la détermination en laboratoire de la classe de texture du sol (SALLEY et al., 2018). Ainsi, de nombreuses études montrent qu'un grand nombre de classes de textures peuvent être correctement attribuées par des pédologues professionnels avec des exactitudes globales allant de 28% à plus de 66% (RICHER-DE-FORGES et al., 2022).

Une étude récente, considérant des mesures de laboratoire et le triangle de texture français, atteint 73% d'exactitude globale. Les essais de terrain sont cependant réalisés par des professionnels aux connaissances des spécificités locales (RICHER-DE-FORGES et al., 2022). Les 27% de classes mal attribuées semblent cependant se trouver dans des classes de textures proches de celles attribuées en laboratoire (Table 10 en annexe). En effet, lorsque les 15 classes de textures de sols de l'Aisne¹¹ sont regroupées selon 5 classes de textures définies par la FAO (Figure 33 en annexe), l'exactitude générale atteint les 85%. La tendance générale à attribuer des textures de sols proches (classes adjacentes) est d'autant plus marquée (Table 11 en annexe).

11. <https://www6.bordeaux-aquitaine.inrae.fr/ispa/Outils/Outils-d-aide-a-la-decision/For-Eval-une-application-mobile-pour-evaluer-les-sols-forestiers/FOR-EVAL-Aide-a-la-description>

Étant donné la grande variabilité d'exactitudes globales obtenues par des professionnels, il est important de s'intéresser aux résultats obtenus par des novices. Ainsi, les techniciens saisonniers, bien qu'il soit difficile de confirmer leur niveau d'éducation ainsi que leur expérience globale vis-à-vis des sols, sont considérés, par SALLEY et al., 2018, comme possédant des expériences comparables à celles de scientifiques de terrain saisonniers en début de carrière (technicien), manquant souvent de formation et d'expériences formelles dans le domaine des sols. En outre, cette catégorie de sondeurs inclut des variantes allant de novice à pédologue à la retraite. Dans le contexte de cette étude, la méthodologie d'estimation de la texture est destinée aux techniciens d'IDPP, pour la plupart bacheliers ou universitaires de diverses filières, parfois même en agronomie. Des conditions raisonnablement similaires à celles de l'étude sont alors rencontrées : un panel d'acteurs avec divers niveaux de connaissances concernant les sols.

Ainsi, SALLEY et al., 2018 a démontré que des scientifiques saisonniers, non entraînés académiquement, estiment la texture du sol avec la même exactitude que des étudiants universitaires avec un entraînement limité. Les techniciens saisonniers non entraînés par des pédologues atteignent une exactitude variant de 27 à 41% (SALLEY et al., 2018). De plus, les études sur les compétences des étudiants publiées avant 1989 ont indiqué que l'exactitude absolue pour les observateurs moins expérimentés était en moyenne d'environ 40% (LEVINE et al., 1989 cité par SALLEY et al., 2018). Il est également à noter que des observateurs de sols inexpérimentés ont besoin de formation, de pratique et d'étalonnage avant d'obtenir une compétence similaire à celle des professionnels (LEVINE et al., 1989 cité par SALLEY et al., 2018).

Cependant, lorsque les classes adjacentes du triangle de texture USDA ¹² (12 classes de texture de sols) (Figure 8) sont considérées, l'exactitude globale monte à 91% et entre 71 et 78% respectivement pour les pédologues et les techniciens saisonniers (SALLEY et al., 2018). Ainsi, afin d'augmenter les probabilités d'attribution de la texture du sol par des agents non-spécialisés, les classes adjacentes du triangle de texture de l'USDA sont également prises en considération pour la modélisation des besoins d'irrigation dans le cadre de ce travail.

12. <https://www.usda.gov/>

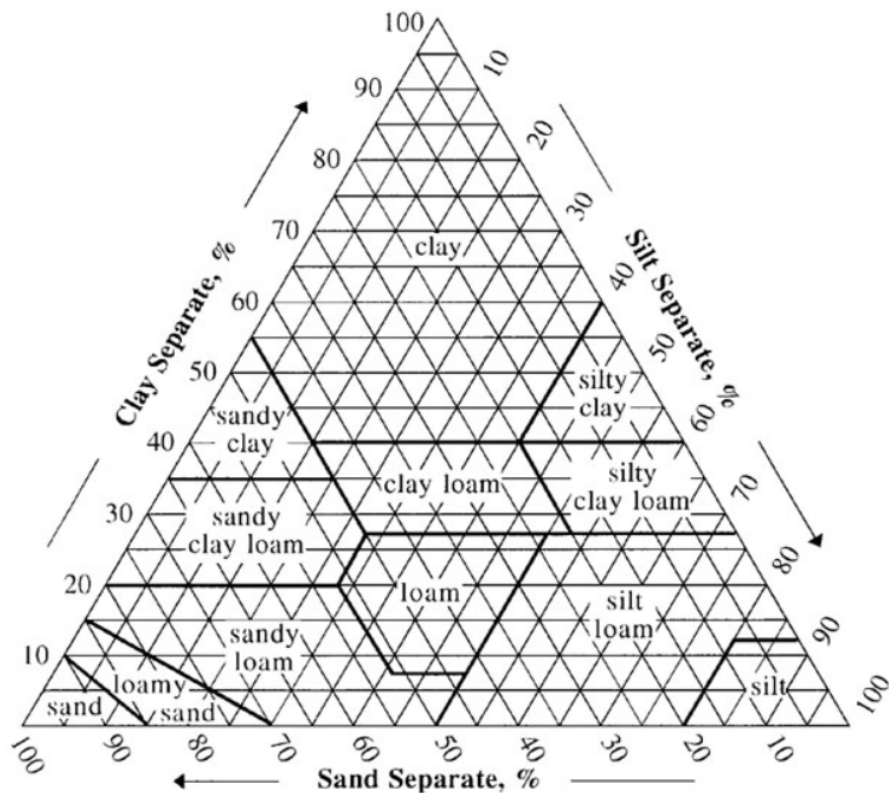


FIGURE 8 – Triangle de texture de sol selon la classification USDA, avec : Sand = sable, Clay = argile, Silt = limon fin, SiltyClayLoam = limon argileux fin, SandyLoam = limon sableux, Loam = limon, SiltLoam = Limon fin, SiltyClay = argile limoneuse, LoamySand = sable limoneux, Silt = limon très fin, ClayLoam = limon argileux, SandyClay : argile sableuse.

Enfin, VOS et al., 2016 précise que l'utilisation de la méthode HFTE est suffisante, plus rapide et plus rentable que l'utilisation d'essais en laboratoire. SALLEY et al., 2018 explique que même les estimations les moins précises sur le terrain peuvent être suffisantes pour certaines applications, comme déterminer si le sol est trop sablonneux pour une irrigation uniquement par les précipitations. RITCHEY et al., 2015 ajoute que les caractéristiques du sol sont prédites avec suffisamment de précision que pour mettre en place des systèmes de gestion.

2.3.2 Nombre d'échantillons

La caractérisation du sol se veut pertinente mais également facile d'application. La sélection du nombre d'échantillons collectés repose sur un compromis d'optimisation entre temps de sondage et précision. Le défi réside donc en l'obtention de données pertinentes dans un temps de prospection limité. Trois outils d'échantillonnage ont été utilisés. Une tarière « fine » (Figure 9a), une pioche et une tarière plus « robuste » (Figure 9b).



(a) Photo : tarière « fine ».



(b) Photo : tarière « robuste ».

FIGURE 9 – Matériels utilisés pour l'échantillonnage de sol.

Les caractéristiques de chacun de ces outils sont reprises au sein du Tableau 1. L'outil le plus performant en terme de temps d'échantillonnage est la tarière « fine ». Cependant, sa grande sensibilité aux pierres ne permet pas son utilisation (Figure 10). La pioche ne permet pas les sondages en profondeurs. L'entièreté de la zone racinaire ne peut pas être inspectée. La tarière « robuste » est la plus utilisée. Sa résistance permet une utilisation prolongée. Néanmoins, le temps de sondage est plus élevé vu sa mauvaise maniabilité. De plus, elle ne permet pas d'apprécier les différentes stratifications du sol comme la tarière « fine ».

TABLE 1 – Comparaison des caractéristiques des différents outils utilisés pour l'échantillonnage de sol, avec : les symboles : (+) explicitant une augmentation, (-) une diminution de la caractéristique.

Caractéristiques	Tarrière « fine »	Pioche	Tarrière « robuste »
Profondeur sondée (cm)	80	30	120
Facilité d'utilisation	++	+	-
Échantillonnage d'un profil (min)	30	45	60
Sensibilité pierre	+++	0	+++



FIGURE 10 – Photo : tarière « fine » pliée après utilisation sur le terrain.

Finalement, un seul sondage par champ peut donc être réalisé. Un échantillon tous les 30cm est prélevé. Trois échantillons sont ainsi extraits à 0-30, 30-60 et 60-90cm (FAO, 2006). La limite de la parcelle ne doit pas être échantillonnée (FAO, 2006). Le test HFTE est répété 3 fois sur l'échantillon prélevé. Trois sous-échantillons sont ainsi prélevés.

Chaque caractéristique du sol possède sa propre distribution de valeur (CARTER & GREGORICH, 2008). Cette distribution peut être caractérisée par des paramètres comme la moyenne, la variance ou le coefficient de variation (CV) (Équation 2). Le CV représente la mesure normalisée de la dispersion autour de la moyenne (CARTER & GREGORICH, 2008).

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} * 100 \quad (2)$$

avec σ : l'écart-type et μ : la moyenne de la population étudiée.

Le Tableau 2 tiré de CARTER & GREGORICH, 2008 permet d'évaluer la qualité statistique d'un nombre d'échantillons choisis. Les CV pour l'estimation de la texture du sol varient entre moins de 15% pour le pourcentage de limon et 15 à 35% pour l'estimation de la teneur en sable, argile et carbone (Table 13 en annexe). Ainsi, différentes combinaisons d'erreur relative et de niveau de confiance sont possible pour 3 répétitions de l'estimation de la texture du sol. Pour l'exemple du limon (CV = 15%), un niveau de confiance de 0.90 et d'erreur relative de 0.1 est atteint. Cela signifie que, en moyenne, dans 90% des cas, le sol échantillonné est bien limoneux et qu'une erreur de 10% sur la quantité de limon est envisageable. Enfin, au vu des pentes présentées sur la zone d'étude (Figure 4b), un échantillonnage selon la pente devrait être réalisé dans le cas où plusieurs échantillons sont prélevés (CARTER & GREGORICH, 2008).

TABLE 2 – Qualité statistique de l'échantillonnage selon le nombre d'échantillons réalisé, tiré de CARTER & GREGORICH, 2008.

Confidence level	Relative error, d_r	Coefficient of variation (CV), %					
		10	20	40	50	100	150
0.80	0.10	2	7	27	42	165	370
	0.25			6	7	27	60
	0.50				2	7	15
	1.0					2	4
0.90	0.10	2	12	45	70	271	609
	0.25			9	12	45	92
	0.50				2	13	26
	1.0					2	8
0.95	0.10	4	17	63	97	385	865
	0.25			12	17	62	139
	0.50				4	16	35
	1.0					9	16

Source: Adapted from Gilbert, R.O., in *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*, Van Nostrand, Reinhold, New York, 1987, 320 pp.

2.3.3 Estimation de la matière organique

La matière organique (MO) sert également d'entrée au modèle. Il s'agit de tous les éléments décomposés, partiellement décomposés et non-décomposés provenant de plantes et d'animaux (FAO, 2006).

Elle peut être estimée à l'aide des couleurs de Munsell en prenant en considération la classe de texture de l'échantillon de sol (Table 12 en annexe) (FAO, 2006). Cette méthode est basée sur le concept que la couleur du sol (value) est un mélange de couleurs obscures dues à la MO et claires dues aux substances minérales. Une valeur de 0 représente le noir absolu et de 10, le blanc absolu. Ainsi, une couleur avec une valeur de 5 se trouve visuellement à mi-chemin entre le noir et le blanc absolu (MUNSELL COLOR (FIRM), 1994). Une valeur de 4 sur l'échelle de Munsell pour un sol de type « Loam » (limoneux) correspond ainsi à des gammes de valeurs allant de 0.4 à 0.6% de MO (g de MO/100g de sol sec) (Table 12 en annexe). Cette méthode tend à surestimer la MO dans les sols des régions sèches et à la sous-estimer pour les sols tropicaux. Ainsi, cette méthode ne permet pas de prédire avec précision la quantité de MO mais bien de donner un indication sur la tendance du sol (FAO, 2006).

2.3.4 Encodage des données dans une fonction de pédotransfert

Beaucoup de fonctions de pédotransfert ont pour objectif de déterminer les propriétés hydrauliques des sols, plus spécifiquement leur capacité de rétention de l'eau. La plupart de ces fonctions utilisent la texture du sol pour prédire des propriétés qui sont difficiles ou coûteuses à mesurer (WÖSTEN et al., 1995; BRUAND et al., 2003; AL MAJOU et al., 2007; PIEDALLU et al., 2011; WÖSTEN et al., 2001; MCBRATNEY et al., 2002 ainsi que BOUMA, 1989; VAN LOOY et al., 2017 cités par RICHER-DE-FORGES et al., 2022). Après l'estimation de la texture par la méthode HFTE, l'échantillon est classé selon l'une des 12 classes qui composent le triangle de texture USDA (Figure 8). Les teneurs moyennes de classe en limon, sable et argile sont attribuées pour chacune des 12 catégories de textures. Cette information est complétée par la teneur en matière organique.

RICHER-DE-FORGES et al., 2022 ont pu démontrer que l'utilisation d'une fonction de pédotransfert pour définir les propriétés du sol à partir d'une méthode HFTE ou en laboratoire sont consistantes. Ils ont également démontré que la construction d'une fonction de pédotransfert à l'aide de données obtenues via la méthode HFTE et en laboratoire ne sont pas significativement différentes.

AquaCrop-OSPy possède un module d'estimation des propriétés hydrauliques du sol via une fonction de pédotransfert (SAXTON & RAWLS, 2006). Elle permet d'estimer les teneurs en eau à la capacité au champ, au point de flétrissement et à saturation. Elle est construite à partir de données provenant de 2000 échantillons d'horizon A et 2000 échantillons d'horizon B. Les valeurs extrêmes comme les pourcentages de MO supérieurs à 8% ou les pourcentages en argile supérieurs à 60 % ne sont pas pris en compte (SAXTON & RAWLS, 2006). Tous les sols rencontrés dans la zone respectent ces conditions.

Des incertitudes liées à la méthode HFTE et à l'utilisation d'une fonction de pédotransfert persistent (RICHER-DE-FORGES et al., 2022). Afin de les prendre en considération, un module de comparaison des sols est ajouté à AquaCrop-OSPy. Les rendements obtenus par les classes de textures adjacentes à celle déterminée sur le terrain sont ainsi comparées à l'aide d'une ANOVA (Paragraphe 2.2.4). Si les rendements sont significativement différents, différents profils de sols sont conservés. Cette conservation permet de donner un intervalle de confiance à l'ONG et aux producteurs quant aux rendements et aux besoins en eau attendus.

2.4 Plantes cultivées

Suite à l'enquête auprès des producteurs, plusieurs plantes cultivées dans la région sont identifiées. Le maïs, la pomme de terre, le blé et parfois le chou constituent ainsi les cultures de rente, tandis que la luzerne ou le reygrass sont des cultures fourragères utilisées pour l'alimentation des cochons d'Inde. D'autres plantes comme les carottes, la betterave, la salade, les piments ou les tomates constituent des cultures de consommation propre.

Au sein d'AquaCrop-OSPy, 4 cultures sont encodées : le maïs, le riz, la pomme de terre et le blé. Pour la présentation des besoins en eau, la culture du maïs est utilisée. Elle a été calibrée à niveau mondial dans le cadre de l'utilisation d'AquaCrop (HSIAO et al., 2009). Le maïs irrigué est semé aux alentours de janvier (de décembre à février) et, selon l'altitude, est récolté entre 150 (en dessous de 3000m) et 250 (haut dessus de 3 000m) jours plus tard. Les fréquences et durées d'irrigation varient, quant à elles, selon les producteurs (Table 3). Ainsi, certains producteurs irriguent pendant 3h (avant de déplacer l'asperseur) tous les 8 jours tandis que d'autres irriguent tous les 20 jours pendant 4 ou 12h.

Le temps d'irrigation multiplié par le débit mesuré au niveau de l'asperseur et divisé par la surface irriguée permet d'obtenir des doses d'irrigation (Table 4). Ce sont ces différentes doses combinées aux fréquences d'irrigation qui sont utilisées pour modéliser les besoins en eau d'irrigation nets et les rendements obtenus par les producteurs. La fréquence de 8 jours étant la plus répandue, non seulement pour le maïs, mais également pour les autres cultures (Table 3), elle est conservée pour la présentation de la modélisation via AquaCrop-OSPy.

TABLE 3 – Fréquences et durées d'irrigation types utilisées par les producteurs de la région pour l'irrigation de la culture du maïs. La valeur « Total » représente l'utilisation des fréquences et des temps d'irrigation du maïs pour l'ensemble des cultures rencontrées à l'exception de la luzerne.

Fréquence irrigation (jour)	Nbre de producteurs		Durée irrigation (heure)	Nbre de producteurs	
	Maïs	Total		Maïs	Total
8	5	27	1	1	5
			3	2	9
			12	2	9
15	2	12	4	1	3
			6	1	2
20	2	5	4	1	1
			12	1	3

TABLE 4 – Doses d'irrigation employées par les producteurs de la région pour la culture du maïs selon différentes combinaisons de débit (L/h) et de temps d'irrigation (h).

Debit (L/h)	Surface irriguée (m ²)	Dose (mm)				
		1h	3h	4h	6h	12h
665	201	3	9	12	17	35
686	275	2	7	10	15	30
720	275	3	8	10	16	31
882	311	3	9	11	17	34
919	935	1	3	4	6	12
939	491	2	6	8	11	23
1108	683	2	5	6	10	19
1137	693	2	5	7	10	20
1140	683	2	5	7	10	20
1200	314	4	11	15	23	46
1440	314	5	14	18	28	55
1440	452	3	10	13	19	38
2880	468	6	18	25	37	74

2.5 Systèmes d'irrigation

Des systèmes d'irrigation par aspersion ont été implémentés dans la région de Huánuco par l'ONG IDPP. Après plusieurs années d'utilisation de ces systèmes par les producteurs, une évaluation est proposée afin d'en déterminer l'évolution. Des problèmes liés à la gestion de l'eau peuvent être dus à une mauvaise conception et/ou au mauvais fonctionnement du système d'irrigation par aspersion. Il est donc nécessaire de quantifier les performances de conception et d'utilisation du système (DINKA, 2016).

Plusieurs auteurs s'accordent sur l'étude de différentes caractéristiques : la dose d'application, le débit d'application, la pression et variation de pression, la durée d'application, la déficience du sol en teneur en eau, l'infiltration, l'uniformité d'application, ainsi que les dommages que peut causer le système sur la culture (CRIDDLE, 1956; MERRIAM & KELLER, 1978; ASCOUGH & KIKER, 2002).

2.5.1 Caractéristiques des systèmes

Les systèmes d'irrigation par aspersion comportent généralement plusieurs éléments. Dans la région, la zone de captation peut être des caisses brise charge (Figure 11a), des réservoirs (Figure 11b), des ruisseaux ou des canaux d'irrigation (Figure 11c). Certains cultivateurs ne possèdent pas leur propre réservoir ou n'ont pas un accès direct à la ressource. Ils sont, dès lors, contraints de se connecter à la prise de tête selon un tour de rôle que fixe un calendrier traditionnel. Une ligne de conduction ou ligne primaire relie ensuite la prise de tête à la parcelle. Depuis la parcelle, une ligne secondaire et parfois même tertiaire (ou latérales) est reliée à un asperseur.

Afin de déterminer la manière d'installer des systèmes dans la région, l'espace entre les asperseurs, les lignes latérales ou encore leur longueur, diamètre et types de tuyaux sont pris en considération (MERRIAM & KELLER, 1978; ASCOUGH & KIKER, 2002). Le positionnement des asperseurs : hauteur et perpendicularité par rapport au sol est également apprécié (MERRIAM & KELLER, 1978). Au vu des pentes présentes dans la zone d'étude, son estimation est également réalisée (MERRIAM & KELLER, 1978; CORNISH, 1998).



(a) Photo : caisse brise charge.



(b) Photo : réservoir.



(c) Photo : canal d'irrigation.

FIGURE 11 – Différents types de captation pour la zone d'étude.

2.5.2 Évaluation des systèmes

Le facteur qui influence la productivité d'un système, aussi bien d'un point de vue agronomique qu'économique, est l'habilité du système à appliquer l'eau de manière uniforme et efficace sur le périmètre irrigué (SOLOMON, 1984; LETEY, 1985; HUNSAKER & BUCKS, 1987 cité par CLEMMENS, 1991; FOLEY & RAINE, 2002; GRIFFITHS, 2006 cité par DINKA, 2016).

Distribution de l'uniformité

Tous les systèmes d'irrigation sont considérés comme non-uniformes dans leur manière d'appliquer la dose d'irrigation (CLEMMENS, 1991). L'objectif est donc de maximiser l'uniformité de distribution. Une distribution uniforme de l'eau est nécessaire pour maximiser le rendement, la qualité des cultures ainsi que l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation disponible (ASCOUGH & KIKER, 2002; DECHMI et al., 2003; DINKA, 2016; ZHANG et al., 2018b). L'uniformité de l'application de l'eau est donc l'aspect le plus important du rendement d'un système par aspersion (SOLOMON, 1979 cité par DINKA, 2016 et MAROUFPOOR et al., 2010). Le coefficient le plus largement utilisé pour la distribution de l'uniformité est le coefficient de Christiansen (CU) (CHRISTIANSEN, 1942; FUKUI et al., 1980; J. LOUIE & S.SELKER, 2000 ASCOUGH & KIKER, 2002; DECHMI et al., 2003; PLAYÁN et al., 2006; MOAZED et al., 2010; FRISO & BORTOLINI, 2012; DWOMOH et al., 2013; ZHANG et al., 2013; OSMAN et al., 2014a; OSMAN et al., 2014b; DINKA, 2016; DARKO et al., 2017; ZHANG et al., 2018a; ZHANG et al., 2018b). Ce coefficient repose sur une mesure de la somme des écarts absolus à la moyenne des diverses mesures. Il est généralement admis qu'un CU (Équation 3) de 80% est « adéquat » ou « acceptable » pour l'irrigation par aspersion (CHRISTIANSEN, 1942; OSMAN et al., 2014a; OSMAN et al., 2014b; DINKA, 2016; DARKO et al., 2017; ZHANG et al., 2018a; ZHANG et al., 2018b). Quarante pourcents de la zone irriguée reçoit alors la même dose d'irrigation.

$$CU = 100 * \left(1 - \frac{\sum X}{n * m}\right) \quad (3)$$

Avec $X : |z - m|$: la valeur absolue de la déviation de la hauteur d'eau collectée dans les seaux (mm), z : la hauteur d'eau collectée (mm), m : la moyenne des observations (mm), n : le nombre d'observation.

La distribution de l'uniformité du quartile inférieur (DU_{lq}) (Équation 4) est également utilisée pour caractériser l'uniformité (BURT et al., 1997; ASCOUGH & KIKER, 2002; ZHANG et al., 2013; OSMAN et al., 2014a; OSMAN et al., 2014b; DARKO et al., 2017). Les valeurs standards de DU_{lq} pour l'irrigation par aspersion sont de 75% (ASCOUGH & KIKER, 2002). Un DU_{lq} de 75% exprime ainsi que le quartile inférieur de l'aire irriguée a reçu 75% de la dose moyenne. Cela signifie que de la sous-irrigation s'est produite dans la zone de test.

$$DU_{lq} = \frac{\bar{q}_1}{m} \quad (4)$$

avec : \bar{q}_1 : la moyenne du quartile inférieur (mm) et m : la moyenne (mm).

Le CV (Équation 5) réside en une expression statistique de la distribution de l'uniformité (ASCOUGH & KIKER, 2002; OSMAN et al., 2014b). Il est utilisé pour corriger la dose d'irrigation (Paragraphe 2.7.1).

$$CV = \frac{s}{m} \quad (5)$$

avec : s : l'écart-type et m : la moyenne (mm).

Afin de déterminer ces paramètres, des récipients sont utilisés pour collecter l'eau. Dans le cadre de cette étude, une trentaine de seaux de 18 cm de diamètre et d'une capacité de 4L ont pu être rassemblés. Le nombre de récipients utilisés dépend du système d'irrigation par aspersion rencontré (CLEMMENS, 1991). CLEMMENS, 1991 explique que n'importe quel type de récipient peut être utilisé à condition qu'il soit semblable pour la même évaluation. ASCOUGH & KIKER, 2002 recommande un diamètre de seau d'au moins 8.5cm. Un récipient gradué est ensuite utilisé pour quantifier la quantité d'eau recueillie dans les récipients. MERRIAM & KELLER, 1978 conseille d'utiliser une graduation de 1ml. Seul un récipient aux graduations de 25ml a pu être trouvé sur place. L'erreur de mesure due à cet équipement est de $\pm 3\%$ (Paragraphe 5.1.2 en annexe). Afin d'établir le schéma de distribution entre deux asperseurs, ASCOUGH & KIKER, 2002 proposent d'utiliser au moins 20 récipients, MERRIAM & KELLER, 1978 au moins 24 contre 36 pour ASCOUGH & KIKER, 2002 et DINKA, 2016. La distance entre les récipients ne devrait pas excéder $3*3\text{m}$ (CHRISTIANSEN, 1942; ASCOUGH & KIKER, 2002). La zone d'évaluation devrait couvrir deux aires adjacentes entre 3 asperseurs (systèmes fixes) et 2 asperseurs (systèmes mobiles) (MERRIAM & KELLER, 1978). DINKA, 2016 prodigue de réaliser les mesures entre 1 et 4 asperseurs tandis que CLEMMENS, 1991 propose une prospection sur une zone couverte par plusieurs asperseurs. CRIDDLE, 1956 et CLEMMENS, 1991 ajoutent que les récipients doivent être positionnés de manière symétrique entre les asperseurs. CRIDDLE, 1956 précise également que si les asperseurs sont positionnés à moins de 9m les uns des autres, un écart de 1,5m entre récipients devrait être respecté. Si cet écart est plus important, une distance de 3m est alors préconisée (CRIDDLE, 1956; ASCOUGH & KIKER, 2002; DINKA, 2016). Les récipients doivent être positionnés au dessus de la canopée (CLEMMENS, 1991). Le positionnement des récipients proposé par la littérature est ainsi représenté par des cercles noirs dans la Figure 12.

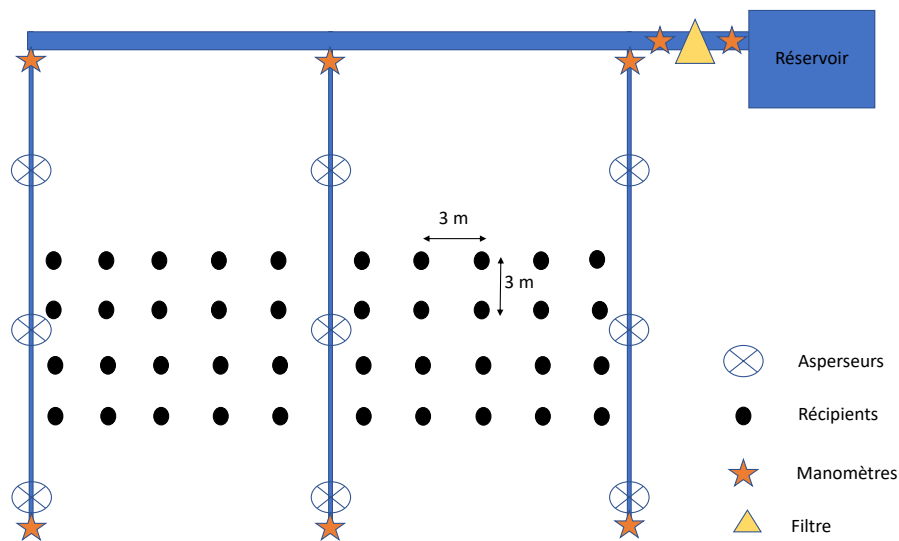


FIGURE 12 – Évaluation de systèmes d'irrigation par aspersion selon la littérature.

Enfin, la zone étudiée devrait, de préférence, être positionnée suffisamment loin de la dernière ligne latérale, CRIDDLE, 1956) MERRIAM & KELLER, 1978 précise que la zone de test peut être unique et que, pour un champ plat, elle devrait être située à 40% de la distance entre l'entrée et la sortie d'eau la plus éloignée. Réaliser ce test sur plusieurs zones de la même ligne latérale permet de déterminer des changements de débit ou de schéma d'uniformité, si la variation de pression est suffisante pour en engendrer (MERRIAM & KELLER, 1978; CLEMMENS, 1991). Une variation de pression de 20% est tolérée (CRIDDLE, 1956; MERRIAM & KELLER, 1978; P. SAWA & FRENKEN, 2002; DINKA, 2016).

Les systèmes étudiés ne sont pas aussi complexes que ceux de la littérature. Le test est adapté à la réalité rencontrée sur le terrain (Figure 13). Ainsi, la plupart des systèmes sont des systèmes mobiles comportant un seul asperseur (Figure 14). Pour les systèmes mobiles, les récipients doivent être positionnés entre deux positions d'asperseurs selon DINKA, 2016. L'étude du recouvrement des asperseurs peut également être estimé à l'aide de récipients (CRIDDLE, 1956; MERRIAM & KELLER, 1978; CLEMMENS, 1991; ZHANG et al., 2013; DINKA, 2016; ZHANG et al., 2018a; ZHANG et al., 2018b). Il peut ici être étudié lorsque le test suit le déplacement de l'asperseur (Figure 14).



FIGURE 13 – Photo : réalisation du test d'uniformité adapté à la réalité du terrain.

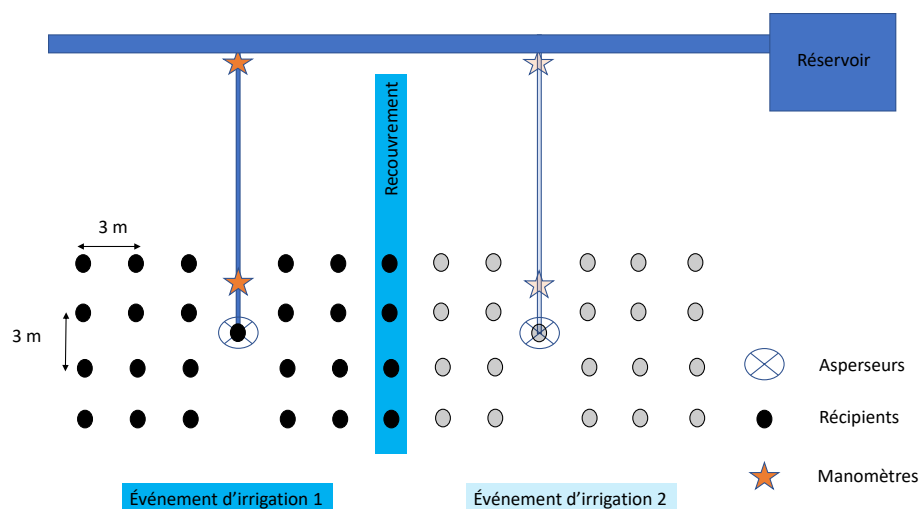


FIGURE 14 – Évaluation de systèmes d'irrigation par aspersion adaptée aux contraintes locales.

La prise de mesure est enclenchée lorsque le système arrive à opération normale. Il faut alors éviter que les récipients se remplissent au moment du lancement du système (CRIDDLE, 1956; MERRIAM & KELLER, 1978). Pour ce faire, MERRIAM & KELLER, 1978 propose de bloquer la buse de l'asperseur hors de la zone d'intérêt. L'opération peut s'arrêter lorsqu'au moins 1,5cm d'eau est présente dans les récipients ou lorsque une heure s'est écoulée (CHRISTIANSEN, 1942; CRIDDLE, 1956). Afin d'uniformiser la prise de mesure, la durée du test est fixée à 1h. La bonne distribution de l'application de la dose d'irrigation est également contrôlée visuellement. En effet, l'eau présente sur le sol devrait, lorsque le jet de l'asperseur termine son nouveau tour, s'être infiltrée. En outre, les dommages éventuels engendrés par l'évènement d'irrigation sur les cultures ainsi que de potentiels ruissellement sont observés (CRIDDLE, 1956; MERRIAM & KELLER, 1978).

Efficience de l'évènement d'irrigation

L'adéquation d'irrigation explique le rendement du système (CHAUDRY, 1976 cité par DINKA, 2016). En effet, le niveau d'uniformité ne donne aucun sens physique à la suffisance de l'application de l'eau d'irrigation. Le rendement adéquat de l'irrigation correspond à la capacité d'un système d'irrigation à fournir la quantité d'eau requise qui peut être stockée efficacement dans la zone racinaire et répondre aux besoins en eau des cultures. Une irrigation adéquate est définie comme une irrigation qui pénètre la zone racinaire sur 95% de la superficie irriguée (CUENCA, 1989 cité par DINKA, 2016). Bien qu'un niveau d'adéquation puisse être mathématiquement supérieur à 100%, l'économie de l'irrigation dicte habituellement un niveau d'adéquation inférieur (ALLISON & HESSE, 1969 cité par (DINKA, 2016).

Le caractère adéquat de la dose d'irrigation ou l'efficience d'application (EA) (Équation 6) est défini comme étant le rapport entre la profondeur moyenne d'eau observée et la profondeur nette d'application modélisée en considérant une efficacité d'application de 75% (BURT et al., 1997; PHOCAIDES, 2000; P. SAWA & FRENKEN, 2002; DINKA, 2016). L'efficacité d'application représente la différence entre l'eau captée à la prise de tête et la quantité réellement utilisée par la plante.

$$EA = \frac{a}{b} * 100 \quad (6)$$

Avec a : la dose moyenne observée (mm) et b : la dose nette d'irrigation souhaitée (mm) (obtenue via la modélisation des besoins en eau par AquaCrop-OSPy)

Mesure de débit et de pression

La pression et le débit sont mesurés au niveau des raccords (avant l'asperseur et, si possible, en début de ligne secondaire) ainsi qu'au niveau de l'asperseur. Il n'est pas toujours possible de réaliser ces mesures. Le système ne peut pas être endommagé ou modifié. Les mesures de débit permettent de déterminer la dose d'application de l'eau, et celle de pression d'évaluer sa variation (CLEMMENS, 1991). Elles sont réalisées lorsque le système a atteint son état stationnaire d'opération.

Pression

La pression peut être mesurée à plusieurs niveaux : de part et d'autre de la ligne latérale testée (CRIDDLE, 1956; CLEMMENS, 1991), au point le plus élevé et/ou le plus éloigné, par rapport à la pompe ou encore avant et après le filtre (CRIDDLE, 1956). Les mêmes opérations sont répétées pour la première et la dernière ligne de latérales (étoiles sur la Figure 12). Pour les systèmes implémentés n'utilisant pas de pompes, de filtres et ne possédant pas plusieurs latérales, des mesures de pression sont réalisées au niveau de l'asperseur et des raccords (étoiles sur la Figure 14). Elles sont réalisées à l'aide d'un manomètre possédant une gamme de 0 à 6bar (Figure 15) (MERRIAM & KELLER, 1978).



FIGURE 15 – Photo : réalisation de la mesure de pression sur le système d'irrigation par aspersion à l'aide d'un manomètre positionné au niveau d'un raccord.

Débit

Le débit (Équation 7) est estimé à l'aide d'un récipient de volume connu en mesurant le temps nécessaire pour le remplir (CRIDDLE, 1956; MERRIAM & KELLER, 1978). Cette opération est répétée afin d'obtenir une moyenne. Les mesures réalisées au niveau des tuyaux sont situées aux emplacements de celles réalisées pour la pression (étoiles sur la Figure 12) (CRIDDLE, 1956; DINKA, 2016). La mesure du débit de l'asperseur est réalisée à l'aide d'un tuyau de jardin directement connecté à la buse de l'asperseur (Figure 16) (CRIDDLE, 1956; MERRIAM & KELLER, 1978).

$$D = \frac{V}{t} \quad (7)$$

Avec D : le débit (L/s) ; V : le volume du récipient (L) et t le temps de remplissage du récipient (s).



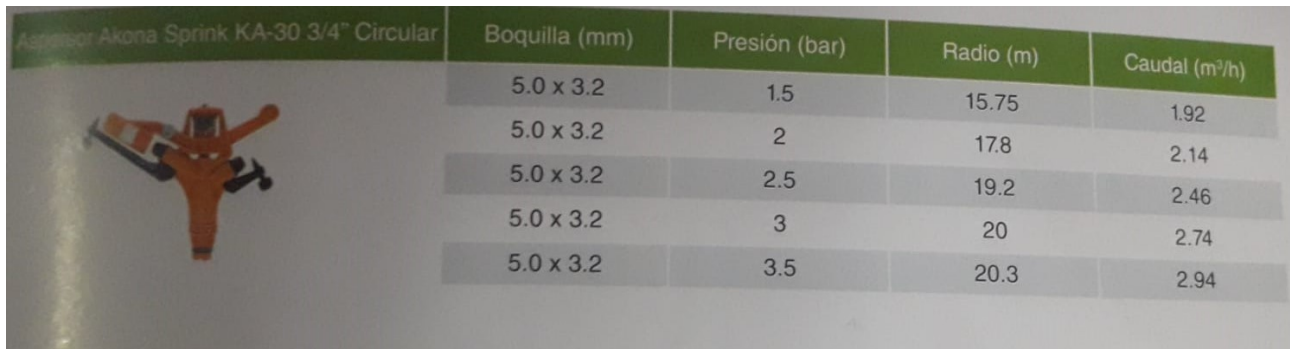
FIGURE 16 – Photo : réalisation de la mesure du débit sur un asperseur à l’aide d’un tuyau d’arrosage connecté à la bouche de sortie.

2.5.3 Tendence générale

L’ensemble des données mesurées sur les systèmes (hauteur de l’asperseur, débit, pression et paramètres d’uniformité) sont entrés dans une Analyse en Composantes Principales (ACP). Il s’agit d’une analyse multivariée permettant d’extraire les informations importantes au départ des observations (RICHARDSON, 2009 ; ABDI & WILLIAMS, 2010 ; VIDAL et al., 2016). Elle est utilisée pour déterminer les variables qui influencent le plus les paramètres d’uniformité.

2.6 Dimensionnement de systèmes

Les systèmes d’irrigation devraient être dimensionnés avec l’objectif d’obtenir une uniformité d’application élevée (TIERCELIN & VIDAL, 2006). Ceci est rendu possible en limitant les variations de pression au sein des différentes lignes de latérales et en prenant en considération la non uniformité du taux d’application (Paragraphe 2.5). Il est estimé que, si l’asperseur le plus éloigné de la prise de tête possède la pression requise, alors, les autres asperseurs, plus proches, possèdent également la pression de fonctionnement requise (TIERCELIN & VIDAL, 2006). La pression utilisée en entrée est celle du milieu de la gamme de l’asperseur (Figure 17).




Aspersor Akona Sprink KA-30 3/4" Circular	Boquilla (mm)	Presión (bar)	Radio (m)	Caudal (m³/h)
	5.0 x 3.2	1.5	15.75	1.92
	5.0 x 3.2	2	17.8	2.14
	5.0 x 3.2	2.5	19.2	2.46
	5.0 x 3.2	3	20	2.74
	5.0 x 3.2	3.5	20.3	2.94

FIGURE 17 – Photo : caractéristiques d'un asperseur issues d'un des catalogues du fournisseur en matériel d'irrigation d'IDPP.

Les caractéristiques de l'asperseur sont entrées dans l'outil de dimensionnement. La relation pression-débit peut ainsi être établie (Équation 8) (DENNIS C. KINCAID, 1982; BURT et al., 1997; TIERCELIN & VIDAL, 2006; ZHANG et al., 2013; WALLER & YITAYEW, 2016).

$$Q = K * P^x \quad (8)$$

Avec : Q : le débit en L/h, P : la pression en mètre et K et x des paramètres.

Cette relation permet, par la suite, de calculer les pertes de charges pour l'ensemble du système tout en prenant en considération la présence d'autres asperseurs. Elles sont calculées via l'équation de Darcy (Équation 9) (CHRISTIANSEN, 1942; PHOCAIDES, 2000; MOTT & UNTENER, 2016; WALLER & YITAYEW, 2016). Le coefficient de friction (f) est estimé à partir du diagramme de Moody (Figure 18).

$$h_L = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (9)$$

Avec h_L : les pertes de charges en long (m), f : le coefficient de friction (-), L : la longueur du tuyau (m), D : le diamètre (m), v : la vitesse (m/s) et g la force d'attraction terrestre (m/s²).

Ces formules sont intégrées au sein d'un module. La sortie est une hauteur exprimée en mètre. Elle représente la différence d'altitude à respecter entre l'asperseur le plus éloigné du système et la position du réservoir afin d'obtenir une gamme de pression qui respecte celle de fonctionnement de l'asperseur.

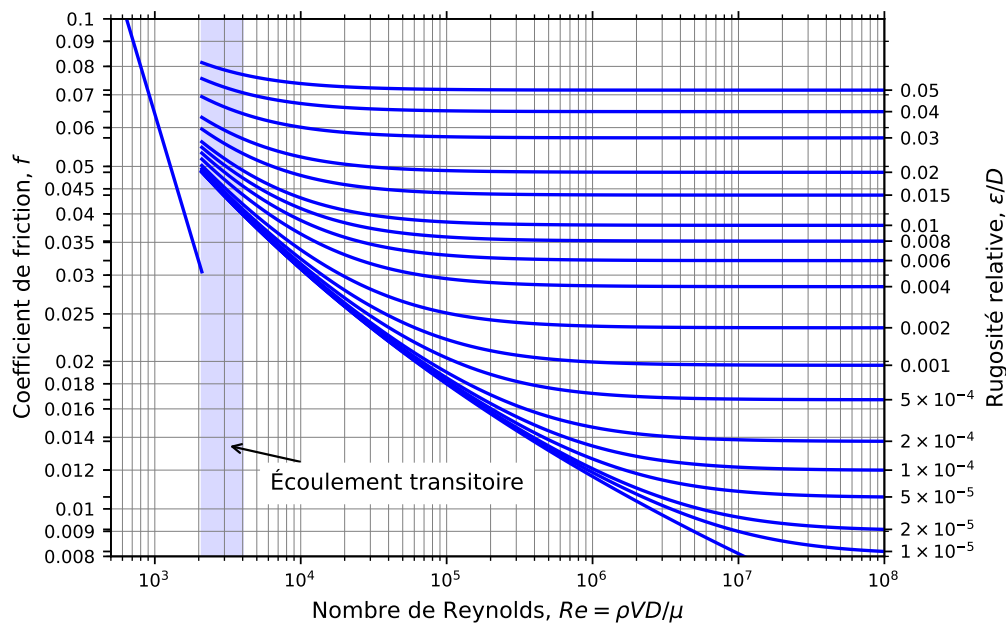


FIGURE 18 – Diagramme de Moody, détermination du facteur de friction (f) à partir du nombre de Reynolds (Re) et de la rugosité relative.

2.7 Calendrier d'irrigation

Pour la plupart des productions dépendant de systèmes d'irrigation par aspersion, une ressource en eau adéquate et fiable est requise. Cela permet de faciliter l'application de la dose d'irrigation en regard des besoins biologiques et physiologiques de la plante. De ce fait, la ressource en eau devrait être capable de subvenir totalement aux besoins de la plante et à la fréquence d'irrigation (DINKA, 2016).

2.7.1 Dose d'irrigation

Les doses d'irrigation sorties par AquaCrop-OSPy sont des doses nettes. Elles correspondent à la dose exacte que va recevoir la parcelle. L'efficacité et la distribution de l'uniformité ne sont pas prises en considération. Afin d'identifier des doses brutes à irriguer, l'efficacité d'utilisation de l'eau par des systèmes par aspersion est considérée à 75% (Équation 10) (BURT et al., 1997; PHOCAIDES, 2000; ASCOUGH & KIKER, 2002; P. SAWA & FRENKEN, 2002; DINKA, 2016). Toutes les doses sont donc augmentées.

De plus, afin de prendre en considération la mauvaise répartition de l'eau au sein de la parcelle (uniformité), le CV obtenu pour la région permet de corriger la dose (WALLER & YITAYEW, 2016). Pour un CV de 0,6, si 10mm d'eau sont distribués à la sortie de l'asperseur, certaines parties en reçoivent 4mm tandis que d'autres en reçoivent 16mm. Pour que l'ensemble de la parcelle reçoive la dose adéquate, 16mm d'eau doivent alors être distribués.

$$D_{brute} = (1 + CV) * \frac{D_{net}}{0.75} \quad (10)$$

Avec D_{brute} : la dose d'irrigation brute (mm), D_{net} : la dose d'irrigation nette (mm), CV : le coefficient de variation.

2.7.2 Optimisation du calendrier d'irrigation

Deux types de calendrier d'irrigation optimisés sont proposés aux producteurs. Un calendrier dit « libre », qui optimise dose et fréquence d'irrigation, et un calendrier « fixe », optimisant uniquement la dose d'irrigation. L'optimisation des deux calendriers se fait via une maximisation du rendement, une minimisation de son incertitude (écart-type) et en fonction des quantités d'eau utilisées. Sur base de ces éléments, un calendrier d'irrigation peut être établi.

Les besoins en eau optimisés pour un calendrier « libre » considèrent une irrigation « parfaite ». Cela signifie que la dose adéquate est donnée au moment le plus propice. La dose d'irrigation est attribuée selon le facteur de déplétion de la culture. Ce facteur corrige la RU (Réserve Utile) (Équation 16 en annexe) selon les capacités de la plante à résister à une diminution de la teneur en eau du sol. L'obtention de la RFU (Réserve Facilement Utilisable) (Équation 17 en annexe) permet ainsi l'activation de l'évènement d'irrigation. En effet, lorsque la teneur en eau du sol passe sous la valeur de la RAW, la plante n'est plus capable d'extraire l'eau du sol. Le calendrier « fixe » prend uniquement en considération la dose d'irrigation. Ce calendrier doit respecter les tours d'irrigation et la fréquence d'irrigation ne peut en être modifiée. Différentes doses d'irrigation incrémentées par pas de 1mm sont alors testées pour des fréquences d'irrigation « fixes ».

3 Résultats et discussion

3.1 Évaluation des systèmes d'irrigation

3.1.1 Tendence générale

Au total, 17 systèmes différents ont été évalués. Pour certains, plusieurs évaluations ont été effectuées. En effet, quand le producteur déplace son asperseur pour irriguer une autre partie de son champ, une autre série de tests est également réalisée. Ce sont ainsi 34 tests qui ont pu être effectués au total.

Les systèmes consistent principalement en l'installation d'un tuyau connecté à un asperseur depuis la prise de tête. Sur les 17 systèmes visités, 7 puisent directement l'eau au niveau du ruisseau, 3 possèdent des caisses brises charges et 7 des réservoirs. Six des sept réservoirs sont installés au sein de la même communauté (Gasgo). Depuis la prise de tête, la longueur du tuyau jusqu'à l'asperseur (*dist_tuyau_tot*) est en moyenne de 716m (Table 5). Cependant, cette longueur varie fortement entre les systèmes (écart-type élevé). Ainsi, certains asperseurs sont situés proches de la zone de captation (50m), tandis que d'autres sont positionnés à presque 2km. La différence d'altitude entre le réservoir et l'asperseur (*hauteur_asp_res*) est généralement de 104m. Les tuyaux utilisés sur un même système sont généralement du même matériau (*nbre_tuyau_diff*). D'un système à l'autre ils peuvent être en polyéthylène (tuyau prévu pour l'irrigation) (Figure 19a) ou de type tuyau d'arrosage (Figure 19b). Le nombre de diamètres différents sur un même système est généralement de 2. Les diamètres rencontrés varient de 16mm (ligne secondaire) à 60mm (ligne primaire).

TABLE 5 – Caractéristiques générales des systèmes évalués de la zone d'étude.

Variable	Signification	Moyenne	Écart-type
CU	Coefficient d'uniformité de Christiansen (%)	52	18
DUIq	Distribution de l'uniformité du quartile inférieur	0.44	0.18
CV	Coefficient de variation	0.63	0.25
num_seau	Nombre de seaux utilisés pour l'évaluation	23	4
presion_variation	Variation de la pression (%)	30	43
hauteur_asp_cm	Hauteur de l'asperseur depuis le sol (cm)	138	39
jet_moyen	Rayon d'influence de l'asperseur (m)	10	3
jet_min_max	Variation du rayon d'influence de l'asperseur (m)	4	2
penne	Pente (degré)	18	9
dist_tuyau_tot	Longueur totale de tuyaux (m)	716	749
debit_tuyau_lh	Débit mesuré au niveau du tuyau (L/h)	1;531	972
p_tuyau	Pression mesurée au niveau du tuyau (bar)	2	1
nbre_diam_dif	Nombre de diamètres différents	2	1
nbre_tuyau_dif	Nombre de types de tuyaux différents	1	0
hauteur_asp_res	Différence d'altitude entre le réservoir et l'asperseur (m)	104	50

Les débits et pressions moyens mesurés sont respectivement de 1531L/h et 2bar. La pression varie de 30% en moyenne. Concernant les asperseurs, plusieurs types sont utilisés : « mariposa » (asperseur papillon) (Figure 20a), asperseur à 1 bouche, 2 bouches ou même 3 bouches (Figure 20b). Ils sont généralement installés sur un bâton planté dans le sol. Ils culminent en moyenne à 138cm du sol. Ils possèdent un rayon d'action moyen de 10m. Ce rayon d'action varie fortement (4m).



(a) Photo : tuyau en polyéthylène.



(b) Photo : tuyau d'arrosage.

FIGURE 19 – Type de tuyaux utilisés par les producteurs dans la région.

Enfin, ces systèmes possèdent des paramètres d'uniformité moyens de 52% (CU), 0.44 (DUIq) et 0.63 (CV). Comme déjà abordé, des systèmes technifiés atteignent des valeurs de 80 et 75% pour le CU et DUIq, respectivement. Ces caractéristiques montrent qu'aucun système n'a été dimensionné ou réfléchi en termes d'installation sur la zone étudiée. L'implémentation des systèmes se limitent actuellement à l'installation d'un tuyau relié à une prise d'eau et à un asperseur. IDPP aide à l'achat et l'installation du matériel mais pas, ou peu, à la conception du système. Quelques conseils pratiques sont cependant dispensés : installation de vannes ou achat de matériel de qualité.



(a) Photo : asperseur de type papillon (« mari-posa »).



(b) Photo : asperseur à 3 bouches.

FIGURE 20 – Type d'asperseurs utilisés par les producteurs dans la zone d'étude.

3.1.2 Analyse en Composantes Principales

Matrice de corrélation

La matrice des corrélations (Figure 21) permet d'appréhender les relations qui existent entre les variables. Afin de se focaliser uniquement sur les corrélations significativement différentes de 0, la valeur de probabilité (p -valeur) est comparée au seuil de signification (0.05) (Figure 35 en annexe). La matrice de corrélation dévoile que les trois paramètres de distribution d'uniformité sont hautement corrélés. Le CV est négativement corrélé au CU et au DUlq. Au vu de ces fortes corrélations, l'analyse de l'ACP se concentre sur le CU.

Ainsi, les 3 paramètres d'uniformité sont significativement corrélés négativement à la hauteur de l'asperseur, au rayon d'influence (jet_moyen) et à la pression. Ils le sont positivement au nombre de diamètres différents installés sur le système. Ces variables sont celles qui influencent le plus les paramètres d'uniformité. Les relations négatives indiquent que la diminution de la valeur de la variable augmente la valeur de l'uniformité. Une diminution de la hauteur de l'asperseur augmente ainsi la valeur d'uniformité.

De plus, certaines variables sont également significativement corrélées entre elles. Premièrement, la pression est négativement corrélée au nombre de diamètres et de types de tuyaux différents installés sur le système. Ainsi, plus des diamètres et tuyaux différents sont utilisés, plus la pression diminue. Le nombre de diamètres de tuyaux et de types de tuyaux est également corrélés avec la variations de la pression (positivement), le rayon d'influence (jet_moyen) (négativement) et la longueur totale de tuyau utilisée (positivement). Plus il y a de tuyaux différents, au plus la pression varie. La variation de pression est également conditionnée par la pente. De plus, une distance croissante entre la prise de tête et l'asperseur augmente la possibilité d'avoir des tuyaux différents. Or il est apprécié, pour les corrélations négatives, que le jet moyen et la pression sont négativement impactés par l'augmentation du nombre de tuyaux. Deuxièmement, le rayon d'influence (jet_moyen) est hautement corrélé avec le débit, la pression et la hauteur de l'asperseur. La distance à laquelle est éjectée l'eau depuis l'asperseur est positivement corrélée au débit et à la pression. Plus ces deux variables augmentent et plus l'eau va loin. De plus, plus l'asperseur est positionné en hauteur par rapport au sol, plus le jet moyen augmente.

Enfin, la pente ainsi que le nombre de seaux utilisés pour la réalisation du test ne sont pas significativement corrélés aux paramètres d'uniformité. Ceci signifie premièrement que des mesures d'uniformité sont réalisables même sur des pentes fortes, en moyenne 18 et parfois jusqu'à 40 degrés (Table 5). Ensuite, le nombre de seaux utilisés n'influençant pas significativement les paramètres d'uniformité, il peut être considéré que les essais réalisés sont comparables dans leur entièreté et ce, peu importe le nombre de seaux utilisés.

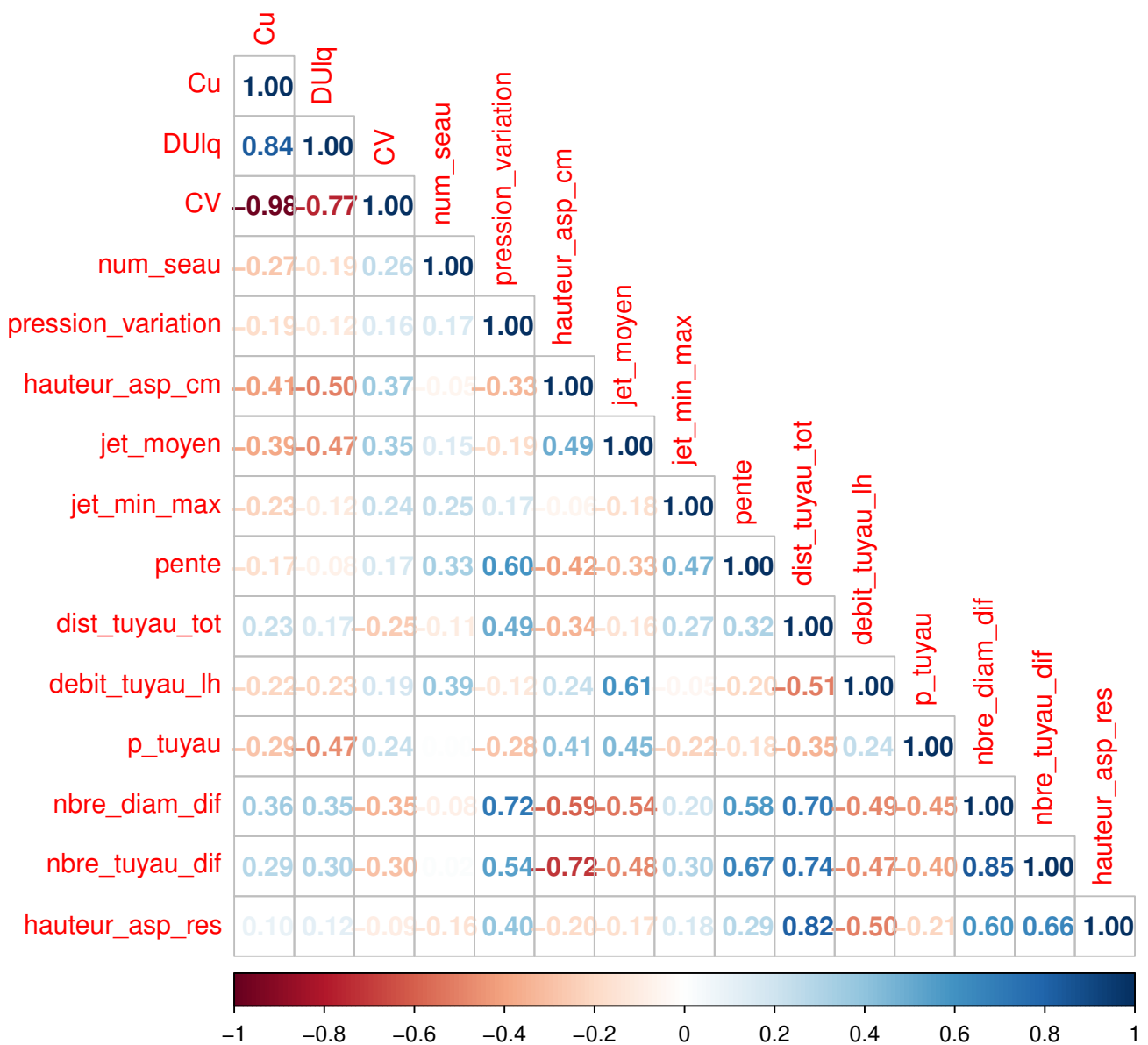


FIGURE 21 – Matrice des corrélations entre les différentes variables de l'Analyse en Composantes Principales, avec Cu = le coefficient d'uniformité de Christiansen (%), DUlq = l'uniformité de distribution du quartile inférieur, CV = le coefficient de variation, num_seau = le nombre de seaux utilisés pour l'évaluation, pression_variation = la variation de la pression, hauteur_asp_cm = la hauteur de l'asperseur par rapport au sol (cm), jet_moyen = le rayon d'influence moyen de l'asperseur (m), jet_min_max = la variation du rayon d'influence de l'asperseur (m), pente = la pente de la parcelle (degrés), dist_tuyau_tot = la longueur totale de tuyau utilisé (m), debit_tuyau_lh = le débit mesuré au niveau du tuyau (L/h), p_tuyau = la pression mesurée au niveau du tuyau (bar), nbre_diam_dif = le nombre de diamètres différents utilisés sur le système, nbre_tuyau_dif = le nombre de types de tuyaux différents utilisés sur le système et hauteur_asp_res = la différence d'altitude entre la position de l'asperseur et celle du réservoir (m).

ACP

Le passage à l'ACP permet, non seulement, de visualiser les différentes relations qui existent entre paramètres. Mais également, dans le cas de l'étude, d'identifier ce qui différencie les catégories de distribution d'uniformité entre elles.

La Figure 22 représente les valeurs propres des différents axes de l'ACP. Des valeurs supérieures à 1 indiquent que l'axe doit être conservé pour l'analyse. Quatre axes sont ainsi à analyser (Figure 22a). Cependant, les deux premiers axes comprennent le plus grand pourcentage des variances expliquées (59%) (Figure 22b), respectivement 38% et 21%. L'analyse se focalise donc sur ces derniers.

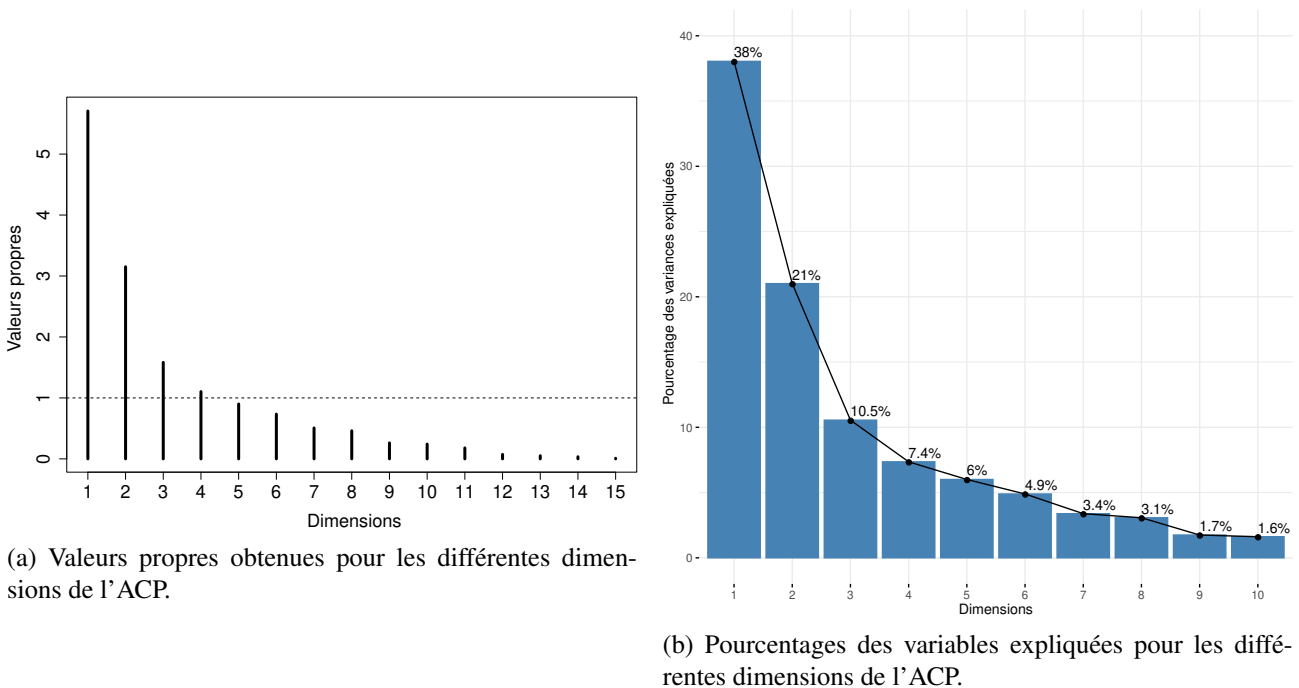
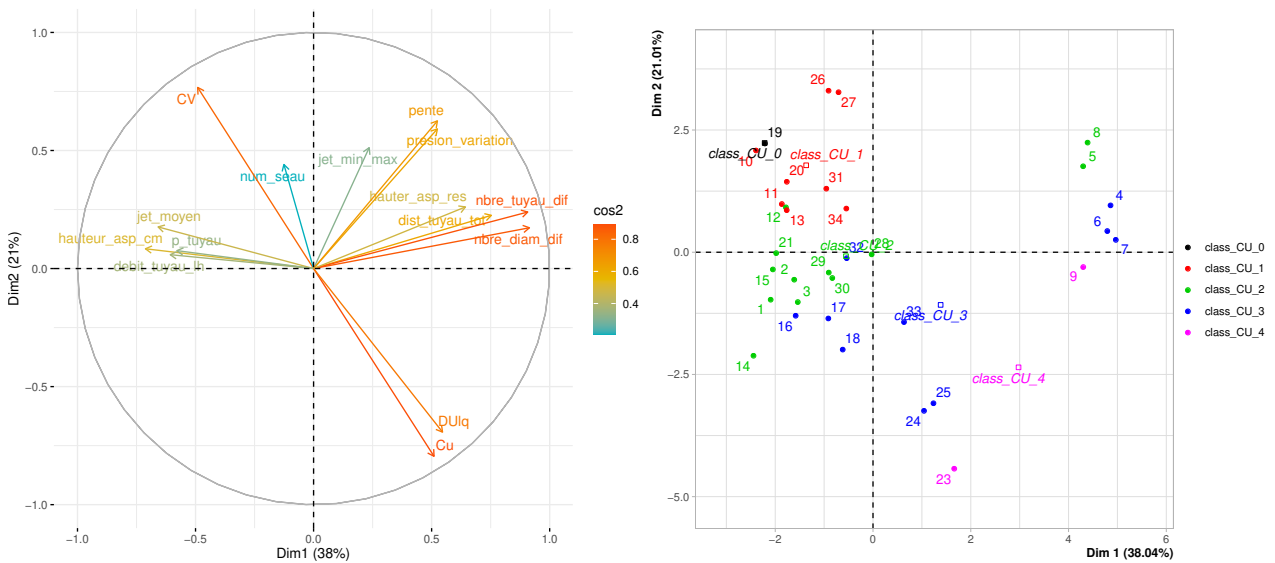


FIGURE 22 – Sélection du nombre de dimensions pour l'Analyse en Composantes Principales.

Afin de visualiser ce qui différencie les distributions d'uniformité, les valeurs de paramètres sont divisées selon le CU en 5 classes (classe 0 : 0-20, classe 1 : 21-40, classe 2 : 41-60, classe 3 : 61-80 et classe 4 : 81-100). Les 3 paramètres d'uniformité étant significativement corrélés, il est, en effet, possible de se focaliser uniquement sur l'un des 3. Les classes 0 et 4, possédant respectivement 1 et 2 individus, ne sont pas analysées.

Sur les deux premières dimensions (Figure 23b), les individus des différents groupes se répartissent selon la deuxième bissectrice. Au plus les différents coefficients d'uniformité s'améliorent, au plus les individus se positionnent vers les parties positives de la première et deuxième dimension. Le groupe 1 (21-40%) est le groupe situé le plus en haut à gauche de l'ACP. Les 3 paramètres d'uniformité participent principalement à expliquer les variances de la deuxième dimension (Table 14 en annexe).

La hauteur de l'asperseur, le rayon d'influence, la distance, les diamètres et tuyaux différents expliquent la variance de la dimension 1 (Table 14 en annexe et Figure 23a) . Plus un des systèmes d'irrigation examinés se positionne dans le positif, plus la hauteur de l'asperseur et le rayon d'influence diminuent tandis que la distance, le diamètre et le nombre de type de tuyaux augmentent. Ainsi, la différence majeure entre les 3 groupes est la hauteur de l'asperseur ainsi que sa zone d'influence, deux variables hautement corrélées. Plus ces deux facteurs diminuent, plus les paramètres d'uniformité augmentent. Les variables de distance et de nombre de diamètres et différences de tuyaux sont difficiles à prendre en considération. Ceci est du à un producteur aux performances plus élevées dans la maîtrise de son système. Il a pour effet d'étirer les données (point 4-6-7 sur la Figure 23b). Les variables de variation de pression (pression_variation) et de variabilité de rayon d'influence (jet_min_max) sont représentées par la deuxième dimension. Il est alors possible de différencier les systèmes du groupe 1 et 2. En effet, plus un système est dans le négatif selon la dimension 2, plus la variation de pression et de rayon d'influence diminuent.



(a) Répartition des variables sur les deux premières dimensions de l'ACP. (b) Visualisation des systèmes examinés pour les dimensions 1-2 de l'ACP.

FIGURE 23 – Visualisation des systèmes examinés et des variables sur l'Analyse en Composantes Principales pour les dimensions 1 et 2.

La matrice de corrélation ainsi que l'ACP montrent que l'amélioration du positionnement de l'asperseur possède une forte influence sur l'amélioration de l'uniformité d'aspersion. Le rayon d'influence est directement proportionnel à la pression, au débit et à la hauteur de l'asperseur (Équation 11 : DENNIS C. KINCAID, 1982 et Équation 12 FRISO & BORTOLINI, 2012). Augmenter la pression, le débit (Équation 11 et Équation 12) et la hauteur de l'asperseur (Équation 12) accroît le rayon d'influence.

$$R = a * (q * P^{\frac{1}{2}})^b \tag{11}$$

avec : R :le rayon (m), q :le débit (L/h), P :la pression (bar), a et b des paramètres.

$$R = K * \alpha^r * H^s * q^t * h^u \tag{12}$$

avec R : le rayon (m), q : le débit (L/h), H : la hauteur de l'asperseur (m), h : la pression (bar), α : l'angle de la bouche (°), K, r, s, t et u des paramètres.

L'influence de l'effet de la hauteur sur la distribution de l'uniformité n'est pas une relation correctement déterminée (DARKO et al., 2017). En effet, la relation peut être positive ou négative selon le diamètre de la bouche de l'asperseur (OSMAN et al., 2014a), négative pour des tests en climat venteux (DARKO et al., 2017) ou encore neutre pour des tests réalisés en laboratoire (FRISO & BORTOLINI, 2012). Cependant, l'augmentation de la vitesse du vent diminue la distribution de l'uniformité (D. C. KINCAID et al., 1996 ainsi que FACI & BERCERO, 1991 ; SEGNER et al., 1991 ; TARJUELO et al., 1994 cités par DECHMI et al., 2003). Le vent a pour effet d'augmenter la quantité d'eau perdue par évaporation, d'emmener les microgouttelettes hors de la surface irriguée et de déformer la zone d'irrigation (DECHMI et al., 2003). Ainsi, augmenter la hauteur de l'asperseur fait croître le risque de s'exposer aux influences du vent via la dérivation des microgouttelettes (DECHMI et al., 2003). Afin d'éviter les effets négatifs sur l'uniformité, la hauteur de l'asperseur doit être diminuée.

Selon la matrice de corrélation, la pression est négativement corrélée aux paramètres d'uniformité. Cela est dû à des pressions trop élevées pour la capacité de l'asperseur. En effet, il n'est pas rare que des asperseurs se détachent à cause de la trop forte pression (Figure 24). De plus, des pressions élevées, hors de la gamme d'opération, engendrent une surirrigation proche de l'asperseur et augmentent la quantité de microgouttelettes potentiellement transportables par le vent ou évapotranspirables (DARKO et al., 2017). Des pressions élevées endommagent également l'asperseur (ZOLDOSKE, 2007). A l'inverse, une faible pression affecte la vitesse de rotation et engendre également une surirrigation proche de l'asperseur. Cependant, lorsque la gamme de pression est respectée, une augmentation de la pression permet généralement d'augmenter le CU (OSMAN et al., 2014b ; FRISO & BORTOLINI, 2012). La variation de la pression affecte le débit. Par la suite, cette variation du débit affecte la dose d'irrigation et donc le rendement (DARKO et al., 2017).



FIGURE 24 – Photo : asperseur décroché suite à une augmentation de pression trop importante.

Afin de régler les problèmes dus à la pression et sa variation, une réflexion sur la position du réservoir est menée (Paragraphe 3.2.2). Concernant le positionnement de l'asperseur, différentes modalités d'installation sont testées afin de minimiser l'effet de l'installation de l'asperseur sur la distribution de l'uniformité (Paragraphe 3.2).

3.2 Amélioration des systèmes d'irrigation

3.2.1 Modalités d'installation de l'asperseur

Suite à la situation générale observée (Paragraphe 3.1), 4 modalités d'installation de l'asperseur sont étudiées. Le test est effectué sur 4 répétitions, 3 journées différentes et des pentes allant de 10 à 40 degrés.

La première modalité est la conservation du positionnement utilisé par les producteurs. L'asperseur est positionné verticalement à 2m au dessus du sol, peu importe la pente (ligne noire sur la Figure 25b). De plus, un asperseur modifié par le producteur est utilisé (Figure 25a). L'asperseur a été muni d'une sorte de grillage qui fracture les projections d'eau en goutelettes plus fines. La deuxième modalité est de conserver cet asperseur pour le test. Cependant, afin de diminuer la variation du rayon d'influence, il est penché par rapport à la verticale afin d'être le plus perpendiculaire possible à la pente générale (asperseur Figure 25b) (MERRIAM & KELLER, 1978 ; DARKO et al., 2017). Il est également positionné à 1m30 du sol. L'installation doit être rapide et simple. La troisième installation possède les mêmes caractéristiques que la deuxième à la différence qu'un asperseur dimensionné est testé. Cet asperseur est sélectionné pour posséder une gamme de pression correspondante à la pression mesurée à l'aide du manomètre. Afin de ne pas engendrer des variations de pression trop importantes entre la situation réelle (asperseur du producteur) et expérimentale (asperseur dimensionné), il est important que les deux appareils possèdent le même nombre de bouches. La dernière modalité consiste en l'utilisation d'un tuyau dédié spécifiquement à une installation d'asperseurs (Figure 25c).



(a) Photo : asperseur du producteur.



(b) Photo : asperseur positionné à la perpendiculaire du sol.



(c) Photo : tuyau pour asperseur.

FIGURE 25 – Modalités d'installation de l'asperseur en vue de l'amélioration des paramètres d'uniformité.

De cette expérience, il ressort que l'installation de l'asperseur du producteur à la perpendiculaire du sol améliore la distribution de l'uniformité de 16% (Table 6). L'utilisation d'un asperseur correctement dimensionné et non modifié par le producteur permet, de plus, d'augmenter l'uniformité de 14% par rapport à la modalité deux. Enfin, l'utilisation d'un tuyau facilitant l'installation ne permet pas d'augmenter la distribution de l'uniformité. Cependant, il permet une installation non seulement plus rapide mais également conforme au principe que les asperseurs doivent être positionnés à la même hauteur sur l'ensemble de la parcelle (DARKO et al., 2017).

Enfin, les écart-types inférieurs aux écarts entre les modalités d'installation testées indiquent que l'uniformité de distribution est effectivement améliorée. Un écart-type élevé est obtenu pour la modalité d'aspersion généralement utilisée dans la région. Ceci est dû à la grande sensibilité du rayon d'influence vis-à-vis de la pente. Le rayon d'influence n'étant pas uniforme, les zones en amont de l'aspersion reçoivent une dose d'irrigation plus élevée (ZHANG et al., 2018a). Positionner l'aspersion à la perpendiculaire du sol permet ainsi de réduire les différences de distribution d'uniformité sur la parcelle.

TABLE 6 – Amélioration des différents paramètres d'uniformité selon les modalités d'installation du système d'irrigation.

Modalité		Cu (%)	DUIq	CV
Aspersion producteur	Moyenne	44	0.43	0.86
	Écart-type	12	0.11	0.24
Aspersion producteur penché	Moyenne	60	0.62	0.53
	Écart-type	5	0.05	0.07
Aspersion dimensionné penché	Moyenne	74	0.74	0.33
	Écart-type	1	0.10	0.02
Aspersion dimensionné penché et tuyau	Moyenne	70	0.67	0.39
	Écart-type	5	0.12	0.09

3.2.2 Positionnement de la prise de tête

La modélisation des pertes de charge n'a pu être testée que sur un seul système. En effet, seul l'aspersion dimensionné et utilisé lors des tests d'amélioration des systèmes possède des caractéristiques connues. Avec une gamme de pression allant de 1.5 à 3bar, cet aspersion dispense entre 1920 et 2940L/h. À l'aide de ces données, la courbe de relation pression-débit est établie (Figure 26). Elle permet, selon une pression d'opération désirée, de déterminer le débit de l'aspersion. Ainsi, l'aspersion, lors du test réalisé, possède une pression de 3bar pour un débit de 2721L/h. Pour une pression de 3bar et un tuyau de 25mm de diamètre et de 350m de long, le réservoir doit être situé 110m plus haut que l'aspersion. Selon les coordonnées GPS relevées, une différence de hauteur de 112m est présente entre l'aspersion et le réservoir. L'utilisation de cet outil semble, à première vue, ainsi permettre de correctement positionner le réservoir. Ainsi, l'amélioration des pressions d'opération dans la région peut être envisagée.

3.2.3 Recouvrement

L'espace entre les aspersions est également un aspect à prendre en considération pour l'amélioration de l'uniformité de distribution des systèmes (CHRISTIANSEN, 1942; BURT et al., 1997; PHOCAIDES, 2000; ASCOUGH & KIKER, 2002; MOAZED et al., 2010; OSMAN et al., 2014b; DARKO et al., 2017; ZHANG et al., 2018a). De manière générale, le rapprochement des aspersions permet d'augmenter l'uniformité de distribution. (CHRISTIANSEN, 1942; ZOLDOSKE, 2007; MOAZED et al., 2010; OSMAN et al., 2014b; DARKO et al., 2017; ZHANG et al., 2018a). Dans des conditions de vents modérés, un espacement d'au moins 50% du rayon d'influence est recommandé (PHOCAIDES, 2000; DARKO et al., 2017). ZHANG et al., 2018a ajoute que l'augmentation de la pente diminue l'uniformité de distribution. Au vue des pentes rencontrées dans la zone d'étude, un espacement de minimum 50% du rayon d'influence est donc recommandé.

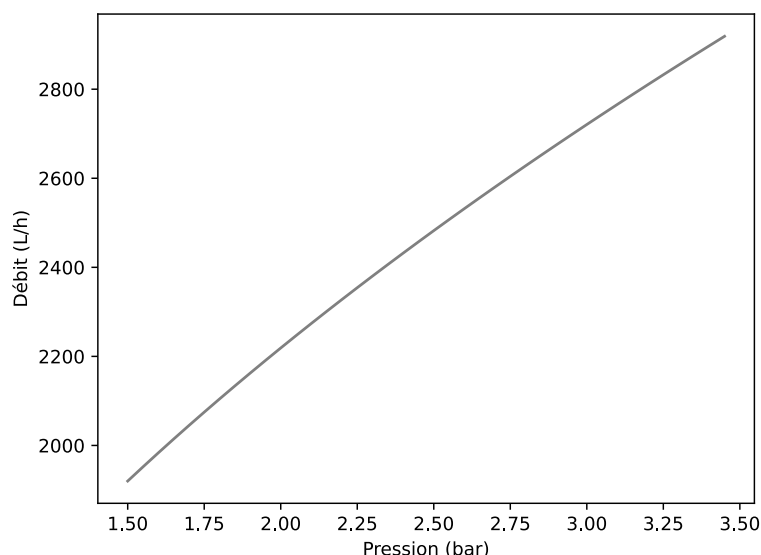


FIGURE 26 – Courbe de relation pression-débit pour l'asperseur dimensionné aux caractéristiques connues.

3.2.4 Maintenance des systèmes

La maintenance systématique des systèmes est très peu pratiquée dans la zone d'étude. Seuls les réservoirs semblent être nettoyés une à deux fois par an. Les asperseurs ne sont nettoyés que lorsque les producteurs remarquent un mauvais fonctionnement. Ce comportement a pour conséquence d'également fortement diminuer l'uniformité de distribution. En effet, il est fréquent de voir des asperseurs qui ne tournent plus suite à l'encombrement de la bouche. Un nettoyage systématique des gicleurs doit être réalisé avant chaque événement d'irrigation. De plus, les gicleurs ont un problème d'usure dans le temps qui peut les déformer et/ou modifier leurs propriétés dispersives. L'augmentation de la taille des gouttes et du taux de précipitation modifie la distribution de l'eau (J. LOUIE & S.SELKER, 2000; DINKA, 2016). Une bonne pratique de gestion est ainsi de changer les asperseurs tous les 2-3 ans (DARKO et al., 2017).

IDPP semble également avoir un rôle à jouer dans le développement de systèmes d'irrigation pressurisés dans la région. En effet, la mise en place et l'utilisation de telles technologies sans aucun support institutionnel débouchent généralement sur un échec dans les régions en développement (CORNISH, 1998). De plus, afin qu'IDPP s'assure de l'appropriation des systèmes par les producteurs, du matériel local, simple d'utilisation et de maintenance, et provenant le moins possible de différents fournisseurs doit être adopté (HILLEL, 1989 cité par CORNISH, 1998).

3.3 Sols

3.3.1 Type de sols

Au total, 21 profils de sols ont été identifiés dans les différents villages (Table 7). Les valeurs de la charte de Munsell pour l'estimation de la matière organique varient entre 3 et 5. Selon la texture de sol, la MO varie entre 0.4 et 4%.

Étant donné la diversité des profils de sols obtenus pour la zone d'étude, l'utilisation d'un module de comparaison des types de sols se justifie d'autant plus. Aussi, la littérature scientifique ne s'accorde pas sur les classes les plus facilement prédictibles (RICHER-DE-FORGES et al., 2022). SALLEY et al., 2018 estiment que les classes de « SandyLoam » et de « Sand » sont les plus mal classifiées, respectivement 32 et 19%. VOS et al., 2016 expliquent que les textures de sols à fraction majoritaire sont les plus difficilement classifiables, tandis que RICHER-DE-FORGES et al., 2022 expriment le contraire. RAWLS & PACHEPSKY, 2002 annoncent que les textures comprenant la terminologie « loam » sont les plus mal classifiées. De plus, des observateurs novices se trompent principalement pour les classes à prédominance limoneuse (« Silty ») (LEVINE et al., 1989 cité par SALLEY et al., 2018).

En outre, l'utilisation d'un maillage de 2mm est obligatoire. La charge caillouteuse de certaines parcelles ne permet pas une estimation rigoureuse (FAO, 2006; SALLEY et al., 2018). Il a, en effet, été observé que la réalisation des tests HFTE sans maillage augmente la difficulté de détermination de la longueur du boudin. Les erreurs sont, de plus, plutôt liées à la longueur du boudin qu'à l'estimation de la rugosité (SALLEY et al., 2018). Cependant, que l'erreur provienne de l'estimation de la longueur du boudin ou de la rugosité, des classes de textures adjacentes sont généralement attribuées. Par exemple, les classes à détermination « Silt » avec une fraction argileuse plus élevée (analyse en laboratoire) observent un glissement latéral vers une augmentation de la fraction sableuse sur le triangle de texture pour les HFTE (RICHER-DE-FORGES et al., 2022). Les classes en haute teneur en sable poussent à sous-estimer la quantité de limon ou d'argile, tandis que la présence de sable fin engendre une confusion avec la fraction limoneuse (RICHER-DE-FORGES et al., 2022). Des erreurs liées à la quantité de MO (alors confondues avec de l'argile) et de sels (dispersion des particules d'argiles) peuvent également survenir (SALLEY et al., 2018).

TABLE 7 – Textures de sols rencontrées pour les différents villages visités, avec *SiltyClayLoam* = limon argileux fin, *SandyLoam* = limon sableux, *Loam* = limon, *SiltLoam* = Limon fin, *SiltyClay* = argile limoneuse, *LoamySand* = sable limoneux, *Silt* = limon très fin, *Clay* = argile, *ClayLoam* = limon argileux.

Village	Texture1	Munsell	MO1	Texture2	Munsell	MO2
Puquio	SiltyClayLoam	3	3-5			
Puquio	SandyLoam	5	<0.4			
Puquio	SandyLoam	5	<0.4			
Puquio	SiltyClayLoam	3	3-5			
Puquio	Loam	3	2-4	SiltLoam	3	3-5
Puquio	SandyLoam	5	<0.4	LoamySand	5	<0.4
MG	SiltyClayLoam	5	0.3-0.6	Silt	5	0.3-0.6
MG	SiltLoam	4	0.9-0.15	ClayLoam	4	0.9-1.5
MG	SiltyClay	5	0.3-0.6			
MG	SandyLoam	5	<0.4	SandyLoam	5	<0.4
Gasgo	Clay	3	3-5			
Gasgo	SiltyClay	4	0.9-1.5			
Gasgo	SiltyClay	4	0.9-1.5			
Gasgo	SiltyClay	4	0.9-1.5			
Gasgo	Clay	4	0.9-1.5	SiltyClayLoam	4	0.9-1.5
Hururupa	ClayLoam	5	0.3-0.6	ClayLoam	5	0.3-0.6
Hururupa	Clay	5	0.3-0.6			
Chually	Loam	3	2-4			
Chually	Loam	3	2-4			
Chually	ClayLoam	4	0.9-1.5			
Chually	Loam	3	2-4			

Les différentes classes de texture sont reportées sur le triangle de texture USDA (Figure 27). Les positions de ces points ne correspondent pas strictement aux pourcentages indiqués par le triangle. Les couleurs des points symbolisent les différents villages. Certains villages possèdent des textures de sols concentrées dans des classes adjacentes (Gasgo en bleu, Hururupa en rouge et Chually en orange). Les villages de Puquio en noir, et Manuel Garcia en vert, comptent ainsi des textures de sols plus hétéroclytes.

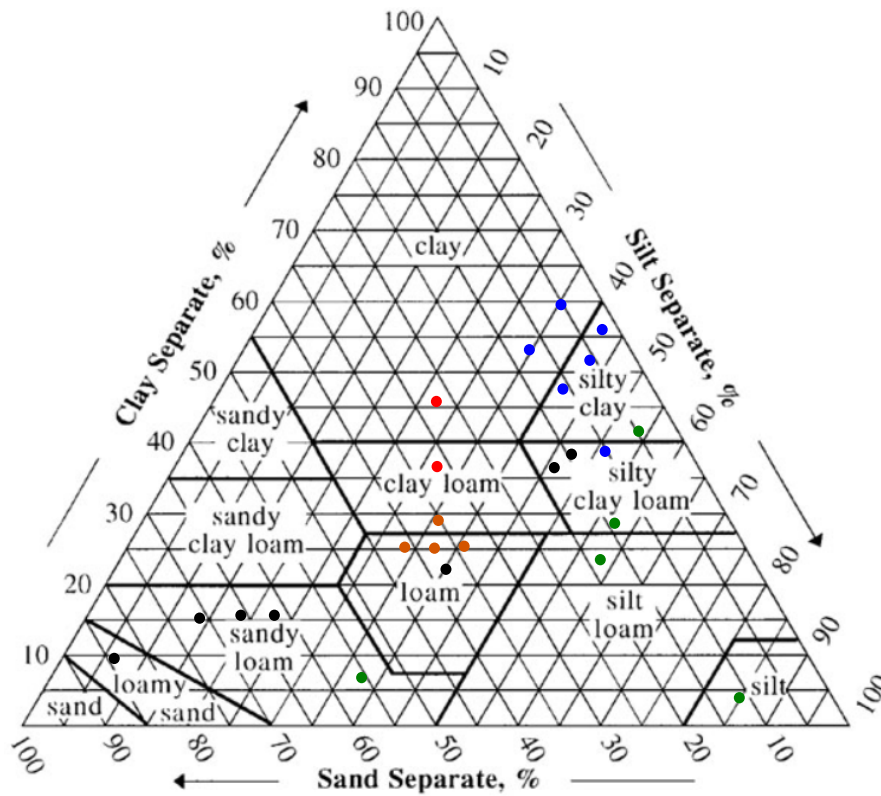


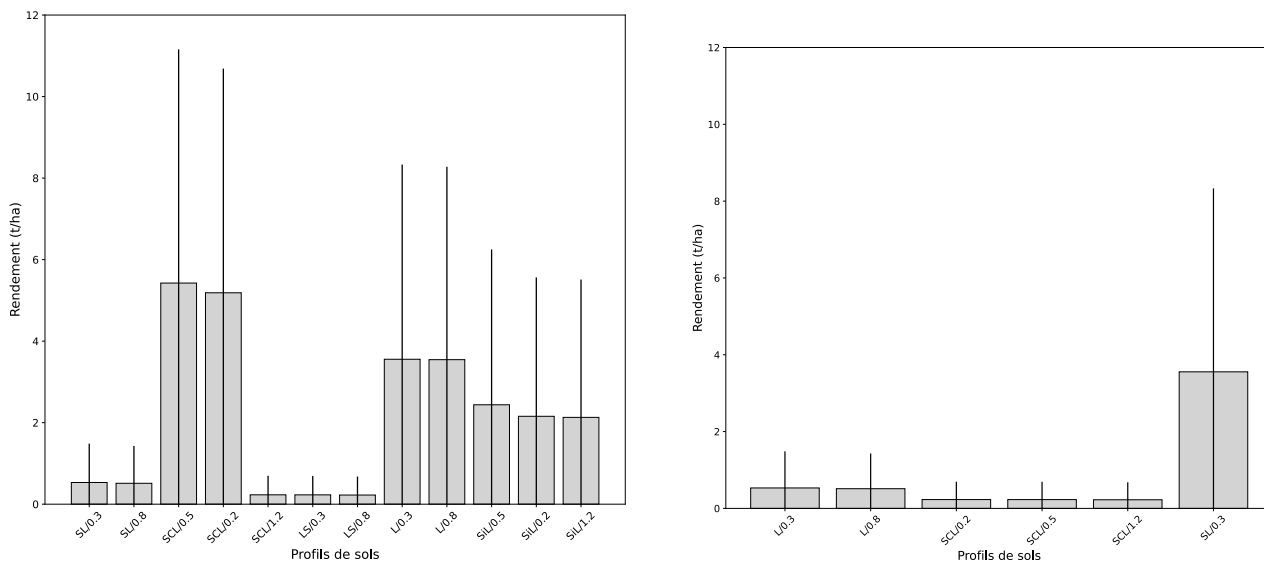
FIGURE 27 – Position des différentes estimations de texture de sol réalisées via la méthode HFTE sur le triangle de texture USDA, classées par village.

Les différentes couleurs représentent les villages : Gasgo en bleu, Hururupa en rouge, Chually en orange, Puquio en noir et Manuel Garcia en vert.

3.3.2 Incertitude liée au sol

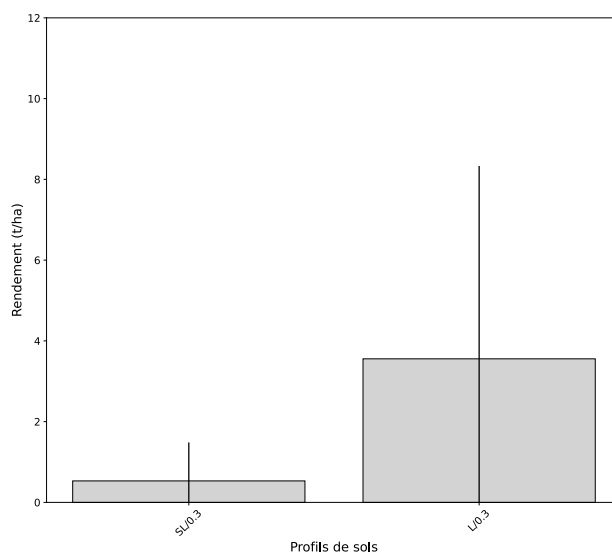
L'incertitude liée aux HFTE est prise en considération à l'aide d'un module implémenté à AquaCrop-OSPy. Les sols les plus sensibles à la méthode HFTE semblent être situés au centre du triangle de texture. Le module implémenté au modèle prend en considération cette spécificité. Il compare, en effet, l'entière des sols adjacents à la texture attribuée. Ainsi, plus de sols sont comparés pour un « Loam » que pour un « Loamy Sand ». Pour la texture de type « SandyLoam » (SL) présentée ici, ce sont donc des textures de type « LoamySand » (LS), « SandyClayLoam » (SCL), « Loam » (L) et « SiltLoam » (SiL) qui vont être testées. En combinant ces textures de sols à différentes valeurs de pourcentages de MO, ce sont ainsi 15 profils de sols qui sont testés (Figure 28a). Les différents rendements obtenus sur 10 années d'agriculture pluviale sont ainsi comparés pour les différents types de sols. À la sortie de l'ANOVA, ce sont 2 profils de sols significativement différents qui sont conservés (Figure 28c).

Bien que les SCL/0.5/0.2/1.2 et les L/0.3/0.8% de MO soient également significativement différents du SL/0.3 % de MO, ils ne sont pas conservés. En effet, une comparaison intermédiaire est réalisée entre les sols significativement différents du « SandyLoam » (Figure 28b). Il semblerait ainsi que la teneur en MO n'impacte pas significativement la modification du rendement pour une agriculture pluviale. Seuls les sols significativement différents entre eux à cette étape sont conservés pour le modèle final. Ceci permet, par la suite, de diminuer le temps de modélisation.



(a) Populations de rendements obtenues pour l'entrée du sol SandyLoam/0.3% de MO (SL/0.3) dans le module de comparaison des différentes populations, 15 combinaisons de profils de sols et MO testées.

(b) Populations de rendements conservées après la réalisation de la première ANOVA, 4 profils de sols conservés.



(c) Populations de sols conservées à la sortie du modèle de comparaison des profils de sols, 2 sols conservés : SL/0.3 et L/0.3.

FIGURE 28 – Sélection de la texture de sol pour l'entrée du modèle selon les différentes populations de rendements obtenues pour une agriculture pluviale et un sol de type SandyLoam 0.3% de MO (SL/0.3) sur une modélisation de 10 ans.

3.4 L'eau d'irrigation

Pour la présentation des résultats, le profil de sol « SandyLoam-0.3 » ainsi que la culture de maïs sont utilisés. AquaCrop-OSPy et les modules implémentés sont cependant capables de modéliser les besoins en eau pour des profils de sols jusqu'à deux horizons différents (maximum rencontré dans la région) et pour la culture de la pomme de terre, du riz et du blé.

3.4.1 Besoin en eau

Les besoins en eau d'irrigation pour des calendriers « fixes » ou « libres » sont modélisés à l'aide de l'extension AquaCrop-OSPy pour du maïs semé le 1 janvier sur un profil de sol « SandyLoam-0.3 » (un des deux sols conservés) sur une période de 10 ans.

Besoin en eau : producteurs

Les rendements et besoins en eau d'irrigation du maïs (Figure 29) des producteurs sont présentés pour des doses d'irrigation fixes estimées à partir du temps d'irrigation utilisé pour la culture du maïs (Table 4 dans matériel et méthode). La fréquence d'irrigation est de 8 jours, ce qui est la pratique la plus courante dans la région. Les doses d'irrigation appliquées varient fortement (1 à 74mm) pour une même fréquence d'irrigation de 8 jours. Dans un premier temps, l'augmentation des doses d'irrigation permet de diminuer la variabilité des rendements. Ces derniers s'améliorent également avec l'augmentation de la dose d'irrigation et ce, jusqu'à atteindre un plateau. Les producteurs, selon le modèle AquaCrop-OSPy, utilisent des quantités d'eau nettes très variables selon les temps d'irrigation renseignés, de 15mm à 1200mm. Ces résultats proviennent d'une modélisation basée sur différentes combinaisons de débit et temps d'irrigation rencontrés pour la région. Les quantités extrêmes sont ainsi exagérées par le modèle. Cependant, cette grande disparité montre l'absence d'utilisation de calendriers d'irrigation dans la région. Les mêmes graphiques peuvent être sortis pour des doses et fréquences d'irrigation différentes.

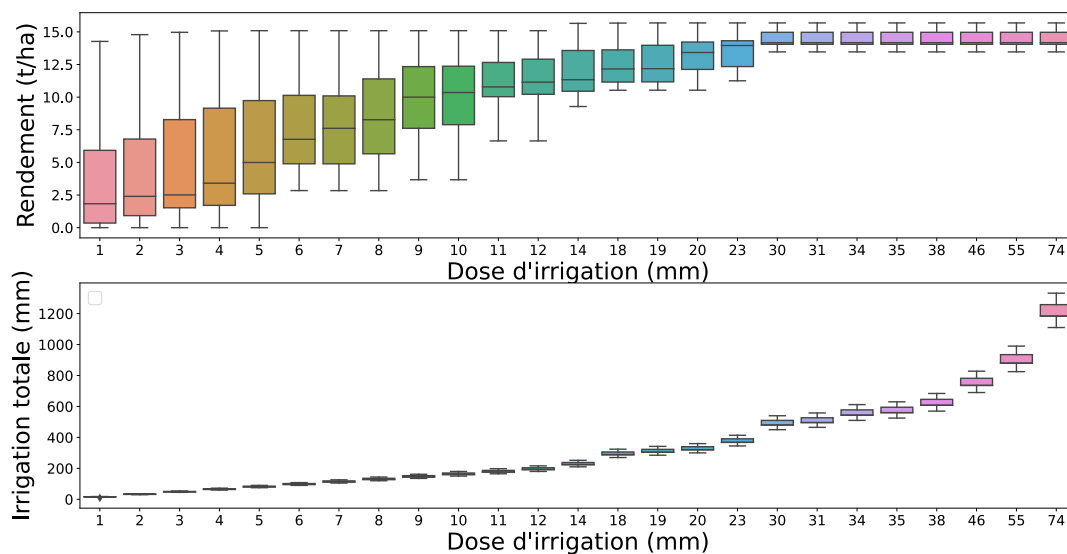


FIGURE 29 – Besoin en eau et rendement selon les doses d'irrigation utilisées par les producteurs, fréquence d'irrigation tous les 8 jours pour une texture de sol de type SandyLoam/0.3.

Optimisation des besoins en eau : calendrier « fixe »

Des simulations sont lancées sur 10 ans pour des doses d'irrigation fixes qui augmentent par pas de 1mm. La dose d'irrigation est mise en regard du rendement et de la productivité de l'eau (PE) attendus (Figure 30). La PE correspond au rendement (kg/ha) divisé par la quantité d'eau utilisée (mm). Les points représentent les doses fixes attribuées tous les 8 jours. La tendance de l'augmentation des rendements est semblable à celle de la Figure 29. Bien que la productivité de l'eau ne soit pas une variable utilisée pour la sélection de la meilleure dose d'irrigation, elle permet néanmoins de montrer que l'augmentation de la dose d'irrigation n'améliore pas indéfiniment la productivité agricole. En effet, la PE ne fait que diminuer suivant l'augmentation de la dose d'irrigation. La sélection d'un calendrier optimisant les rendements, écart-type, quantité d'eau d'irrigation et PE devrait être mise en place. La réalisation d'un tel outil d'optimisation nécessite cependant la mise au point d'un modèle d'optimisation multi-objectif, travail qui sort du cadre de cette étude.

La dose sélectionnée optimisée ici est de 44mm, elle est, en effet, celle qui permet d'obtenir le rendement le plus élevé selon l'écart-type le plus faible sur les 10 années modélisées. Elle minimise également la quantité d'eau d'irrigation pour des rendements similaires.

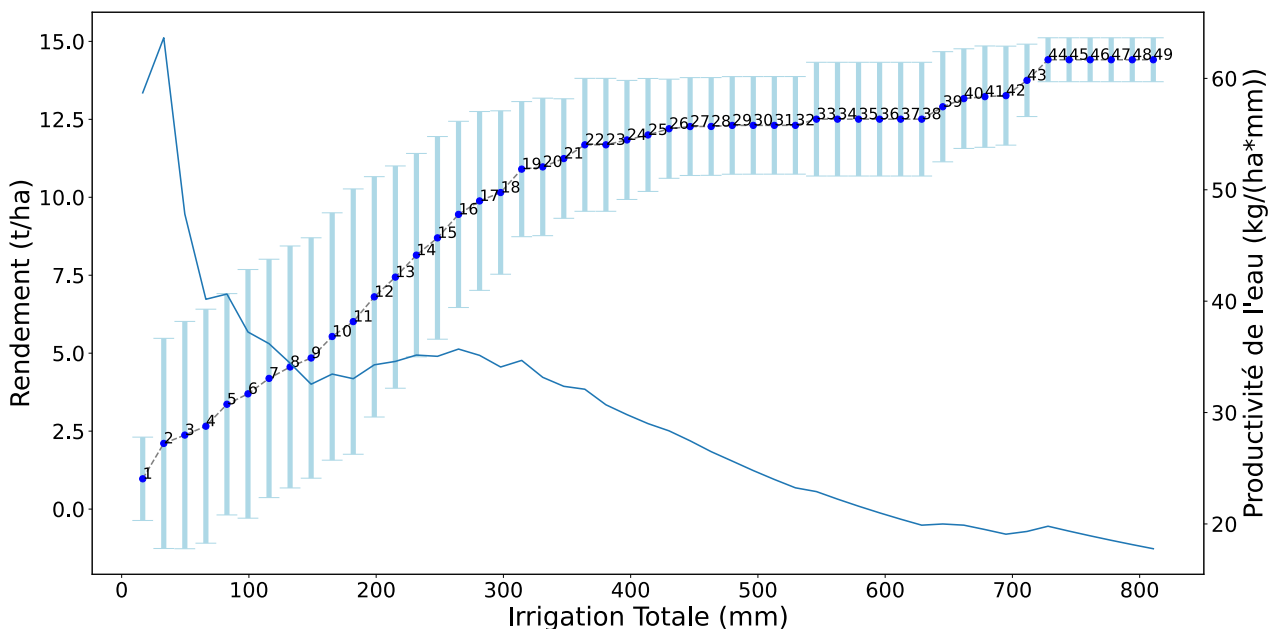
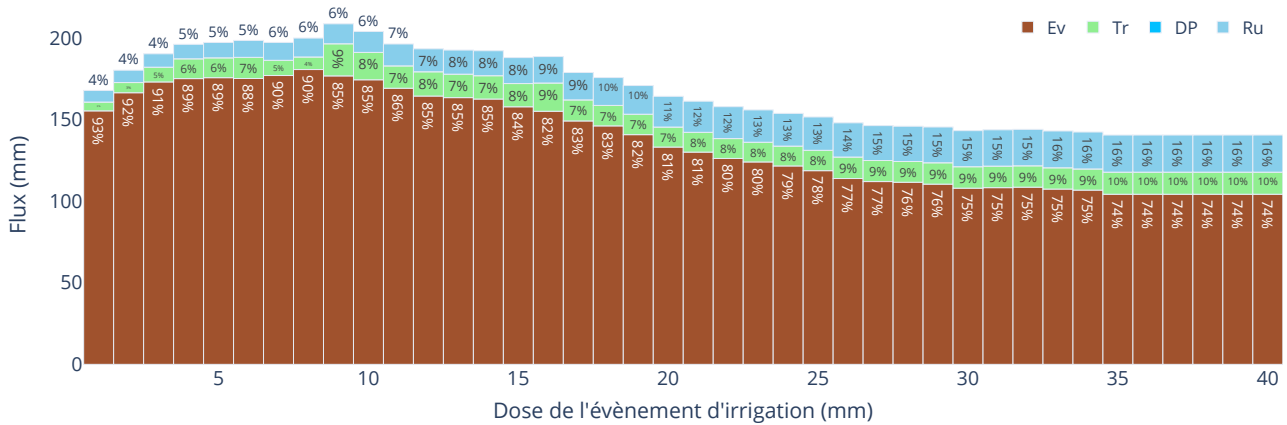
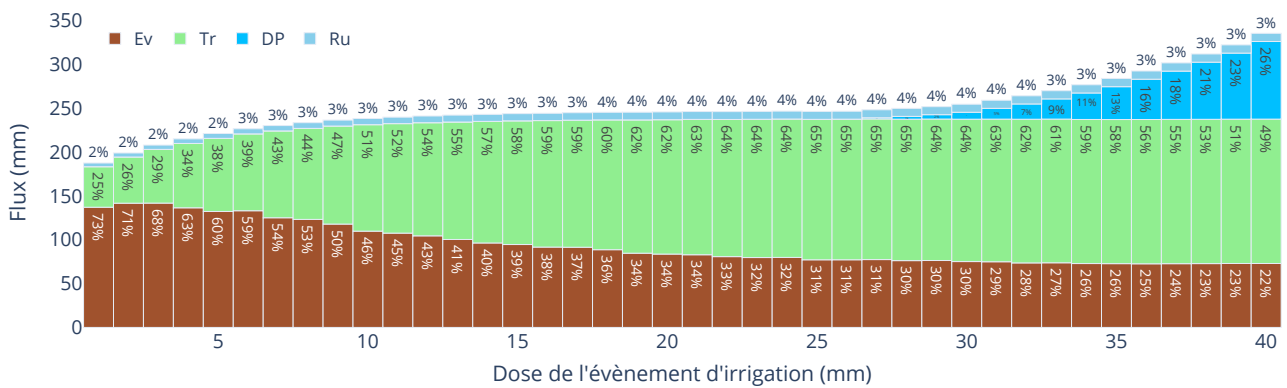


FIGURE 30 – Sélection d'un calendrier « fixe » optimisé selon une maximisation du rendement, une minimisation de son écart-type et de la quantité d'eau d'irrigation nette utilisée dans le cadre de la culture de maïs pour un sol de type SL/0.3.

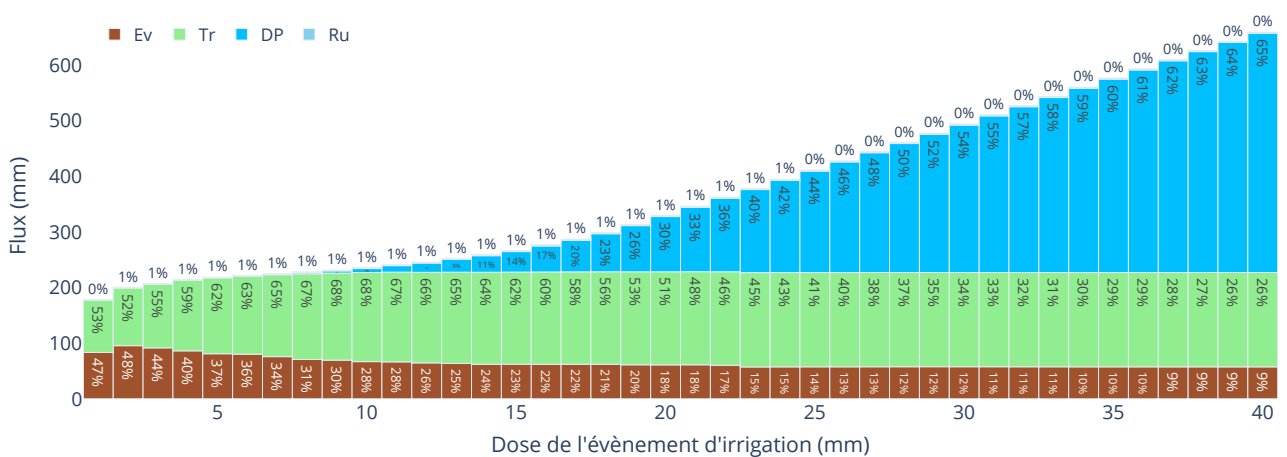
La Figure 31 permet d'expliquer la courbe de croissance du rendement suivie d'un palier. Elle représente la modélisation des flux d'eau selon l'augmentation de la dose d'irrigation pour un évènement fixe. Les différents flux varient selon l'augmentation de cette dose attribuée tous les 8 jours. Les flux représentent une somme sur la période de production. Trois profils situés à l'extrémité du triangle de texture : argile, sable et limon sont présentés. L'augmentation de la dose d'irrigation permet d'augmenter la transpiration (Figure 31a, 31b et 31c), paramètre directement corrélé au rendement (Figure 30). L'augmentation de la transpiration est le signe d'une croissance de la production. Les différents flux modélisés par le modèle sont expliqués par les propriétés hydrauliques des sols. Les 3 types de sols possèdent des capacités d'infiltration différentes : 5cm/h (sable), 1.3cm/h (limon) et 0.05 cm/h (argile) (P. SAWA & FRENKEN, 2002; SALLET & VANDEWYNCKEL, 2019; FAO, s. d.). Au vu de sa grande perméabilité, le sable est donc le premier à subir une percolation profonde (à partir de doses de 6mm) (Figure 31c). L'évaporation est freinée par l'augmentation de la dose d'irrigation (Figure 31a, 31b et 31c). Cette augmentation permet, dans un premier temps, d'accroître la production (représentée par la transpiration) et donc de diminuer la partie évaporée par le sol qui est progressivement moins exposé et ombragé au fil de la croissance de la plante de maïs. L'atteinte du palier au niveau du rendement et de la PE (Figure 30) est expliquée par la constance de transpiration pour des doses supérieures à 20mm pour le sable et le limon (Figure 31c et 31b) et à 30mm pour l'argile (Figure 31a). L'évaporation de l'argile est supérieure aux deux autres types de sol car l'eau reste plus longtemps dans l'horizon de surface. La transpiration y est également plus faible, l'eau étant fortement retenue par les particules fines. L'argile est également plus sensible au ruissellement à cause de sa faible capacité d'infiltration. Le ruissellement augmente peu à peu avec l'augmentation de la dose d'irrigation pour les sols argileux et limoneux (Figure 31a et 31b). Du fait de sa grande capacité d'infiltration, le ruissellement du sable est nul malgré l'augmentation de la dose d'irrigation (Figure 31c). La quantité totale de flux diminue avec l'augmentation de la dose d'irrigation pour un sol argileux (Figure 31a). La capacité d'infiltration n'est en effet pas dépassée pour une modélisation journalière, l'eau ne ruisselle pas. La faible percolation de ce type de sol engendre également une conservation prolongée de l'eau dans le profil de sol, la quantité de flux observée diminue.



(a) Évolution des flux d'eau du sol pour un sol de type argileux.



(b) Évolution des flux d'eau du sol pour un sol de type limoneux.



(c) Évolution des flux d'eau du sol pour un sol de type sableux.

FIGURE 31 – Évolution des différents flux d'eau totaux enregistrés sur une saison de production pour des sols argileux, limoneux et sableux pour la culture du maïs, avec EV : l'évaporation, Tr : la transpiration, DP : la percolation profonde et Ru : le ruissellement.

Optimisation des besoins en eau : calendrier « libre »

Le modèle AquaCrop-OSPy est lancé sur une période de 10 ans pour le SL/0.3. De ces 10 années, sortent dix calendriers d'irrigation optimisés chacun pour l'année qui leur a été attribuée. Avant de sélectionner le plus optimisé, ils sont simplifiés afin de pouvoir être utilisés par les producteurs. Des doses moyennes et des fréquences fixes d'irrigation sont alors fixées pour chaque mois. Par la suite, ces 10 calendriers optimisés sont testés sur 10 années (Figure 32). Le calendrier conservé ici est le numéro 5. L'optimisation des calendriers libres ne semble pas autant souffrir du problème sélection rencontré pour les calendriers fixes. En effet, les doses d'irrigation restent dans des gammes beaucoup plus raisonnables. L'augmentation de la quantité d'eau d'irrigation totale ne permet pas, ici, d'améliorer systématiquement le rendement. Cela est dû à la prise en considération de l'importance du moment de l'attribution de la dose par les calendriers « libres » (AMIN et al., 2015 ; CAVERO et al., 2018).

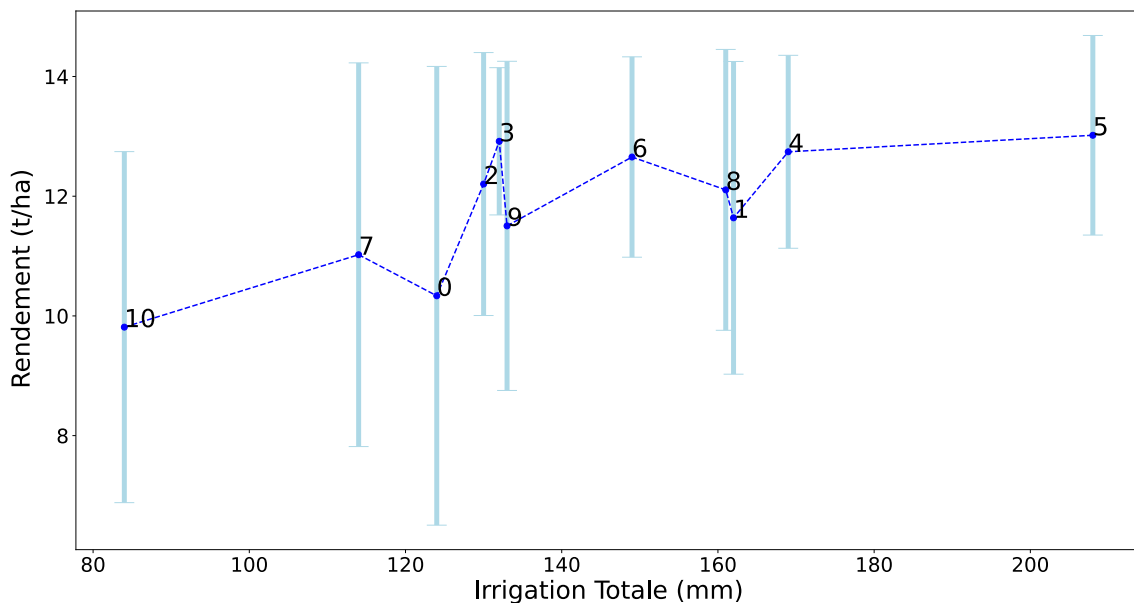


FIGURE 32 – Sélection d'un calendrier « libre » optimisé selon une maximisation du rendement, une minimisation de son écart-type et de la quantité d'eau d'irrigation nette utilisée.

Le module ajouté à AquaCrop-OSPy permet ainsi la proposition d'un calendrier d'irrigation optimisé pour la modalité conservée (Figure 32). À partir des doses et fréquences variables, un calendrier d'irrigation optimisé est proposé (Table 8). Il consiste en calendriers simplifiés utiles aux producteurs, dans lesquels des fréquences et doses d'irrigation constantes pour chaque mois sont utilisées. De plus, ce calendrier simplifié préconise, pour chaque mois, des doses et fréquences fixes. Malgré une perte en efficacité de l'eau, l'utilisation de calendriers simplifiés permet aux producteurs d'instaurer une routine mensuelle. Le passage de la dose d'irrigation au temps d'irrigation se réalise en multipliant la dose par la surface irriguée et en divisant, par la suite, par le débit. Gagner en simplicité permet ainsi au producteur de plus facilement suivre le calendrier d'irrigation. Ces outils de gestion simples d'utilisation sont proposés aux producteurs possédant un réservoir ou, du moins, n'étant pas restreints par des tours d'irrigation. Dans le cadre du « SandyLoam », ce sont donc deux calendriers d'irrigation qui sont rendus (Table 8a et 8b), compte tenu de l'imprécision sur l'estimation de la texture du sol. Le producteur possède donc une gamme de doses d'irrigation à respecter. En janvier, deux ou trois doses d'irrigation nettes doivent être données : de 24 ou 34mm. Selon la réaction de la parcelle, le producteur peut ainsi ajuster son temps d'irrigation. Ces calendriers opèrent donc comme un « garde fou ».

TABLE 8 – Calendriers « libres » optimisés proposés pour les deux types de sols conservés : SL/0.3 et L/0.3 pour la culture du maïs.

Date	Dose (mm)	Date	Dose (mm)
01-janv	34	01-janv	24
11-janv	34	16-janv	24
21-janv	34	01-févr	16
01-févr	25	16-févr	16
01-mars	25	01-avr	25
16-mars	25	01-mai	26
01-avr	31		

(a) Calendrier « libre » optimisé pour le profil de sol SandyLoam/0.3.

(b) Calendrier « libre » optimisé pour le profil de sol Loam/0.5.

3.4.2 Limite : utilisation du modèle

Le modèle est dépendant des données climatiques disponibles. En conséquence, il ne permet pas de modéliser des besoins en eau pour les dernières années. De plus, les durées de croissance obtenues pour la culture du maïs semblent correspondre à celles données par les producteurs pour une altitude inférieure à 3000m. L'utilisation d'une autre base de données, pour une station d'altitude similaire devrait dès lors être utilisée pour la modélisation des besoins en eau des cultures situées à une altitude supérieure à 3000m.

Afin d'obtenir des rendements plus fiables, des calibrations du modèle pour les différentes cultures sont requises via des données d'observation de terrain relatives à la biomasse produite, le rendement ou encore l'évapotranspiration des cultures (ABEDINPOUR et al., 2012; PAREDES et al., 2014; SANDHU & IRMAK, 2019).

3.5 Réduction de la consommation en eau

L'utilisation de l'eau est présentée pour une fréquence d'irrigation de 8 jours, un sol de type SL/0.3 et un rendement en maïs de 15t/ha. Ainsi, pour un même rendement obtenu, différentes quantités d'eau d'irrigation sont modélisées par AquaCrop-OSPy (Table 9). Les différentes doses utilisées par les producteurs donnent des quantités d'eau nette allant de 497 à 1225mm. Cette quantité d'eau est transformée en eau brute via l'efficacité de 75% et le CV de 0.6 de la zone d'étude (Qbp Table 9).

Ces quantités d'eau brute sont comparées aux quantités obtenues pour un calendrier d'irrigation « fixe ». Le recours exclusif à ce type de calendrier ne permet pas une réduction systématique de la quantité d'eau utilisée (variation de 47 à -40%). Il semblerait ainsi que certains producteurs irriguent des doses moins importantes que celles préconisées par l'outil d'optimisation. En outre, si les systèmes sont améliorés à hauteur de 70% de distribution de l'uniformité via un positionnement correct de l'asperseur, un CV de 0.3 peut être attendu. Ainsi, via l'utilisation du calendrier fixe et l'amélioration des systèmes (Qbof0.3 Table 9), la quantité d'eau d'irrigation brute utilisée est ainsi diminuée. Dans certains cas, une économie d'eau supplémentaire de 10% est alors réalisée. L'usage de ces calendriers est donc à préconiser aux producteurs irriguant sur 12h de temps. Les variations positives montrent également l'importance de la prise en considération de la PE dans le processus d'optimisation des calendriers « fixes ».

Ensuite, l'utilisation d'un calendrier optimisé « libre » pour des systèmes améliorés permet des réductions de l'utilisation de l'eau entre 74 et 89% (Qbol Table 9). D'un côté, l'adoption de ces calendriers par les producteurs permettrait des attributions de doses d'irrigation différentes selon les cultures. Cette pratique est en effet rarement rencontrée dans la zone d'étude. D'un autre côté, il permettrait également la diminution de la taille des réservoirs. Des réservoirs aux dimensions plus faibles sont moins coûteux. L'affranchissement vis-à-vis des tours d'irrigation serait ainsi, d'autant plus envisageable.

Comme déjà mentionné plus eau, certaines quantités d'eau utilisées ne reflètent peut être pas la réalité du terrain. En effet, la modélisation de la dose d'irrigation via des fréquences et temps d'irrigation renseignés par les producteurs amènent à une extrapolation des quantités d'eau d'irrigation modélisées. Par exemple, tous les producteurs n'irriguent pas systématiquement tous les 8 jours. S'ils estiment que les précipitations sont suffisantes, aucune dose d'irrigation n'est attribuée. Certaines réductions pourraient ainsi être exagérées. Une étude plus détaillée des doses et temps d'irrigation utilisés doit donc être réalisées via l'installation d'un compteur d'eau et le suivi de certains producteurs.

Enfin, l'utilisation de systèmes par aspersion permet de diminuer le risque d'érosion pour des terrains en pente (CORNISH, 1998). Néanmoins, le débit à la sortie des asperseurs est à prendre en considération. Selon les débits observés dans la région, il apparaît que des doses entre 1mm/h et 6mm/h sont irriguées. Un débit plus élevé que la capacité d'infiltration du sol engendre des ruissellements. Ce phénomène risque d'être d'autant plus marqué au vu des pentes rencontrées (NEAL, 1938; JOURGHOLAMI et al., 2020). La problématique pourrait ici survenir pour des sols argileux à la capacité d'infiltration plus faible.

TABLE 9 – Amélioration de l'efficacité de l'eau dans la région,

D représente la dose d'irrigation (mm), *Qeau* = la quantité d'eau totale utilisée sur la saison (mm), *Rdmt* = le rendement espéré (t/ha), *Qbp* = la quantité d'eau brute du producteur (mm), *Qbof0.6* = la quantité d'eau brute optimisée pour un calendrier « fixe » et un coefficient de variation de 0.6, *variation* = la réduction (-) ou l'augmentation de la quantité d'eau d'utilisée suite au passage à l'utilisation d'un type de calendrier depuis l'irrigation des producteurs, *Qbof0.3* = la quantité d'eau brute optimisée pour un calendrier « fixe » et un coefficient de variation de 0.3, *Qbol* = la quantité d'eau pour un calendrier optimisé « libre » et un CV de 0.3 (mm)

Irrigation producteurs				Irrigation « fixe »					Irrigation « libre »		
D (mm)	Qeau (mm)	Rdmt (t/ha)	Qbp (mm)	Qeau (mm)	Qbof0.6 (mm)	Variation	Qbof0.3 (mm)	Variation	Qeau (mm)	Qbol (mm)	Variation
30	497	15	1060	730	1557	47%	1265	19%	208	277	-74%
31	513	15	1094	730	1557	42%	1265	16%	208	277	-75%
34	563	15	1201	730	1557	30%	1265	5%	208	277	-77%
35	580	15	1237	730	1557	26%	1265	2%	208	277	-78%
38	629	15	1342	730	1557	16%	1265	-6%	208	277	-79%
46	762	15	1626	730	1557	-4%	1265	-22%	208	277	-83%
55	910	15	1941	730	1557	-20%	1265	-35%	208	277	-86%
74	1225	15	2613	730	1557	-40%	1265	-52%	208	277	-89%

4 Conclusion

Au terme de cette étude, il apparaît que l'installation de systèmes d'irrigation par aspersion a permis, non seulement de diminuer la pénibilité du travail des producteurs, mais également de réduire les pertes de terre par érosion due à l'irrigation gravitaire. Cependant, les systèmes installés n'atteignent pas les standards de performance des systèmes par aspersion. Afin d'atteindre des distributions d'uniformité plus élevées, l'amélioration de ces systèmes doit passer par (I) le positionnement à la perpendiculaire de la tendance générale de la pente, (II) l'utilisation d'asperseurs dont les caractéristiques sont connues en vue d'un dimensionnement, (III) l'implémentation de réservoirs ou de caisses brise charge afin de, non seulement réguler les variations de pression et d'obtenir une pression d'opération adéquate, mais également d'émanciper les producteurs des tours d'irrigation. La première recommandation ne nécessite aucun investissement de la part des producteurs. Cette amélioration relève donc uniquement de la transmission de l'information par IDPP aux producteurs. La deuxième relève également de l'intervention d'IDPP. En effet, lors de l'achat de matériel, il est important de connaître les caractéristiques des asperseurs. L'utilisation d'un manomètre afin de mesurer la pression au sein des tuyaux permet la sélection d'un asperseur aux caractéristiques adéquates. Ces informations sont des plus utiles pour le passage à la troisième recommandation. Il faut cependant rester prudent avec cette dernière. Elle n'a, en effet, pu être vérifiée que sur un seul système.

Actuellement, la gestion de l'eau d'irrigation dans la région s'articule uniquement autour des tours d'irrigation et du ressenti des producteurs quant aux fréquences et doses d'irrigation. L'utilisation de calendriers d'irrigation permettrait ainsi d'engager la transition vers une utilisation de l'eau raisonnée et réfléchie. Deux types de calendriers sont proposés aux producteurs. Des calendriers « fixes » destinés aux producteurs devant respecter les tours d'irrigation et des calendriers « libres », dont les fréquences et doses d'irrigation sont optimisées. Les quantités d'eau proposées par les calendriers « fixes » semblent surdimensionnées. L'étude de l'utilisation d'algorithmes d'optimisation multi-critères constitue une piste pour la détermination d'une dose d'irrigation située entre optimisation du rendement et gestion raisonnée de l'eau. En outre, l'utilisation de ces calendriers permet, in fine, un dimensionnement inférieur des réservoirs et donc un moindre coût.

L'amélioration des systèmes et de la gestion de l'eau peuvent se faire séparément. Cependant, il semblerait que l'utilisation de calendriers permette, à elle seule, d'améliorer de manière plus significative la gestion de l'eau d'irrigation dans la région. Néanmoins, d'après les contacts sur place, il semblerait que l'ensemble des producteurs visités ne soient pas prêts à adopter l'utilisation de ces calendriers d'irrigation, et moins encore à investir dans du matériel. La transition doit se faire au rythme de chacun. Il est donc important de cibler ceux qui se montrent ouverts au changement. L'utilisation des différents types de calendrier devrait être testée avec des producteurs ayant une bonne connaissance de leur système afin d'apprécier une utilisation correcte. De plus, afin, non seulement, de tester l'efficacité des calendriers mais également d'acquérir la confiance des producteurs quant à leur pertinence d'utilisation, leurs applications sur une partie de la parcelle peut être envisagée. En outre, le recours à des compteurs d'eau dans la région permettrait d'estimer avec plus de précision la quantité d'eau d'irrigation réellement utilisée par les producteurs. Par la suite, il serait alors permis de déterminer l'amélioration de la gestion de l'eau avec plus de précision.

Pour terminer, l'utilisation conjointe de l'amélioration des systèmes et des calendriers d'irrigation permettrait une meilleure gestion de la ressource en eau dans la région. Cependant, dans ce cadre, la gestion réfléchie et le respect par tous les acteurs des tours d'irrigation est primordiale. Autour de cet enjeu, qui relève de la culture, des traditions et des conditions sociales, il faudrait également mobiliser d'autres disciplines et compétences.

Références

- ABDI, H. & WILLIAMS, L. J. (2010). Principal component analysis. *WIREs Computational Statistics*, 2(4), 433-459. <https://doi.org/10.1002/wics.101>
- ABEDINPOUR, M., SARANGI, A., RAJPUT, T. B. S., SINGH, M., PATHAK, H. & AHMAD, T. (2012). Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 110, 55-66. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.04.001>
- AL MAJOU, H., BRUAND, A., DUVAL, O. & COUSIN, I. (2007). Variation of the water-retention properties of soils : validity of class-pedotransfer functions. *Comptes Rendus Geoscience*, 339(9), 632-639. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.07.005>
- ALMEIDA VINUEZA, J. (1998). *Andean Social Construction of Identity and Political Direction* (R. BOELEN, G. DÁVILA & R. MENCHÚ, Éd.). Van Gorcum.
- AMIN, M., ANJUM, L., ALAZBA, A. & RIZWAN, M. (2015). Effect of the irrigation frequency and quality on yield, growth and water productivity of maize crops. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 7(5), 721-730. <https://doi.org/10.3920/QAS2014.0519>
- ARYA, L. M., LEIJ, F. J., SHOUSE, P. J. & van GENUCHTEN, M. T. (1999). Relationship between the hydraulic conductivity function and the particle-size distribution. *Soil Science Society of America Journal*, 63(5), 1063-1070. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6351063x>
- ASCOUGH, G. & KIKER, G. (2002). The effect of irrigation uniformity on irrigation water requirements. *Water SA*, 28(2), 235-242. <https://doi.org/10.4314/wsa.v28i2.4890>
- BM. (2022). *Ratio de la population pauvre en fonction du seuil de pauvreté national (% de la population) - Peru* | Data [La Banque Mondiale Bird-Ida : Données]. Récupérée 11 juin 2022, à partir de <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/SI.POV.NAHC?locations=PE>
- BRUAND, A., FERNÁNDEZ, P. P. & DUVAL, O. (2003). Use of class pedotransfer functions based on texture and bulk density of clods to generate water retention curves. *Soil Use and Management*, 19(3), 232-242. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2003.tb00309.x>
- BURT, C. M., CLEMMENS, A. J., STRELKOFF, T. S., SOLOMON, K. H., BLIESNER, R. D., HARDY, L. A., HOWELL, T. A. & EISENHAUER, D. E. (1997). Irrigation performance measures : efficiency and uniformity. *Biological Systems Engineering : Papers and Publications*, (38), 22.
- CARLIER, A. (2008). Le nettoyage rituel des canaux d'irrigation d'une communauté de la cordillère de Lima (province de Canta, Pérou) : une approche ethnohistorique. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, (37), 351-374. <https://doi.org/10.4000/bifea.3144>
- CARTER, M. R. & GREGORICH, E. G. (Éd.). (2008). *Soil sampling and methods of analysis* (2nd ed). Canadian Society of Soil Science ; CRC Press.

- CAVERO, J., MEDINA, E. T. & MONTOYA, F. (2018). Sprinkler irrigation frequency affects maize yield depending on irrigation time. *Agronomy Journal*, 110(5), 1862-1873. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.05.0315>
- CHRISTIANSEN, J. E. (1942). IRRIGATION BY SPRINKLING. *University of California Agricultural Experiment Station Bulletin*, 124(670), 125.
- CLEMMENS, A. J. (1991). Irrigation uniformity relationships for irrigation system management. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 117(5), 682-699. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1991\)117:5\(682\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1991)117:5(682))
- CORNISH, G. (1998). Pressurised irrigation technologies for smallholders in developing countries - a review. *Irrigation and Drainage Systems*, 12(3), 185-201. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1023/A:1006037817381>
- CRIDDLE, W. D. (1956). *Methods for evaluating irrigation systems*. Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture.
- D. C. KINCAID, K. H. SOLOMON & J. C. OLIPHANT. (1996). Drop size distributions for irrigation sprinklers. *Transactions of the ASAE*, 39(3), 839-845. <https://doi.org/10.13031/2013.27568>
- DARKO, R. O., SHOUQI, Y., JUNPING, L., HAOFANG, Y. & XINGYE, Z. (2017). Overview of advances in improving uniformity and water use efficiency of sprinkler irrigation. *Int J Agric & Biol Eng*, 10(2), 1-15. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20171002.1817>
- DECHMI, F., PLAYÁN, E., CAVERO, J., FACI, J. M. & MARTÍNEZ-COB, A. (2003). Wind effects on solid set sprinkler irrigation depth and yield of maize (zea mays). *Irrigation Science*, 22(2), 67-77. <https://doi.org/10.1007/s00271-003-0071-9>
- DENNIS C. KINCAID. (1982). Sprinkler pattern radius. *Transactions of the ASAE*, 25(6), 1668-1672. <https://doi.org/10.13031/2013.33786>
- DINKA, M. O. (2016). Evaluating the Adequacy Performance of Sprinkler Irrigation Systems at Finchaa Sugar Cane Plantation, Eastern Wollega Zone (Ethiopia). *Irrigation and Drainage*, 65(4), 537-548. <https://doi.org/10.1002/ird.2059>
- DWOMOH, F., SHOUQI, Y. & HONG, L. (2013). Field Performance Characteristics of Fluidic Sprinkler. *Applied Engineering in Agriculture*, 29, 529-536. <https://doi.org/10.13031/aea.29.10070>
- E. SHERBONDY, J. (1998). *Andean Irrigation in History* (R. BOELEN, G. DÁVILA & R. MENCHÚ, Éd.). Van Gorcum.
- ESHEL, G., LEVY, G. J., MINGELGRIN, U. & SINGER, M. J. (2004). Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle-size distribution analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 68(3), 736-743. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.7360>

- FAO. (s. d.). *Le sol : chapitre 9, la perméabilité du sol*. Récupérée 5 août 2022, à partir de https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706f/x6706f09.htm
- FAO. (2006). *Guidelines for soil description* (4th ed). Food ; Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2014). *World reference base for soil resources 2014 : international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. Food ; Agriculture Organization of the United Nations. Récupérée 30 juin 2022, à partir de <http://www.fao.org/3/i3794en/I3794en.pdf>
- FAO. (2015). *Profil de pays-Pérou*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, Italie.
- FAO. (2019). *Fiche d'information du pays-Belgique*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, Italie.
- FOLEY, J. & RAINE, S. (2002). Comparing Application Systems for Cotton Irrigation - What are the Pros and Cons ; Récupérée 12 août 2022, à partir de <http://www.insidecotton.com/jspui/handle/1/941>
- FRISO, D. & BORTOLINI, L. (2012). Influence of the trajectory angle and nozzle height from the ground on water distribution radial curve of a sprinkler. *Journal of Agricultural Engineering*, 43(1), e4. <https://doi.org/10.4081/jae.2012.e4>
- FUKUI, Y., NAKANISHI, K. & OKAMURA, S. (1980). Computer evaluation of sprinkler irrigation uniformity. *Irrigation Science*, 2(1), 23-32. <https://doi.org/10.1007/BF00285427>
- G. ALLEN, R., S.PEREIRA, L., RAES, D. & SMITH, M. (1998). *FAO irrigation and drainage paper no.56, crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome, Italie.
- GUPTA, S. & LARSON, W. (1979). Estimating Soil Water Retention Characteristics From Particle Size Distribution, Organic Matter Percent, and Bulk Density. *Water Resources Research - WATER RESOURCES*, 15, 1633-1635. <https://doi.org/10.1029/WR015i006p01633>
- HARDY, M. (1992). X-ray diffraction measurement of the quartz content of clay and silt fractions in soils. *Clay Minerals*, 27(1), 47-55. <https://doi.org/10.1180/claymin.1992.027.1.05>
- HARDY, M., JAMAGNE, M., ELSASS, F., ROBERT, M. & CHESNEAU, D. (1999). Mineralogical development of the silt fractions of a podzoluvisol on loess in the paris basin (france). *European Journal of Soil Science*, 50(3), 443-456. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.1999.00246.x>
- HARDY, M. (1993). INFLUENCE OF GEOGENESIS AND PEDOGENESIS ON CLAY MINERAL DISTRIBUTION IN NORTHERN VIETAM SOILS. *Soil Science*, 156(5), 336-345. Récupérée 12 août 2022, à partir de https://journals.lww.com/soilsci/Abstract/1993/11000/Influence_of_Geogenesis_and_Pedogenesis_on_Clay.6.aspx

- HSIAO, T. C., HENG, L., STEDUTO, P., ROJAS-LARA, B., RAES, D. & FERERES, E. (2009). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water : III. parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448-459. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>
- INEI. (1996). *Instituto Nacional de Estadística e Informática - Compendio Estadístico 1995-96*. Récupérée 31 juillet 2022, à partir de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitaless/Est/Lib0169/n00.htm
- J. LOUIE, M. & S.SELKER, J. (2000). Sprinkler Head Maintenance Effects on Water Application Uniformity. *Journal of irrigation and Drainage Engineering*, 126(3).
- JOURGHOLAMI, M., KARAMI, S., TAVANKAR, F., LO MONACO, A. & PICCHIO, R. (2020). Effects of slope gradient on runoff and sediment yield on machine-induced compacted soil in temperate forests. *Forests*, 12(1), 49. <https://doi.org/10.3390/f12010049>
- KELLY, T. D. & FOSTER, T. (2021). AquaCrop-OSPy : bridging the gap between research and practice in crop-water modeling. *Agricultural Water Management*, 254, 106976. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106976>
- KETTLER, T., DORAN, J. & GILBERT, T. (2001). Simplified method for soil particle-size determination to accompany soil-quality analyses. *Soil Science Society of America Journal*, 65(3), 849-852. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.653849x>
- LETEY, J. (1985). Irrigation uniformity as related to optimum crop production — additional research is needed. *Irrigation Science*, 6(4), 253-263. <https://doi.org/10.1007/BF00262470>
- MAROUFPOOR, E., FARYABI, A., GHAMARNIA, H. & MOSHREFI, G. Y. (2010). Evaluation of uniformity coefficients for sprinkler irrigation systems under different field conditions in kurdistan province (northwest of iran). *Soil and Water Research*, 5 (2010), 139-145. <https://doi.org/10.17221/42/2009-SWR>
- MCBRATNEY, A. B., MINASNY, B., CATTLE, S. R. & VERVOORT, R. W. (2002). From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma*, 109(1), 41-73. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00139-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00139-8)
- MERRIAM, J. & KELLER, J. (1978). *Farm irrigation system evaluation : a guide for management*. (3^e éd.). Récupérée 21 mars 2022, à partir de <https://www.semanticscholar.org/paper/Farm-irrigation-system-evaluation%3A-a-guide-for-Merriam-Keller/cdb7328e3920682039a6090ce86bdf47d8826786>
- MINASNY, B. & MCBRATNEY, A. B. (2002). The efficiency of various approaches to obtaining estimates of soil hydraulic properties. *Geoderma*, 107(1), 55-70. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00138-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00138-0)
- MOAZED, H., BAVI, A., BOROOMAND-, S., NASERI, A. & ALBAJI, M. (2010). Effects of Climatic and Hydraulic Parameters on Water Uniformity Coefficient in Solid Set Systems. *Journal of Applied Sciences*, 10(16), 1792-1796. <https://doi.org/10.3923/jas.2010.1792.1796>

- MOTT, R. L. & UNTENER, J. A. (2016). *Applied fluid mechanics, seventh edition, global edition* (Pearson education limited). Récupérée 19 octobre 2021, à partir de <https://smilingbookstore.com/products/9781292019611-applied-fluid-mechanics-global-edition-paperback-7e-by-robert-l-mott>
- MUNSELL COLOR (FIRM). (1994). *X-Rite Munsell : soil book of color*. Macbeth Division of Kollmorgen Instruments Corporation.
- NACHTERGAELE, F. (2010). The classification of leptosols in the world reference base for soil resources, 3.
- NEAL, J. H. (1938). The effect of the degree of slope and rainfall characteristics on runoff and soil erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 2, 525-532. <https://doi.org/10.2136/sssaj1938.036159950002000C0083x>
- OSMAN, M., HASSAN, S. & WAN YUSOF, K. (2014a). Effect of Combination Factors of Operating Pressure, Nozzle Diameter and Riser Height on Sprinkler Irrigation Uniformity. *Applied Mechanics and Materials*, 695, 380-383. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.695.380>
- OSMAN, M., HASSAN, S. B. & YUSOF, K. W. (2014b). Effect of low pressure on irrigation uniformity of solid set sprinkler irrigation system. *Applied Mechanics and Materials*, 567, 26-31. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.567.26>
- OSTERTAGOVA, E., OSTERTAG, O. & KOVÁČ, J. (2014). Methodology and Application of the Kruskal-Wallis Test. *Applied Mechanics and Materials*, 611, 115-120.
- P. SAWA, A. & FRENKEN, K. (2002). *Module8 : Systèmes d'irrigation par aspersion : planification, conception, exploitation et maintenance*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et Bureau sous-régional pour l'Afrique orientale et australe (SAFR). Récupérée 5 août 2022, à partir de http://www.journals.cambridge.org/abstract_S1026881200127618
- PACHEPSKY, Y. A. & RAWLS, W. J. (1999). Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. *Soil Science Society of America Journal*, 63(6), 1748-1757. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6361748x>
- PAREDES, P., de MELO-ABREU, J. P., ALVES, I. & PEREIRA, L. S. (2014). Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. *Agricultural Water Management*, 144, 81-97. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.06.002>
- PHOCAIDES, A. (2000). *Technical handbook on pressurized irrigation techniques*. Food ; Agriculture Organization of the United Nations.
- PIEDALLU, C., GÉGOUT, J.-C., BRUAND, A. & SEYNAVE, I. (2011). Mapping soil water holding capacity over large areas to predict potential production of forest stands. *Geoderma*, 160(3), 355-366. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.10.004>

- PLAYÁN, E., ZAPATA, N., FACI, J. M., TOLOSA, D., LACUEVA, J. L., PELEGRÍN, J., SALVADOR, R., SÁNCHEZ, I. & LAFITA, A. (2006). Assessing sprinkler irrigation uniformity using a ballistic simulation model. *Agricultural Water Management*, 84(1), 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.01.006>
- RAWLS, W. & PACHEPSKY, Y. (2002). Using field topographic descriptors to estimate soil water retention. *Soil Science*, 167(7), 423-435. <https://doi.org/10.1097/00010694-200207000-00001>
- RICHARDSON, M. (2009). Principal component analysis. *University of Oxford*, 23.
- RICHER-DE-FORGES, A. C., ARROUAYS, D., CHEN, S., ROMÁN DOBARCO, M., LIBOHOVA, Z., ROUDIER, P., MINASNY, B. & BOURENNANE, H. (2022). Hand-feel soil texture and particle-size distribution in central france. relationships and implications. *CATENA*, 213, 106155. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106155>
- RITCHEY, E. L., MCGRATH, J. M. & GEHRING, D. (2015). Determining soil texture by feel. (139), 4.
- ROBERT, M., HARDY, M. & ELSASS, F. (1991). Crystallochemistry, properties and organization of soil clays derived from major sedimentary rocks in france. *Clay Minerals*, 26(3), 409-420. <https://doi.org/10.1180/claymin.1991.026.3.09>
- ROMÁN DOBARCO, M., BOURENNANE, H., ARROUAYS, D., SABY, N. P. A., COUSIN, I. & MARTIN, M. P. (2019a). Uncertainty assessment of GlobalSoilMap soil available water capacity products : a french case study. *Geoderma*, 344, 14-30. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.036>
- ROMÁN DOBARCO, M., COUSIN, I., LE BAS, C. & MARTIN, M. P. (2019b). Pedotransfer functions for predicting available water capacity in french soils, their applicability domain and associated uncertainty. *Geoderma*, 336, 81-95. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.022>
- SALLETS, P. & VANDEWYNCKEL, C. (2019). Les besoins en eau de la ferme. *Itinéraires BIO*(51), 66.
- SALLEY, S. W., HERRICK, J. E., HOLMES, C. V., KARL, J. W., LEVI, M. R., MCCORD, S. E., van der WAAL, C. & VAN ZEE, J. W. (2018). A comparison of soil texture-by-feel estimates : implications for the citizen soil scientist. *Soil Science Society of America Journal*, 82(6), 1526-1537. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.04.0137>
- SANDHU, R. & IRMAK, S. (2019). Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. *Agricultural Water Management*, 223, 105687. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105687>
- SAXTON, K. E. & RAWLS, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569-1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- SENTILHES, H. (1970). RÉFORME AGRAIRE AU PÉROU. *Revue Tiers Monde*, 11(44), 759-766. Récupérée 31 juillet 2022, à partir de <https://www.jstor.org/stable/23588597>

- SOLOMON, K. H. (1984). Yield related interpretations of irrigation uniformity and efficiency measures. *Irrigation Science*, 5(3), 161-172. <https://doi.org/10.1007/BF00264605>
- TIERCELIN, J.-R. & VIDAL, A. (2006). *Traité d'irrigation* (2e éd). Éd. Tec & doc.
- VIDAL, R., MA, Y. & SASTRY, S. (2016). *Generalized principal component analysis* (T. 40). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-87811-9>
- VOS, C., DON, A., PRIETZ, R., HEIDKAMP, A. & FREIBAUER, A. (2016). Field-based soil-texture estimates could replace laboratory analysis. *Geoderma*, 267, 215-219. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.12.022>
- WALLER, P. & YITAYEW, M. (2016). *Irrigation and drainage engineering*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-05699-9>
- WÖSTEN, J. H. M., FINKE, P. A. & JANSEN, M. J. W. (1995). Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. *Geoderma*, 66(3), 227-237. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(94\)00079-P](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)00079-P)
- WÖSTEN, J. H. M., PACHEPSKY, Y. A. & RAWLS, W. J. (2001). Pedotransfer functions : bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251(3), 123-150. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00464-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00464-4)
- WÖSTEN, J., LILLY, A., NEMES, A. & LE BAS, C. (1999). Development and use of a database of hydraulic properties of european soils. *Geoderma*, 90(3), 169-185. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00132-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00132-3)
- ZHANG, L., HUI, X. & CHEN, J. (2018a). Effects of terrain slope on water distribution and application uniformity for sprinkler irrigation. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(3), 120-125. <https://doi.org/10.25165/ijabe.v11i3.2901>
- ZHANG, L., MERKLEY, G. P. & PINTHONG, K. (2013). Assessing whole-field sprinkler irrigation application uniformity. *Irrigation Science*, 31(2), 87-105. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0294-0>
- ZHANG, L., MERKLEY, G. P., WU, P. & ZHU, D. (2018b). Effect of catch-can spacing on calculation of sprinkler irrigation application uniformity. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 46(7), 1800130. <https://doi.org/10.1002/clen.201800130>
- ZOLDOSKE, D. F. (2007). An overview of smart water application technologies™(SWAT™) and achieving high water use efficiency. *California State University*, 224.

5 Annexe

5.1 Partie matériel et méthode

5.1.1 Tables et figures

TABLE 10 – Matrice de confusion : comparaison de classification entre la méthode HFTE et la méthode d'analyse en laboratoire, table tirée de RICHER-DE-FORGES et al., 2022.

Confusion matrix between hand-feel predicted ST classes and their corresponding ST classes using measured particle-size distribution. Users' accuracy (UA, Eq. (1)) and producers' reliability (PR, Eq. (3)) for the ST classes are determined by hand-feel test and by laboratory measurement of particle-size distribution. The reference (or considered as "true") values are the values from laboratory measurement. ALO: heavy clay, A: clay, AL: silty clay, AS: sandy clay, LA: clayey silt, LAS: sandy clayey silt, LSA: clayey sand silt, SA: clayey sand, S: sand, SL: silty sand, LL: silt, LS: sandy silt, LMS: sandy medium silt, LM: medium silt, LLS: sandy silt.

ST hand-feel class	ST measured particle-size class															sum	UA%
	A	AL	ALO	AS	LA	LAS	LL	LLS	LM	LMS	LS	LSA	S	SA	SL		
A	1195	353	261	69	5	43	0	0	0	0	0	29	0	1	0	1956	61
AL	146	1456	93	3	68	22	0	0	0	0	0	10	0	0	0	1798	81
ALO	71	49	2064	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2205	94
AS	123	5	39	643	0	2	0	0	0	0	2	60	0	73	3	950	68
LA	33	231	15	0	1303	128	0	0	6	3	3	53	0	0	0	1775	73
LAS	84	105	15	12	91	877	0	0	2	33	26	145	0	12	0	1402	63
LL	2	2	0	0	15	3	3	2	11	9	2	2	0	0	0	51	6
LLS	0	3	0	0	17	13	0	3	7	19	52	5	1	4	7	131	2
LM	8	29	0	0	164	36	0	0	290	42	21	8	0	0	0	598	48
LMS	8	12	0	1	42	91	0	0	30	382	129	27	0	19	2	743	51
LS	9	1	0	0	0	11	0	3	0	30	444	38	0	34	24	594	75
LSA	32	24	0	26	18	94	0	0	0	6	46	836	0	48	1	1131	74
S	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	10	6	1151	133	256	1561	74
SA	12	0	0	90	0	4	0	0	0	0	28	83	15	1144	64	1440	79
SL	0	0	0	0	0	7	0	2	0	8	52	13	43	93	835	1053	79
sum	1723	2270	2487	870	1723	1331	3	10	346	532	815	1315	1210	1561	1192	17,388	
NA	108	190	188	78	245	171	1	7	92	92	77	75	91	91	77		
PR%	69	64	83	74	76	66	100	30	84	72	54	64	95	73	70		OA%=73

PR% is producer's reliability; UA% is user's accuracy; OA is percent correctly classified; NA is non available data for ST hand-feel class.

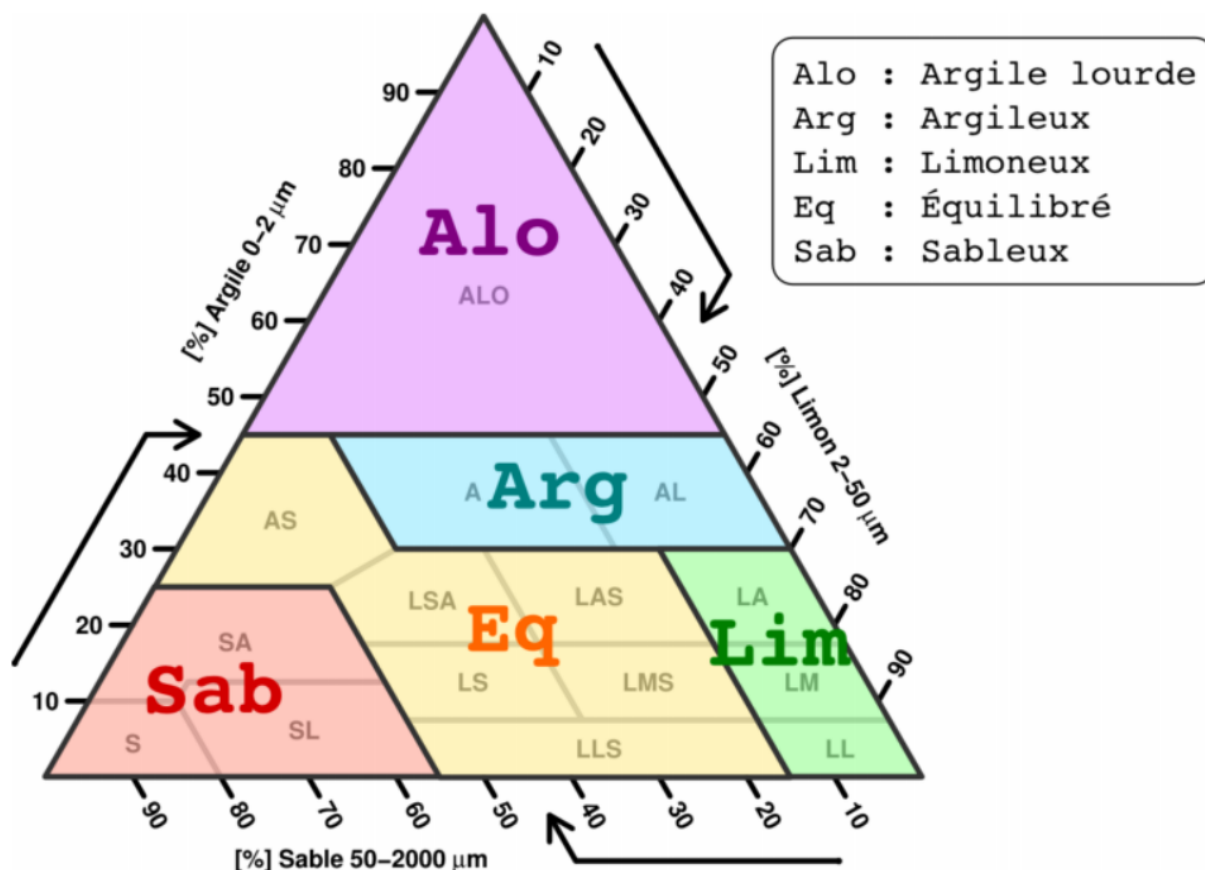


FIGURE 33 – Triangle de texture de sol selon la classification française de l’Aisne, les 15 classes de texture sont regroupées selon les 5 classes définies par la FAO.

TABLE 11 – Matrice de confusion : comparaison de classification entre la méthode HFTE et la méthode d’analyse en laboratoire, selon les classes proposées par l’INRAE pour le triangle de texture français, adapté de RICHER-DE-FORGES et al., 2022.

ST hand-feel	ST measured particle-size class					sum	UA%
	A+AL	ALO	LIM	EQ	SAB		
A+AL	3150	354	73	176	1	3754	84
ALO	120,00	2064	0	21	0	2205	94
LIM	305	15	1792	312	0	2424	74
EQ	406	54	207	4056	228	4951	82
SAB	12	0	0	308	3734	4054	92
sum	3993	2487	2072	4873	3963	17388	
PR%	79	83	86	83	94		OA% = 85

TABLE 12 – Estimation de la Matière Organique à l'aide des couleurs de Munsell, tiré de FAO, 2006.

TABLE 46

Estimation of organic matter content based on Munsell soil colour

Colour	Munsell value	Moist soil			Dry soil		
		S	LS, SL, L	SIL, SI, SICL, CL, SCL, SC, SIC, C	S	LS, SL, L	SIL, SI, SICL, CL, SCL, SC, SIC, C
(%)							
Light grey	7				< 0.3	< 0.5	< 0.6
Light grey	6.5				0.3–0.6	0.5–0.8	0.6–1.2
Grey	6				0.6–1	0.8–1.2	1.2–2
Grey	5.5			< 0.3	1–1.5	1.2–2	2–3
Grey	5	< 0.3	< 0.4	0.3–0.6	1.5–2	2–4	3–4
Dark grey	4.5	0.3–0.6	0.4–0.6	0.6–0.9	2–3	4–6	4–6
Dark grey	4	0.6–0.9	0.6–1	0.9–1.5	3–5	6–9	6–9
Black grey	3.5	0.9–1.5	1–2	1.5–3	5–8	9–15	9–15
Black grey	3	1.5–3	2–4	3–5	8–12	> 15	> 15
Black	2.5	3–6	> 4	> 5	> 12		
Black	2	> 6					

Note: If chroma is 3.5–6, add 0.5 to value; if chroma is > 6, add 1.0 to value.

Source: Adapted from Schlichting, Blume and Stahr, 1995.

TABLE 13 – Coefficient de variation des différentes propriétés du sol tiré de CARTER & GREGORICH, 2008.

TABLE 1.2 Variability of Soil Properties

	Coefficient of variation			
	Low (CV <15%)	Moderate (CV 15%–35%)	High (CV 35%–75%)	Very high (CV 75%–150%)
Soil hue and value ^a		Sand content ^a	Solum thickness ^a	Nitrous oxide flux ^b
pH ^a		Clay content ^a	Exchangeable Ca, Mg, K ^a	Electrical conductivity ^b
A horizon		CEC ^a	Soil nitrate N ^b	Saturated hydraulic conductivity ^b
Thickness ^a		% BS ^a	Soil-available P ^b	Solute dispersion coefficient ^b
Silt content ^a		CaCO ₃ equivalent ^a	Soil-available K ^b	
Porosity ^b		Crop yield ^b		
Bulk density ^b		Soil organic C ^b		

^a Adapted from Wilding, L.P. and Drees, L.R., in L.P. Wilding, N.E. Smeck, and G.F. Hall, (Eds.), *Pedogenesis and Soil Taxonomy. I. Concepts and Interactions*, Elsevier Science Publishing, New York, 1983, 83–116.

^b Adapted from Mulla, D.J. and McBratney, A.B., in M.E. Sumner (Ed.), *Handbook of Soil Science*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2000, A321–A352.

5.1.2 Erreur de mesure

Le récipient utilisé pour cette étude possède des graduations tous les 25mL. Une graduation au mL est généralement utilisée (MERRIAM & KELLER, 1978). Afin de déterminer l'erreur sur les paramètres d'uniformité due à l'outil de mesure, les quantités d'eau prélevées sur le terrain sont modifiées de + 25mm ou de -25mm. Toutes les combinaisons ne pouvant être testées, des valeurs de quantité d'eau modifiées pour 5, 10, 15, 20 ou 25 seaux avec 10, 100, 1000 et 10 000 répétitions sont utilisées pour mesurer l'écart-type des valeurs de l'uniformité (Figure 34).

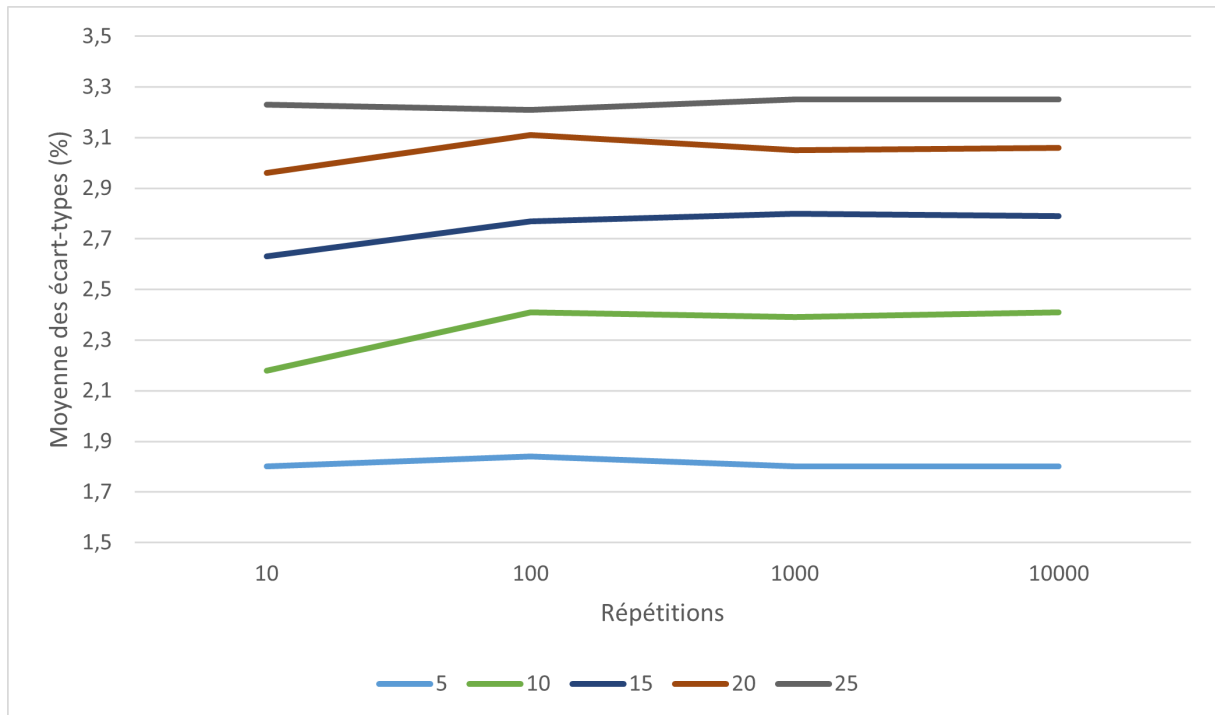


FIGURE 34 – Variation de la valeur du coefficient d'uniformité de Christiansen due à l'outil de mesure, récipient gradué à 25ml.

Plus le nombre de seaux modifiés augmente, plus la moyenne des écarts-types augmente. Cependant, même en modifiant l'ensemble des quantités mesurées, l'erreur est, au maximum, de 3%. De plus, l'augmentation du nombre de répétitions augmente également la moyenne des écarts-types, ceci jusqu'à atteindre un palier. L'outil de mesure fait ainsi varier les paramètres d'uniformité de $\pm 3\%$. Au vu de la variabilité mesurée au niveau des systèmes, cette variation n'est pas significative.

5.1.3 Équation

Équation de l'estimation du rayonnement solaire à partir de données de température tirée de G. ALLEN et al., 1998.

$$R_s = k_{R_s} * \sqrt{(T_{max} - T_{min})} * R_a \quad (13)$$

avec : k_{R_s} : un coefficient d'ajustement (0.16) [$^{\circ}\text{C}^{-0.5}$], T_{max} et T_{min} [$^{\circ}\text{C}$] et R_a : le rayonnement extra-terrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$].

Équation du rayonnement net tirée de G. ALLEN et al., 1998.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (14)$$

avec R_n : le rayonnement net [$\text{MJ m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$], R_{ns} : le rayonnement court net [$\text{MJ m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$], et R_{nl} : le rayonnement long net [$\text{MJ m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$].

Équation de l'estimation de l'évapotranspiration de référence selon Penman-Monteith tirée de G. ALLEN et al., 1998.

$$ET_0 = \frac{0,408 * \delta * (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T+273} * u_s * (e_s - e_a)}{\delta + \gamma * (1 + 0,34 * u_2)} \quad (15)$$

avec :

- ET_0 l'évapotranspiration de référence [mm/jour]
- R_n radiation nette à la surface de la culture [$\text{MJ/m}^2 \cdot \text{jour}$]
- G densité du flux thermique du sol [$\text{MJ/m}^2 \cdot \text{jour}$]
- u_x vitesse du vent à 2m de haut [m/s]
- e_s pression de vapeur à saturation [kPa]
- e_a pression de vapeur actuelle [kPa]
- $e_s - e_a$ déficit de pression de vapeur [kPa]
- Δ pente de la courbe de pression de vapeur [$\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$]
- γ constante psychrométrique [$\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$]

Équation de la réserve utile (RU) tirée de G. ALLEN et al., 1998.

$$RU = (\theta_{fc} - \theta_{pf}) * 10 * Rd \quad (16)$$

avec : RU : la réserve utilisable [mm], θ_{fc} : la teneur en eau à la capacité au champs [m^3/m^3], θ_{pf} : la teneur en eau au point de flétrissement [m^3/m^3], Rd : la profondeur racinaire [m].

Équation de la réserve facilement utilisable par la plante (RFU) tirée de G. ALLEN et al., 1998.

$$RFU = RU * p \quad (17)$$

avec : RFU : la réserve facilement utilisable [mm], p : le tarissement ou facteur de déplétion [-].

5.2 Partie résultats et discussion

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,000	0,000	0,125	0,823	0,016	0,027	0,207	0,341	0,193	0,224	0,104	0,041	0,104	0,597
2	0,000		0,000	0,300	0,937	0,003	0,006	0,518	0,672	0,345	0,194	0,006	0,047	0,087	0,519
3	0,000	0,000		0,144	0,720	0,035	0,044	0,188	0,339	0,155	0,291	0,184	0,045	0,092	0,609
4	0,125	0,300	0,144		0,411	0,770	0,393	0,169	0,058	0,547	0,025	0,978	0,644	0,912	0,387
5	0,823	0,937	0,720	0,411		0,068	0,229	0,144	0,000	0,000	0,283	0,277	0,000	0,000	0,009
6	0,016	0,003	0,035	0,770	0,068		0,004	0,754	0,015	0,050	0,184	0,019	0,000	0,000	0,265
7	0,027	0,006	0,044	0,393	0,229	0,004		0,317	0,059	0,385	0,000	0,009	0,001	0,004	0,332
8	0,207	0,518	0,188	0,169	0,144	0,754	0,317		0,006	0,124	0,787	0,210	0,257	0,086	0,326
9	0,341	0,672	0,339	0,058	0,000	0,015	0,059	0,006		0,073	0,258	0,312	0,000	0,000	0,108
10	0,193	0,345	0,155	0,547	0,000	0,050	0,385	0,124	0,073		0,002	0,046	0,000	0,000	0,000
11	0,224	0,194	0,291	0,025	0,283	0,184	0,000	0,787	0,258	0,002		0,173	0,004	0,005	0,003
12	0,104	0,006	0,184	0,978	0,277	0,019	0,009	0,210	0,312	0,046	0,173		0,009	0,020	0,232
13	0,041	0,047	0,045	0,644	0,000	0,000	0,001	0,257	0,000	0,000	0,004	0,009		0,000	0,000
14	0,105	0,087	0,092	0,912	0,000	0,000	0,004	0,086	0,000	0,000	0,005	0,020	0,000		0,000
15	0,597	0,519	0,609	0,387	0,009	0,265	0,332	0,326	0,108	0,000	0,003	0,232	0,000	0,000	

(1) : Cu, (2) : Dulq, (3) : CV, (4) : num_seau, (5) : p_variation,

(6) : hauteur_asp_cm, (7) : jet_moyen, (8) : jet_min_max, (9) : pente, (10) : dist_tuyau_tot,

(11) : debit_tuyau_lh, (12) : p_tuyau, (13) : nbre_diam_dif, (14) : nbre_tuyau_dif, (15) : hauteur_asp_res

FIGURE 35 – P valeur des différentes corrélations entre les variables de l'Analyse en Composantes Principales.

TABLE 14 – Variances expliquées des différentes dimensions de l'Analyse en Composantes Principales.

	Dimension1	Dimension2	Dimension3	Dimension4	Dimension5
Cu	4.56	20.06	0.80	2.99	0.86
DULq	5.22	15.23	4.01	0.02	1.92
CV	4.22	18.67	0.47	5.02	0.64
num_seau	0.28	6.16	26.22	5.78	2.88
pression_variation	4.82	11.10	0.12	5.10	10.95
hauteur_asp_cm	8.89	0.22	9.96	0.52	6.91
jet_moyen	7.61	0.99	1.92	32.68	3.94
jet_min_max	0.97	8.32	2.82	9.82	42.53
pente	4.82	12.41	6.15	0.68	2.97
dist_tuyau_tot	9.94	1.61	10.05	7.52	8.37
debit_tuyau_lh	6.46	0.11	15.02	20.16	1.27
p_tuyau	5.88	0.18	4.24	3.51	9.42
nbre_diam_dif	14.65	0.95	0.04	1.16	2.70
nbre_tuyau_dif	14.42	1.82	0.04	1.28	0.09
hauteur_asp_res	7.25	2.16	18.14	3.89	4.56