

Résumé complet de la thèse – Simon Meunier

Prix de thèse de la chancellerie

Chapitre I : Revue de littérature

En Afrique subsaharienne, les alternatives les plus communes pour l'accès à l'eau pour l'usage domestique dans les zones pauvres et non connectées au réseau électrique sont les puits ouverts (figure 1), desquels l'eau est extraite avec un seau et une corde, et les pompes à main (figure 2). L'eau des puits ouverts n'est pas potable car ils sont exposés à la contamination extérieure. En revanche, l'eau des pompes à main est potable. Cependant, pour les pompes à main, tout comme pour les puits ouverts, l'extraction d'eau est difficile, le débit d'extraction est limité par la force humaine et ces pompes ne permettent pas d'atteindre les ressources en eau profondes (> 50 m).



figure 1 – Puits ouvert



figure 2 – Pompe à main

Les technologies de pompage d'eau électrifiées permettent de remédier à ces difficultés. Les deux principales sources d'énergie pour l'électrification des pompes sont l'énergie photovoltaïque (PV) et le diesel. Les systèmes de pompage photovoltaïques (PVWPS) sont compétitifs économiquement avec les pompes diesel et ont une durée de vie plus longue, des besoins en maintenance plus réduits et n'émettent pas de fumées toxiques. Nous avons de plus mis en évidence que les émissions de gaz à effet de serre des PVWPS pour l'accès à l'eau domestique sont faibles, notamment car un PVWPS de faible puissance (~1 kW) fournit un service à haute valeur ajoutée (i.e. fournir de l'eau à des dizaines de ménages). Cela explique pourquoi nous ne nous intéresserons pas aux émissions de gaz à effet de serre des PVWPS dans cette thèse.

La conception d'un PVWPS pour un village rural consiste à déterminer son architecture, sa position dans le village et son dimensionnement. Conventionnellement, ces éléments sont déterminés de la manière suivante :

- Architecture : le stockage grâce à un réservoir d'eau est privilégié par rapport aux batteries, pour des raisons de fiabilité qui sont cruciales dans ces zones rurales.
- Position : le décideur propose une position dans le village en suivant quelques lignes directrices.
- Dimensionnement : les articles scientifiques actuels visent à déterminer le dimensionnement du système qui minimise le coût sur cycle de vie et qui maximise la satisfaction de la demande en eau des habitants.

Conformément à la littérature, l'architecture avec le réservoir d'eau nous paraît aussi la plus adaptée et nous considérons donc cette architecture dans cette thèse. Cependant, concernant la position et le dimensionnement, nous avons identifié les manquements suivants de l'approche conventionnelle :

- Le positionnement est un sujet très peu abordé dans la littérature et aucun outil de support n'est fourni au décideur pour le positionnement du PVWPS.
- La position et le dimensionnement ne sont pas couplés, c'est-à-dire que les travaux sur le dimensionnement des PVWPS ne prennent pas en compte le fait que la demande en eau au PVWPS dépend de sa position dans le village. En effet, une grande partie des villages d'Afrique subsaharienne sont très étendus (plusieurs km²) et les conditions d'accès à l'eau ne sont pas les mêmes dans toutes les zones du village. Ainsi, l'affluence à un nouveau point d'eau (ici le PVWPS) dépendra de sa position dans le village.
- L'approche conventionnelle pour la conception des PVWPS ne considère pas l'impact sur le développement socio-économique (e.g. utilisation d'une eau de meilleure qualité, diminution de la distance à parcourir pour la collecte d'eau), alors que la maximisation de cet impact positif est l'objectif principal des institutions qui financent les PVWPS. Cela empêche de plus de cibler les habitants du village qui ont l'accès à l'eau le plus défavorable.

L'objectif de cette thèse est donc de développer une méthodologie de conception optimale des PVWPS qui permette de déterminer les dimensionnements du PVWPS et ses positions dans le village qui maximisent l'impact positif sur le développement socio-économique et minimisent le coût sur cycle de vie du PVWPS.

Cet objectif est atteint en trois étapes principales:

- **Chapitre II.** Un PVWPS est conçu et installé de manière conventionnelle dans un village rural d'Afrique subsaharienne. D'une part, cela permet de comprendre en détail la situation actuelle concernant les PVWPS et de mettre en place une méthodologie qui se base sur cette situation. D'autre part, cela permet de collecter des données pour appliquer la méthodologie développée et pour valider les modèles proposés.

- **Chapitre III.** Nous construisons un modèle interdisciplinaire liant le dimensionnement et la position du PVWPS à son impact socio-économique et à son coût sur cycle de vie. Le modèle interdisciplinaire est composé de 4 sous-modèles : demande, technique, impact et économique. Ce modèle prend aussi en compte la variabilité de la ressource solaire et les aspects environnementaux liés à l'impact du pompage sur les ressources en eau.
- **Chapitre IV.** Nous définissons un problème d'optimisation pour déterminer les dimensionnements et les positions du PVWPS qui maximisent l'impact positif sur le développement socio-économique et minimisent le coût du cycle de vie du PVWPS, tout en préservant les ressources en eau. Nous présentons ensuite les résultats de l'optimisation.

Pour résumer, dans le chapitre II, nous apprenons de la conception et de l'installation d'un PVWPS de manière conventionnelle. Ensuite, dans les chapitres III et IV, nous utilisons les connaissances acquises pour proposer une méthodologie améliorée de conception et d'installation des PVWPS (i.e. nous déterminons comment nous aurions pu concevoir et installer le PVWPS mis en place conventionnellement de manière plus optimale).

Ce travail a été effectué au sein d'une équipe interdisciplinaire composée de chercheurs en génie électrique (laboratoires GeePs et SATIE), politique environnementale et sociologie (Imperial College London), économétrie (Colorado State University) et hydrologie (Stanford University) en collaboration avec l'entreprise Burkinabé DargaTech, spécialisée dans les systèmes d'énergie solaire.

Chapitre II : Dispositif expérimental

Village d'étude

Le village de Gogma (latitude 11.73°, longitude -0.58°) compte 1100 habitants répartis dans 125 ménages. Les ménages sont eux-mêmes regroupés en 41 concessions. La grande majorité des habitants travaillent dans le domaine de l'agriculture et vivent avec un revenu inférieur à 1 \$/jour. Les ménages n'ont pas accès à l'électricité. Nous avons identifié 4 types d'usages domestiques de l'eau : boire, cuisiner, se laver et laver les vêtements. L'eau pour ces usages est collectée auprès de 22 points d'eau répartis en 3 catégories : 16 puits ouverts desquels l'eau est extraite avec un seau et une corde, 5 pompes à main et 1 PVWPS.

Conception, installation et description du PVWPS

Nous avons suivi les différentes étapes de la conception et de l'installation du PVWPS qui a été coordonnée par l'entreprise Burkinabé DargaTech. L'analyse de ces étapes et les discussions avec les membres de DargaTech nous ont permis de mettre en évidence la procédure conventionnelle d'installation des PVWPS au Burkina Faso. Elle est détaillée sur la figure 3. Cette procédure a duré 5 mois à Gogma entre fin 2017 et début 2018 et le PVWPS a été ouvert à la consommation en janvier 2018.

La figure 4 présente l'architecture du PVWPS installé et les figures 5 et 6 montrent des photos du système. Une vidéo du village et du PVWPS est aussi disponible au lien suivant : <https://youtu.be/VrjM0edKVsl>. Ce système comprend des modules PV polycristallins pour une puissance crête totale de 620 W_c, une motopompe Grundfos SQFlex 5A-7 et un réservoir d'eau cylindrique en acier de 11.4 m³. Le contrôleur régule l'énergie fournie par les modules PV à la motopompe, selon le niveau d'eau dans le réservoir, obtenu par un interrupteur à flotteur. L'eau est collectée à la fontaine par les habitants.



figure 3 – Procédure conventionnelle pour la conception et l'installation de PVWPS

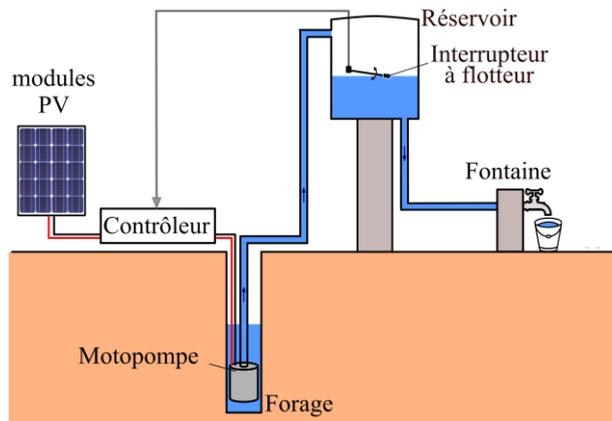


figure 4 – Architecture du PVWPS.

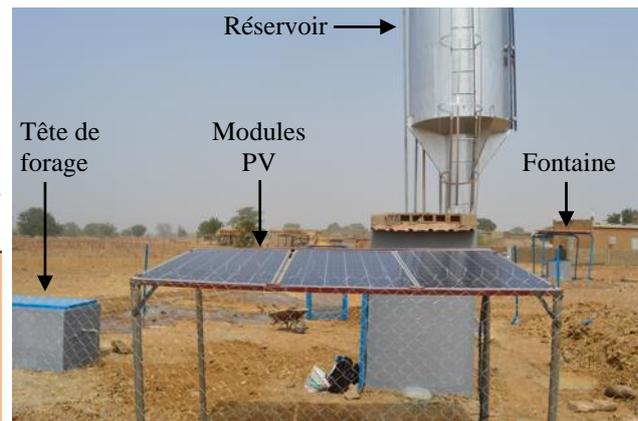


figure 5 - Photo du PVWPS.



figure 6 – Vue d'ensemble du PVWPS
 Sur la gauche : fontaine où les habitants collectent l'eau.
 Sur la droite : les modules PV et le réservoir d'eau

Collecte de données

Voici les données principales qui ont été collectées à Gogma :

- Les coordonnées GPS des ménages, des sources d'eau et des points importants du village ont été relevées et sont représentées sur la photo satellite de la figure 7.
- Des mesures géophysiques ont été effectuées, avant la mise en place du PVWPS actuel, visant à détecter l'éventuelle présence d'eau (voir figure 7).
- Nous avons déterminé le coût pour collecter de l'eau à chaque source grâce aux carnets de comptes des sources.
- Des enquêtes ménage socio-économiques ont été effectuées, avant et après l'ouverture à la consommation du PVWPS, auprès de 88 ménages tirés au sort parmi les 125 ménages du village. Ces enquêtes ont notamment permis de connaître le choix de source de chaque ménage avant et après l'installation du PVWPS, ainsi que de savoir comment les ménages perçoivent la qualité de

l'eau et la facilité d'extraction aux sources qu'ils utilisent. Les données recueillies pour les 88 ménages interrogés sont extrapolées aux 37 ménages du village qui n'ont pas été interrogés, notamment grâce à la connaissance de la position GPS de ces 37 ménages.

- Des tests de pompage ont été réalisés pour le PVWPS actuel. Ils ont permis de déterminer le débit maximum $Q_{p,max}$ qui peut être extrait du forage sans mettre en péril les ressources en eau.
- Des analyses bactériologiques ont été effectuées pour toutes les sources d'eau afin de quantifier leur qualité.
- Le PVWPS est monitoré en continu depuis janvier 2018 grâce notamment à un système de collecte de données autonome que nous avons nous-mêmes conçu et installé (voir figure 8). Les grandeurs collectées sur le système sont l'irradiance, la température ambiante et celle des modules PV, la tension et le courant des modules PV, le débit pompé, le débit collecté à la fontaine et le niveau d'eau dans le forage. Les données sont collectées avec un pas de temps de 2 s.

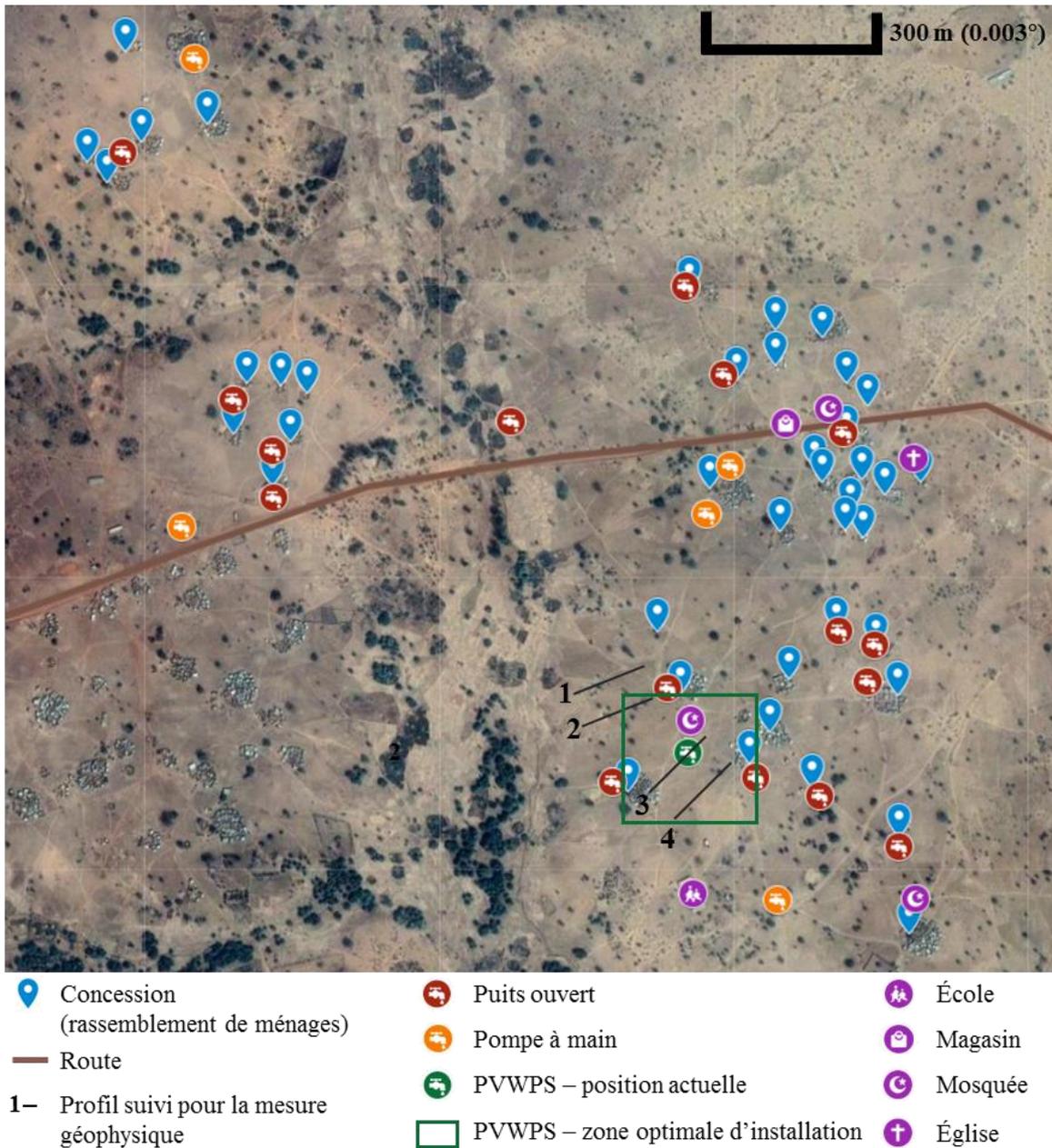


figure 7 - Cartographie GPS du village de Gogma.

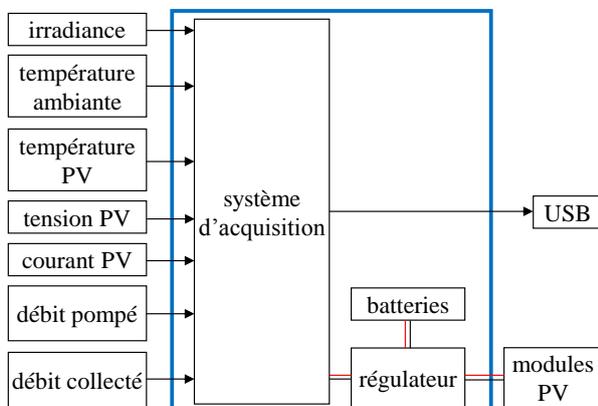


figure 8 – Système de collecte de données développé pour le monitoring du PVWPS de Gogma

Chapitre III : Modèle interdisciplinaire

Vue d'ensemble

Le modèle interdisciplinaire lie le dimensionnement et la position du PVWPS à son impact socio-économique et à son coût du cycle de vie. Le synoptique du modèle est représenté sur la figure 9.

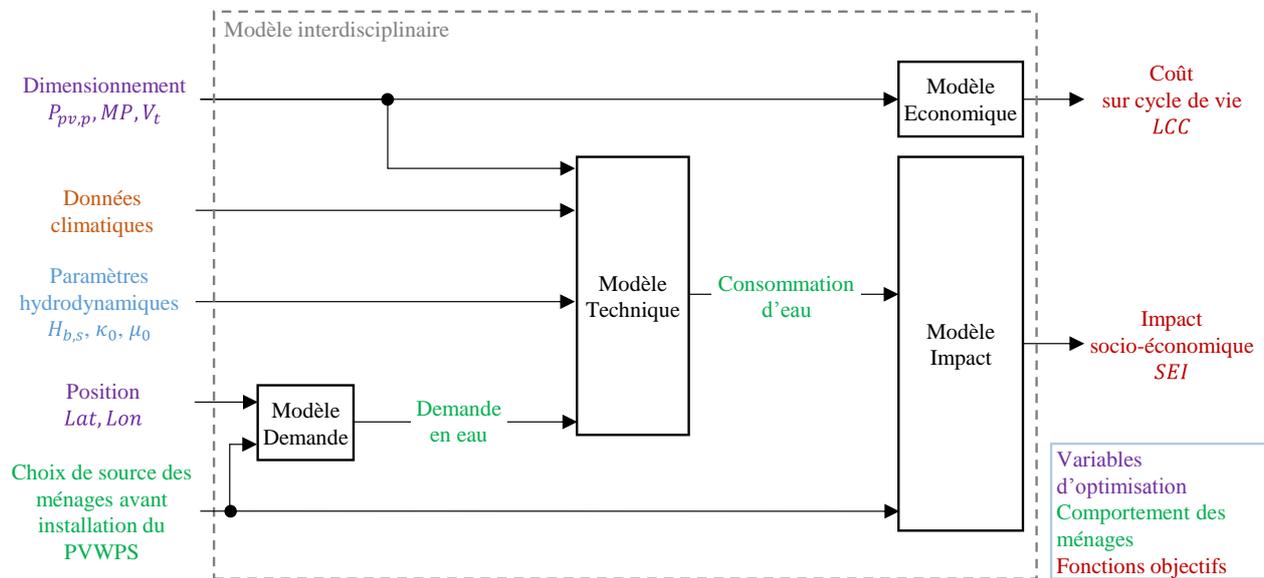


figure 9 – Synoptique du modèle interdisciplinaire.

Entrées et sorties

Les entrées du modèle interdisciplinaire peuvent être regroupées en 4 catégories :

1. *Variables d'optimisation.* Nous distinguons deux types de variables d'optimisation: (1) les variables de dimensionnement du PVWPS et (2) la position du PVWPS dans le village, qui est donnée par sa longitude *Lon* et sa latitude *Lat*. Les variables de dimensionnement incluent la puissance crête totale des modules PV dans les conditions de test standard (STC) $P_{pv,p}$, la référence de la motopompe *MP* et le volume du réservoir d'eau V_t . Nous avons numérisé les courbes caractéristiques de 8 références de motopompes.
2. *Données climatiques.* Ce sont les données d'irradiance et de température ambiante.
3. *Paramètres hydrodynamiques:* le niveau d'eau statique dans le forage $H_{b,s}$ (i.e. le niveau d'eau lorsqu'il n'y a pas de pompage), le coefficient de pertes dues à l'aquifère κ_0 et le coefficient de pertes dues au forage μ_0 . Ces paramètres hydrodynamiques dépendent des ressources en eau. Ils sont déterminés après avoir fait un forage puis des tests de pompage. Par exemple, ils ont été déterminés pour le PVWPS actuel de Gogma grâce aux tests de pompage effectués (voir Chapitre II). Sans faire de forage et de tests de pompage, il est seulement possible de donner une plage de variation de ces paramètres.
4. *Le choix de source des ménages avant installation du PVWPS.*

Les sorties du modèle interdisciplinaire sont le coût du PVWPS sur cycle de vie *LCC* et son impact socio-économique *SEI*.

Sous-modèles

Le *modèle de demande* est un modèle d'économétrie qui permet de prévoir le choix de source d'eau effectué par chaque ménage à partir:

- des distances entre le ménage et les différentes sources d'eau ;
- de la perception du ménage de la qualité de l'eau des différentes sources.

Nous pouvons donc, pour chaque position du PVWPS, prévoir quels ménages quitteraient leur ancienne source d'eau au profit du PVWPS. Cela permet d'obtenir la demande en eau au PVWPS. Les paramètres de ce modèle sont identifiés grâce au choix de source des ménages et à leur perception et distance aux sources avant installation du PVWPS (données collectées grâce aux enquêtes ménage).

Le *modèle technique* permet de déterminer le pourcentage de la demande en eau au PVWPS qui est satisfait, c'est-à-dire la consommation d'eau, et d'identifier les ménages qui bénéficient effectivement du PVWPS. Les entrées du modèle sont les données climatiques, les paramètres hydrodynamiques, le dimensionnement du PVWPS et la demande en eau. Ce modèle prend en compte les différentes étapes de la conversion d'énergie au sein du PVWPS et la réponse de la nappe phréatique au pompage d'eau. Nous avons validé ce modèle pour le système actuel de Gogma grâce aux données acquises par le système de collecte de données. Nous évaluons ce modèle pour une année avec un pas de temps de 1h en utilisant des données climatiques issues de bases de données satellites. Grâce aux modèles de demande et technique, nous pouvons donc prédire quels ménages vont effectivement quitter leur ancienne source d'eau pour le PVWPS.

Le *modèle d'impact* permet alors d'évaluer l'impact socio-économique *SEI* associé à ces changements de sources d'eau. L'impact socio-économique est évalué grâce à des indicateurs. Nous avons séparé ces indicateurs en deux catégories :

- *Indicateurs directs*. Ils résultent directement du changement de source d'eau. Ils sont au nombre de 4 : la qualité de l'eau utilisée, la facilité pour extraire l'eau, le prix à payer pour utiliser l'eau et la distance à parcourir pour collecter l'eau.
- *Indicateurs indirects*. Ils résultent des indicateurs directs et ont été identifiés grâce à la mise en place d'une théorie du changement. Ces indicateurs considèrent notamment la prévalence des maladies hydriques (diarrhée, trachome), les gains de temps, les dépenses de santé et l'accès à l'éducation.

Nous quantifions tout d'abord l'effet des changements de sources d'eau sur les indicateurs directs, puis l'effet de la variation des indicateurs directs sur la valeur des indicateurs indirects. L'impact socio-économique est égal à la somme pondérée des valeurs des indicateurs directs et indirects, normalisées au

préalable. Les coefficients de pondération dépendent du choix du décideur politique, selon les indicateurs qu'il veut favoriser.

Le *modèle économique* permet de déterminer le coût du PVWPS sur cycle de vie *LCC* à partir de son dimensionnement (valeurs de $P_{pv,p}$, MP et V_t). Le modèle prend en compte les coûts d'investissement et de fonctionnement et l'actualisation de la monnaie. Les données utilisées pour ce modèle ont été collectées auprès d'entreprises Burkinabès.

Chapitre IV : Conception optimale

Problème d'optimisation

Les 2 fonctions objectifs de l'optimisation sont le coût sur cycle de vie LCC du PVWPS, que nous voulons minimiser, et l'impact socio-économique SEI , que nous voulons maximiser. Les variables de l'optimisation sont la puissance de crête totale des modules PV $P_{pv,p}$, la référence de motopompe MP , le volume du réservoir d'eau V_t , la latitude Lat et la longitude Lon du PVWPS. La référence de motopompe MP est la seule variable discrète. Nous effectuons une optimisation pour chaque référence de motopompe MP et nous obtenons donc un front de Pareto pour chaque référence de motopompe. Nous déterminons alors le front de Pareto final en passant par les meilleurs points des fronts de Pareto associés aux références de motopompes.

Nous utilisons un algorithme d'évolution différentielle bi-objectif, qui est un algorithme stochastique pour l'optimisation. Nous avons choisi un algorithme stochastique car le problème d'optimisation est non-linéaire.

Analyse d'un résultat de référence

Nous présentons ici un exemple de résultat d'optimisation pour lequel l'impact socio-économique SEI considère les 4 indicateurs directs avec des poids tous identiques. Nous supposons de plus que, pour toutes les positions de Gogma, les valeurs des paramètres hydrodynamiques sont les mêmes que les valeurs déterminées pour le PVWPS actuel.

La figure 10 montre le front Pareto obtenu. Les figures 11, 12 et 13 illustrent l'évolution des variables d'optimisation le long du front de Pareto. Nous présentons aussi sur ces figures les valeurs des fonctions objectifs et des variables pour le système actuel de Gogma.

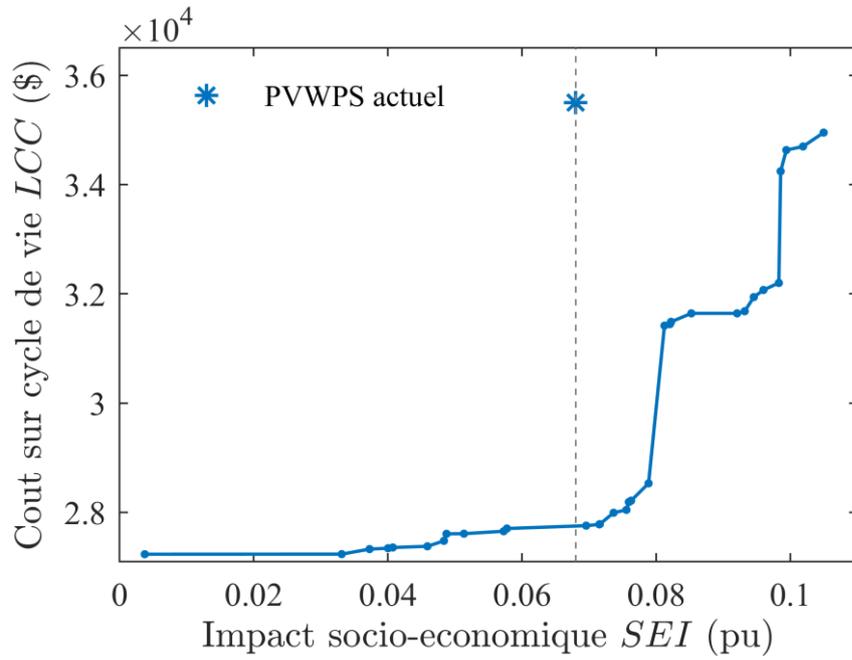


figure 10 – Front de Pareto

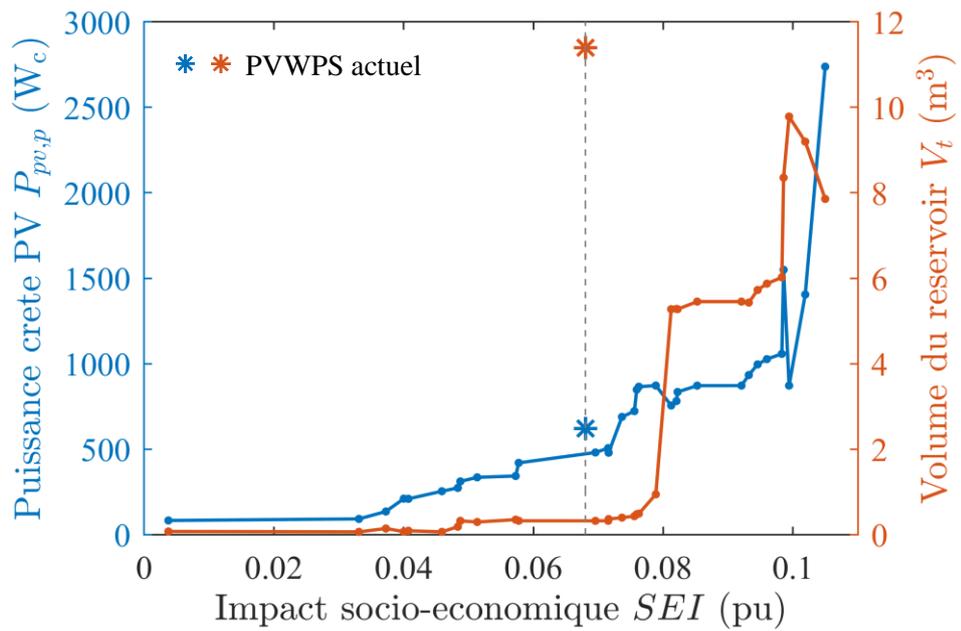


figure 11 – Variation de $P_{pv,p}$ et V_t en fonction de SEI .

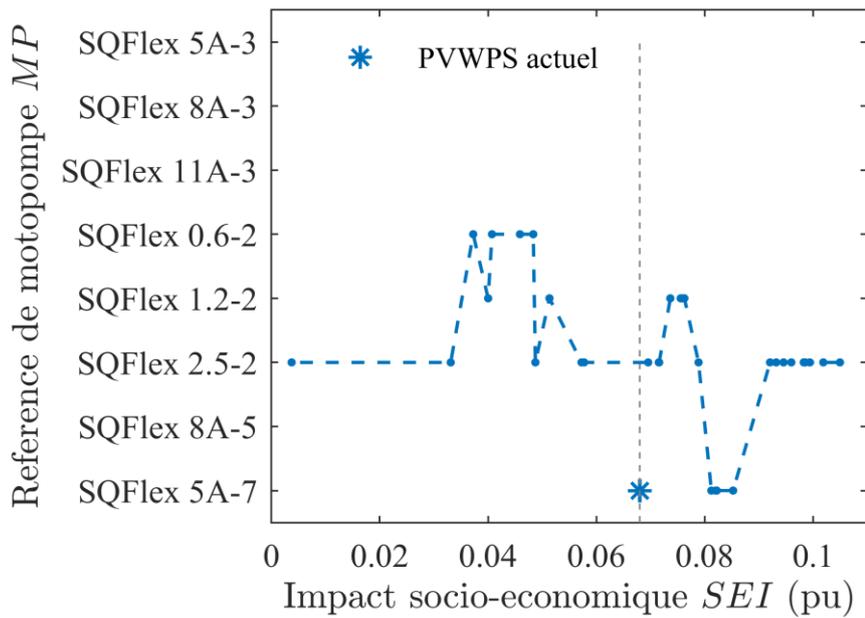


figure 12 – Variation de MP en fonction de SEI.

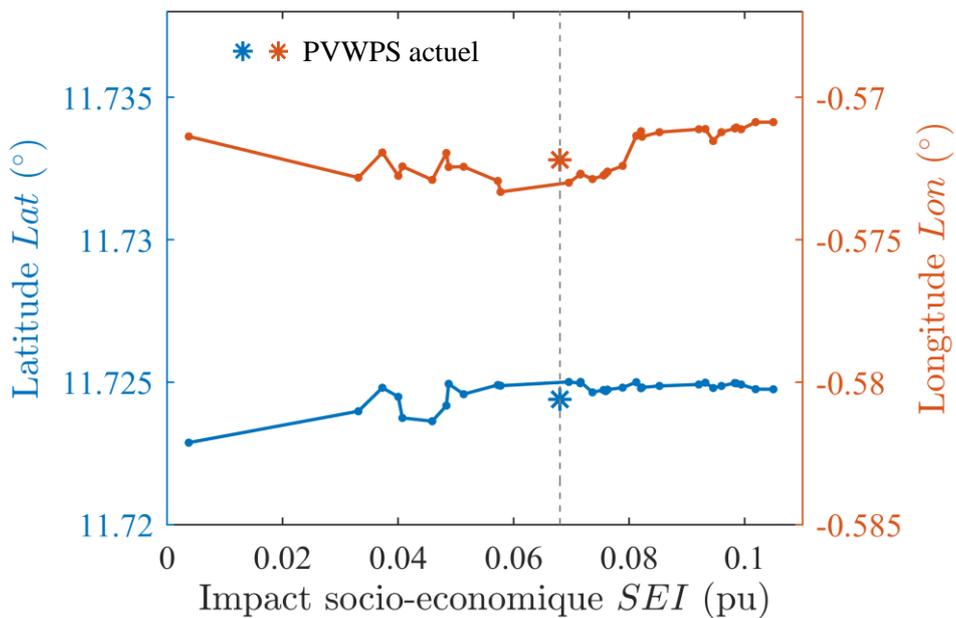


figure 13 – Variation de Lat et Lon en fonction de SEI.

La figure 10 permet de déterminer (1) l'impact socio-économique SEI maximum envisageable pour un PVWPS de coût LCC et (2) la coût minimal LCC pour atteindre un impact socio-économique SEI donné. Il apparaît logiquement que des dépenses plus importantes conduisent à des impacts socio-économiques positifs plus significatifs. Les résultats indiquent aussi que la différence de LCC entre le point de minimum SEI et le point de maximum SEI est $7.9 \cdot 10^3$ \$, ce qui représente 29% du coût LCC du point de minimum

SEI ($2.72 \cdot 10^4$ \$). Cela suggère que, dans la mesure du possible, il est préférable de choisir des points du front avec des valeurs de SEI élevées.

Nous observons de plus sur la figure 11 que les valeurs optimales de la puissance crête totale des modules PV $P_{pv,p}$ et du volume du réservoir V_t augmentent avec l'impact socio-économique SEI . En effet, de manière générale, des systèmes de plus grande taille permettent d'accroître le nombre de bénéficiaires et donc l'impact socio-économique. Concernant le choix de motopompe (figure 12), l'optimisation privilégie les références 5A-7, 2.5-2, 1.2-2 et 0.6-2. Enfin, nous observons une faible variation de la position du PVWPS le long du front de Pareto (figure 13). Cela permet d'identifier une zone du village ($Lat \in [11.723^\circ, 11.725^\circ] \times Lon \in [-0.573^\circ, -0.571^\circ]$) où l'installation du PVWPS serait optimale. Nous avons représenté cette zone par un rectangle vert sur la figure 7. Nous observons sur la figure 7, que la densité de ménages est relativement élevée dans cette zone et que les seules sources d'eau disponibles sont des puits ouverts, qui sont des sources de mauvaise qualité (eau non potable) et pour lesquelles l'extraction d'eau est très fastidieuse. Ainsi, dans le cas où un PVWPS est installé dans cette zone, les ménages proches du PVWPS peuvent alors quitter leur puits ouvert pour le PVWPS. Cela conduit à un fort impact socio-économique et explique notamment le choix de cette zone par l'optimisation.

Nous pouvons aussi comparer les valeurs des fonctions objectifs et des variables pour le système actuel aux résultats optimaux. Sur la figure 10, nous observons que le coût du PVWPS actuel ($3.55 \cdot 10^4$ \$) aurait pu permettre d'atteindre l'impact socio-économique SEI le plus élevé (0.105), à la place du SEI du PVWPS actuel (0.068). En outre, il apparaît que l'impact socio-économique du système actuel (0.11) a été obtenu pour un coût LCC de $3.55 \cdot 10^4$ \$ alors que, d'après le front de Pareto, il aurait pu être obtenu pour un coût de seulement $\sim 2.78 \cdot 10^4$ \$. Cela suggère que l'application de la méthodologie aurait pu permettre d'économiser $\sim 7.7 \cdot 10^3$ \$ à Gogma, pour l'expression du SEI considérée ici. Pour le SEI du PVWPS actuel (0.068), la figure 11 indique que la puissance crête totale des modules PV $P_{pv,p}$ actuelle est proche de la puissance optimale mais que le volume du réservoir V_t actuel est bien plus large que le volume optimal. La figure 12 suggère que la motopompe SQFlex 2.5-2 serait plus adaptée que la motopompe actuelle (SQFlex 5A-7). En effet, pour le point du front de Pareto le plus proche ($SEI = 0.070$), la motopompe optimale est la SQFlex 2.5-2. Enfin, la figure 13 montre que la position actuelle du PVWPS est proche de la position optimale.

Nous avons en outre évalué l'influence de la définition de l'impact socio-économique par le décideur politique et des ressources en eau sur les résultats d'optimisation.

Proposition de procédure améliorée pour la conception et l'installation des PVWPS

La procédure améliorée proposée est présentée sur la figure 14. Elle est basée sur la procédure conventionnelle (voir figure 3) et inclut la méthodologie d'optimisation développée.

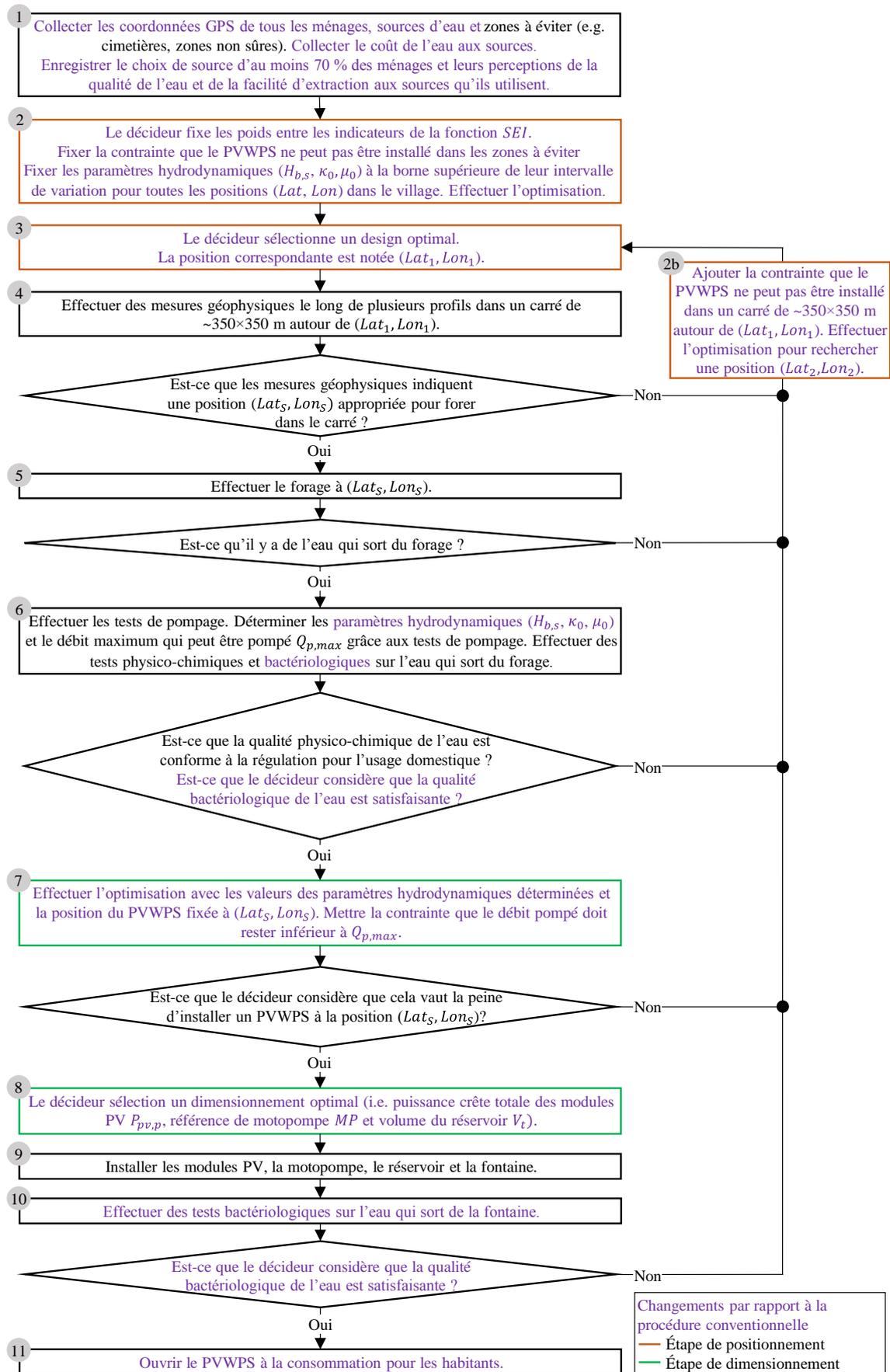


figure 14 – Procédure améliorée pour la conception et l'installation des PVWPS.

Dans les paragraphes suivants, nous décrivons les différences entre la procédure conventionnelle (voir figure 3) et la procédure améliorée proposée (voir figure 14).

Pour évaluer les modèles de demande et d'impact, il est nécessaire de collecter des données dans le village. C'est l'objet de l'étape 1. Les coordonnées GPS de tous les ménages et sources doivent être recueillies ainsi que le coût de l'eau à toutes les sources. Il faut aussi recueillir le choix de source d'au moins 70% des ménages du village ainsi que leur perception de la qualité de l'eau et de la facilité d'extraction aux sources qu'ils utilisent. Nous estimons que cette collecte de données coûte environ ~800 \$ pour un village comme Gogma. Lorsque nous comparons ce coût avec les économies potentielles liées à l'application de la méthodologie développée à Gogma (~7.7 10³ \$), cela suggère que l'application de la procédure améliorée est économiquement viable.

Une première optimisation bi-objectif est effectuée aux étapes 2 et 3, ce qui permet de proposer une première position (Lat_1, Lon_1), autour de laquelle les ressources en eau seront examinées. Pour cette optimisation, les poids de la fonction SEI sont définis par le décideur en fonction des indicateurs qu'il souhaite privilégier. Enfin, les paramètres hydrodynamiques sont pris égaux à la limite supérieure de leur intervalle de variation pour toutes les positions (Lat, Lon) du village, ce qui aide à éviter des coûts plus élevés que prévu lors du forage et du dimensionnement du PVWPS. Grâce à cette première phase d'optimisation, le décideur peut désormais compter sur un outil lui permettant d'identifier une position potentielle (Lat_1, Lon_1) autour de laquelle installer le PVWPS. Cette position maximise l'impact socio-économique positif SEI sur le village tout en minimisant le coût sur cycle de vie du système LCC . Nous rappelons que dans la situation classique, le décideur ne pouvait compter que sur son intuition pour cette étape de positionnement.

Au cours des étapes 4 à 6, le forage est effectué, la qualité de l'eau est testée et les paramètres hydrodynamiques ($H_{b,s}$, κ_0 et μ_0) et le débit maximal pouvant être pompé $Q_{p,max}$ sont déterminés grâce aux essais de pompage.

Une seconde optimisation bi-objectif est ensuite effectuée aux étapes 7 et 8, ce qui permet de déterminer les valeurs des variables de dimensionnement. Pour cette optimisation, la position est fixée à la position du forage et la contrainte que le débit de la pompe doit rester inférieur à $Q_{p,max}$ est définie, afin de préserver les ressources en eau. Il est important de noter que la détermination des paramètres hydrodynamiques ($H_{b,s}$, κ_0 et μ_0) est essentielle pour garantir le respect de la contrainte mentionnée précédemment car ces paramètres sont nécessaires pour calculer le débit pompé. Dans l'ensemble, cette deuxième phase d'optimisation aide la société qui installe le PVWPS et le décideur à déterminer le dimensionnement du PVWPS qui maximise l'impact socio-économique positif SEI et minimise le coût du cycle de vie LCC , tout en préservant les ressources en eau.

Enfin, nous proposons également quelques modifications concernant les tests bactériologiques. Premièrement, nous proposons d'ajouter des tests bactériologiques en même temps que les tests physico-chimiques, à l'étape 6. En effet, les tests bactériologiques ne coûtent que ~20 \$ (voir section II.2.7.2) et fournissent des informations sur la qualité bactériologique de l'eau du forage. Si le décideur n'est pas satisfait par la qualité de l'eau du forage, il peut alors décider de modifier la position du PVWPS avant d'effectuer de nouveaux investissements. Deuxièmement, nous recommandons que les seconds tests bactériologiques soient toujours effectués avant l'ouverture du PVWPS à la consommation (voir étapes 10 et 11).

Transposabilité, contributions et continuité

Cette section présente les systèmes auxquels la méthodologie développée pour les PVWPS pourrait être appliquée, résume les contributions majeures de cette thèse et donne un aperçu des projets actuellement en cours qui ont suivi ces travaux de thèse.

Transposabilité

La méthodologie de conception optimale proposée peut être appliquée à d'autres systèmes pour lesquels la demande pour le service rendu dépend de la position du système et qui ont un impact socio-économique significatif. Dans le contexte des zones rurales des pays en voie de développement, les moulins communautaires alimentés par l'énergie photovoltaïque où les habitants apportent leurs grains pour faire de la farine peuvent être une application particulièrement intéressante. En effet, selon la position du moulin, différents agriculteurs peuvent être ciblés et les impacts socio-économiques associés à la vente de produits agricoles transformés sont significatifs. Dans le cas des pays occidentaux, une des applications possibles est le positionnement des bornes de recharge publiques pour les véhicules électriques. En effet, la demande à la borne de recharge dépend de sa position et les impacts socio-économiques peuvent inclure une réduction du temps nécessaire pour se rendre à la borne et un accès facilité pour les personnes à mobilité réduite.

Contributions

Les contributions de cette thèse peuvent être divisées entre contributions méthodologiques, contributions au domaine de l'accès à l'eau et contributions techniques sur les PVWPS.

Les deux contributions méthodologiques sont :

- L'inclusion de la position du système comme variable d'optimisation. Cela est notamment rendu possible par le développement du modèle de demande qui simule la demande pour le service rendu par le système en fonction de sa position.
- La prise en compte de l'impact socio-économique comme fonction objectif de l'optimisation. Cela est rendu possible par le développement des modèles de demande, technique et d'impact qui relie les variables d'optimisation à l'impact socio-économique.

Les deux contributions au domaine de l'accès à l'eau sont :

- L'élaboration d'une théorie du changement qui permet d'identifier les impacts socio-économiques (ex : prévalence des maladies hydriques, gain de temps, accès à l'éducation) associés aux choix de sources d'eau des ménages. Cette théorie du changement a notamment été mise en place grâce à l'identification et à l'analyse des références pertinentes de la littérature sur le sujet. Elle aide à mieux comprendre les impacts des investissements dans des sources d'eau améliorées.

- Le développement d'un modèle de demande en eau qui prend en compte la saisonnalité et prédit la courbe de charge à un système d'extraction d'eau qui sera installé dans le futur. La courbe de charge prédite par le modèle de demande peut alors être utilisée pour le dimensionnement technique du futur système d'extraction d'eau.

Les six contributions techniques sur les PVWPS sont:

- Le développement d'un système de collecte de données autonome et son utilisation pour le *monitoring* en continu du PVWPS de Gogma. À notre connaissance, c'est la première fois qu'un PVWPS pour l'accès à l'eau domestique est monitoré en continu et que des données sont collectées sur un PVWPS en Afrique subsaharienne rurale. Cela permet une prévision plus précise des performances et de la durabilité des PVWPS pour l'accès à l'eau domestique et dans cette région, où ils sont particulièrement utiles.
- L'inclusion de la demande en eau au PVWPS comme entrée du modèle technique. Cela permet de modéliser le fonctionnement instantané des PVWPS qui comportent un réservoir et un contrôleur qui arrête et redémarre la motopompe en fonction du niveau d'eau dans le réservoir, ce qui correspond à une architecture commune pour les PVWPS.
- Le développement et la validation d'un modèle hydraulique piloté par les données expérimentales (*data driven model*). Contrairement aux modèles précédents, le modèle développé n'est pas basé sur des hypothèses qui sont rarement satisfaites (ex : aquifère homogène et isotrope) et peut être appliqué à tous les types d'aquifères.
- La démonstration que les données d'irradiance d'une base de données satellite peuvent être utilisées à la place des données d'un capteur local pour la modélisation et l'optimisation des PVWPS. Cela peut favoriser la mise en œuvre des PVWPS dans les zones où aucune mesure d'irradiance locale n'est disponible, ce qui est souvent le cas en Afrique subsaharienne.
- La démonstration qu'un pas de temps de 1 heure peut être utilisé pour la modélisation et l'optimisation des PVWPS, au lieu de pas de temps plus fins (ex : 1 minute). Cela permet notamment de réduire le temps de calcul pour l'optimisation.
- La démonstration qu'il n'est pas indispensable de considérer le comportement thermique des modules PV et l'évolution de la température ambiante lors de la modélisation des PVWPS pour l'accès à l'eau domestique.

Continuité

Le travail que j'ai initié autour des PVWPS et des approches interdisciplinaires se poursuit dans le cadre de plusieurs projets. Tout d'abord, je co-supervise actuellement le projet étudiant de recherche de Adnan Zeddoun et de Vincent Roy à CentraleSupélec concernant l'utilisation des réseaux de neurones pour la prédiction de la demande et de la disponibilité en eau dans les villages ruraux. Je co-supervise également en

ce moment deux thèses de M2 (*MSc thesis*) à l'Imperial College London. La première (*MSc thesis* de Anne Charpentier) porte sur la détermination de l'état des aquifères grâce au *machine learning*. La seconde (*MSc thesis* de Camille Soenen) se focalise sur le vieillissement des différents composants des PVWPS. Enfin, le *monitoring* du PVWPS de Gogma se poursuit en continu grâce au système de collecte de données autonome. De plus, une nouvelle collecte de données socio-économiques (enquêtes ménages) est prévue dans 2 ans dans le village de Gogma afin d'étudier l'impact du PVWPS sur les conditions de vie à moyen terme.