

ESSAIS DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE : UN OUTIL DE SURVEILLANCE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES DE POMPAGE D'EAU

Ange Sahuquet^{1,2}, Simon Meunier^{1,2}, Judith A. Cherni³, Anne Charpentier³, Thomas Vezin^{1,2}, Arouna Darga^{1,2}, Peter K. Kitanidis⁴, Loïc Quéval^{1,2}

¹Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, GeePs, 91192 Gif-Sur-Yvette, France

²Sorbonne Université, CNRS, GeePs, 75252 Paris, France

³Centre for Environmental Policy, Imperial College London, London SW7 2AZ, United Kingdom

⁴Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, United States

RESUME – Les systèmes photovoltaïques de pompage d'eau (PVWPS) représentent aujourd'hui une solution attractive pour l'accès à l'eau potable dans les pays en voie de développement. Nous proposons dans cet article un protocole d'essais de pompage à coût réduit permettant d'évaluer l'état de santé du forage de ce type de système au long de sa phase de fonctionnement. Cette solution permet ainsi de surveiller la soutenabilité des ressources en eau et la durabilité du système.

Mots-clés— *Système photovoltaïque de pompage d'eau ; Etat de santé d'un forage ; Essais de pompage ; Ressources en eau souterraines.*

1. INTRODUCTION

L'accès aux ressources en eau dans les communautés rurales isolées est un enjeu majeur pour les pays en voie de développement [1], [2]. Les systèmes photovoltaïques de pompage d'eau (PVWPS) constituent une solution intéressante pour répondre à cette problématique [3], [4]. Ce sont des systèmes à la fois économiquement compétitifs en zones isolées [5], technologiquement fiables [6] et à faible émission de gaz à effet de serre [7]. Il est primordial de mettre en place des protocoles permettant d'améliorer la soutenabilité de ces systèmes afin de pérenniser l'accès aux ressources en eau et d'éviter la surexploitation des capacités hydriques d'un site.

La Fig. 1 présente l'architecture conventionnelle d'un PVWPS pour l'accès à l'eau domestique [8], [9]. Les modules photovoltaïques (PV) alimentent une motopompe qui extrait de l'eau du forage. Cette eau est stockée dans un réservoir et peut être collectée par les utilisateurs à la fontaine. Un interrupteur à flotteur permet de commander le démarrage et l'arrêt de la motopompe en fonction du niveau d'eau dans le réservoir.

Les essais de pompage sont l'un des outils permettant d'évaluer la soutenabilité de l'extraction d'eau dans un forage [10]. Ils consistent à extraire de l'eau du forage à un débit donné pendant une durée définie et à mesurer l'évolution du niveau d'eau dans le forage [11]. Cela permet d'en déduire des informations sur l'état de santé du forage (e.g. colmatage) et sur le débit maximal qu'il est possible d'extraire lors de son exploitation [3]. Ces essais sont en général effectués en utilisant une motopompe alimentée par un générateur diesel [12] selon le dispositif présenté dans la Fig. 2. Dans la suite de l'article, ceux-ci seront désignés comme "essais de pompage standard" (EPS).

Dans la majorité des cas, les EPS sont effectués uniquement pendant la phase d'installation du PVWPS [11], [13]. Ceci est notamment dû au fait que des procédures et des coûts importants

seraient nécessaires pour effectuer les essais de pompage après l'installation du système. En effet, cela nécessiterait : le transport d'un générateur diesel sur site, l'arrêt de l'installation, l'ouverture du forage puis le redémarrage de l'installation après avoir effectué les essais. En outre, ces essais suspendraient l'accès à l'eau pour les utilisateurs pendant toute la durée de la procédure.

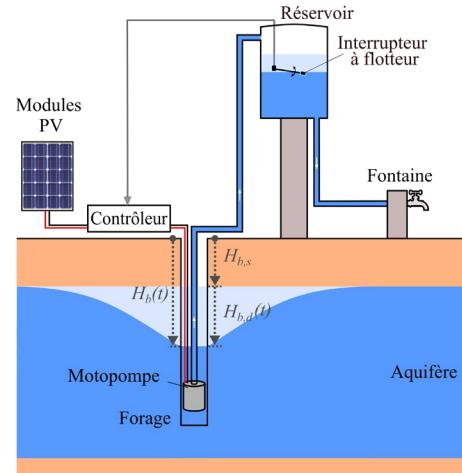


Fig. 1. Système photovoltaïque de pompage d'eau (PVWPS)

L'état de santé du forage étant amené à évoluer durant la phase de fonctionnement du PVWPS (~20 ans) [14], il peut être problématique de ne l'observer qu'uniquement pendant la phase d'installation du système.

Dans ce contexte, nous proposons une méthodologie afin de réaliser des essais de pompage à coût réduit, réalisables durant la phase de fonctionnement du PVWPS. Ces essais sont effectués en utilisant les modules photovoltaïques du PVWPS comme source d'énergie au lieu d'un générateur diesel et seront donc désignés comme "essais de pompage photovoltaïque" (EPPV). À notre connaissance, c'est la première fois que de tels essais sont proposés dans la littérature. Dans la Section 2, nous présentons le protocole des EPPV et l'intérêt de leur mise en place. Dans la Section 3, nous présentons les résultats obtenus lors de la réalisation de tels essais sur le PVWPS installé dans le village de Gogma, au Burkina Faso.

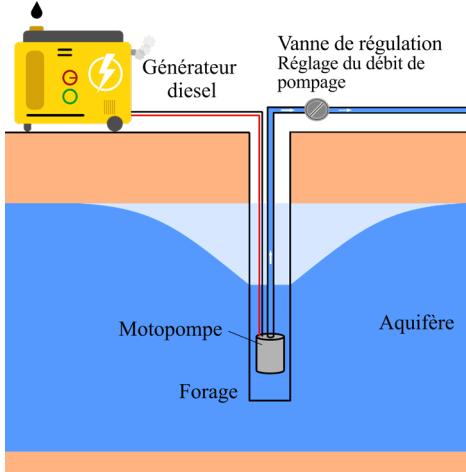


Fig. 2. Essai de pompage standard

2. METHODOLOGIE

2.1. Modélisation du niveau d'eau dans le forage lors du pompage

Quand la motopompe ne pompe pas, le niveau d'eau dans le forage H_b est égal au niveau d'eau statique $H_{b,s}$. Lorsque de l'eau est pompée, un cône de dépression se forme et un rabattement $H_{b,d}$ dans le forage se cumule avec le niveau d'eau statique $H_{b,s}$ (voir Fig. 1) [15]. De ce fait, plus le débit de pompage est élevé, plus le niveau d'eau dans le forage H_b sera profond. Le niveau d'eau dans le forage H_b est donné par [14] :

$$H_b(t) = H_{b,s} + H_{b,d}(t) \quad (1)$$

où $H_{b,s}$ est le niveau d'eau statique dans le forage. $H_{b,d}$ est le rabattement et est égal à :

$$H_{b,d}(t) = - \sum_{n=0}^N \kappa_n Q_p(t - n \Delta T) - \sum_{n=0}^N \mu_n Q_p(t - n \Delta T)^2 \quad (2)$$

où Q_p est le débit de pompage, κ_n et μ_n sont des coefficients positifs et ΔT est le temps de réponse caractéristique du forage. N est un paramètre qui représente l'effet des débits passés sur le niveau d'eau du forage. Les hauteurs $H_b(t)$, $H_{b,s}$ et $H_{b,d}(t)$ sont définies négatives et elles apparaissent sur la Fig. 1.

2.2. Description et implémentation des essais de pompage photovoltaïque

Les EPPV doivent pouvoir se dérouler après l'installation du PVWPS et sans interférer avec l'opération du système : les utilisateurs du système doivent pouvoir continuer de collecter de l'eau pour leurs usages. Le but de ces essais est d'identifier des perturbations éventuelles concernant le niveau d'eau dans le forage (ex : colmatage) ainsi que de mettre à jour les paramètres du forage $H_{b,s}$, κ_n , μ_n , ΔT et N , indicateurs de son état de santé.

Lors des EPPV, il est nécessaire de mesurer le débit pompé Q_p et le niveau d'eau dans le forage H_b . Afin de mesurer Q_p , un débitmètre est positionné sur le tuyau en sortie de la motopompe. Concernant la mesure de niveau d'eau H_b , un capteur de pression hydrostatique est utilisé.

La Fig. 3 présente le déroulement des essais. L'installation des équipements est réalisée 1 heure avant le lever du soleil afin de commencer les mesures lorsque le niveau d'eau est encore à son niveau statique $H_{b,s}$. La collecte de données commence 30 minutes avant le lever de soleil et est arrêtée 3 heures après le coucher de soleil, avec un pas de temps de 10 minutes. Les données obtenues couvrent alors une journée complète et permettent d'observer la phase de rétablissement après l'arrêt de la motopompe (lorsque le

niveau d'eau au sein du forage remonte jusqu'à atteindre le niveau d'eau statique). Enfin, les équipements sont retirés et les données analysées. Un EPPV ne nécessite qu'une seule personne, formée au préalable, pour installer les deux capteurs (débitmètre, capteur de pression hydrostatique), lancer la collecte de données, vérifier régulièrement que les données sont correctement enregistrées puis retirer les équipements. Nous estimons le coût total d'un EPPV en prenant en compte les coûts liés au salaire de l'opérateur, à l'amortissement de l'achat des capteurs et au trajet de l'opérateur.

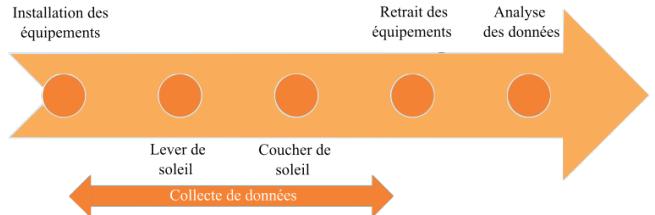


Fig. 3. Déroulement d'un essai de pompage photovoltaïque

2.3. Intérêt des essais de pompage photovoltaïque

Bien que les EPPV présentent un coût, ils peuvent permettre de déduire des informations sur l'état de santé du forage, et ainsi d'améliorer la durabilité du système. Par exemple, on peut diagnostiquer un niveau d'eau dans le forage H_b trop faible. Ce phénomène peut être expliqué par un mauvais entretien du forage, une surextraction des ressources en eau par le PVWPS et/ou par des facteurs externes au système tels que la surexploitation de l'aquifère par des systèmes de pompage voisins. Le diagnostic pourrait conduire à la mise en place de mesures adaptées pour préserver la durabilité du PVWPS et de l'aquifère comme la désobstruction du forage, l'adaptation du régime d'utilisation du PVWPS (ex : le plafonnement du débit d'eau collecté dans l'aquifère par le PVWPS), la concertation avec les gestionnaires de systèmes de pompage voisins et éventuellement avec les experts et autorités locales.

En plus de compromettre la soutenabilité du PVWPS et de l'aquifère, une incapacité à diagnostiquer une baisse trop importante de H_b et à appliquer des mesures adaptées pourrait entraîner des conséquences techniques qui affecteraient directement le coût du PVWPS. La première répercussion possible serait que, si H_b diminue trop, il peut y avoir une baisse du débit pompé. Une deuxième conséquence possible d'une baisse importante de H_b serait la baisse du niveau d'eau sous le niveau de la motopompe, qui continuerait de fonctionner sans suffisamment d'écoulement pour assurer son refroidissement. Cette surchauffe pourrait provoquer la défaillance de la motopompe qui devrait alors être remplacée [16]. Même si la motopompe dispose d'une sécurité et s'arrête, cela entraînerait une diminution du volume pompé [17] et pourrait causer une diminution de la durée de vie de la motopompe. Ces deux conséquences pourraient engendrer différents coûts. Par exemple, il pourrait être nécessaire de remplacer la motopompe par une motopompe dont la hauteur de pompage est plus élevée. En second lieu, il est envisageable que le forage doive être creusé plus profondément afin d'installer la motopompe à une plus grande profondeur. En troisième lieu, les résidents pourraient décider d'abandonner à la fois le forage et le PVWPS, car ils ne répondraient plus à leurs besoins.

3. RESULTATS

3.1. Cas d'étude

Nous présentons dans cette section les résultats obtenus lors d'EPPVs sur le PVWPS installé dans le village de Gogma (un village isolé de 1100 habitants au Burkina Faso). Le PVWPS est composé de 620 W_p de modules photovoltaïques, d'une motopompe Grundfos SQFlex 5A-7 et d'un réservoir de

11,4 m³. Sur ce site, environ 7 m³ sont consommés quotidiennement pour les usages domestiques d'environ 260 villageois [18], [19]. Le forage de 0,11 m de diamètre atteint une profondeur de 56 m et la motopompe est positionnée à une profondeur de 30 m.



Fig. 4. PVWPS de Gogma

3.2. Essais de pompage standard à Gogma

Deux types d'essais de pompage standard (EPS) ont été effectués en novembre 2017 sur le site de Gogma après la réalisation du forage pour le PVWPS. Ils ont été réalisés par la société Sogedaf, basée au Burkina Faso. Premièrement, un essai de type "série de paliers de débits" a été réalisé le 5 novembre 2017 avec quatre paliers de débits différents ($2,8 \cdot 10^{-4}$ m³/s, $8,3 \cdot 10^{-4}$ m³/s, $1,7 \cdot 10^{-3}$ m³/s et $1,8 \cdot 10^{-3}$ m³/s). Pour chaque palier de débit Q_p , le niveau d'eau dans le forage H_b était mesuré pendant 1 heure de pompage, puis 1 heure d'arrêt de pompage (phase de rétablissement). Deuxièmement, un essai de type "longue durée" a été réalisé entre le 8 et le 9 novembre 2017. Le niveau d'eau au sein du forage était mesuré pendant une phase de pompage d'une durée prolongée de 36 heures à un débit constant de $1,8 \cdot 10^{-3}$ m³/s puis durant une phase d'arrêt de pompage d'une durée de 11 heures (phase de rétablissement). Ces essais de pompage standard nous ont permis de déterminer le niveau d'eau statique $H_{b,s}$. A cette période de l'année, $H_{b,s}$ est égal à -4,9 m. L'essai de pompage de type "série de paliers de débits" a coûté \$511 et l'essai de pompage de type "longue durée" a coûté \$2050.

3.3. Essais de pompage photovoltaïque à Gogma

Pour mesurer le niveau d'eau au sein du forage H_b , un capteur de pression hydrostatique DCX-22 SG a été installé [20]. Pour mesurer le débit pompé Q_p , un capteur de débit à turbine YF-DN40 est utilisé [21], [22]. Pour les EPPV, nous utilisons les données de H_b et Q_p avec un pas de temps de 10 minutes. Le coût de réalisation d'un EPPV à Gogma est estimé à \$43, il est réparti équitablement entre le coût de main d'œuvre, le coût du matériel et le coût du transport (sachant que le test est réalisé par un technicien venant de Ouagadougou, la capitale du Burkina Faso).

3.4. Analyse des essais des essais de pompage photovoltaïque

Comme la réponse de l'aquifère du site de Gogma est rapide et l'influence des paramètres κ_n et μ_n avec $N > 0$ est faible [14], nous considérons $N = 0$ dans l'équation (2). Nous présentons dans le Tableau 1 les résultats de l'identification des trois paramètres du modèle de forage $H_{b,s}$, κ_0 et μ_0 pour différents essais. Ces identifications sont obtenues à partir de données de débit de pompage Q_p et de mesures de niveau d'eau au sein du forage H_b provenant d'EPS et d'EPPV réalisés entre novembre 2017 et juin 2020. Nous résumons aussi le coût des essais dans le tableau.

Nous observons tout d'abord que les EPPV nous permettent d'identifier de manière fiable ($R^2 = 0.99$, voir Tableau 1) les valeurs des paramètres du forage ($H_{b,s}$, κ_0 , μ_0) à moindre coût en comparaison avec les EPS. De plus, il apparaît que ces paramètres varient au cours du temps, ce qui témoigne de l'intérêt d'effectuer des essais tout au long de la phase de fonctionnement du PVWPS. En effet, surveiller la variation du niveau d'eau statique $H_{b,s}$ du forage et du rabattement $H_{b,d}$ permet de s'assurer que l'état de santé du forage ne soit pas critique. En particulier, en déterminant les valeurs du rabattement $H_{b,d}$ pour différents essais de pompage à un débit de pompage Q_p donné, nous pouvons notamment quantifier l'évolution de la dynamique du forage pour différents moments de la vie du système du système. Par exemple, dans le cas de l'EPPV I réalisé en avril 2019, en fixant un débit de pompage égal à $1,0 \cdot 10^{-3}$ m³/s et grâce aux valeurs de κ_0 et μ_0 déterminées lors de cet essai, nous estimons une valeur de rabattement $H_{b,d}$ égale à -3,2 m grâce à l'équation (2). Dans le cas de l'EPPV V, pour la même valeur de débit de pompage mais pour les valeurs des paramètres κ_0 et μ_0 obtenues grâce à ce dernier essai, nous obtenons une valeur indicative de rabattement égale à -3,3 m. Nous observons ainsi que cette valeur indicative de rabattement évolue légèrement au cours du temps. Pour le site de Gogma, ces valeurs n'indiquent pas de danger pour l'état de santé du forage : cela montre que la maintenance du forage et l'utilisation faite du PVWPS sont adéquates.

Sur la Fig. 5, nous représentons trois courbes d'évolution du niveau d'eau du forage H_b pour la journée du 10 avril 2020. Deux d'entre elles représentent l'évolution de H_b estimé lors de cette journée, à partir des paramètres de forage identifiés dans le Tableau 1 (EPS réalisé le 5 novembre 2017 et EPPV réalisé le 2 avril 2020). L'estimation du niveau d'eau est fortement améliorée lorsque l'on utilise des paramètres récents. Cela met donc en évidence l'intérêt d'effectuer régulièrement des EPPVs en complément des EPS initiaux.

Tableau 1 : Résultats des essais de pompage standard (EPS) et photovoltaïque (EPPV) : coût, paramètres et erreurs estimées R^2 .

Type	Date de l'essai	Coût (\$)* estimé	$H_{b,s}$ (m)	κ_0 (m ⁻² .s)	μ_0 (m ⁻⁵ .s ²)	R^2
EPS [3]	05-Nov.-2017	\$511	-4,9	$2,0 \cdot 10^3$	$5,8 \cdot 10^5$	0,97
EPPV I	02-Avril-2019	\$43*	-7,5	$2,0 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^6$	0,99
EPPV II	18-Juin-2019	\$43*	-7,9	$1,9 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^6$	0,99
EPPV III	22-Nov.-2019	\$43*	-6,0	$1,8 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^6$	0,99
EPPV IV	02-Avril-2020	\$43*	-7,1	$2,1 \cdot 10^3$	$9,0 \cdot 10^5$	0,99
EPPV V	18-Juin-2020	\$43*	-7,7	$2,3 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^6$	0,99

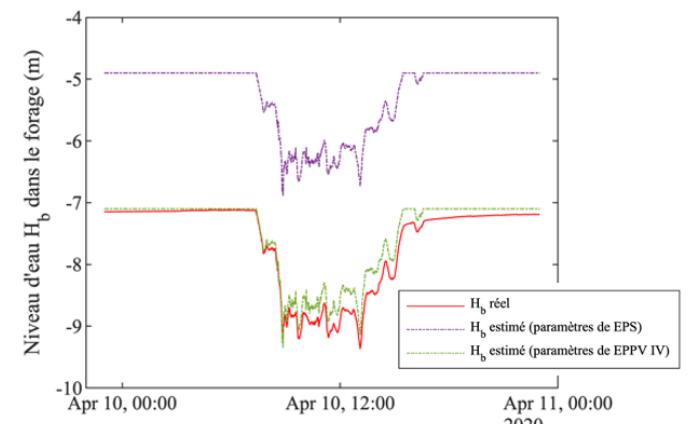


Fig. 5. H_b réel et estimé en fonction de différents paramètres de forage

3.5. Quantification des bénéfices des essais de pompage photovoltaïque

Comme mentionné dans la Section 2.3., la réalisation d'EPPV peut permettre, entre autres, de réaliser d'importantes

économies. En effet, ce type d'essais peut permettre d'éviter l'endommagement de certains composants du PVWPS, en surveillant la dégradation de l'état de santé du forage. Par exemple, de tels essais peuvent permettre d'éviter de devoir remplacer prématurément la motopompe ou de ne pas avoir à réaliser un nouveau forage dans le cas d'une dégradation importante dudit forage. Dans le cas de Gogma, nous pouvons comparer le coût des EPPV (\$43) avec le coût de remplacement de la motopompe ou le coût estimé d'un nouveau forage. La motopompe de Gogma a coûté \$2200 [3], il faudrait donc 51 EPPV pour atteindre le coût de remplacement de la motopompe en cas de panne prématurée. La durée de vie de la motopompe est estimée à 10 ans [3]. Au cours de cette période, le coût opérationnel de la mise en place d'EPPV réguliers chaque année s'élèverait à \$430. Cela représente moins de 20 % du coût d'une nouvelle motopompe si elle devait être remplacée prématurément. Le forage de Gogma a coûté \$8300 [3]. Cela correspond au coût de 193 EPPV. La durée de vie d'un forage est estimée à 50 ans [3]. Sur cette période, le coût total de la mise en place d'EPPV réguliers s'élèverait à \$2150, soit 26 % du coût d'un nouveau forage.

Sur la durée de vie de la motopompe et du forage, non seulement les essais de pompage photovoltaïque sont moins coûteux que le remplacement prématuré de ces composants, mais les coûts sont également répartis uniformément et régulièrement dans le temps. Cela signifie qu'aucun paiement majeur et imprévu ne devrait être effectué, contrairement au cas où un composant majeur du système PVWPS devrait être remplacé. Dans certains cas, les communautés locales ne peuvent pas faire face à la défaillance du système PVWPS dû par exemple à un manque de fonds pour le remplacement du matériel et/ou à temps d'installation trop long. Cette situation peut entraîner l'interruption de l'accès à l'eau temporaire ou définitive sur le PVWPS. De plus, les essais de pompage photovoltaïque sont compatibles avec une utilisation du PVWPS, alors que le changement d'un composant du PVWPS le rendrait inutilisable pendant toute la durée des réparations et de l'installation.

4. CONCLUSIONS

Dans cet article, nous avons proposé une solution de surveillance des systèmes photovoltaïques de pompage d'eau (PVWPS) : l'essai de pompage photovoltaïque. A l'inverse des essais de pompage standard menés lors de la phase d'installation, ces essais à coût réduit sont réalisables périodiquement tout au long de la phase de fonctionnement des PVWPS. Ils permettent d'obtenir une mise à jour fiable des paramètres du forage et de surveiller l'état de santé du forage.

Dans le futur, nous prévoyons notamment d'étudier la périodicité (ex : une fois par an, une fois tous les 2 ans) à choisir pour réaliser ces essais de pompage afin d'assurer un suivi adéquat de l'état de santé du forage. Ce choix dépendra de la précision requise par les gestionnaires du système photovoltaïque de pompage d'eau et du budget disponible pour la mise en place de ce type d'essais.

Bien que le protocole ait été appliqué à un village spécifique dans cet article, il est générique et transférable à d'autres installations. Ces essais de pompage photovoltaïque peuvent présenter un intérêt pour tous les acteurs souhaitant améliorer la soutenabilité des systèmes photovoltaïques de pompage, tels que les autorités locales, les gouvernements, les organisations non-gouvernementales et les entreprises.

5. REFERENCES

- [1] World Health Organization and United Nations Children's Fund (UNICEF), "Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017: special focus on inequalities." Geneva: World Health Organization, 2019.
- [2] G. Hutton and J. Bartram, "Regional and Global Costs of Attaining the Water Supply and Sanitation Target (Target 10) of the Millennium Development Goals - WHO," 2010.
- [3] S. Meunier, "Optimal design of photovoltaic water pumping systems for rural communities – a technical, economic and social approach," PhD thesis, Université Paris-Saclay, 2019.
- [4] R. Foster and A. Cota, "Solar Water Pumping Advances and Comparative Economics," *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 1431–1436, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.134.
- [5] B. Singh, A. K. Mishra, and R. Kumar, "Solar Powered Water Pumping System Employing Switched Reluctance Motor Drive," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 5, pp. 3949–3957, Sep. 2016, doi: 10.1109/TIA.2016.2564945.
- [6] S. S. Chandel, M. Nagaraju Naik, and R. Chandel, "Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 1084–1099, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.04.083.
- [7] E. T. Maddalena, C. G. da S. Moraes, G. Bragança, L. G. Junior, R. B. Godoy, and J. O. P. Pinto, "A Battery-Less Photovoltaic Water-Pumping System With Low Decoupling Capacitance," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 3, pp. 2263–2271, May 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2900412.
- [8] C. Soenen et al., "Comparison of Tank and Battery Storages for Photovoltaic Water Pumping," *Energies*, vol. 14, no. 9, art. 2483, Apr. 2021, doi: 10.3390/en14092483.
- [9] K. Meah, S. Fletcher, and S. Ula, "Solar photovoltaic water pumping for remote locations," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 2, pp. 472–487, Feb. 2008, doi: 10.1016/j.rser.2006.10.008.
- [10] W. H. Bierschenk, Determining Well Efficiency by Multiple Step-drawdown Tests. International Association of Scientific Hydrology, 1963.
- [11] "Pumping Tests : Aquifer Testing 101." <http://www.aqtesolv.com/pumping-tests/pump-tests.htm> (accessed Dec. 13, 2022).
- [12] P. S. Osborne, S. T. S. C. for G. W. (Robert S. K. E. R. Laboratory), U. S. E. P. A. O. of R. and Development, and U. S. E. P. A. T. I. Office, Suggested Operating Procedures for Aquifer Pumping Tests. Superfund Technology Support Center for Ground Water, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, 1993;
- [13] International Committee of the Red Cross (ICRC), "Technical review: practical guidelines for test pumping in water wells," 2011.
- [14] T. Vezin et al., "Borehole water level model for photovoltaic water pumping systems," *Applied Energy*, vol. 258, art. 114080, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114080.
- [15] R. A. Freeze and J. A. Cherry, "Groundwater." Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1979.
- [16] Grundfos, "SQ/SQE Protection Features: Dry-Running Protection," 2023. <https://www.grundfos.com/solutions/learn/ecademy/all-courses/grundfos-sq-sqe/sq-sqe-protection-features-dry-running-protection> (accessed Apr. 21, 2023).
- [17] S. Meunier, P. K. Kitanidis, A. Cordier, and A. M. MacDonald, "Aquifer conditions, not irradiance determine the potential of photovoltaic energy for groundwater pumping across Africa," *Commun Earth Environ*, vol. 4, art. 52, Feb. 2023, doi: 10.1038/s43247-023-00695-8.
- [18] S. Meunier et al., "Sensitivity Analysis of Photovoltaic Pumping Systems for Domestic Water Supply," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 6, pp. 6734–6743, Nov./Dec. 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.3013513.
- [19] S. Ferreira, S. Meunier, M. Heinrich, J. A. Cherni, A. Darga, and L. Quéval, "A decision support tool to place drinking water sources in rural communities," *Science of The Total Environment*, vol. 833, art. 155069, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155069.
- [20] Keller, "DCX-22 SG," KELLER Pressure, 2019. <https://keller-druck.com/fr/produits/enregistreur-de-donnees/enregistreurs-de-niveau-hydrostatique/dcx-22> (accessed Mar. 27, 2023).
- [21] HaiHuiLai, "Turbine à Hall en plastique, YF-DN40 G1.5," 2019. <https://fr.aliexpress.com/item/32795067364.html> (accessed Mar. 27, 2023).
- [22] S. Meunier et al., "A validated model of a photovoltaic water pumping system for off-grid rural communities," *Applied Energy*, vol. 241, pp. 580–591, May 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.03.035.