

# Hydro-solaire : une nouvelle utilisation des réservoirs

## *Solar-hydro: a new utilization of dam reservoirs*

Luc Deroo<sup>1</sup>, Yves Sahut<sup>1</sup>, et Benoit Defrance<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ISL Ingénierie, 75 Boulevard Macdonald, 75019 Paris, France

**Résumé.** Les retenues de barrages peuvent offrir de nouveaux services pour le développement de vastes capacités d'électricité solaires, que ce soit par l'implantation de panneaux solaires flottants, mais aussi en offrant une capacité de stockage hydraulique pouvant être mobilisée en hybridation avec la ferme solaire, pour produire une électricité dispatchable. L'article aborde dans un premier temps les intérêts principaux d'une telle hybridation, ainsi que les contraintes et enjeux qui lui sont associés, notamment pour un développement sur le continent africain. Plusieurs fonctionnements sont ensuite décrits à travers le prisme de trois pas de temps : le pas de temps de la minute (pour des études à dominance dynamique), le pas de temps journalier (pour étudier le placement de l'énergie) et le pas de temps annuel (pour étudier les influences saisonnières et optimiser la gestion de la retenue). Deux exemples sont enfin donnés pour illustrer l'intérêt actuel porté à cette nouvelle façon de produire de l'électricité.

**Abstract.** The dams' water retention can offer new services to develop large solar electrical capacities, whether it be by using floating solar panels, but also by offering a hydraulic storage capacity which can be used in a hybrid way with the solar powerplant to produce dispatchable electricity. The article first approach the main interests for such a hybridization and its stakes and constraints with a focus on an African development. A few ways to operate such a powerplant are then described by using three time-scales: the minute (mainly for dynamic studies), the day (to study energetic placement) and the year (to study the seasons' influence and the optimization of the water retention's management). Two examples are then given to illustrate the actual interest shown to this new way of producing electricity.

---

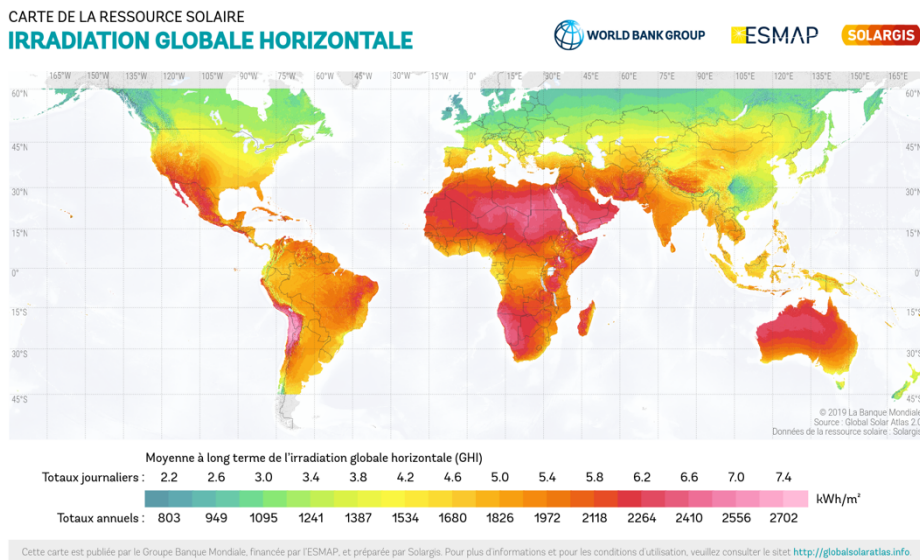
\* Corresponding author: [defrance@isl.fr](mailto:defrance@isl.fr)

# 1 Contraintes et fonctionnement de l'hybridation Hydro-Solaire

## 1.1 Intérêt de l'hybridation Hydro-Solaire

L'hybridation Hydro-Solaire a pour objectif la fourniture d'une électricité dispatchable, en opposition à l'électricité de source solaire dont le caractère intermittent rend difficile, notamment pour de fortes puissances, l'intégration sur les réseaux électriques.

Une telle hybridation est particulièrement pertinente sur le continent Africain, le « gisement solaire » (i.e. le productible encore disponible) étant conséquent et encore peu exploité.



**Fig. 1.** GHI (Global Horizontal Irradiation) mondiale correspondant au potentiel solaire ©World Bank Group ©ESMAP ©SOLARGIS.

Une forte production solaire, à cause de sa forte intermittence, ne pourrait donc pas être intégrée sur la plupart des réseaux africains, qui ne sont aujourd'hui pas assez résilients pour effacer de telles variations.

L'ajout de production hydraulique, pour laquelle l'Afrique possède aussi un important gisement (avec par exemple un potentiel de développement estimé à 11 GW [1] pour le WAPP (West African Power Pool) et 300 GW pour l'intégralité du continent, selon l'Agence internationale de l'énergie), permettrait ainsi de maximiser la production solaire en lissant son intermittence, tout en complétant la production la nuit lorsque les centrales solaires sont inactives.

L'hybridation de ces deux sources d'énergie est aussi intéressante pour la complémentarité qu'elle offre par rapport aux variations saisonnières de production :

- Durant la saison sèche, la production solaire augmente via des périodes d'ensoleillement plus longues (selon l'éloignement par rapport à l'équateur) et plus fréquentes, là où la production hydroélectrique diminue notamment pour cause de pluies plus rares et de températures plus élevées. La consommation électrique est aussi plus élevée, du fait de l'utilisation de climatiseurs électriques ;

- Durant la saison humide, la production solaire diminue via des périodes d'ensoleillement plus courtes (même remarque que précédemment) et plus rares, là où la production hydroélectrique augmente pour cause de pluies plus fréquentes et de températures plus faibles.

## **1.2 Problématiques liées au développement du secteur énergétique**

Le développement de la solution d'hybridation Hydro-Solaire va néanmoins devoir faire face à plusieurs problématiques dans le cadre du développement du secteur énergétique africain.

Le premier défi à relever consiste à développer et interconnecter efficacement les réseaux électriques des différents pays. Le continent souffre aujourd'hui de très fortes inégalités, avec certains pays dont l'électrification ne dépasse pas les 10 % (la moyenne étant à 42 % en 2016 pour le continent) [2].

Les réseaux doivent aussi être correctement automatisés pour assurer un dispatching capable d'intégrer correctement de plus en plus d'énergies renouvelables.

Pour que l'hybridation Hydro-Solaire puisse être mise en place, il sera nécessaire de pouvoir s'appuyer sur un marché de l'électricité commun à plusieurs pays, avec des tarifs avantageux et/ou des mécanismes d'obligation d'achat, pour que la solution puisse être compétitive, notamment par rapport aux centrales thermiques.

Dans la suite de l'article, un fonctionnement similaire à celui du marché européen de l'énergie sera utilisé pour faciliter l'illustration des possibilités. Il est à noter qu'un tel fonctionnement n'est que très peu répandu actuellement en Afrique. Comme mentionné précédemment, cet aspect constitue l'un des axes majeurs de développement du secteur énergétique africain, dont dépendra en partie la solution Hydro-Solaire.

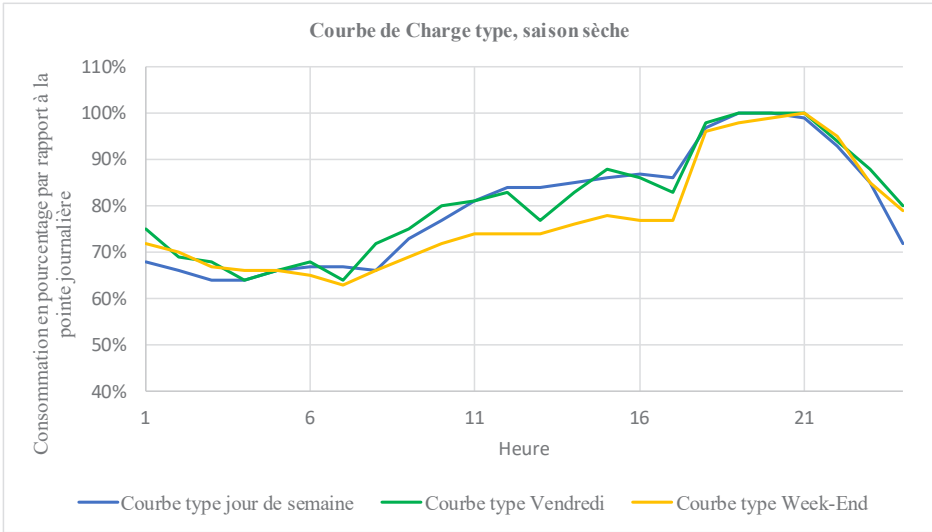
## **1.3 Différenciation des centrales hybridées**

Le fonctionnement d'une centrale Hydro-Solaire peut être divisé en deux grandes catégories :

- Les centrales Hydro-Solaire STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage) ;
- Les centrales Hydro-Solaire avec barrage.

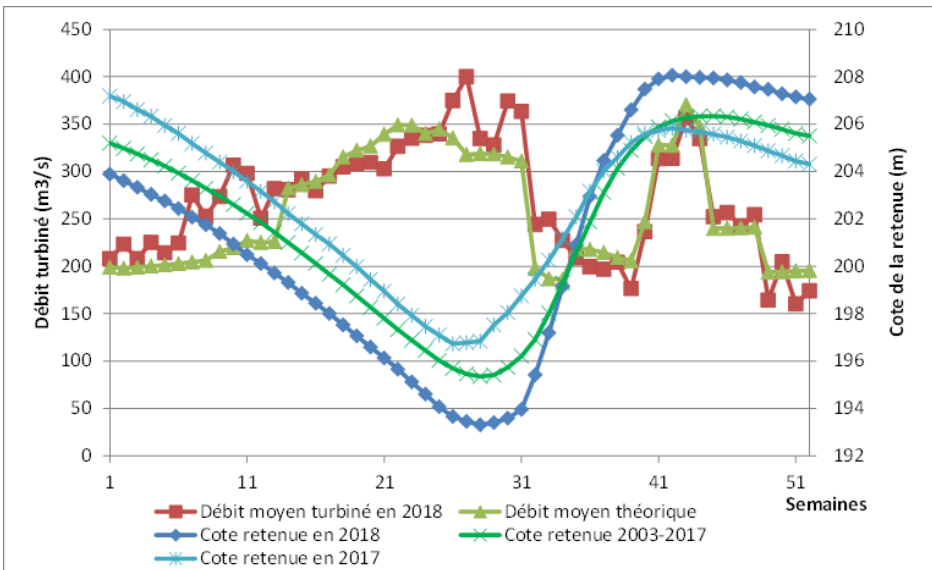
Pour les centrales Hydro-Solaire STEP, la production hybride se fera en fonction des objectifs de production d'énergie et des spécificités des projets. La STEP doit pouvoir fonctionner à minima sur une journée pour que la production puisse être garantie à J+1 (ce qui permet de participer à un marché Day-Ahead), l'objectif étant de pouvoir assurer une continuité de la production. Il est cependant possible de travailler à l'échelle hebdomadaire, trimestrielle, etc...

L'intérêt de cette solution est de pouvoir stocker l'énergie solaire excédentaire (qui dépasse l'objectif de production à l'instant t) pour pouvoir la restituer lorsque la production solaire fait défaut, particulièrement en fin de journée et durant la nuit, où se trouvent les pics de consommation électrique dans plusieurs pays africains.



**Fig. 2.** Courbe de Charge type du Niger en saison Sèche, données issues du HCAVN.

Dans le cas des barrages (et de leur centrale hydroélectrique associée), la production solaire aura pour rôle de suppléer la production hydroélectrique. L'intérêt réside principalement dans l'amélioration de la gestion et de la disponibilité de la ressource en eau.



**Fig. 3.** Exemple d'évolution de données hydrauliques pour le barrage de Manantali.

Dans cet exemple, l'apport d'une centrale photovoltaïque est particulièrement pertinent, puisque la production solaire aura tendance à être plus forte au moment où la cote de la retenue est faible.

## 1.4 Fonctionnements possibles de centrales hybridées

### 1.4.1 Fonctionnement « faiblement hybridé »

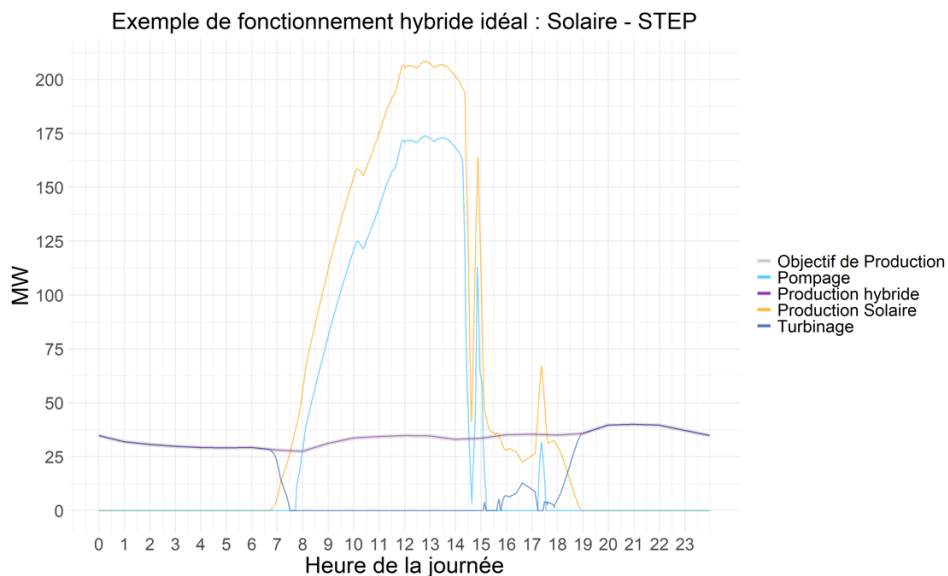
Pour un fonctionnement faiblement hybridé, les centrales solaires et hydroélectriques fonctionnent en majorité séparément. L'objectif de l'hybridation est alors uniquement de lisser les fortes et/ou rapides variations solaires pour éviter que des fluctuations importantes puissent perturber le réseau électrique.

Un tel fonctionnement a l'avantage d'être économiquement intéressant, car il permet l'injection de la quasi-totalité de l'énergie solaire tout en s'affranchissant en grande partie des pertes qui peuvent par exemple apparaître lorsque l'énergie est stockée par une STEP.

La problématique réside cependant dans le fait que l'énergie solaire est alors majoritairement injectée dans la journée, ce qui n'est pas spécialement adapté à la consommation des pays africains (voir Figure 2).

### 1.4.2 Fonctionnement « fortement hybridé »

Pour un fonctionnement fortement hybridé, l'objectif est de pouvoir garantir une énergie associée à une courbe de charge, à minima pour J+1. La centrale solaire est considérée comme une source qui servira soit d'appui dans le cas d'une hybridation avec barrage, soit de l'apport principal dans le cas d'une hybridation avec STEP.



**Fig. 4.** Fonctionnement idéal d'une hybridation Solaire – STEP. Le pompage et le Turbinage compensent parfaitement la production solaire pour suivre l'objectif de production.

Ce fonctionnement induit cependant des pertes importantes. Dans le cas d'une hybridation avec barrage, les contraintes de disponibilité en eau et la limitation de la variation du débit turbiné, pour éviter la création de vagues trop importantes en aval, peuvent provoquer une perte d'une partie de la production solaire, le barrage ne pouvant pas toujours compenser ces variations.

Dans le cas d'une hybridation avec STEP, une part importante de l'énergie solaire passe par le cycle de la centrale hydroélectrique (pompage, puis turbinage) dont le rendement global se trouve généralement entre 65 et 70 %.

Une centrale fortement hybridée sera donc plus difficile à rentabiliser. Elle présente cependant l'intérêt de pouvoir garantir une énergie injectée et d'assurer une production lorsque la demande est haute.

Pour étudier ces différents fonctionnements, ISL a mis au point un outil de simulation Hydro-Solaire. Cet outil permet aujourd'hui de simuler le fonctionnement d'une centrale hybride Solaire – STEP pour en étudier la production à plusieurs échelles de temps :

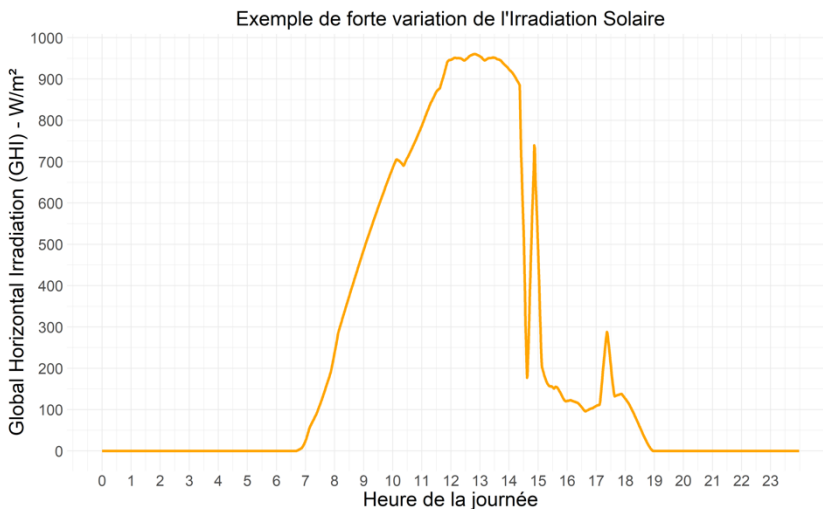
- Un pas de temps court, de l'ordre de la minute ;
- Un pas de temps journalier ;
- Un pas de temps annuel.

## 2 Échelles de temps utilisées pour l'étude de l'hybridation Hydro-Solaire

### 2.1 Pas de temps de la minute

L'intérêt de l'étude d'un pas de temps court est de pouvoir considérer les variations rapides de l'énergie photovoltaïque, dues par exemple au passage d'un nuage. Le pas de temps de la minute a quant à lui été choisi dans un souci de disponibilité des données d'irradiation solaire (rarement disponibles à une échelle de temps plus courte), ainsi que pour pouvoir vérifier la réponse de la partie hydroélectrique de la centrale, dont nous pourrions approximer le temps de montée en puissance (du démarrage jusqu'à la puissance nominale) à une dizaine de minutes.

Comme mentionné précédemment, les variations de la production d'électricité de source solaire peuvent être très fortes : dans la figure suivante, la variation maximale observée est de 463 W/m<sup>2</sup> en dix minutes, soit près de 50 % de l'irradiation maximale observée ce jour.



**Fig. 5.** Variation maximale de l'irradiation solaire sur dix minutes durant l'année 2015, Sambangalou, Sénégal – Données SODA.

Le dimensionnement et le fonctionnement de la centrale hybridée doivent pouvoir répondre à ces variations, pour que l'électricité fournie réponde aux exigences de qualité imposées par le gestionnaire de réseau.

Outre le bon dimensionnement de l'hybridation Hydro-Solaire, plusieurs mécanismes peuvent être utilisés pour réguler rapidement l'énergie fournie :

- Un bridage dynamique de la production solaire, réalisé au niveau des onduleurs de la centrale, peut permettre de réduire la variation de l'énergie solaire injectée. Ce mécanisme est particulièrement utile en cas de forte et rapide augmentation de l'irradiation solaire (éclaircie après le passage d'un nuage par exemple) ;
- Une prévision court-terme météorologique (de dix à quinze minutes) donne une indication utile quant aux variations de la production solaire à venir. Une telle prévision peut ainsi servir à démarrer plus tôt les groupes turbines - génératrices (ou les groupes moteurs - pompes, selon la situation et la centrale hydroélectrique étudiée) pour répondre avec plus d'efficacité aux variations mentionnées précédemment ;
- Un jeu de batteries et/ou condensateurs peuvent être utilisés pour lisser les variations trop rapides qui pourraient subsister. Si des batteries sont utilisées, elles pourraient aussi éventuellement aider au démarrage des groupes moteurs - pompes.

## **2.2 Pas de temps journalier**

L'étude de l'énergie hybride fournie à l'échelle journalière permet de simuler un fonctionnement associé au marché Spot (J+1) de l'énergie électrique. Pour pouvoir garantir une fourniture d'énergie à J+1, plusieurs prévisions sont requises :

- Une prévision météorologique la plus précise possible de la journée à venir (voir des journées suivantes) pour estimer la production solaire à venir ;
- Dans le cas d'une hybridation Solaire - STEP, une prévision de la réserve d'énergie hydraulique disponible pour la journée J+1, estimée à partir de l'état actuel de la réserve et de la prévision de production solaire pour la journée en cours (il est en effet nécessaire de prendre en compte la production de l'après-midi dans les prévisions, pour se conformer aux horaires du marché spot) ;
- Dans le cas d'une hybridation Solaire - centrale hydroélectrique d'un barrage, une estimation des différentes données hydrauliques (débit entrant, altitude du plan d'eau, etc.) à partir des données hydrauliques des années précédentes et de l'état actuel.

Ces prévisions permettent une estimation de l'énergie hybride productible à J+1, associée à une courbe de charge (objectif de production hybride à chaque instant).

## **2.3 Pas de temps annuel**

L'étude au pas de temps annuel du fonctionnement Hydro-Solaire permet de prendre en compte les variations saisonnières des productions solaires et hydroélectriques, ainsi que d'étudier les variations du niveau de la réserve hydraulique sur le long terme, dans le cas d'une hybridation Solaire - STEP.

Ces observations permettent par ailleurs de définir un niveau d'énergie garantie (énergie journalière que la centrale hybride est capable de produire à minima 95 % du temps par exemple) qui peut, selon les objectifs de production, être fixe ou variable au cours de l'année. Associé au pas de temps journalier, cela permet de pouvoir s'inscrire à la fois sur le marché long terme de l'électricité (avec le niveau d'énergie garantie) et sur un marché plus court terme, avec l'énergie excédentaire par rapport à l'énergie garantie.

### **3 Exemples d'application**

#### **3.1 Barrage de Manantali**

Au sein d'un groupement d'entreprise, ISL a participé à l'élaboration d'une étude d'opportunité (financée par la Banque Mondiale) de projets d'hybridation Hydro-Solaires en Afrique de l'Ouest.

Cette étude a notamment permis d'identifier l'aménagement de Manantali comment étant potentiellement propice à la mise en place d'une hybridation Hydro-Solaire.

Les études sont encore en cours (stade de faisabilité) pour une hybridation de compensation avec 70 Mwc de solaire, pour 210 MW hydroélectriques installés.

#### **3.2 Projet pilote d'Energias de Portugal (EDP)**

En 2016, EDP a débuté un projet pilote d'hybridation Hydro-Solaire en associant une centrale photovoltaïque flottante au projet de STEP d'Alto Rabagão.

Une capacité de 220 kW a été installée et le projet s'est révélé concluant, notamment grâce à une production photovoltaïque supérieure aux estimations [3].

Plusieurs autres projets et études sont en cours dans le monde, certains associant également la production éolienne pour utiliser un mix hydro-solaire-vent [4].

### **4 Bilan**

De nombreuses possibilités existent pour associer une production solaire et une production hydroélectrique. Les exemples qui ont pu être décrits dans cet article ne constituent pas une liste exhaustive et chaque projet aura un fonctionnement propre, selon les objectifs de production fixés (objectif de production maximale, objectif de production facilement intégrable sur le réseau électrique, ...) et les caractéristiques (géographie, potentiel hydraulique, potentiel solaire, etc...) dudit projet.

L'hybridation est aujourd'hui une solution pertinente, notamment en Afrique, pour continuer de développer la production électrique à l'aide d'énergies renouvelables, tout en facilitant leur intégration dans le mix énergétique.

### **Références**

1. L. Bouzat, J. Dubois, L. Charlier, Synthèse du plan directeur de la CEDEAO pour le développement des moyens régionaux de production d'énergie électrique 2019-2033, [https://www.ecowapp.org/sites/default/files/tome\\_0.pdf](https://www.ecowapp.org/sites/default/files/tome_0.pdf) (2019)



2. « Améliorer l'accès à l'électricité en Afrique grâce à l'innovation et une meilleure réglementation », <https://www.banquemondiale.org/fr/region/afr/publication/boosting-access-to-electricity-in-africa-through-innovation-better-regulation> (2018)
3. iha, « Case study: a hybrid hydropower and floating PV system in Portugal », [https://www.hydropower.org/sites/default/files/publications-docs/case\\_study\\_-\\_a\\_hybrid\\_hydropower\\_and\\_floating\\_pv\\_system\\_in\\_portugal.pdf](https://www.hydropower.org/sites/default/files/publications-docs/case_study_-_a_hybrid_hydropower_and_floating_pv_system_in_portugal.pdf)
4. S. Sterl, I. Vanderkelen, C. J. Chawanda, D. Russo, R. J. Brecha, A. van Griensven, N. P. M. van Lipzig, W. Thiery, « Smart renewable electricity portfolios in West Africa », [https://www.nature.com/articles/s41893-020-0539-0.epdf?sharing\\_token=yvNmxePfNKsOsc\\_9Lg6vktRgN0jAjWeI9jnR3ZoTv0N9v42WCK5ewmpsb2LFHeaid2AUwVVfnTcUPkVY8CsLa2ITzDfU\\_fENjJR\\_iRqTscncSIE06LK70KM5xDZ1N02JDLvifq\\_mAik\\_NPwigJQAnP0XfaXz-bVGkDKtd1SWCnU%3D](https://www.nature.com/articles/s41893-020-0539-0.epdf?sharing_token=yvNmxePfNKsOsc_9Lg6vktRgN0jAjWeI9jnR3ZoTv0N9v42WCK5ewmpsb2LFHeaid2AUwVVfnTcUPkVY8CsLa2ITzDfU_fENjJR_iRqTscncSIE06LK70KM5xDZ1N02JDLvifq_mAik_NPwigJQAnP0XfaXz-bVGkDKtd1SWCnU%3D) (2020)