



**UNIVERSITE DE CORSE-PASCAL PAOLI**  
**ECOLE DOCTORALE ENVIRONNEMENT ET SOCIETE**  
**UMR CNRS 6134 (SPE)**



**Thèse présentée pour l'obtention du grade de  
DOCTEUR EN MECANIQUE DES FLUIDES, ENERGETIQUE,  
THERMIQUE, COMBUSTION, ACOUSTIQUE  
Mention : Energétique, Génie des procédés**

**Soutenu publiquement par**

**BENJAMIN PILLOT**

Le 4 septembre 2014

---

**Planification de l'électrification rurale décentralisée en Afrique  
subsaharienne à l'aide de sources renouvelables d'énergie : le cas  
de l'énergie photovoltaïque en République de Djibouti**

---

**Directeurs :**

M. Marc Muselli, Professeur, Université de Corse  
M. Philippe Poggi, Professeur, Université de Corse

**Rapporteurs :**

Mme Irina Martin-Dimina, Professeure, Université Aix-Marseille  
M. Philippe Lauret, Professeur, Université de La Réunion

**Jury**

M. Marc Muselli, Professeur, Université de Corse  
M. Philippe Poggi, Professeur, Université de Corse  
Mme Irina Martin-Dimina, Professeure, Université Aix-Marseille  
M. Philippe Lauret, Professeur, Université de La Réunion  
M. Dominique Lambert, Dr-HDR, Université de Toulouse

# Résumé

La remise en question du mode de développement des sociétés humaines a, sur ces 40 dernières années, profondément transformé le contexte énergétique mondial, instaurant alors un nouveau cadre politique permettant l'essor spectaculaire des énergies renouvelables. Par ailleurs, si l'électricité apparaît comme un vecteur fondamental du développement humain, le contexte des populations majoritairement rurales d'Afrique subsaharienne incite à la recherche d'alternatives énergétiques adaptées. En substance, si les ressources renouvelables peuvent répondre de manière pertinente au défi de l'électrification décentralisée des zones rurales de la région, elles doivent également représenter une solution technique et économique crédible, avant d'être politique.

La République de Djibouti, petit pays situé dans la corne de l'Afrique, symbolise parfaitement le défi *socio*-énergétique de l'ensemble de la région, et des populations rurales en particulier. Avec un pays pauvre en ressources traditionnelles mais présentant *a priori* un gisement solaire intéressant, nous avons alors privilégié l'étude des systèmes photovoltaïques (PV) dans le cadre de l'électrification décentralisée des populations rurales du pays. Comme d'autres ressources, ces systèmes, bien que reposant sur une technologie relativement ancienne, ont réellement pris leur essor au début des années 2000 avec les mesures incitatives du Protocole de Kyoto.

Évaluer la pertinence de la technologie photovoltaïque nécessitait, dans un premier temps, d'estimer le niveau et la répartition de la ressource solaire au sein du pays. Pour cela, nous avons construit un atlas de l'irradiation solaire horaire incidente sur le territoire, pour la période 2008-2011, à partir d'un modèle satellitaire de rayonnement. Afin de valider les estimations issues de cet atlas, nous les avons comparées aux mesures *in situ* relevées par deux stations météorologiques temporaires déployées, entre 2010 et 2013, sur quatre sites présentant des caractéristiques distinctes. Finalement, la carte annuelle extraite de l'atlas a confirmé que le gisement solaire du pays, avec une irradiation moyenne de 5,87kWh/m<sup>2</sup> par jour, constituait l'un des plus importants au monde.

Si les modèles utilisant des données satellitaires permettent de retrouver le flux solaire incident au sol, ils ne tiennent en revanche pas compte des effets du relief local sur ce dernier. Ainsi, afin de tenir compte des effets d'ombrage engendré par le terrain, nous avons développé une procédure dite de *désagrégation*, couplant l'utilisation d'un maillage numérique d'altitude aux cartes de rayonnement issues du modèle satellite. Pour ce faire, nous avons élaboré un modèle théorique pour retrouver l'horizon autour d'un point donné, et validé celui-ci à l'aide d'une campagne de mesures topographiques en Corse. En corrigeant ensuite le rayonnement à l'aide de cet horizon pour chaque pixel du maillage d'altitude, nous avons pu enrichir le niveau de l'information fournie par la cartographie de l'irradiation globale.

Bien que le gisement solaire soit l'indicateur principal du potentiel photovoltaïque, il est également nécessaire de considérer des paramètres secondaires, éléments de technologie et caractéristiques environnementales, qui permettent d'évaluer avec précision l'énergie électrique produite par un système PV quelconque. En combinant l'utilisation de différents modèles, nous avons ainsi pu intégrer à l'estimation finale du productible l'influence du rayonnement et de la température sur le rendement de conversion d'un module photovoltaïque. Nous avons ainsi construit une cartographie du productible PV qui, couplée à une évaluation multicritère de la pertinence de la technologie PV vis-à-vis des alternatives énergétiques classiques en matière d'électrification rurale, est destinée à faciliter la prise de décision pour les différents acteurs, publics ou privés, du domaine de l'énergie.

# Resume

Over the 40 past years, growth of renewable energies benefited of the new world energy frame, which resulted of the questioning about what development of human societies had to be. Furthermore, although human development comes with electricity, the rural condition of many populations of sub-Saharan Africa incites us to look for suitable power supply alternatives. Eventually, in this specific context, renewable energies can represent a reliable solution to the off-grid electrification of rural peoples. However, this solution has to be economical and technical, and not only political.

The Republic of Djibouti is a little developing country located in the Horn of Africa which perfectly symbolizes the social and energy challenges of rural populations in Sub-Saharan Africa. Instability and limitation of the existing electrical grid, fuel cost and lack of fossil resources point to the geographically diffused solar resource as probably the best way to improve human development and reduce poverty of Djiboutian rural peoples. Therefore, we have considered the study of photovoltaic (PV) systems within the rural off-grid electrification frame.

Firstly, in order to evaluate relevance of these systems, it was necessary to estimate level and repartition of the solar resource across the country. So we developed a solar atlas, i.e. cartography of the hourly solar irradiation reaching the ground, based on satellite-derived irradiance estimates retrieved between 2008 and 2011. For assessing the atlas quality, we compared irradiation estimates with ground measures retrieved on 4 different sites by 2 temporary weather stations deployed between 2010 and 2013. Finally, yearly map extracted from the atlas showed that, with a daily mean irradiation of 5,87kWh/m<sup>2</sup>.day, the solar potential of Djibouti is one of the most significant in the world.

Satellite models are useful for determining solar irradiance at ground level but they don't take into account local topography effects. In order to incorporate these shading effects to the satellite-derived irradiance maps, and so improve irradiance accuracy and spatial resolution, we used a Digital Elevation Model (DEM). Firstly, this *disaggregation* process was based on the development of a new fast horizon algorithm which was assessed by means of topographic measures in Corsica Island. Then, by correcting irradiance with this horizon for each pixel of the DEM, we improved geographic information of the solar irradiation atlas.

Although solar resource is the first indicator of the photovoltaic potential, other elements, as environmental parameters or endogenous characteristics of photovoltaic modules, also have to be taken into consideration for precisely estimating energy produced by a PV system. Hence, by means of different models, we evaluated influence of irradiance and temperature onto the conversion efficiency of a PV generator to finally retrieve the atlas of the PV potential across the country. In conclusion, by combining this cartography to a multi-criteria approach comparing relevance between PV systems and classical power supply systems within the rural electrification scheme, we developed the first photovoltaic decision making tool of the country intended for all officials who are acting in the energy field.