



Proposition de Thèse

Pour l'Année Universitaire 2022/23

Titre: Fluctuations Intra-Journalières des Variables Climatiques Futures au Maroc: Modélisation et Quantification des Sources d'Incertitude

Date de Publication: Mercredi 01 Juin 2022

Date Limite de Soumission: Jeudi 28 Juillet 2022

Référence: Bouramdane_MOD_2022

1. Intérêt Scientifique et Objectifs :

i) Un état des lieux peu engageant :

Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC; en anglais: Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) n'a eu de cesse de préciser au fil de ses rapports que la hausse des émissions de gaz à effet de serre depuis 1750 est sans équivoque et causée par les activités humaines. Selon un nouveau bilan de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), bien que la pandémie de COVID-19 avait fait baisser les émissions planétaires, celles-ci ont rebondi bien au-delà de leur niveau de 2019. En cause : un redémarrage de l'économie avec un recours massif au charbon [1].

Il est donc sans équivoque que l'influence humaine a réchauffé l'atmosphère, l'océan et la terre. Dans le premier volet [2] du rapport du GIEC sur le réchauffement climatique, publié en août 2021, le GIEC dévoile que la terre s'est déjà réchauffée d'environ +1,1°C en moyenne lors la décennie 2011-2020 par rapport à l'ère pré-industrielle (milieu du 19ème siècle). Le budget carbone pour limiter le réchauffement climatique à +1,5°C (resp. +2°C) pourrait être consommé avant 2030 (resp. 2040).

Le deuxième volet [3], paru fin février 2022, explique que le monde affrontera de multiples aléas climatiques inévitables au cours des deux prochaines décennies avec un réchauffement climatique de 1,5°C. Dès lors que le réchauffement dépassera ce seuil, même de façon temporaire, le monde connaîtra des impacts supplémentaires graves, dont certains seront irréversibles, notamment sur les écosystèmes, la biodiversité, il pourrait accroître les inégalités engendrant des conflits sociaux et territoriaux (ex. pression sur les ressources en eau, problèmes d'approvisionnement en nourriture), etc.

ii) Cinq nouveaux scénarios

L'une des principales nouveautés contenues dans ce nouveau rapport [2] est l'utilisation de nouvelles typologies de scénarios dit « SSP » pour « Shared Socioeconomic Pathways » (en français : trajectoires socio-économiques communes). Le rapport ébauche cinq scénarios, du plus optimiste au plus dramatique, dessinant en termes humains, politiques, économiques les évolutions futures liées au climat (Figure 1). Dans tous les cas, les températures continueront d'augmenter au moins jusqu'aux années 2050. Le scénario le plus optimiste permettrait de contenir le réchauffement à 1,6°C d'ici le milieu du siècle, avant d'amorcer – sans certitude – une légère décrue au tournant des années 2100. En tout état de cause, le réchauffement de 1,5 et 2°C – objectifs visés dans l'accord de Paris qui lie toutes les nations du globe depuis 2015 – sera dépassé au 21ème siècle à moins qu'une réduction profonde des gaz à effet de serre n'intervienne lors des prochaines décennies.

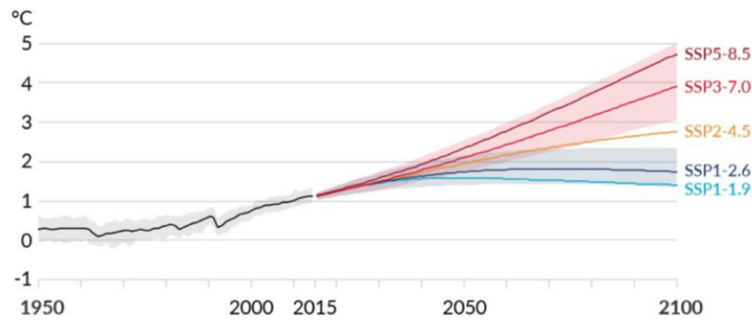


Figure 1: Scénarios d'évolution de la température de surface mondiale comparée à la période 1950 – 2015. Source : le 1er volet du sixième rapport d'évaluation (AR6) du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC; en anglais : Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) sur le réchauffement climatique [2]. Ils envisagent cinq récits – du plus au moins optimistes – de la réponse humaine face à la crise climatique : Les deux premiers scénarios (SSP1-1.9 et SSP1-2.6) se basent sur le récit SSP1 « Durabilité – La voie verte ». Le scénario médian (SSP2-2.5) se base sur le récit SSP2 « Au milieu du gué ». Le quatrième scénario (SSP3-7.0) se base sur SSP3 « Rivalités régionales – Un chemin escarpé ». Le GIEC n'a pas envisagé le scénario SSP4 « Inégalités – une route divisée » dans son rapport. Le scénario le plus pessimiste du GIEC (SSP5-8.5) se base sur le récit SSP5 « Développement alimenté par des combustibles fossiles – L'autouroute ».

iii) Un panel de solutions :

Le troisième et dernier volet [4] du sixième rapport d'évaluation des experts climat paru en avril 2022, indique la nécessité de modifier considérablement le système énergétique au cours des 30 prochaines années. Pour y parvenir, il présente par grands secteurs (énergie, transport, industrie, agriculture...) les mesures (politiques, technologiques, financières, comportementales) les plus prometteuses pour diminuer les émissions mondiales de gaz à effet de serre. Il touche au trois leviers utilisés dans le domaine de l'énergie : la sobriété énergétique, l'efficacité énergétique et la décarbonation de la production. Il aborde également les questions d'acceptabilité sociale et la place des technologies comme le captage et le stockage du carbone.

Pour la décarbonation, l'énergie solaire et l'énergie éolienne représentent le potentiel de contribution à la réduction de gaz à effet de serre le plus élevé (Figure 2). Un avantage considérable puisque les coûts de déploiement du solaire et de l'éolien ont vu leur coût dégringoler au cours de la décennie 2010 - 2019 (-85% pour le solaire photovoltaïque ou les batteries de véhicules électriques, -55% pour l'éolien terrestre, par exemple, Figure 3 en haut). Dans certaines régions du monde, ces technologies sont désormais en mesure de concurrencer les solutions fossiles et affichent d'ailleurs des taux de croissance exponentiels (Figure 3 en bas). D'autres options ont un potentiel moins élevé, avec un coût plus important. Il s'agit du nucléaire, de l'hydroélectricité ou de la chasse aux émissions de méthane dans la production d'énergies fossiles (Figure 2)

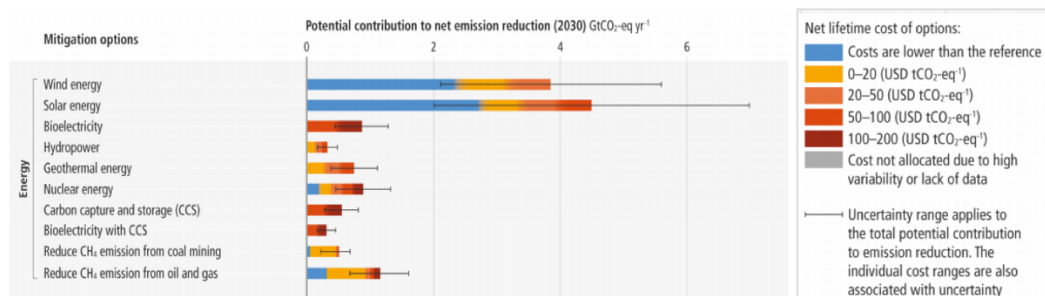


Figure 2: Les options de mitigation du changement climatiques et leurs contributions potentielle aux réductions nettes des émissions. Source : le 3^{ème} volet du sixième rapport d'évaluation (AR6) du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC ; en anglais : Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) sur le réchauffement climatique (Figure TS.23 de la Ref [4]). Le solaire et l'éolien (terrestre ou marin) représentent les principales contributions potentielles à la réduction des émissions nettes.

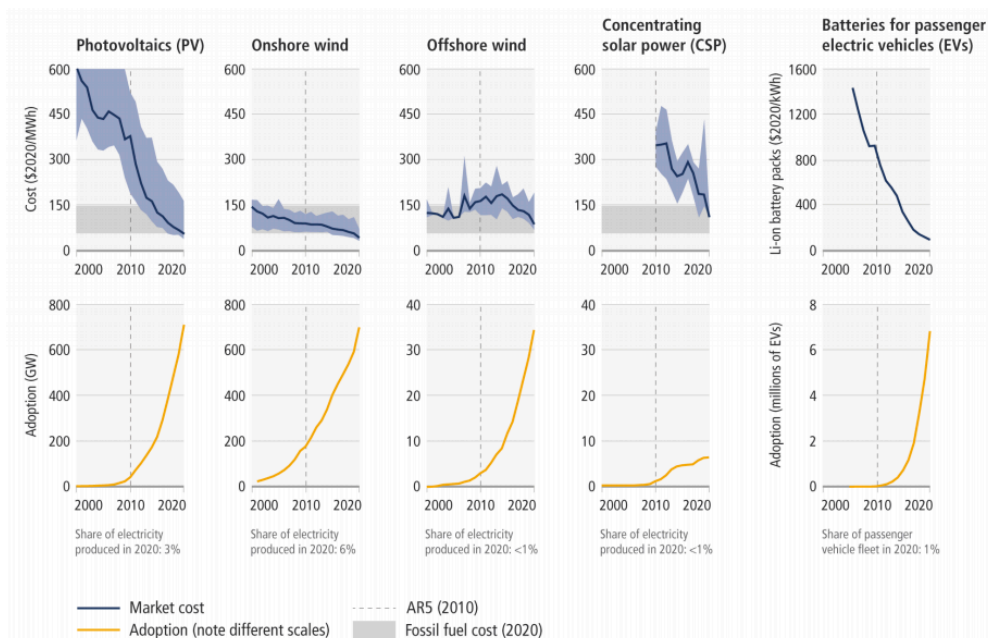


Figure 3: En haut, les coûts sont en chute de plusieurs technologies bas-carbone ; **en bas**, leur taux de déploiement est souvent exponentiel. Source : le 3^{ème} volet du sixième rapport d'évaluation (AR6) du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC; en anglais: Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) sur le réchauffement climatique (Figure TS.7 de la Ref [4]).

iv) La problématique de recherche :

Pour atteindre la neutralité carbone, le recours aux énergies renouvelables apparaît comme immanquable. Une décision d'autant plus primordiale avec la guerre russo-ukrainienne qui entraîne des augmentations de prix d'énergie tout à fait affolantes. Même avec un minimum de réacteurs nucléaires, il faudra 50% de renouvelables : Un constat établi par les scénarios du Réseau de Transport de l'Électricité (RTE) pour le cas de la France [5].

Cependant, afin d'effectuer des analyses de mix électriques basés sur les énergies renouvelables dans des conditions climatiques futures caractérisées par un dérèglement climatique, les évolutions historiques et futures de la production éolienne et solaire et de la consommation d'électricité sur une zone d'étude donnée avec une résolution temporelle élevée sont requises. Cependant, les données historiques réelles de production renouvelable et de consommation ne sont pas disponibles dans des bases de données en ligne, particulièrement pour les pays d'Afrique.

Les données climatiques provenant des stations météorologiques ou des ré-analyses climatiques permettent d'effectuer des simulations historiques de ces séries temporelles avec un pas de temps horaire. En revanche, s'appuyer sur des observations énergétiques ou sur des données météorologiques/climatiques ne permet pas d'analyser les évolutions futures du climat et leur impact sur les mix renouvelables.

Les données CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling EXperiment) fournissent des projections climatiques pour le 21^{ème} siècle, et pourraient être utilisées pour étudier des scénarios de changement climatique et leurs impacts sur les bouquets énergétiques. Cependant, les données climatiques CORDEX sont disponibles avec un pas de temps journalier, ce qui n'est pas suffisant pour prendre en compte l'effet des fluctuations climatiques de hautes fréquences qui ont un impact significatif sur la production photovoltaïque (PV), thermodynamique (Concentrated Solar Power -CSP-) et éolienne et sur la consommation d'électricité. En effet, ignorer les fluctuations intra-journalières futures de la vitesse du vent, du rayonnement solaire dont la variation dépend principalement des composantes atmosphériques (ex. nuages, aérosols) et de la température conduit à installer beaucoup ou peu de capacités solaires et éoliennes, ce qui augmente le risque d'adéquation production-demande dans le mix électrique marocain (Chapitre 5 de la Réf [6]). Ces fluctuations intra-journalières sont importantes non seulement pour la production solaire photovoltaïque ou PV [7] mais aussi pour le solaire thermodynamique CSP « Concentrated Solar Power » [8], les batteries Li-ion [9] et le stockage thermique (Chapitre 5 de la Réf [6]).

v) Revue de la littérature :

La problématique de l'impact du changement climatique sur les systèmes énergétiques est préoccupante pour diverses parties du globe (Section 2, Chapitre 5, Réf [6]). Une série d'études quantifient et simulent le risque de la ressource solaire [10, 12] et éolienne [11].

Cependant, on assiste à un manque d'attention à la modélisation des fluctuations intra-journalières des variables climatiques futures.

vi) Questions de Recherche :

Comment modéliser les fluctuations intra-journalières des variables climatiques futures (température, irradiation globale horizontale, vitesse du vent, etc.), en Afrique et particulièrement au Maroc, en tenant en compte les aspects paramétriques et stochastiques, et quelles sont les sources d'incertitude, sont les principales questions auxquelles ce sujet de thèse vise à répondre.

2. Plan de Travail

i) Revue de la Littérature, Récolte et Analyse des Données :

Le travail comprend une phase préliminaire de familiarisation avec la littérature existante sur les processus physiques du climat et les méthodes d'élaboration des scénarios climatiques.

Ensuite, l'étudiant·e sera amené·e à extraire les données climatiques historiques et futures des principales variables (vitesse du vent, irradiation globale horizontale et température ambiante, etc.) retenues pour élaborer cette étude, en Afrique et au Maroc ; et à analyser leur variabilité temporelle et spatiale. Un premier développement nécessaire sera de réduire l'échelle spatiale des données climatiques pour que les méthodes peuvent être applicable à l'échelle de toute l'Afrique et à l'échelle du Maroc.

ii) Recherche et Réflexion Théorique :

Une seconde étape visera à réaliser une recherche bibliographique et une réflexion théorique assez large qui abordera la problématique générale et les différentes approches physiques et/ou statistiques permettant de modéliser les fluctuations intra-journalières de la vitesse du vent, de l'irradiation globale horizontale et de la température afin de comprendre quelle méthode est applicable, interprétée par des grilles de lectures normatives.

iii) Implémentation et Évaluation des Sources d'Incertainitude :

Il s'agit de développer plusieurs modèles qui reproduisent le comportement intra-journalier des variables climatiques futures en tenant en compte leurs sensibilités à un ou plusieurs processus intrinsèques. En effet, la mobilisation d'approches alternatives pourrait permettre d'identifier la méthode la plus performante, non seulement en termes de fiabilité, mais aussi en termes d'agilité, c'est à dire de représenter un vaste ensemble d'aspects.

À l'issue de ce travail et sur la base d'analyse des résultats, l'étudiant·e pourrait quantifier les sources d'incertitude et explorer les utilisations potentielles de ses résultats dans divers cas de recherches connexes.

L'étudiant·e développera les points ci-dessus, de façon plus ou moins approfondies, selon ses affinités et en accord avec les directeurs du travail.

3. Profil Souhaité

Le sujet s'adresse plus directement aux étudiant·es ayant une formation type école d'ingénieur ou Master 2 (Bac +5) et disposant des connaissances sur la physique du climat. Un intérêt pour le traitement de gros volumes de données numériques climatologiques et les analyses statistiques et probabilistes est souhaité.

Nous cherchons un·e étudiant·e passionné·e, capable de travailler en collaboration au sein d'une équipe ainsi que de manière autonome.

Une aisance en programmation sous Python, ou une motivation pour apprendre, ainsi que des capacités rédactionnelles et présentation orale sont indispensables pour mener à bien ce travail.

4. Financement, Lieu de Travail, et Encadrement

Ce projet de thèse s'intègre dans l'axe 4 « Weather-Climate Features » de la plateforme Research - Teaching - Politics Platform (RTP) for Economic-Reliable-Environmental Energy Systems (EREES) « RTP4EREES » sur la modélisation et l'optimisation des systèmes énergétiques actuels et futures.

La thèse est soutenue financièrement par le Green Energy Park (GEP, <https://www.greenenergypark.ma/>) qui emploiera le ou la doctorant.e en CDD pendant toute la durée de la thèse.

La thèse est dédiée aux étudiants qui songent à entreprendre une cotutelle à l'Université Mohammed VI

Polytechnique (UM6P, <https://um6p.ma/>) et à l'École Mines Paris (<https://www.minesparis.psl.eu/>) dans le but d'appuyer la coopération scientifique entre les équipes de recherche marocaines et françaises.

La formule de la cotutelle de thèse suppose donc que:

- La thèse se déroulera essentiellement dans les locaux du GEP/UM6P mais le ou la doctorant·e sera aussi amené·e à travailler sur le site de l'école des Mines Paris.
- La thèse sera encadrée par Ayat-allah Bouramdane (Dr) en tant que maître de thèse. Elle est chercheure postdoctorale en modélisation - cheffe de groupe au GEP et responsable de la création et développement de la plateforme RTP4EREES. La thèse sera co-dirigée par Philippe Blanc (HDR, Dr), directeur de recherche Mines Paris – PSL et responsable du département Énergétique et Procédés au Centre Observation, Impacts, Energy (O.I.E.). Le ou la doctorant.e travaillera également en collaboration directe avec Abdellatif Ghennioui, chef de département de modélisation et chef d'équipe support et valorisation au GEP.
- La durée de la thèse est de 3 ans.
- L'étudiant·e est tenu de remplir les exigences pédagogiques et de respecter le règlement des études des deux établissements.

5. Comment Postuler ?

Les étudiant·es qui sont intéressé·es par ce sujet sont invité·es à envoyer directement les documents suivants aux responsables du projet (bouramdane@greenenergypark.ma; philippe.blanc@minesparis.psl.eu; ghennioui@greenenergypark.ma), en précisant le titre et la référence du sujet.

- Une lettre de motivation (d'au plus deux pages) contenant le cursus académique de l'étudiant·e et un plan de recherche préliminaire comprenant les principales questions de recherche,
- Une lettre de recommandation d'un professeur,
- Des copies de diplômes universitaires et certificat d'inscription au doctorat.

6. Références :

[1] IEA (2022), Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>

[2] Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report.

[3] Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report.

[4] Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report.

[5] Réseau de Transport d'Électricité (RTE). 2021. Futurs Énergétiques 2050.

[6] Ayat-Allah Bouramdane. Scenarios of Large-Scale Solar Integration with Wind in Morocco: Impact of Storage, Cost, Spatio-Temporal Complementarity and Climate Change. Physics [physics]. Institut Polytechnique de Paris, 2021. English. ffNNT : 2021IPPAX083ff. fftel-03518906.

[7] Denholm, P.L., O'Connell, M., Brinkman, G.L., & Jorgenson, J. (2015). Overgeneration from Solar Energy in California - A Field Guide to the Duck Chart.

[8] Larrañeta, M., Moreno-Tejera, S., Lillo-Bravo, I., & Silva-Pérez, M. (2019). Impact of the Intra-day Variability of the DNI on the Energy Yield of CSP Plants. SOLARPACES 2018: International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems.

[9] Leng, F., Tan, C.M., & Pecht, M.G. (2015). Effect of Temperature on the Aging Rate of Li Ion Battery Operating above Room Temperature. Scientific Reports, 5.

[10] Kleissl, J. (2013). Solar Energy Forecasting and Resource Assessment.

[11] Brower, M.C. (2012). Wind Resource Assessment: A Practical Guide to Developing a Wind Project.

[12] Sengupta, M., Habte, A., Kurtz, D.P., Dobos, A.P., Wilbert, S., Lorenz, E., Stoffel, T.L., Myers, D.R., Wilcox, S., Blanc, P., & Perez, R. (2015). Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications.