

# Transition Énergétique: Problématiques de Recherche

Ayat-Allah Bouramdane, Ph.D.

1 April 2022

## 1 Un État des Lieux Peu Engageant

Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution 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  $+1,1^{\circ}\text{C}$  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  $+1,5^{\circ}\text{C}$  (resp.  $+2^{\circ}\text{C}$ ) 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  $1,5^{\circ}\text{C}$ . 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.

## 2 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  $1,6^{\circ}\text{C}$  d'ici le milieu du siècle, avant d'amorcer – sans certitude – une légère décline au tournant des années 2100. En tout état de cause, le réchauffement de  $1,5$  et  $2^{\circ}\text{C}$  – 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.

## 3 Problématique de la Recherche

Cette crise énergétique, sociale et économique doit servir de déclic pour nous sevrer des combustibles fossiles et accélérer la transition énergétique, car les réserves vont de toute façon se tarir. Et plus on attend, plus il devient difficile de planifier et ainsi choisir notre transition. Il convient de se mobiliser et d'agir. Pour cela, il faut comprendre déjà les problématiques liées à la transition énergétique.

### 3.1 RTP4EREES

Il s'agit de proposer des solutions multidimensionnelles pour avancer vers une transition énergétique résiliente au climat.

En effet, il s'agit de proposer une approche axée sur (i) la recherche, (ii) la formation et (iii) les recommandations pour la stratégie énergétique nationale, d'où le nom "Research - Teaching - Politics (RTP)".

L'objectif spécifique du concept RTP4EREES est le dimensionnement, la modélisation et l'optimisation des systèmes énergétiques actuels et futures dans plusieurs régions du monde et plus spécifiquement au Maroc pour répondre à la demande de la façon (i) la plus économique, (ii) avec un faible risque d'adéquation production-demande et (iii) la plus environnementale, d'où le nom "Economic-Reliable-Environmental Energy Systems (EREES)".

### 3.2 Distribution Spatial des Installations Renouvelables

La recherche d'un site favorable à l'installation des énergies renouvelables se fait par une approche multicritère, elle demande une bonne concordance entre les critères économiques, techniques, sociaux et environnementaux. Par exemple, l'ensoleillement, la température, l'occupation du sol, la topographie, l'humidité, la proximité au réseau électrique existant, la proximité aux réserves hydrographiques (ex. pour refroidissement), la proximité au réseau routier, etc. Les études qui se font actuellement, au Maroc, ne prennent pas en compte l'impact du changement climatique sur toute la chaîne de valeur du secteur d'énergie, particulièrement pour la distribution spatiale des installations renouvelables, si on exclut [4, 5, 6] [7, Chapter 5].

### 3.3 Fluctuations Intra-Journalières des Variables Climatiques: Analyse des Données, Modélisation, Quantification des Sources d'Incertitudes et Application aux Projections Climatiques Futures

En outre, 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 [8]. 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 [7]. 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 [7]. Par exemple, les données CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling EXperiment) fournissent des projections climatiques pour le 21ème 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 [7, Chapter 5]. Ces fluctuations intra-journalières sont importantes non seulement pour la production solaire photovoltaïque ou PV [9] mais aussi pour le solaire thermodynamique CSP «Concentrated Solar Power» [10], les batteries Li-ion [11] et le stockage thermique [7, Chapter 5]. Ajoutons à cela les incertitudes dans les projections climatiques, économiques et dans les performances technologiques [7, Chapter 5] [12].

En effet, la problématique de l’impact du changement climatique sur les systèmes énergétiques est préoccupante pour diverses parties du globe [7, Chapter 5, Section II]. Une série d’études quantifient et simulent le risque de la ressource solaire [13] et éolienne [14]. Cependant, on assiste à un manque d’attention à l’analyse de l’impact de la variabilité et changement climatique sur les paramètres permettant de modéliser la consommation d’électricité et la production renouvelable ; et particulièrement à la modélisation des fluctuations intra-journalières des variables climatiques, en tenant en compte les aspects paramétriques et stochastiques.

Le travail devra comprendre une phase préliminaire de familiarisation avec la littérature existante sur les processus physiques du climat, d’extraction des données climatiques historiques des principales variables (vitesse du vent, irradiation globale horizontale et température ambiante, etc.) retenues pour élaborer cette étude, et d’analyse de leur variabilité temporelle et spatiale.

Une seconde étape devra viser 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. Il s’agit de développer plusieurs modèles qui reproduisent le comportement intra-journalier des variables climatiques futures, dans différentes zones marocaines, 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.

L’idée est de pouvoir explorer les utilisations potentielles des résultats dans divers cas de recherches connexes (i.e., implémentation aux projections climatiques futures).

### 3.4 Analyse Techno-Économiques de Différentes Structures de Systèmes hybrides à Source d’Énergie Renouvelables Pour la Production d’Électricité et Dessalement de l’Eau de Mer

Les zones côtières, par exemple au Maroc, sont confrontées à des défis majeurs en termes d’offre et de demande énergétiques futures, notamment une augmentation de la demande d’électricité suite au développement de l’industrie et à la croissance démographique, ce qui entraîne une plus grande dépendance aux importations de combustibles fossiles et des émissions de carbone.

Pour lutter contre le stress hydrique et assurer la sécurité d’approvisionnement énergétique, il s’agit de développer des simulations à travers lesquelles il faut démontrer la faisabilité de produire de l’électricité et de l’eau, à partir d’un système hybride basé sur les énergies renouvelables avec et sans stockage, et adapté à différentes applications : systèmes connectés au réseau ou autonomes ou de pompage d’eau ou de dessalement d’eau de mer.

Il s’agit également d’établir les actions pour atténuer et s’adapter aux effets du changement climatique dans tous les secteurs (i.e., énergie, industrie, transport, agriculture, résidentiel, etc).

## References

- [1] IEA. Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021. 2022.
- [2] IPCC. *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)].* IPCC., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021.
- [3] IPCC. *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)].* IPCC., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021.

- [4] Ayat-Allah Bouramdane. Identifying Large-Scale Photovoltaic and Concentrated Solar Power Hot Spots: Multi-Criteria Decision-Making Framework. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Energy and Power Engineering*, 17(02), 2023. DOI: [10.5281/zenodo.7324107](https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.7324107). URL: <https://publications.waset.org/abstracts/157186/pdf>.
- [5] Ayat-Allah Bouramdane. Site Suitability of Offshore Wind Energy: A Combination of Geographic Referenced Information and Analytic Hierarchy Process . *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Energy and Power Engineering*, 17(02), 2023. DOI: [10.5281/zenodo.7324191](https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.7324191). URL: <https://publications.waset.org/abstracts/157240/pdf>.
- [6] Ayat-Allah Bouramdane. Spatial Suitability Assessment of Onshore Wind Systems Using the Analytic Hierarchy Process . *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Energy and Power Engineering*, 17(07), 2023. DOI: [10.5281/zenodo.7324223](https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.7324223). URL: <https://publications.waset.org/abstracts/157232/pdf>.
- [7] Ayat-Allah Bouramdane. *Scenarios of Large-Scale Solar Integration with Wind in Morocco : Impact of Storage, Cost, Spatio-Temporal Complementarity and Climate Change*. Theses, Institut Polytechnique de Paris, October 2021.
- [8] Réseau de Transport d'Électricité (RTE). *Futurs Énergétiques 2050*. 2021.
- [9] Paul L Denholm, Matthew O'Connell, Gregory L. Brinkman, and Jennie Jorgenson. *Overgeneration from Solar Energy in California - A Field Guide to the Duck Chart*. 2015.
- [10] Miguel Larrañeta, Sara Moreno-Tejera, Isidoro Lillo-Bravo, and Manuel Silva-Pérez. 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*, 2019.
- [11] Feng Leng, Cher Ming Tan, and Michael G. Pecht. Effect of Temperature on the Aging rate of Li Ion Battery Operating above Room Temperature. *Scientific Reports*, 5, 2015.
- [12] Ayat-Allah Bouramdane. PV, CSP et Éolien au Maroc : Intégration à Géométrie Variable. *énergie/mines & carrières*, 2022. DOI: [10.5281/zenodo.7594221](https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.7594221). URL: <https://energiemines.ma/pv-csp-et-eolien-au-marocintegration-a-geometrie-variable/>.
- [13] Jan Kleissl. *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*. 2013.
- [14] Michael C. Brower. *Wind Resource Assessment: A Practical Guide to Developing a Wind Project*. 2012.

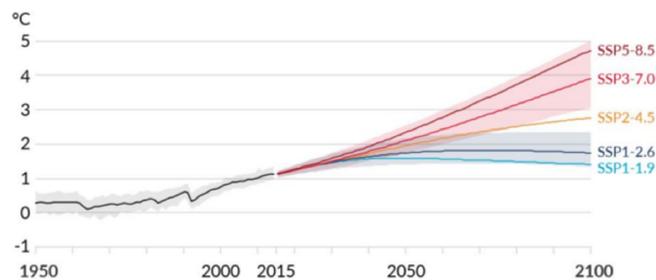


Figure 1: Scénarios d'évolution de la température de surface mondiale comparée à la période 1950 – 2015. Source : le 1er volet du sixième rapport d'évaluation (AR6) du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC; en anglais : Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) sur 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 ».