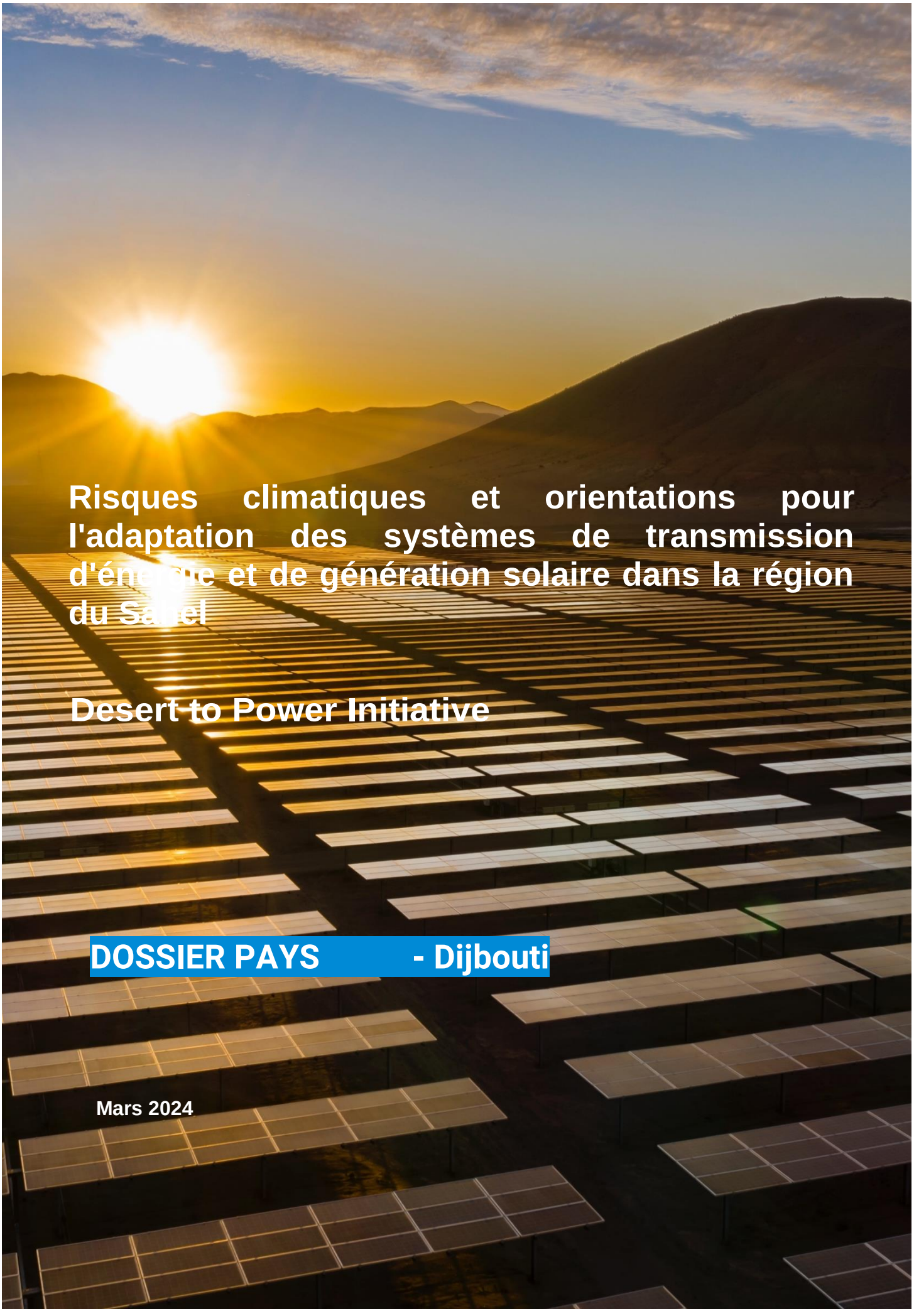


Risques climatiques et orientations pour l'adaptation des systèmes de transmission d'énergie et de génération solaire dans la région du Sahel

Desert to Power Initiative

DOSSIER PAYS - Dijbouti

Mars 2024

AUTEURS ET REMERCIEMENTS

Ce rapport a été élaboré par :

Global Center on Adaptation: Adele Cadario, Program Lead, Infrastructure & Nature-Based Solutions, Hafiz Lawal, Africa Regional Program Manager, Infrastructure & Nature-Based Solution; María José Vásquez Senior Program Officer, Infrastructure and Nature Based Solutions; Tanim Istiaque, Senior Program Officer, Infrastructure and Nature Based Solutions.

Partnerships: Africa Development Bank: NESIAMA MILLER, Principal Renewable Energy Specialist.

Consultants: Global CAD: Johanna Klein, Climate Risk Assessment Expert; Andrea Tapia, Hazard/ Risk Modelling and QGIS Expert; Frank Müller, Climate Risk Assessment Expert; Yacouba Ouedraogo, Regional Data and Stakeholder Engagement Expert; Seyni Salack (WASCAL - West African Science Service Centre on Climate Change and Adapted Land Use), Regional Expert on Risks and Vulnerability to Climate Extremes; Anna Maria Franco Gantiva, Project Support; Maria Nicolau, Project Support; METEO SIM: Miguel Ángel Manzanares Gutiérrez, Climate Data Expert; Mikel Sarasua Etxeberria, Project Support; Paula Sánchez Gayet, Project Support; Elna Bagés Cid, Project Support: OCA Global: Maria Galí Reniu, Climate Impact Analyst; Maria Guerrero González, Solar Energy Infrastructures Expert; Lluís Torrent Bescós, Climate Impact Senior Expert.

Les directives nationales peuvent être citées comme suit:

Global Center on Adaptation, Country Chapter, Dijbouti, 2023. Partnership: African Development Bank. Consulting firms: Global CAD, Meteo SIM, OCA Global. Developed under the AAAP.

DESCRIPTION

Sector: Resilient Solar Assets

Region: Africa

Keywords: climate hazard assessment, climate vulnerability stress test, prioritization ofadaptation and resilience investment options, resilient infrastructure, infrastructure PPPs.

Contact: infrastructure@gca.org

Remerciements

GLOBAL CENTER ON ADAPTATION

ABOUT THE GLOBAL CENTER ON ADAPTATION

The Global Center on Adaptation (GCA) is an international organization, hosted by the Netherlands, which works as a solutions broker to accelerate action and support for adaptation solutions from the international to the local, in partnership with the public and private sector, to ensure we learn from each other and work together for a climate resilient future.

AFRICA ADAPTATION ACCELERATION PROGRAM

GCA is providing technical assistance under the African Adaptation Acceleration Program (AAAP), a joint initiative launched by the GCA and the African Development Bank in 2021.

African Union — AFRICA ADAPTATION INITIATIVE — AFRICAN DEVELOPMENT BANK GROUP — GLOBAL CENTER ON ADAPTATION

En partenariat avec:

Consultants:

GLOBAL CAD — METEO SIM — OCA GLOBAL

GLOBAL CENTER ON ADAPTATION

TABLE OF CONTENTS

4.3.1 Current Climatology and Summary of Climate Hazards (current and future) 2

4.3.2 Projected Climate Risks for Solar Technologies 5

4.3.3 Recommendations 14

4.3.4 Adaptation solutions 15

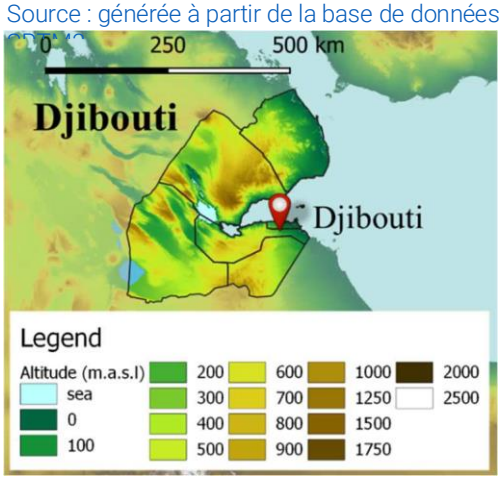
4.3 Djibouti

Djibouti est un pays côtier d'Afrique de l'Est qui compte une population d'environ 1,1 million d'habitants (données mi-2022)[115].

Le pays présente une topographie variée avec une côte bordant la mer Rouge à l'est et contrastant avec une grande chaîne de montagnes (altitude supérieure à 1000 m) séparant la plaine côtière du plateau intérieur. Djibouti n'a pas de cours d'eau pérennes et ses ressources en eau dépendent donc largement des eaux souterraines.

Djibouti est un pays essentiellement urbain, environ 20 % de sa population résidant dans des petites villes et des villages. En raison de son taux d'urbanisation élevé,

Figure 46 – Carte topographique de Djibouti. Source : générée à partir de la base de données

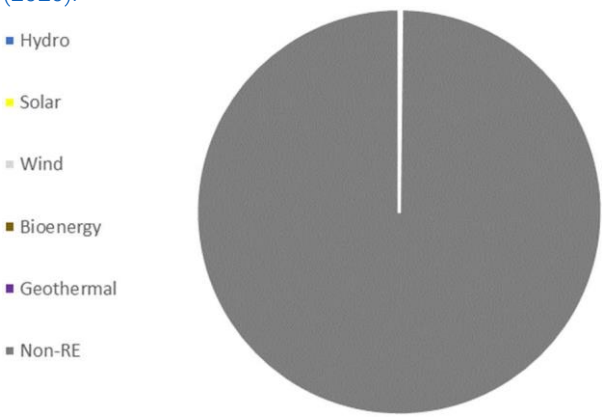


le pays se caractérise par des niveaux d'accès à l'énergie relativement élevés : en 2020, 62 % de la population avait accès à l'électricité, une valeur supérieure à la moyenne régionale dans la zone du Sahel, qui est de 45 %. En outre, la BAD a financé, avec la Banque mondiale, une ligne d'interconnexion améliorant la connectivité du réseau de transport entre l'Éthiopie et Djibouti. Ce projet vise à stabiliser les flux d'électricité et à renforcer la fiabilité des systèmes[116]. Seulement 10 % de la population a accès à des conditions de cuisson propre[117].

Djibouti dépend entièrement des importations de combustibles fossiles (voir figure 47) et de l'électricité provenant des pays voisins (principalement l'Éthiopie). La production nationale d'électricité dépend fortement du mazout pour les centrales principales et du diesel pour les centrales de province[118].

Étant donné les énormes possibilités de Djibouti en matière d'énergie solaire, leur développement pourrait potentiellement assurer la souveraineté énergétique du pays tout en améliorant l'accès à l'énergie de la population

Figure 47 – Production d'électricité à Djibouti (GWh) en 2020. Source : Profil énergétique de Djibouti par l'IRENA (2020).



115 Population Reference Bureau (PRB) (2022). Fiche de données sur la population mondiale. Disponible sur : https://www.prb.org/wp-content/uploads/2022/09/2022-World-Population-Data-Sheet-Booklet.pdf

116 https://africa-energy-portal.org/news/world-bank-authorises-55million-increase-energy-access-djibouti

117 IRENA (2022). Profil énergétique de Djibouti. Disponible sur : https://www.irena.org/IRENADocuments/Statistical_Profiles/Africa/Djibouti_Africa_RE_SP.pdf 118 IRENA (2015). Évaluation de l'état de préparation aux énergies renouvelables : Djibouti. Disponible sur : https://www.irena.org/publications/2015/May/Renewables-Readiness-Assessment-Djibouti

4.3.1 Climatologie actuelle et résumé des aléas climatiques (actuels et futurs)

Cette section présente une modélisation des données climatologiques du pays, à titre de référence quant à l'évolution des aléas climatiques les plus pertinents affectant les technologies solaires au Sahel. Des informations plus détaillées sont disponibles dans l'évaluation des aléas climatiques pour la région du Sahel (GCA, 2022).

Liés à la température :

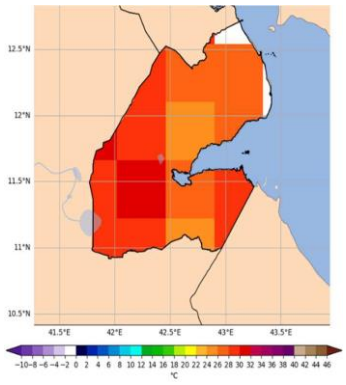
Climat de référence (1961-1990) :

Djibouti bénéficie d'un climat chaud avec des températures moyennes journalières allant de 18 °C pendant la saison froide à 40 °C pendant l'été.

La saison chaude s'étend de mai à août, mais c'est en juin-juillet que l'on enregistre le plus grand nombre de journées chaudes[119] et de vagues de chaleur[120].

Figure 48 – Distribution des températures journalières moyennes à Djibouti pour la période de référence (1961-1990).

Source : élaboration en interne.



Climat historique (1990-2020)

- Moyenne : les températures moyennes journalières ont augmenté de 1 °C au cours des 30 dernières années.
- Vague de chaleur : le nombre de journées chaudes a augmenté de 50 % par rapport à la période de référence (1961-1990).

Climat futur (2030-2060)

- Moyenne : les températures journalières moyennes devraient augmenter de +2,0 °C (si l'on considère le scénario conservateur RCP 4.5) et de +2,5 °C (dans le scénario pessimiste RCP 8.5)[121].
- Vague de chaleur : la fréquence des journées chaudes devrait être 3 à 4 fois plus élevée que pendant la période de référence (1961-1990), le nombre de journées chaudes devant augmenter de plus de 50 jours par an.

Vague de chaleur : niveau d'aléas élevé sur l'ensemble de Djibouti.

Incendie de forêt : aléa nul dans la majeure partie de Djibouti, mais un risque modéré dans l'ouest (Dikhil).

Liés aux précipitations :

Climat de référence (1961-1990) :

Les précipitations totales annuelles de Djibouti varient de moins de 100 mm dans les régions orientales à 800 mm dans la zone centrale des monts Goda. La saison des pluies s'étend de juillet à septembre, et la plupart des périodes de sécheresse ont lieu entre janvier et février. La durée des périodes de sécheresse est plus prononcée dans l'est, avec plus de 300 jours, alors que dans le reste du pays, elle est comprise entre 150 et 200 jours.

Climat historique (1990-2020) :

- Moyenne : les précipitations totales annuelles moyennes sont restées pratiquement constantes, avec de légères augmentations dans le centre et l'ouest du pays[122].

119 Les journées chaudes sont définies par les températures maximales dépassant le 90e centile des températures maximales pour la période de référence (1961-1990). À Djibouti, la valeur médiane est de 39 °C, bien qu'il soit possible que cette valeur ne soit pas représentative de l'ensemble du pays en raison des facteurs topographiques et de la zone d'extension.

120 Les périodes chaudes sont définies par le nombre de jours, et comptent au moins 6 jours consécutifs de chaleur.

121 Forte probabilité d'une augmentation de la température moyenne journalière de 1 °C.

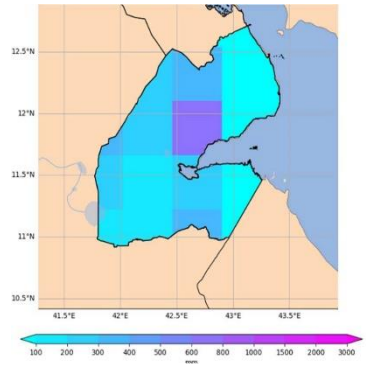
122 Malgré une grande incertitude entre les modèles climatiques pour tous les indices liés aux précipitations.

- **Fortes précipitations :** le nombre de jours de pluie123 n'a pas évolué de manière significative par rapport à la période de référence (1961-1990).
- **Sécheresse :** les périodes de sécheresse ont augmenté d'environ 20 jours.

Climat futur (2030-2060) :

- **Moyenne :** les précipitations annuelles totales devraient augmenter d'environ 10 mm dans les deux scénarios (conservateur RCP 4.5 et pessimiste RCP 8.5). Des augmentations plus importantes sont prévues dans le scénario conservateur dans le nord-ouest de Djibouti.
- **Fortes précipitations :** le nombre de jours de pluie ne devrait pas changer de manière significative dans les futurs scénarios de changement climatique par rapport à la période de référence (1961-1990).
- **Sécheresse :** les périodes de sécheresse devraient augmenter de 20 jours dans le scénario le plus pessimiste (RCP 8.5), par rapport à la période de référence (1961-1990). Le scénario conservateur (RCP 4.5) prévoit un retour au nombre de jours secs de la période de référence.

Figure 49 – Distribution des précipitations totales annuelles moyennes à Djibouti pour la période de référence (1961-1990). Source : élaboration en



Fortes précipitations : niveau d'aléas faible sur l'ensemble de Djibouti, avec des niveaux modérés dans le centre du pays (région proche des monts Goda).

Inondations : niveau d'aléas faible à modéré dans le nord de Djibouti (à la frontière avec l'Erythrée) et dans les régions du sud (frontières de Toboki, Arta et Dikhil). Néanmoins, des crues soudaines peuvent se produire sur l'ensemble du territoire si de fortes précipitations surviennent après une saison sèche prolongée.

Sécheresse : niveau d'aléas élevé sur l'ensemble de Djibouti.

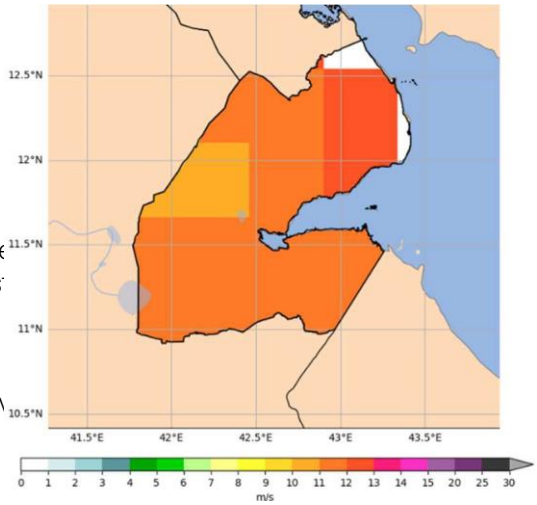
Élévation du niveau de la mer : les zones côtières présentent un niveau de risque élevé (affectant particulièrement la ville de Djibouti, ainsi que les régions de Tadhoura et

Liés au vent :

Climat de référence (1961-1990) :

La vitesse moyenne journalière du vent est faible à modérée dans le pays (environ 3-5 m/s), avec des valeurs plus élevées dans les régions septentrionales. Les vents violents sont rares à Djibouti, les vitesses maximales journalières dépassant à peine 14 m/s dans la partie nord-est du pays (voir figure 50), bien que leur fréquence soit inférieure à 1 jour par an.

Figure 50 – Distribution de la vitesse maximale journalière du vent à Djibouti pour la période de référence (1961-1990). Source : élaboration en



Climat historique (1990-2020)

- **Moyenne :** aucun changement significatif n'est enr
- **Vents violents :** aucun changement significatif n'es enregistré.

Climat futur (2030-2060)

- **Moyenne :** aucun changement significatif n'est pré

123 Les jours de pluie sont définis par le nombre de jours au cours desquels les précipitations totales quotidiennes dépassent le 90e percentile des précipitations totales quotidiennes cumulées sur les jours de pluie enregistrés dans la période de référence (1961-1990).

- Vents violents : aucun changement significatif n'est prévu.

Variabilité du vent: niveau d'aléas modéré sur l'ensemble de Djibouti.

Tempête : niveau d'aléas modéré dans la majeure partie de Djibouti et niveau faible dans certaines parties du sud.Poussière de sable : niveau d'aléas élevé dans la majeure partie de Djibouti et très élevé dans l'extrême nord du pays.

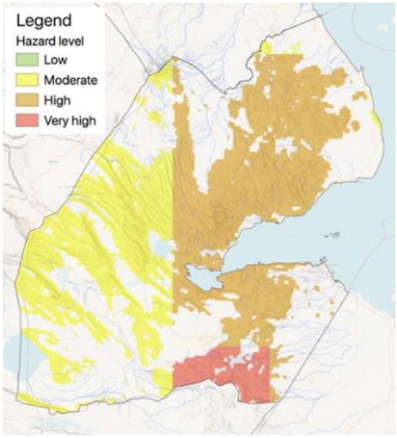
Liés aux masses solides :

En raison de sa topographie escarpée, de sa géologie et des conditions du sol, Djibouti est un pays sujet aux glissements de terrain. De fortes précipitations peuvent déclencher une instabilité du terrain, en combinaison avec l'escarpement du terrain, les conditions de sécheresse et les caractéristiques du sol. Récemment, le pays a été confronté à

des glissements de terrain provoqués par des précipitations qui ont fortement affecté la capitale du pays (novembre 2019[124]).

Djibouti n'est pas exposé à la mobilité du sable[125] (bien que cet aspect nécessite une étude plus approfondie). Il n'est pas possible d'établir des projections futures en raison de la complexité des mécanismes impliqués.

Figure 51 – Projections du risque de glissement de terrain à Djibouti, selon le scénario (2030-2060) le plus pessimiste (RCP 8.5).



Glissements de terrain : niveau de risque modéré à élevé sur l'ensemble du territoire djiboutien, avec un niveau très élevé dans le sud du pays.

Mobilité du sable : pas d'exposition au déplacement du sable en raison de la répartition des mers de sable éolien (Muhs, 2009)[12].

4.3.2 Prévision des risques climatiques pour les technologies solaires

Les aléas climatiques peuvent se transformer en risques climatiques s'ils ont le potentiel d'affecter négativement les technologies solaires. Le tableau 10 résume les risques climatiques les plus pertinents pour les technologies solaires à Djibouti. Leurs impacts potentiels sont discutés plus en détail ci-dessous. Un tableau complet résumant les principaux risques prévus pour les composants des projets d'énergie solaire, ainsi que les performances et les coûts, est présenté dans l'annexe 1 (tableau de sensibilité). Des propositions d'adaptation sont présentées pour chacun des risques climatiques décrits dans la section 4.3.4 (page 92).

Il convient de noter que les risques climatiques suivants sont basés sur une analyse générale. Il est fortement recommandé que chaque projet de développement solaire fasse l'objet d'une étude de préfaisabilité spécifique qui identifie les risques climatiques les plus pertinents pour les actifs solaires d'après les dernières données, informations et modèles climatiques disponibles.

Risques liés à la température :

Pour Djibouti, la forte probabilité d'une augmentation **des températures** peut avoir des conséquences limitées sur les performances et l'intégrité des systèmes de production d'énergie solaire. Une augmentation moyenne de la température journalière de 1 °C (pour les modèles de Djibouti, une augmentation de 2,0 °C) peut avoir des conséquences

124 https://reliefweb.int/report/djibouti/djibouti-flash-update-3-humanitarian-impact-flooding-17-december-2019

125 D’après la distribution globale du sable éolien, actif ou stabilisé. Muhs, Daniel. (2009). Eolian Sediments and Processes. 10.1007/978-1-4020-4411-3_81.

sur l'efficacité des technologies solaires, en particulier entre mars et mai et dans le nord du pays. Cela pourrait entraîner une baisse de rendement de 0,3 % pour la technologie solaire photovoltaïque et de 1 % pour les centrales solaires thermodynamiques à concentration (bien que ces dernières ne soient pas recommandées car le pays est enclavé et le transport des pièces est donc difficile). Le réseau de transport et de distribution pourrait également être affecté par une augmentation de la température ambiante, en raison de l'augmentation de la résistivité liée à l'augmentation des températures entraînant des pertes dans le réseau.

En outre, l'augmentation prévue de la fréquence des journées **chaudes**[38] (qui pourrait tripler par rapport au record historique) **et des vagues de chaleur**[39] pourrait exacerber ces impacts sur les systèmes solaires en raison de l'augmentation des températures. Par ailleurs, ces phénomènes pourraient exposer le personnel à des températures plus élevées que la moyenne pendant les mois d'été, ce qui ajoute un risque pour l'exploitation et la maintenance, car cela pourrait affecter la capacité du corps à réguler la température et entraîner des effets potentiellement défavorables sur la santé[126].

Bien que **le risque d'incendie de forêt** soit pratiquement inexistant à Djibouti (sauf dans la partie ouest du pays où le risque est modéré), une attention particulière doit être portée aux systèmes solaires situés à proximité des zones sujettes aux incendies. Les incendies de forêt représentent un risque critique pour l'intégrité de la technologie solaire. Les conséquences peuvent être plus graves pour les systèmes en réseau qui dépendent des lignes de transport et de distribution, lesquelles peuvent s'étendre sur de longues distances et sont susceptibles de traverser des zones exposées aux incendies de forêt.

Risques liés à l'eau :

La répartition des précipitations montre une légère augmentation des niveaux de précipitations totales annuelles moyennes dans le centre et l'ouest du pays, ce qui pourrait entraîner une augmentation des crues soudaines dans la région montagneuse de Goda.

Malgré l'incertitude élevée quant aux niveaux de précipitations, l'augmentation des précipitations dans les régions du centre-est du pays devrait améliorer la disponibilité de l'eau pour le nettoyage des modules photovoltaïques et des collecteurs CSP.

Les fortes précipitations se concentrent principalement dans les monts Goda, et les impacts sur les actifs solaires sont donc considérés comme limités pour le reste du pays. Néanmoins, sans une préparation adéquate, ces événements peuvent entraîner des dommages aux systèmes solaires, en particulier à cause des tempêtes de grêle (qui sont relativement probables à Djibouti, selon Prein et Holland (2018)[127]).

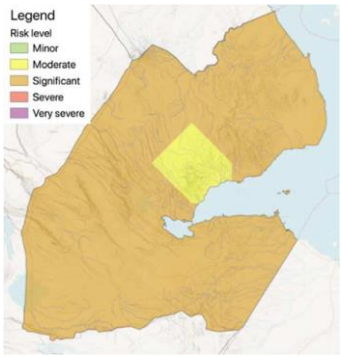
126 https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-heat-and-health#:~:text=Rapid%20rises%20in%20heat%20gain,exhaustion%2C%20heatstroke%2C%20and%20hyperthermia.

127 Prein, Andreas & Holland, Greg. (2018). Estimations mondiales du risque de grêle destructrice. Weather and Climate Extremes. 22. 10.1016/j.wace.2018.10.004.

Les inondations et les mares d'eau sur le site **pourraient** affecter les opérations et les travaux de maintenance en limitant l'accès des opérateurs sur le site. En outre, le risque d'inondation pourrait entraîner des dommages structurels aux infrastructures solaires et aux composants électriques si des mesures de

protection adéquates ne sont pas prises. Le risque de crue éclair est également au plus haut pendant la saison des pluies en raison d'une combinaison de fortes précipitations, de l'imperméabilité des sols asséchés et des pentes. Des mesures de précaution doivent donc être envisagées pour les systèmes solaires.

Figure 52 – Projections du risque de sécheresse pour les systèmes photovoltaïques à Djibouti, selon le scénario le plus pessimiste (RCP 8.5). Source : élaboration en interne.

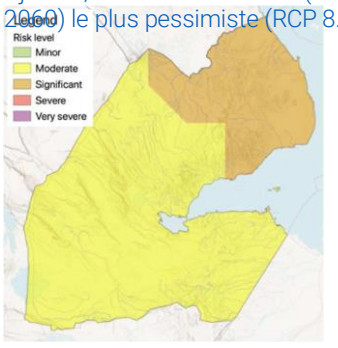


Dans les zones côtières de Djibouti**, l'élévation du niveau de la mer** pourrait avoir un impact important (en particulier sur la capitale du pays), augmentant les zones inondables dans ces régions. Cela pourrait alors affecter la qualité de l'eau des aquifères (en raison de l'intrusion de sel) dans le pays, dont la population et les infrastructures dépendent de manière significative. En outre, le rapprochement du littoral pourrait exposer les infrastructures solaires à des niveaux d'humidité plus élevés et à des particules d'embruns, ce qui pourrait ombrager les panneaux solaires et les collecteurs CSP, entraînant une augmentation du besoin de nettoyage.

Les prévisions d'aléas de **sécheresse** suggèrent que l'exposition à un environnement sec et chaud se poursuivra dans les deux scénarios de changement climatique (RCP 4.5 et RCP 8.5), bien que les variations spatiales ne soient pas homogènes dans l'ensemble du pays. Comme le montrent les archives, le pays a récemment connu des sécheresses importantes qui devraient se poursuivre à l'avenir pendant la saison sèche. Pour cette raison, des mesures préventives doivent être envisagées pour éviter la dépendance des systèmes à l'eau, notamment en privilégiant le nettoyage et la réfrigération à sec.

Risques liés au vent :

Figure 53 – Projections du risque de poussière de sable pour les systèmes photovoltaïques à Djibouti, selon le scénario (2030-2069) le plus pessimiste (RCP 8.5).



Si elles sont conçues de manière adéquate, les infrastructures solaires **ne sont pas menacées par des vitesses de vent** relativement constantes et douces. À des vitesses de vent faibles, il est peu probable que les systèmes solaires subissent des dommages dus à la résonance mécanique, si leur conception est adaptée aux scénarios prévus. Au contraire, les vents calmes peuvent être bénéfiques en raison de leur effet de refroidissement, qui peut améliorer l'efficacité des modules solaires.

Les faibles vitesses des vent provenant du nord-ouest et de l'est (du désert du Sahara et de la péninsule arabique, respectivement) peuvent entraîner un dépôt important **de terre et de poussière** sur les collecteurs solaires, ce qui pourrait limiter le rendement de production

et augmenter le besoin de nettoyage. Toutefois, ce facteur doit être étudié plus en détail et traité.

Risques liés aux masses solides :

L’ensemble du territoire de Djibouti est particulièrement sensible aux **glissements de terrain**, compte tenu de la topographie complexe et des caractéristiques géologiques du pays.

Les centrales et systèmes solaires étant vulnérables aux glissements de terrain et à l'érosion des sols, une attention particulière doit être portée à ce risque si les actifs solaires doivent être installés sur des terrains escarpés.

Zones à risque du changement climatique pour les actifs solaires

Les cartes suivantes de la Figure 54 montrent le risque climatique global par technologie (solaire photovoltaïque, CSP et réseaux de transport et de distribution) à Djibouti, en visualisant clairement les zones où les actifs solaires sont plus vulnérables au changement climatique.

Figure 54 – Zones sensibles de Djibouti par type de technologie, selon le scénario le plus pessimiste (RCP 8.5). Affiché : (a) Solaire photovoltaïque ; (b) Centrales solaires thermodynamiques ; et (c) Réseau de transport et de distribution.

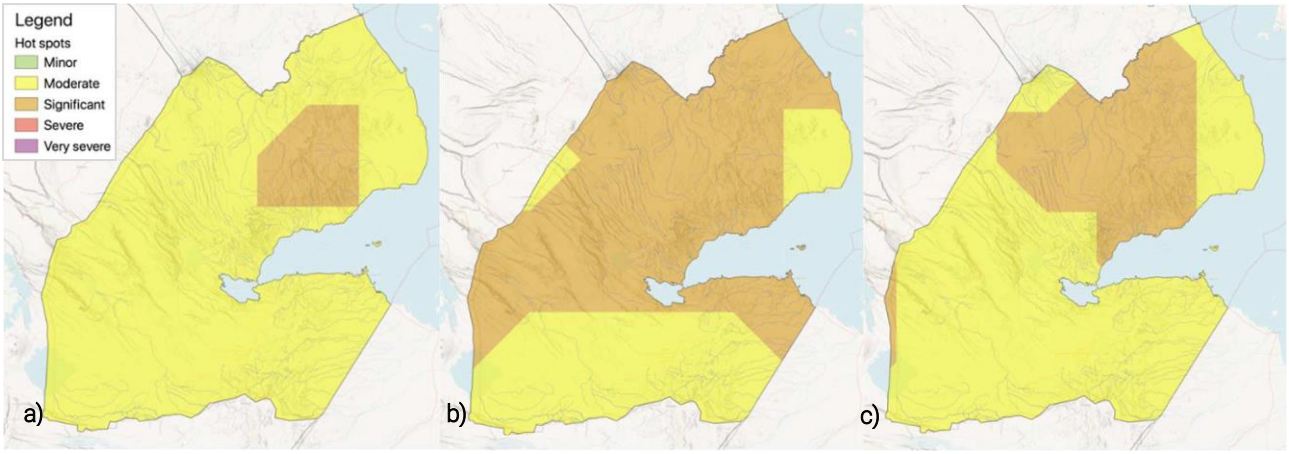


Tableau 10 – Aperçu du niveau de risque climatique à Djibouti selon le scénario le plus pessimiste (RCP 8.5). Le code couleur indique le niveau de risque global estimé[128] pour chaque type d'aléas. Vert : risque mineur ; jaune : risque modéré ; orange : risque important ; rouge : risque grave ; violet : risque très grave. Source : GCA (2022)[129].

<table>
<tr><th>Type de Aléa climatique</th><th>Aléa climatique</th><th>Solaire photovoltaïque</th><th>Centrale solaire thermodynamique</th><th>Mini-réseaux et Panneaux solaires de toiture</th><th>Réseau de transport de distribution</th><th>Risque financier potentiel ou impacts sur la production[130]</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Liés à la température</td><td>Vagues de chaleur</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>Risque financier élevé (perte de revenu estimée à 10-20 % du revenu associé à la capacité de production ou de 400 000 à 800 000 USD). Des pertes d'énergie fournie peuvent être enregistrées en raison de la baisse de l'efficacité des modules PV et CSP. En outre, l'augmentation des températures peut réduire la capacité de transport et de distribution.</td></tr>
<tr><td>Incendies de forêt[131]</td><td colspan="4">Le risque est plus faible que pour les systèmes en réseau.</td><td>Risque financier faible (perte de revenus estimée inférieure à 5 % des revenus associés à la capacité de production, soit 20 000 à 200 000 USD). L'indisponibilité potentielle ou l'effondrement pourrait entraîner l'arrêt de la production d'électricité, jusqu'à la reconstruction ou le remplacement des pièces endommagées. L'ouest du pays présente un risque modéré d'incendie de forêt.</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Liés à l'eau</td><td>Fortes précipitations</td><td colspan="4"></td><td>Risque financier faible (perte de revenus estimée inférieure à 5 % des revenus associés à la capacité de production, soit 20 000 à 200 000 USD). Les pertes de puissance des composants dues à la rupture des cellules solaires, causée par une grêle peu fréquente, pourraient aller jusqu'à 1-15 %. De même, l'indisponibilité due à la défaillance d'un module en cas de dommages graves entraînerait l'arrêt de la production d'électricité jusqu'à la reconstruction ou le remplacement des pièces.</td></tr>
<tr><td>Inondations[1]32</td><td colspan="4" rowspan="3"></td><td>Risque financier modéré (perte de revenus estimée entre 5 et 10 % des revenus associés à la capacité de production, soit 200 000 à 400 000 USD). Des coûts peuvent s'ajouter pour le remplacement des composants endommagés, s'ils ne sont pas isolés pour résister aux infiltrations d'eau (variables en fonction de l'intensité des événements).</td></tr>
<tr><td>Sécheresse</td><td>Risque financier modéré (perte de revenus estimée entre 5 et 10 % des revenus associés à la capacité de production, soit 200 000 à 400 000 USD). L'énergie fournie au réseau peut être réduite en raison de l'encrassement, en cas de nettoyage à l'eau.</td></tr>
<tr><td>Élévation du niveau de la mer</td><td>Risque financier élevé (perte de revenu estimée à 5-10 % du revenu associé à la capacité de production ou de 200 000 à 400 000 USD).</td></tr>
</table>

128 Estimation qualitative fondée sur le niveau de risque correspondant à la plus grande partie des terres du pays.

129 Centre mondial pour l'adaptation (2022). Rapport sur les aléas climatiques dans la région du Sahel.

130 Estimation basée sur une centrale solaire photovoltaïque de 10 MW dont la production annuelle est estimée à environ 10-15 millions de KWh, générant un revenu estimé entre 1 et 3 millions USD. Clause de non-responsabilité : les auteurs ne seront pas tenus responsables des conséquences techniques ou financières des décisions prises sur la base des commentaires et des estimations formulés dans ce rapport.

131 Les zones situées dans l'ouest de Djibouti présentent un risque important d'incendie de forêt. La vigilance est donc de mise lors de la planification des infrastructures solaires dans les zones voisines.

132 Bien que l’analyse ne révèle que peu de zones à risque d’inondation dans l’ensemble de Djibouti, une attention particulière doit être portée à l’ensemble du territoire pour prévenir les impacts des crues soudaines, courantes dans la région.

			Déplacement possible vers des zones non inondées et corrosion précoce des composants en raison de la salinité.
Liés au vent	Variabilité du vent		Risque financier faible à très faible (perte de revenus estimée à 20 000 USD En cas de résonance mécanique, des coûts variables liés aux réparations et à l'effondrement potentiel de la centrale peuvent s'ajouter.
	Tempêtes	*Les panneaux solaires de toiture peuvent être plus gravement touchés.*	Risque financier modéré (perte de revenus estimée entre 5 et 10 % des revenus associés à la capacité de production, soit 200 000 à 400 000 USD). De rares rafales de vent peuvent provoquer des ruptures (en particulier pour les panneaux solaires de toiture), entraînant une indisponibilité partielle jusqu'à leur reconstruction. L'indisponibilité due aux orages électriques pourrait interrompre la production d'électricité jusqu'à la reconstruction ou le remplacement des pièces endommagées.
	Poussière de sable		Risque financier modéré (perte de revenus estimée entre 5 et 10 % des revenus associés à la capacité de production, soit 200 000 à 400 000 USD). Un ombrage uniforme (dû à l'encrassement des dépôts de poussière accumulée) de 50 % pourrait réduire le rendement énergétique de plus de 60 %[133].
Liés aux masses solides	Mobilité du sable		Risque financier très faible (perte de revenus estimée à 20 000 USD). Augmentation des dépenses d'investissement des installations en raison de la planification/construction de mesures de protection telles que des barrières pour retenir le sable, le boisement des environs.
	Glissements de terrain		Risque financier modéré (perte de revenus estimée entre 5 et 10 % des revenus associés à la capacité de production, soit 200 000 à 400 000 USD). Le changement de l'alignement des panneaux en cas de léger mouvement de terrain peut réduire l'énergie fournie au réseau et entraîner des coûts de réparation supplémentaires. Dans le sud-ouest du pays, ce risque devient élevé.

133 Bana, S. and Saini, R.P. (2017). Experimental investigation on power output of different photovoltaic array configurations under uniform and partial shading scenarios. Énergie. Volume 127. P438-453. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.139. Extrait de : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217305327

4.3.3 Recommandations

Les impacts climatiques sur les systèmes solaires peuvent être évités et/ou atténués avec une planification et une conception adéquates. La section suivante présente des recommandations générales sur les aspects les plus pertinents à prendre en compte lors de la planification des systèmes solaires à Djibouti.

Accessibilité

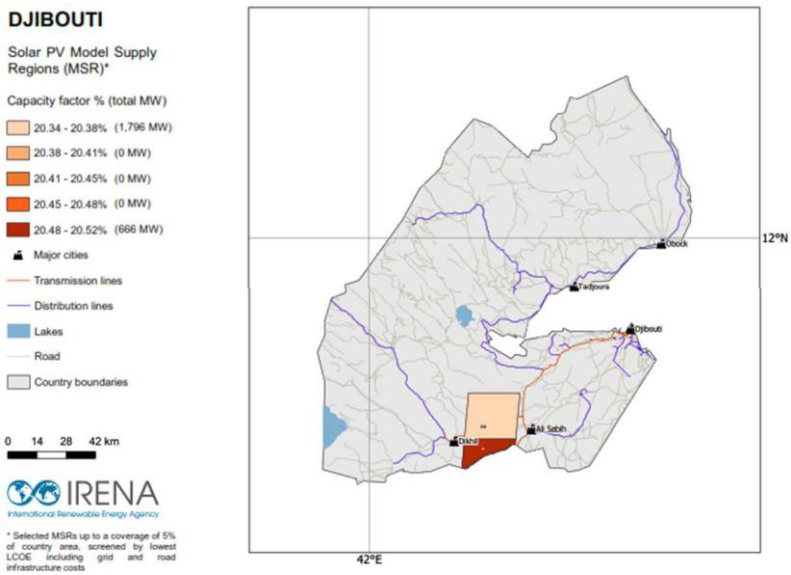
Djibouti est un pays côtier de la Corne de l'Afrique, un point de référence en Afrique de l'Est en tant que principal port maritime pour les importations et les exportations vers les pays voisins (tels que l'Éthiopie). Le pays est situé sur l'une des voies maritimes les plus fréquentées au monde, contrôlant l'accès à la mer Rouge et à l'océan Indien, et servant également de centre de ravitaillement et de transbordement. Il s'agit d'un aspect très important étant donné que dans l'industrie solaire, les composants sont généralement transportés par voie maritime, car c'est l'un des moyens de transport international les moins coûteux. Par conséquent, aucun choix de technologie solaire ne doit être affecté par les moyens de transport car l'accessibilité des composants peut être assurée.

Sites d'implantation

Afin d'identifier les sites les plus appropriés pour l'installation de centrales solaires de grande capacité à Djibouti, plusieurs aspects doivent être pris en compte. Le potentiel de ressources solaires existant, la disponibilité de l'infrastructure de réseau, l'utilisation des terres et la topographie sont des aspects clés à prendre en compte lors de la planification de futurs projets solaires. Selon ces aspects, Djibouti compte une zone propice au développement solaire (voir Figure 55[134]).

La zone est située dans le sud du pays, entre les villes d'Ali Sabih et de Dikhil, où les infrastructures électriques et de transport sont adéquates. En outre, il s'agit de la partie du pays où l'irradiation solaire est la plus élevée. En revanche, la topographie complexe du nord du pays rend l'installation de centrales de grande capacité assez difficile. Néanmoins, compte tenu de la modularité de la technologie photovoltaïque, des systèmes photovoltaïques isolés et des mini-réseaux peuvent être installés sur l'ensemble du territoire.

Figure 55 – Régions d'approvisionnement en modèles photovoltaïques à Djibouti. Source : Sterl, S., Hussain, B., Miketa, A. et al. (2022)



134 Sterl, S., Hussain, B., Miketa, A. et al. An all-Africa dataset of energy model "supply regions" for solar photovoltaic and wind power. Sci Data 9, 664 (2022). https://doi.org/10.1038/s41597-022-01786-5. Extrait de : https://www.nature.com/articles/s41597-022-01786-5

Technologie solaire

Étant donné que 20 % de la population de Djibouti vivent dans des zones rurales dispersées, le développement de mini-réseaux ou de systèmes photovoltaïques isolés sur les toits est également une option très pratique à envisager, car ces systèmes sont très modulaires, leur installation n'est pas excessivement complexe et ils peuvent fonctionner à la fois en réseau et hors réseau, ce qui signifie qu'ils peuvent être installés presque partout. En fait, des mini-réseaux sont déjà en construction, dont un à Moumina, un village situé près du lac Abbe, dans la région d'Arta[135], qui contribuera à améliorer les conditions de vie des citoyens grâce à un meilleur accès à l'énergie.

En ce qui concerne les centrales solaires de grande capacité, il existe à proximité de Dikhil un plateau qui pourrait accueillir une centrale solaire thermodynamique ou une centrale photovoltaïque de grande capacité. Les centrales solaires thermodynamiques nécessitent un rayonnement solaire direct abondant pour que la lumière du soleil soit concentrée aux températures requises pour la production d'électricité. Ainsi, pour que la technologie soit rentable, des niveaux d'irradiation directe normale de 2000 kWh/m² ou plus sont généralement requis[136]. À Djibouti, les centrales solaires thermodynamiques doivent être conçues avec un système de condenseur à refroidissement par air, qui permet d'économiser plus de 90 % de la consommation d'eau par rapport aux systèmes de refroidissement à eau[137]. Dans le désert de Grand Bara (au sud de Djibouti), où les niveaux d'irradiation directe normale dépassent 2000 kWh/m2, un projet de centrale solaire de 30 MWp a récemment été approuvé[138].

Les enseignements tirés des centrales solaires thermodynamiques déjà en service en Égypte et aux Émirats arabes unis seront utilisés pour développer les futures centrales dans le nord du pays, en raison des similitudes avec les risques et l'environnement de Djibouti.

Utilisation prévue

La détermination de la capacité ou de la puissance d'une centrale ou d'un système solaire photovoltaïque dépend principalement de son utilisation prévue. Les systèmes photovoltaïques peuvent être utilisés à des fins très diverses : pour le pompage de l'eau, l'éclairage des rues, le fonctionnement des systèmes de refroidissement, l'alimentation des maisons rurales ou la production d'électricité à grande échelle, par le biais de centrales de grande capacité. Les bonnes pratiques générales doivent être respectées pour garantir la conformité aux codes et réglementations du pays et aux attentes du client.

4.3.4 Solutions d'adaptation

Sur la base des sections précédentes, les mesures d'adaptation suivantes sont proposées (dans le Tableau 7) pour créer des systèmes solaires plus résilients en fonction du niveau global de chaque risque climatique à Djibouti. Un tableau complet des mesures d'adaptation possibles (non adaptées au niveau national) est également proposé en Annexe 2.

Il convient de noter que les mesures suivantes sont des recommandations génériques et illustratives fondées sur une analyse de haut niveau. Il est fortement recommandé que chaque projet solaire fasse l'objet d'une étude de préfaisabilité spécifique comprenant une évaluation des risques climatiques et de la vulnérabilité de la zone du projet, y compris des options et des mesures d'adaptation plus détaillées.

135 https://www.undp.org/djibouti/news/solar-energy-better-electrification-rural-areas

136 IRENA (2015), Évaluation de l'état de préparation aux énergies renouvelables : Djibouti, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi

137 Turchi, Craig & Wagner, Michael & Kutscher, Chuck. (2010). Water Use in Parabolic Trough Power Plants: Summary Results from WorleyParsons' Analyses. Contrat. 303. 10.2172/1001357. URL : https://www.researchgate.net/publication/255222574_Water_Use_in_Parabolic_Trough_Power_Plants_Summary_Results_from_WorleyParsons'_Analyses/citation/download

138 https://www.constructafrica.com/news/amea-power-fsd-partnership-power-djibouti-30mwp-solar-pv-plant

Tableau 11 – Mesures d'adaptation proposées à Djibouti, d'après la vue d'ensemble des risques climatiques dans le scénario le plus pessimiste (RCP 8.5).

Type de risque climatique	Risque climatique	Niveau de risque	Mesures d'adaptation proposées		
			Implantation et construction	**Conception et ingénierie**	**Exploitation et entretien**
Liés à la température	Vagues de chaleur		• Envisager l'emplacement du projet en fonction de la perte potentielle d'efficacité énergétique due à des conditions de température extrêmes. • *Réseau de transport et de distribution :* • Sélectionner des câbles de transport ayant une température nominale appropriée en fonction des conditions locales actuelles et prévues.	• Modéliser l'effet potentiel de la variabilité de la température sur la performance de la centrale/du système solaire. • Veiller à ce que la conception et l'installation de la centrale/du système solaire (panneaux ou capteurs solaires photovoltaïques, onduleurs, sous-stations, système de refroidissement, systèmes de batteries, câbles de transport, etc.) tiennent compte des conditions environnementales locales prévues (température, pression atmosphérique, humidité, conditions de vent, etc.) • *Réseau de transport et de distribution :* • Éviter de concevoir des réseaux de distribution trop longs afin de réduire l'exposition à des conditions extrêmes entraînant des pertes d'énergie.	• Ventiler mécaniquement les salles des batteries et des onduleurs (par exemple, installer des ventilateurs ou des climatiseurs pour un refroidissement forcé) afin de réduire l'impact des températures élevées. • Veiller à l'entretien et au fonctionnement adéquats des bâtiments électriques ventilés mécaniquement afin de réduire les effets potentiels des températures élevées. • Assurer une surveillance constante des composants de la centrale/du système solaire afin de gérer les effets d'une chaleur élevée et persistante. Accorder une attention particulière aux courts-circuits potentiels au niveau des raccords de câbles. Ils sont généralement liés à une défaillance de l'isolation lors de variations extrêmes de la charge électrique et de la température.
Liés à l'eau	Fortes précipitations		• Évaluer si l'emplacement du système solaire est susceptible de subir des orages de grêle avec des grêlons de taille moyenne à grande (25-50 mm) afin de déterminer la pertinence de l'emplacement du projet (en particulier dans le sud). • Éviter les sites à proximité/à la topographie escarpée et aux sols à grains fins, conditions qui facilitent l'érosion du sol et une faible infiltration, augmentant ainsi le risque d'inondation et d'accumulation d'eau lors d'épisodes de fortes pluies.	• Concevoir et construire un système permanent de gestion des eaux pluviales conforme aux exigences nationales ou aux bonnes pratiques internationales. • Dans les régions soumises à de fortes tempêtes de grêle, utiliser des modules certifiés résistants à la grêle (norme IEC 61215). Outre un verre plus épais et/ou entièrement trempé, un module plus résistant à la grêle peut être conçu avec un cadre plus solide, des barres de soutien, une encapsulation plus épaisse et un système d'interconnexion de cellule à cellule renforcé.	• Assurer le fonctionnement et l'entretien réguliers et adéquats de tous les composants du système d'alerte précoce et des éléments de toute infrastructure d'atténuation des risques grise[139] ou verte[140] disponible. • Envisager l'adoption d'une police d'assurance couvrant la centrale contre les épisodes météorologiques extrêmes. • Concevoir un plan de protection/évacuation d'urgence pour les épisodes de fortes pluies (par exemple, des pluies de plus de 20-30 mm/h) afin d'éviter les problèmes de sécurité pour le personnel travaillant dans l'usine.
	Inondations		• Les systèmes solaires prévus doivent pouvoir compter sur des systèmes d'évacuation des eaux adéquats afin de résister à l'augmentation potentielle de la moyenne des précipitations annuelles. • Veiller à ce que les composants (boîtiers d'onduleurs, • les systèmes de stockage des batteries, les sous-stations, etc.)	• Veiller à ce que les boîtiers d'onduleurs, les systèmes de stockage des batteries et les sous-stations ne soient pas situés sur un cours d'eau à crue rapide. • Veiller à ce que des systèmes d'eaux pluviales publics adéquats soient installés pour éloigner les eaux de crue des panneaux solaires	• Veiller à l'entretien et au bon fonctionnement du système d'évacuation des eaux. • Veiller à ce que la végétation au sol à l'intérieur et autour des installations solaires soit maintenue basse pour permettre aux eaux de crue de passer librement.

139 Les infrastructures grises font référence aux approches traditionnelles élaborées par l'homme pour gérer l'eau et des risques. Pour atténuer les risques de glissement de terrain, les mesures d'infrastructure grise peuvent être les suivantes : utilisation d'agents chimiques pour renforcer les matériaux des pentes, installation de structures telles que des pieux et des murs de soutènement, injection de coulis dans les joints et les fissures des roches, détournement des trajectoires des débris et réacheminement des eaux de surface et des eaux souterraines.

140 L'infrastructure verte vise à restaurer l'environnement naturel à des fins de gestion de l'eau et des risques (par exemple, la (re)forestation ou l'ingénierie végétale pour prévenir et atténuer les risques de glissement de terrain).

			ne soient pas situés sur un cours d'eau à crue rapide, et/ou veiller à ce que des systèmes d'eaux pluviales publics adéquats soient installés pour éloigner les eaux de crue des panneaux solaires photovoltaïques et des fondations, afin d'éviter les inondations ou les accumulations d'eau.	photovoltaïques et des fondations, afin d'éviter les inondations ou les accumulations d'eau.	Concevoir un plan de protection/évacuation d'urgence pour les épisodes de fortes pluies (par exemple, des pluies de plus de 20-30 mm/h) afin d'éviter les problèmes de sécurité pour le personnel travaillant dans l'usine.
	Sécheresse Djibouti		• Si le système est conçu pour fonctionner dans des conditions de pénurie d'eau potentielle, le risque de sécheresse ne limiterait pas les zones d'implantation à Djibouti.	*Centrales solaires thermodynamiques :* • Les systèmes de refroidissement sec seront privilégiés à Djibouti en raison des limitations globales de l'approvisionnement en eau.	• Étudier la possibilité d'utiliser d'autres sources d'eau (par exemple, la collecte des eaux de pluie). • Le nettoyage à sec doit être envisagé sur l'ensemble du territoire.
	Élévation du niveau de la mer		• Établir des critères excluant la construction à moins de 100 m du rivage (idéalement 200 m au minimum) lorsque le risque d'inondation est plus élevé. • Éviter la construction de tout équipement solaire dans les zones susceptibles d'être affectées par l'élévation du niveau de la mer ou les ondes de tempête.	• Dans les zones présentant un risque occasionnel d'inondation, veiller à ce que les onduleurs et les batteries installés au sol soient posés sur une dalle de béton (c'est-à-dire entre 0,5 et 1 mètre au-dessus du niveau de la mer prévu) afin de les surélever au-delà des niveaux d'inondation anticipés. • Garantir la conformité aux règlementations internationales relatives aux niveaux de protection (protections contre les infiltrations[141] telles que la norme IP65) et anticorrosion afin d'éviter la corrosion due à l'infiltration de sel marin et à l'humidité[142] ou utiliser du mastic pour aquarium pour l'étanchéité des équipements (connecteurs électriques et boîtes de raccordement)[143]. Dans les zones périodiquement inondées, la norme IP67 pourrait protéger l'équipement contre une immersion de courte durée (1 mètre de hauteur).	• Dans le cas de centrales plus grandes, veiller au bon fonctionnement du système de surveillance de l'état de l'équipement. Ce dernier doit fournir des alertes précoces en cas de détérioration des conditions entraînant une défaillance ou de mauvaises performances de l'équipement. • Assurer des performances adéquates des opérations de contrôle et d'acquisition des données (SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition), y compris les contrôleurs logiques programmables (PLC) et les terminaux distants (RTU), qui acquièrent les informations requises et effectuent la surveillance à distance et basée sur l'action pour le système solaire.
Liés au vent	Tempêtes		• Veiller à ce que tous les appareils soient installés et construits conformément aux critères de conception (par exemple, vérifier le cadre et les boulons de fixation à l'aide d'une clé dynamométrique)	• Veiller à ce que la conception de la centrale tienne compte de la charge de vent maximale prévue pour la zone du projet (ce qui est particulièrement important pour les systèmes de panneaux solaires de toiture, plus vulnérables aux vents violents).	• Veiller à l'entretien adéquat des systèmes de protection contre la foudre et des systèmes d'alerte précoce. • Envisager l'adoption d'une police d'assurance couvrant la centrale contre les épisodes météorologiques extrêmes.

141 https://www.earthtechproducts.com/ip-rating-guide.html

142 https://vietnamenergy.vn/the-influence-of-salt-spray-and-high-humidity-environments-on-solar-pv-systems-27350.html

143 https://solartechadvisor.com/solar-panels-waterproof/

	Poussière de sable		• Concevoir le projet solaire afin qu'il résiste à la pénétration potentielle de sable dans les composants, et avec des procédures de nettoyage adéquates pour éviter l'encrassement. • Envisager la création d'une zone tampon de végétation qui ferait office de mur brise-vent, située au-delà des limites de la centrale/du système solaire photovoltaïque.	• Assurer la conformité avec les réglementations internationales sur les niveaux de protection (protections contre les infiltrations telles que IP65) afin d'éviter l'infiltration de poussière[144].	• Le nettoyage à l'eau est le meilleur moyen de maintenir l'efficacité du fonctionnement des modules solaires. • L'utilisation d'outils de nettoyage à sec manuels pour les modules solaires ou le nettoyage à sec (semi-)automatisé et robotisé des panneaux solaires dans les grandes centrales solaires permet le nettoyage des modules solaires sans eau.
Liés aux masses solides	Glissements de terrain		• Entreprendre une analyse géographique et géologique pour identifier les zones potentiellement exposées aux glissements de terrain (analyse de susceptibilité aux glissements de terrain) où l'installation de centrales/systèmes solaires devrait être complètement proscrite. • Éviter l'installation de centrales/systèmes solaires dans les zones géologiquement instables où le risque de glissement de terrain est élevé en cas de fortes précipitations.	• Mettre en place des systèmes d'alerte précoce basés sur la surveillance des conditions du sol telles que la déformation des roches et des sols, le déplacement des pentes et le niveau des nappes phréatiques. • Utiliser des méthodes de prévention basées sur des infrastructures vertes telles que le (re)boisement ou l'ingénierie végétale, une méthode de prévention et d'atténuation des risques de glissement de terrain par la plantation d'arbres en fonction de la typologie des plantes et de l'altitude des collines. • Utiliser des méthodes de prévention basées sur des infrastructures grises telles que la modification de la géométrie des pentes, l'utilisation d'agents chimiques pour renforcer les matériaux des pentes, l'installation de structures telles que des pieux et des murs de soutènement, l'injection de coulis dans les joints et les fissures des roches, le détournement des trajectoires des débris et le réacheminement des eaux de surface et des eaux souterraines.	• Assurer le fonctionnement et l'entretien réguliers et adéquats de tous les composants du système d'alerte précoce et des éléments de toute infrastructure d'atténuation des risques grise ou verte disponible. •

144 https://vietnamenergy.vn/the-influence-of-salt-spray-and-high-humidity-environments-on-solar-pv-systems-27350.html



GLOBAL
CENTER ON
ADAPTATION

ANTOINE PLATEKADE 1006
3072 ME ROTTERDAM
THE NETHERLANDS
+31(0)88-088-6800
WWW.GCA.ORG