

# ÉTUDE DE PREFAISABILITE POUR L'INSTALLATION DE PANNEAUX SOLAIRES EN TOITURE DES BATIMENTS PUBLICS DE MORONI

Étude de pré faisabilité sur l'utilisation de systèmes photovoltaïques sur les toits des bâtiments publics aux Comores, avec une connexion au réseau, et définition d'une politique de Net Metering

Union des Comores

## INFORMATION DOCUMENTAIRE

Projet	Étude de pré faisabilité sur l'utilisation de systèmes photovoltaïques sur les toits des bâtiments publics aux Comores, avec une connexion au réseau, et définition d'une politique de Net Metering.
Contrat	UNEP/2024/33
Titre	Étude de pré faisabilité pour l'installation de panneaux photovoltaïques sur les toits des bâtiments publics de Moroni
Référence :	1139-COM-LIV-07

### Historique des versions

Version	Date	Émis par	Statut et commentaires
0.1	02-02-2026		Version initiale
0.2	12-03-2026		Version finale

## AVIS IMPORTANT ET CLAUSE DE NON-RESPONSABILITÉ

Ce document est destiné à l'usage exclusif du Client tel que spécifié sur la première page à qui il est adressé et qui a conclu un accord écrit avec MRV Énergie Conseils Inc. ou une société affiliée émettant ce document (« MRV Énergie »). Ni MRV Énergie ni aucune société affiliée n'assument de responsabilité envers des tiers (autres que le client) en vertu de tout acte, omission ou défaut, que ce soit contractuel, délictuel, y compris la négligence, ou autrement. Aucune société affiliée autre que MRV Énergie ne sera responsable de toute perte ou dommage résultant de l'activité de MRV Énergie, de ses sociétés affiliées, ou de leurs préposés, sous-traitants ou agents. Ce document doit être lu dans son intégralité et est soumis à toutes les hypothèses et réserves qui y sont exprimées, ainsi que dans toute autre communication pertinente. Il peut contenir des données techniques détaillées destinées à être utilisées par des personnes possédant l'expertise requise dans ce domaine.

Ce document est soumis au droit d'auteur et ne peut être reproduit et diffusé qu'en conformité avec la classification du document et les conditions associées stipulées ou mentionnées dans ce document ou dans l'accord écrit avec le client. Une classification de document permettant au client de redistribuer ce document n'implique pas que MRV Énergie ait une quelconque responsabilité envers tout destinataire autre que le client.

Ce document est basé sur les informations concernant les dates et périodes mentionnées. Il ne garantit pas l'immuabilité des données. Sauf accord écrit explicite pour la vérification des informations, MRV Énergie décline toute responsabilité en cas d'informations incorrectes fournies par le Client ou un tiers, ainsi que pour les conséquences de ces données, qu'elles soient incluses dans ce document ou non.

Toutes les données, prévisions, estimations ou prédictions sont sujettes à des facteurs qui ne sont pas tous inclus dans la probabilité et les incertitudes mentionnées dans ce document, et aucune garantie de résultat n'est donnée dans ce document.

## RÉSUMÉ EXÉCUTIF

L'Union des Comores fait face à des contraintes énergétiques structurelles marquées par une forte dépendance aux centrales thermiques au diesel, des coûts élevés de production de l'électricité, une vulnérabilité du réseau et des interruptions fréquentes de service. Dans ce contexte, le déploiement du solaire photovoltaïque sur les bâtiments publics constitue un levier stratégique pour réduire les dépenses publiques liées à l'électricité, renforcer la sécurité énergétique et accompagner la transition vers un mix énergétique plus durable.

La présente étude de préfaisabilité, réalisée pour le compte du Centre et Réseau de Technologies Climatiques (CTCN) du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), vise à évaluer le potentiel photovoltaïque des bâtiments publics de la ville de Moroni, à analyser leurs performances énergétiques et économiques, et à proposer une priorisation des sites.

La méthodologie adoptée combine une analyse géospatiale sous QGIS, des visites de reconnaissance sur site, des estimations de puissance photovoltaïque installable et des simulations énergétiques réalisées à l'aide du logiciel PVsyst. Cette démarche a permis d'identifier et d'analyser 19 bâtiments publics, présentant des surfaces de toiture exploitables variables et un potentiel photovoltaïque globalement favorable.

Les puissances photovoltaïques installables estimées varient d'environ 13 kWc à plus de 560 kWc selon les bâtiments. Les productions annuelles simulées sont cohérentes avec le fort potentiel solaire de la zone de Moroni, tandis que les fractions solaires atteignables présentent une variabilité significative, principalement liée aux profils de consommation électrique propres à chaque site.

Une sélection technico-énergétique a ensuite été réalisée afin de hiérarchiser les bâtiments avant l'analyse économique et financière. Cette étape repose sur une grille multicritère intégrant quatre critères : fraction solaire atteignable, puissance photovoltaïque installable, état général du bâtiment et de la toiture, ainsi que conditions d'accès et de sécurité. Chaque critère a été noté sur une échelle de 0 à 2, pour un score maximal de 8 points par bâtiment. Sur la base de cette grille, deux bâtiments ont été écartés en raison de contraintes techniques et énergétiques significatives : Le Service Immigration et le Ministère de la Jeunesse et des Sports, tandis que 17 bâtiments ont été retenus pour la poursuite de l'analyse économique et financière.

Sur la base d'hypothèses de coûts standards adaptées à un niveau de préfaisabilité, une analyse économique préliminaire a été menée. Le CAPEX estimé varie d'environ 25 000 € pour les installations de petite puissance à plus de 670 000 € pour les grandes toitures à fort potentiel. Les OPEX, considérés comme proportionnels au CAPEX et homogènes entre bâtiments, se situent typiquement dans une plage comprise entre 2 000 € et 21 000 € par an.

L'analyse financière met en évidence une hétérogénéité marquée des performances économiques entre les bâtiments étudiés, confirmant la nécessité d'une approche de priorisation différenciée. Les coûts actualisés de l'énergie photovoltaïque (LCOE) se situent globalement entre 0,09 et 0,3 €/kWh, avec des valeurs actuelles nettes (VAN) positives pour la majorité des sites présentant un potentiel significatif.

Sur la base de règles d'exclusion financière : VAN négative ou nulle, TRI inférieur au taux d'actualisation retenu, temps de retour non atteignable, deux bâtiments supplémentaires, la Brigade Mixte et le Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Artisanat ont été écartés en raison de leur non-rentabilité, ramenant le périmètre à 15 bâtiments pour la phase de priorisation financière.

Une grille de notation financière multicritère, fondée sur trois indicateurs clés LCOE, VAN et temps de retour simple, chacun noté sur une échelle de 1 à 3, a permis de classer les bâtiments en priorités financière élevée, moyenne ou faible. À l'issue de ce processus, 12 bâtiments ont été retenus, représentant le meilleur compromis entre faisabilité technique, performance énergétique et viabilité économique à l'échelle du programme :

- Palais du Peuple
- Ministère de la Justice, des Affaires Islamiques et de la Fonction Publique
- Ministère des Postes, des Télécommunications et de l'Économie numérique
- Tribunal de première instance de Moroni
- Cabinet ministériel
- Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Intégration économique / Vice-présidence – Commissariat au Plan
- Commissariat Central de la Police Nationale
- Ministère de l'Éducation nationale
- Ministère de l'Énergie de l'Eau et des Hydrocarbures (MEEH)
- Ministère de l'Éducation Régionale
- Ministère de l'Aménagement du territoire
- Ministère de l'Environnement / Direction de l'Environnement et des forêts

Les bâtiments classés en priorité faible, non retenus à ce stade, pourront être réexaminés lors de phases ultérieures, sous réserve d'optimisations techniques, d'un regroupement de projets ou d'une évolution du cadre économique et réglementaire.

Les bâtiments finalement retenus pour le déploiement photovoltaïque représentent une puissance totale installable d'environ 2,17 MWc, permettant une production annuelle estimée à près de 3,99 GWh d'électricité solaire.

Le coût total d'investissement du programme (CAPEX) est estimé à environ 2,84 millions d'euros.

Sur la base d'un tarif moyen de l'électricité de 0,24 €/kWh, les économies annuelles agrégées pour les bâtiments publics étudiés sont estimées à environ 956 400 euros par an.

Sur le plan environnemental, ces installations permettraient d'éviter environ 2 790 tonnes de CO<sub>2</sub> par an, soit près de 69 700 tonnes de CO<sub>2</sub> sur une durée de vie estimée de 25 ans, contribuant ainsi à la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles et aux objectifs de transition énergétique du pays.

En conclusion, cette étude de pré faisabilité démontre que le déploiement de systèmes photovoltaïques en toiture sur les bâtiments publics de Moroni est techniquement réalisable, économiquement pertinent et environnementalement bénéfique. Le périmètre du programme demeure évolutif et pourra être élargi lors des phases ultérieures, notamment dans le cadre des études de faisabilité détaillées, en fonction des priorités des autorités comoriennes et des financements disponibles. Ce programme constitue ainsi une solution crédible pour réduire la dépendance au diesel, renforcer la résilience énergétique des institutions publiques et soutenir la transition énergétique de l'Union des Comores.

## TABLE DES MATIÈRES

Étude de Pré faisabilité pour l'Installation de panneaux solaires en toiture des Bâtiments Publics de Moroni .....	1
Information Documentaire .....	ii
Avis Important et Clause de Non-Responsabilité .....	iii
Résumé Exécutif .....	4
Table des Matières.....	6
Liste des Éléments Graphiques.....	7
Glossaire.....	10
1 Introduction .....	11
2 Méthodologie .....	12
3 Analyse géospatiale de la ville de Moroni .....	13
4 Sélection et analyse préliminaire des bâtiments publics .....	25
5 Installation solaire photovoltaïque .....	42
6 Plan de raccordement des systèmes photovoltaïques.....	52
7 Analyse du potentiel photovoltaïque des bâtiments .....	53
8 Estimation des coûts des installations photovoltaïques.....	63
9 ANALYSE FINANCIÈRE.....	68
10 Bâtiments retenus.....	79
11 RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE CO <sub>2</sub> .....	83
12 Fiches techniques par bâtiment.....	86
13 EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS PUBLICS .....	99
14 EXPLOITATION ET MAINTENANCE DES INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES... ..	100
15 RECOMMANDATIONS TECHNIQUES.....	102
16 Impacts attendus du déploiement photovoltaïque à Moroni .....	103
CONCLUSION .....	105
Annexes .....	107

## LISTE DES ÉLÉMENTS GRAPHIQUES

### LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1— Irradiation solaire globale horizontale mensuelle à Moroni (kWh/m <sup>2</sup> /mois)	20
Tableau 2— Caractéristiques géospatiales des bâtiments publics ministériels identifiés	29
Tableau 3-Caractéristiques des toitures des bâtiments publics validées	31
Tableau 4 - Surfaces exploitables et consommation électrique des bâtiments publics analysés	34
Tableau 5-Registre des contraintes, opportunités et actions de vérification des bâtiments publics sélectionnés	38
Tableau 6- Comparaison cellules mono-verres et bi-verres	46
Tableau 7-Synthèse des pertes énergétiques prises en compte dans les simulations PVsyst	56
Tableau 8-Résultats des simulations photovoltaïques sous PVsyst par bâtiment	58
Tableau 9- Grille de sélection technico-énergétique et règles de notation retenues	61
Tableau 10-Résultats de la grille de sélection technico-énergétique des bâtiments publics	62
Tableau 11-Estimation détaillée des coûts d'investissement (CAPEX) par bâtiment	64
Tableau 12-Estimation des coûts d'exploitation et de maintenance (OPEX) par bâtiment	66
Tableau 13- indicateurs financiers	71
Tableau 14 - Analyse de sensibilité du temps de retour simple à une variation du CAPEX ( $\pm 10\%$ )	74
Tableau 15-Grille de notation financière et seuils d'évaluation retenus	77
Tableau 16-Résultats de la priorisation financière des bâtiments retenus	78
Tableau 17-Caractéristiques énergétiques et financières des bâtiments retenus	80
Tableau 18-Synthèse des indicateurs énergétiques et économiques du programme photovoltaïque	82
Tableau 19-Émissions de CO <sub>2</sub> évitées par bâtiment	84
Tableau 20 - Coût d'investissement par tonne de CO <sub>2</sub> évitée pour les bâtiments retenus	85

## LISTE DES FICHES TECHNIQUES

Fiche technique 1 - Palais du Peuple	87
Fiche technique 2-Ministère de la justice, des Affaires Islamiques et de la Fonction Publique	87
Fiche technique 3- Ministère des Postes, des Télécommunications et de l'Économie numérique	89
Fiche technique 4-Tribunal de première instance	90
Fiche technique 5-Cabinet Ministériel	91
Fiche technique 6-Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Intégration économique	92
Fiche technique 7- Ministère de l'Énergie de l'Eau et des Hydrocarbures (MEEH)	93
Fiche technique 8-Ministère de l'Éducation nationale	94
Fiche technique 9- Commissariat Centrale de la Police Nationale	95
Fiche technique 10-Ministère de l'Aménagement du territoire	96
Fiche technique 11-Ministère de l'Éducation Régionale	97
Fiche technique 12-Ministère de l'Environnement / Direction de l'Environnement et des forêts	98

## LISTE DES FIGURES

Figure 1— Carte physique de l'Union des Comores.....	14
Figure 2— Localisation de Moroni sur l'île de Grande Comore .....	15
Figure 3— Emprise urbaine de Moroni et des localités périphériques .....	16
Figure 4— Carte topographique de Grande Comore (source : OpenStreetMap / Elevation API). 17	
Figure 5— Rayonnement Solaire global horizontal (GHI) à Grande Comore (The World Bank – Global Solar Atlas).....	18
Figure 6— Potential Photovoltaïque PVOUT (The World Bank – Global Solar Atlas). .....	19
Figure 7 - Comparaison de l'irradiation solaire mensuelle à Moroni.....	21
Figure 8— Carte d'élévation de Moroni – FloodMap .....	23
Figure 9 – Emprise des bâtiments de Moroni – Données OSM.....	24
Figure 10 — Exemple de délimitation des surfaces de toitures pour l'estimation des surfaces exploitables : ministère de l'Intérieur et Tribunal de première instance de Moroni. ....	26
Figure 11— Ministère des Affaires étrangères et de la Coopération internationale de Moroni ...	27
Figure 12—Tribunal de première instance de Moroni.....	27
Figure 13— Ministère de l'Energie de l'Eau et des Hydrocarbures (MEEH) .....	27
Figure 14—Ministère de l'éducation nationale de Moroni .....	28
Figure 15 — Localisation des principaux bâtiments ministériels de Moroni (source : Google Earth).....	29
Figure 16 - Principe de fonctionnement d'une installation photovoltaïques .....	43
Figure 17-Cellules mono et poly cristalline .....	44
Figure 18-Module bifacial.....	46
Figure 19- Onduleur de chaîne (string).....	49
Figure 20-Raccordement BT en autoconsommation avec vente du surplus.....	53
Figure 21– Illustration du principe d'implantation de modules photovoltaïques sur toiture – exemple du Tribunal de première instance de Moroni .....	54

## GLOSSAIRE

<b>CTCN</b>	Centre et Réseau des Technologies Climatiques (ONU).
<b>UNEP</b>	Programme des Nations Unies pour l'Environnement.
<b>GHI</b>	Global Horizontal Irradiance : irradiation solaire reçue sur une surface horizontale.
<b>GTI</b>	Global Tilted Irradiance : irradiation solaire reçue sur un plan incliné.
<b>PV</b>	Photovoltaïque : technologie de conversion de la lumière solaire en électricité.
<b>PVOUT</b>	Production photovoltaïque simulée pour 1 kWp installé (kWh/kWp/an).
<b>OSM</b>	OpenStreetMap : base de données cartographiques collaborative.
<b>MNT / SRTM</b>	Modèle Numérique de Terrain dérivé des données NASA.
<b>PVsyst</b>	Logiciel de modélisation et de dimensionnement des systèmes photovoltaïques.
<b>SIG / GIS</b>	Systèmes d'Information Géographique utilisés pour l'analyse spatiale.
<b>BT</b>	Basse Tension.
<b>CAPEX</b>	Dépenses d'investissement (Capital Expenditure).
<b>OPEX</b>	Dépenses d'exploitation (Operational Expenditure).
<b>FS</b>	Fraction solaire.
<b>IAM</b>	Incidence Angle Modifier – Facteur de modification de l'angle d'incidence.
<b>LID</b>	Light Induced Degradation – Dégradation induite par la lumière.
<b>EMS</b>	Système de gestion de l'énergie.
<b>G.E.</b>	Groupe électrogène.
<b>Net Metering</b>	Mécanisme d'injection et de compensation du surplus d'électricité photovoltaïque.
<b>LCOE</b>	Coût actualisé de l'énergie
<b>VAN</b>	Valeur actuelle nette
<b>TRI</b>	Taux de rentabilité interne
<b>ROI</b>	Retour sur investissement
<b>IEA</b>	International Energy Agency

## 1 INTRODUCTION

### 1.1 CONTEXTE DU PROJET

L'Union des Comores fait face à des défis structurels persistants en matière d'approvisionnement en électricité. Le système électrique national repose majoritairement sur des centrales thermiques alimentées au diesel, caractérisées par des coûts de production élevés, des rendements limités et une forte vulnérabilité aux contraintes d'approvisionnement en carburant. Ces fragilités se traduisent par des délestages fréquents, affectant directement la continuité des services publics et le fonctionnement des institutions de l'État.

Dans ce contexte, le développement des énergies renouvelables, et en particulier du solaire photovoltaïque, constitue un levier stratégique pour améliorer la sécurité énergétique du pays, réduire la dépendance aux combustibles fossiles et maîtriser les dépenses publiques liées à l'électricité. Le potentiel solaire élevé de l'archipel, combiné à la disponibilité de surfaces de toiture sur de nombreux bâtiments publics, offre des conditions favorables au déploiement de systèmes photovoltaïques en autoconsommation raccordés au réseau.

C'est dans ce cadre que le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), en collaboration avec le Centre et Réseau des Technologies Climatiques (CTCN), a mandaté MRV Énergie pour accompagner les autorités comoriennes dans l'évaluation du potentiel photovoltaïque des bâtiments publics de la ville de Moroni. Cette mission, réalisée dans le cadre du contrat UNEP/2024/33, vise à fournir une base technique, énergétique et économique solide pour orienter la prise de décision et préparer la mise en œuvre progressive d'une politique nationale de solaire en toiture, incluant à terme des mécanismes de type Net Metering.

### 1.2 OBJECTIF DU RAPPORT

La présente étude de pré faisabilité a pour objectif principal d'évaluer la faisabilité technique, énergétique et économique de l'installation de systèmes photovoltaïques sur les toits des bâtiments publics de la ville de Moroni, en vue d'identifier les sites les plus pertinents pour une future phase de faisabilité détaillée.

Plus spécifiquement, l'étude vise à :

- Identifier les bâtiments publics présentant un potentiel d'accueil pour des installations photovoltaïques ;
- Évaluer les surfaces de toiture exploitables et leurs caractéristiques (type de toiture, inclinaison, état général, obstacles et ombrage) ;
- Estimer la puissance photovoltaïque maximale installable par bâtiment ;
- Simuler la production énergétique annuelle attendue à l'aide du logiciel PVsyst ;
- Analyser les indicateurs de performance énergétique, notamment la fraction solaire ;
- Réaliser une préanalyse économique incluant des ordres de grandeur de CAPEX, OPEX, coût du kWh, VAN et TRI ;
- Établir une priorisation des bâtiments afin d'orienter efficacement les investissements vers les sites à plus fort potentiel lors de la phase de faisabilité détaillée.

## 2 MÉTHODOLOGIE

L'approche méthodologique adoptée repose sur une analyse progressive et structurée, visant à identifier les bâtiments publics pertinents, à estimer leur potentiel photovoltaïque en toiture, et à réaliser une première évaluation technique, énergétique et économique au niveau de la préféabilité. La démarche combine des outils géospatiaux, des observations terrain et des simulations énergétiques, et se décline en cinq étapes complémentaires, décrites ci-après.

- Étape 1 — Analyse géospatiale (QGIS) : La première étape a consisté à réaliser une analyse géospatiale à l'aide du logiciel QGIS, à partir d'images satellites à haute résolution (Google Satellite). Cette analyse visait à identifier les toitures susceptibles d'accueillir des installations photovoltaïques et à constituer une première liste de bâtiments publics potentiels. Les travaux réalisés dans cette phase comprennent notamment :
  - La digitalisation des surfaces de toiture exploitables ;
  - L'identification visuelle des obstacles en toiture ;
  - L'analyse de l'orientation, de l'environnement proche et des ombrages potentiels.

Cette première sélection repose exclusivement sur des données géospatiales et constitue une base de travail préliminaire.

- Étape 2 — vérification terrain ciblée : Des visites de vérification ont été réalisées sur site afin de confronter les résultats de l'analyse géospatiale aux conditions observables sur le terrain, notamment en ce qui concerne les surfaces de toiture accessibles, la présence d'obstacles visibles, l'état apparent des toitures et les conditions générales d'accès.
- Étape 3 — Détermination de la surface utile et de la puissance installable À partir des surfaces exploitables identifiées, une estimation de la surface photovoltaïque utile et de la puissance installable maximale par bâtiment a été réalisée. Cette étape permet de caractériser le potentiel physique des sites et de préparer les simulations énergétiques.
- Étape 4 — Simulation énergétique préliminaire (PVsyst) : Des simulations PVsyst ont été réalisées afin d'estimer la production annuelle, le performance ratio (PR), la fraction solaire et les principales

pertes du système, en configuration raccordée au réseau, conformément au niveau de préfaisabilité de l'étude.

- Étape 5 — Analyse économique et financière comparative : Une analyse économique et financière préliminaire a été réalisée afin d'évaluer la pertinence relative des projets et de prioriser les bâtiments. Elle repose sur des hypothèses standard de CAPEX et d'OPEX, les résultats des simulations énergétiques et l'estimation des niveaux d'autoconsommation. Les principaux indicateurs analysés sont le coût actualisé de l'énergie (LCOE), la valeur actuelle nette (VAN) et le temps de retour simple, utilisés à des fins comparatives au niveau de la préfaisabilité

À ce stade de la préfaisabilité, l'analyse vise à fournir des ordres de grandeur fiables et des indicateurs comparatifs technico-économiques. Elle permet d'évaluer la cohérence entre le potentiel énergétique, les performances économiques et les contraintes techniques des projets, et de structurer une priorisation progressive des bâtiments en vue des phases ultérieures et de la préparation des décisions d'investissement et de financement.

### 3 ANALYSE GEOSPATIALE DE LA VILLE DE MORONI

#### 3.1 LOCALISATION ET CONFIGURATION GENERALE

L'Union des Comores est un archipel volcanique situé dans l'océan Indien, entre les côtes de la Tanzanie, du Mozambique et de Madagascar, entre 43° et 45,5° de longitude Est et 10,5° et 13,5° de latitude Sud <sup>1</sup>

Le pays est formé de quatre îles, dont trois sont administrées par l'Union des Comores et une, Mayotte, placée sous administration française :

- Grande Comore (Ngazidja) : 1 148 km<sup>2</sup>
- Mohéli (Mwali) : 290 km<sup>2</sup>
- Anjouan (Ndzouani) : 424 km<sup>2</sup>
- Mayotte (Maoré) : 375 km<sup>2</sup>

Ces îles sont séparées par des fosses sous-marines de plus de 3 500 m de profondeur, avec des distances variantes entre 30 et 40 km. Cette configuration géographique confère à l'archipel une topographie contrastée et un isolement marqué, influençant directement la logistique, la connectivité électrique et la planification énergétique du territoire.

---

<sup>1</sup> Source : ministère de l'Agriculture, de la Pêche, de l'Environnement, du Tourisme et de l'Artisanat ; Évaluation des Besoins Technologiques (TNA), Programme UNEP/GEF, 2022.

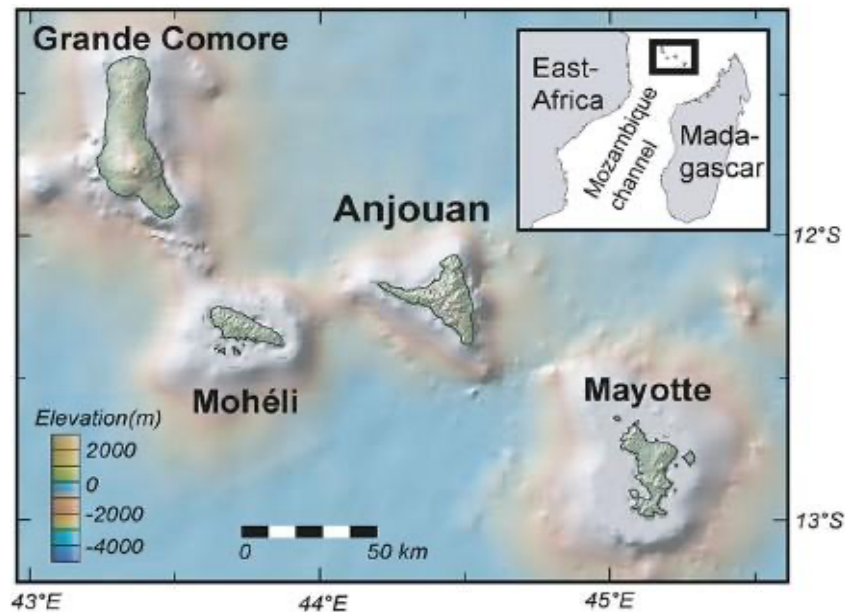


Figure 1— Carte physique de l'Union des Comores

Sur le plan énergétique, l'Union des Comores fait face à plusieurs défis :

- Un accès partiel à l'électricité, particulièrement en dehors de la capitale ;
- Une forte dépendance aux combustibles fossiles importés ;
- Des infrastructures vieillissantes entraînant des pertes importantes sur le réseau ;

Cette dépendance au pétrole rend le pays vulnérable aux fluctuations des prix internationaux du carburant et limite son développement économique.

Dans ce contexte, le déploiement de systèmes photovoltaïques (PV) en toiture sur les bâtiments publics apparaît comme une solution stratégique permettant de :

- Diversifier le mix énergétique national ;
- Réduire les émissions de gaz à effet de serre ;
- Renforcer la résilience du réseau électrique ;
- Améliorer l'autonomie énergétique des institutions publiques et des services essentiels.

### 3.2 PRÉSENTATION DE LA VILLE DE MORONI

La ville de Moroni, capitale de l'Union des Comores, est située sur la côte ouest de l'île de Grande Comore (Ngazidja), au pied du volcan Karthala, point culminant de l'archipel (2 361 m). Elle est localisée aux coordonnées géographiques 11,7172° de latitude Sud et 43,2473° de longitude Est, pour une altitude moyenne d'environ 29 m au-dessus du niveau de la mer. Moroni s'étend sur une bande littorale d'environ 8 km de long et 2 à 3 km de large, entre Itsandra Mdjini au nord et Mkazi au sud. Son développement urbain suit une logique côtière, fortement contrainte par la topographie volcanique, le relief accidenté et la proximité immédiate de l'océan Indien.

Afin de mieux comprendre les caractéristiques physiques de la capitale et son organisation spatiale, il est nécessaire de la replacer dans son contexte géographique immédiat. La carte ci-

dessous présente la localisation de Moroni au sein de l'île de Grande Comore, en mettant en évidence la structure topographique de l'île, notamment la présence du massif du Karthala, ainsi que la position littorale de la ville. Cette lecture spatiale permet d'introduire les particularités géographiques qui influencent le développement urbain et les possibilités d'aménagement énergétique.



Figure 2— Localisation de Moroni sur l'île de Grande Comore

Ces éléments géographiques structurants influencent directement le développement urbain de Moroni : la présence du volcan Karthala limite l'expansion vers l'est, tandis que la bande littorale reste la zone la plus propice à l'urbanisation et à l'accueil d'infrastructures. Cette configuration resserrée concentre les bâtiments administratifs dans une zone relativement plane, bien exposée au soleil et proche des axes de transport, ce qui constitue un avantage notable pour l'implantation de systèmes photovoltaïques en toiture.

### 3.3 MORPHOLOGIE URBAINE DE MORONI

La capitale comorienne s'organise en un tissu urbain dense, concentré autour du centre historique et administratif. Les zones littorales accueillent la majorité des infrastructures publiques, commerciales et résidentielles, tandis que les pentes vers l'est deviennent rapidement plus végétalisées et moins accessibles.

La figure 3 - illustre la morphologie urbaine de Moroni et de ses localités périphériques. On y observe les principaux quartiers : Itsandra Mdjini au nord, Salimani au centre, et Mkazi au sud. Cette répartition linéaire le long de la côte traduit un développement contraint par la topographie volcanique et la disponibilité limitée d'espaces plats.

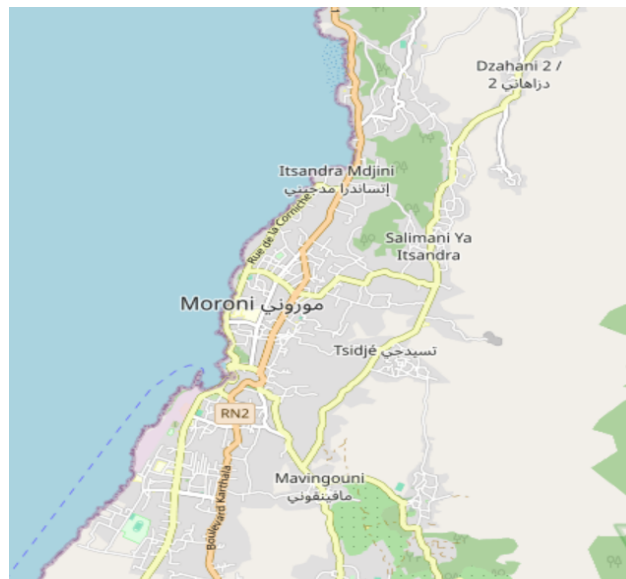


Figure 3– Emprise urbaine de Moroni et des localités périphériques

La structure urbaine de Moroni, étirée le long de la côte et densifiée autour du noyau administratif, favorise une exposition solaire dégagée des toitures publiques et limite les ombrages latéraux. La densité bâtie facilite également les interventions techniques (accès, maintenance, raccordement), ce qui renforce la pertinence d'équiper les bâtiments publics situés au cœur de la capitale.

### 3.4 TOPOGRAPHIE ET ALTIMETRIE

L'île de Grande Comore est d'origine volcanique et présente des variations altitudinales marquées, principalement liées à la présence du volcan Karthala. Le massif volcanique occupe une large partie du territoire, avec des altitudes culminant à plus de 2 300 mètres, tandis que les zones côtières présentent des altitudes faibles et des pentes limitées.

La ville de Moroni est située sur la façade occidentale de l'île, en zone littorale, à des altitudes généralement comprises entre 0 et 150 mètres. Cette topographie relativement plane constitue un contexte favorable à l'implantation de systèmes photovoltaïques en toiture, en limitant les contraintes liées à la pente, à l'accessibilité et à la stabilité des structures.

La Figure 4 illustre les variations d'altitude sur l'île de Grande Comore, mettant en évidence la localisation de Moroni dans une zone peu accidentée, bien adaptée aux installations solaires sur bâtiments existants.

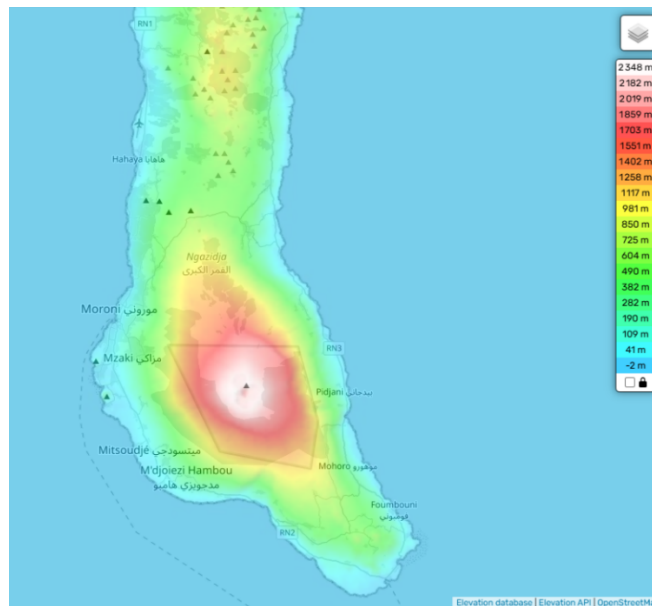


Figure 4— Carte topographique de Grande Comore (source : OpenStreetMap / Elevation API).

D'un point de vue photovoltaïque, la configuration topographique de Moroni présente plusieurs avantages :

- Absence d'ombrage topographique significatif lié au relief volcanique,
- Facilité d'accès aux toitures pour l'installation et la maintenance,
- Conditions favorables à une implantation homogène des systèmes sur les bâtiments publics.

Ces caractéristiques confirment la pertinence du choix de Moroni comme zone prioritaire pour le développement de projets photovoltaïques en toiture.

### 3.5 RESSOURCE SOLAIRE ET POTENTIEL PHOTOVOLTAÏQUE

La ville de Moroni bénéficie d'un ensoleillement élevé et stable tout au long de l'année, ce qui en fait un site particulièrement adapté au développement de systèmes photovoltaïques en toiture. Le rayonnement solaire global horizontal (GHI), exprimé en kWh/m<sup>2</sup>/an, constitue l'indicateur principal pour évaluer la quantité d'énergie solaire disponible et pour dimensionner correctement les installations.

La Figure 5 présente la moyenne à long terme du GHI sur l'île de Grande Comore pour la période 1999–2018, issue du Global Solar Atlas (World Bank & Solargis). Ces données confirment que Moroni dispose d'un gisement solaire largement favorable au déploiement de centrales photovoltaïques.



Figure 5— Rayonnement Solaire global horizontal (GHI) à Grande Comore (The World Bank – Global Solar Atlas).

La Figure 6 illustre le potentiel photovoltaïque (PVOUT), exprimé en kWh/kWp/an, qui correspond à la production annuelle attendue pour 1 kWp de panneaux solaires installés en conditions optimales.



Figure 6— Potential Photovoltaïque PVOUT (The World Bank – Global Solar Atlas).

Selon ces données, le potentiel énergétique à Moroni est compris entre 1534 et 1680 kWh/kWp/an, soit un niveau supérieur à la moyenne mondiale (1300 kWh/kWp/an). Le PVOUT constitue ainsi un indicateur précieux pour estimer la production annuelle et confirmer la rentabilité potentielle des installations en toiture.

Dans l'ensemble, les cartes GHI et PVOUT démontrent que Moroni bénéficie d'une ressource solaire abondante, stable et parfaitement compatible avec la mise en place de systèmes photovoltaïques performants sur les bâtiments publics étudiés.

Afin d'obtenir une estimation robuste et représentative de la ressource solaire locale, trois bases de données reconnues dans les études photovoltaïques ont été comparées:

- Meteonorm 8 – base de données climatique issue d'une combinaison de mesures au sol, de données satellitaires et de modèles climatologiques, largement utilisée dans les études de faisabilité et intégrée nativement dans PVsyst 8

- PVGIS-SARAH3 – base de données européenne de référence, couvrant l’Afrique avec une résolution élevée.
- NASA-SSE – base de données satellitaire historique de la NASA, largement utilisée dans les études énergétiques.
- NASA-POWER (RETScreen) - base de données satellitaire plus récente de la NASA, accessible notamment à travers le logiciel RETScreen et utilisée en Union des Comores.

Le tableau 1 suivant présente l’irradiation mensuelle moyenne à Moroni (kWh/m<sup>2</sup>/mois) issue de ces quatre sources. Les valeurs RETScreen ont été calculées à partir du rayonnement solaire quotidien fourni par NASA-POWER, puis converties en irradiation mensuelle:

Tableau 1— Irradiation solaire globale horizontale mensuelle à Moroni (kWh/m<sup>2</sup>/mois)

Mois	Meteonorm 8	PVGIS-SARAH3	NASA-SSE	NASA-POWER (RETScreen)
Janvier	189,7	154	167,3	186,9
Février	172,5	151,7	157,5	166,9
Mars	192	149,9	182	193,4
Avril	175,7	139	155,8	176,7
Mai	166,6	134,4	157,4	169,9
Juin	148,3	111,8	145,3	158,4
Juillet	155,6	106,9	154,3	164
Août	182,2	129,7	169,9	184,8
Septembre	187,7	131,3	184	200,7
Octobre	202,2	145,9	207,2	208,6
Novembre	211,7	171,9	209,9	208,5
Décembre	222,5	182,1	206,3	194,7
Total	2 207	1 709	2 092	2 214
Mois	Meteonorm 8	PVGIS-SARAH3	NASA-SSE	NASA-POWER (RETScreen)
Janvier	189,7	154	167,3	186,9
Février	172,5	151,7	157,5	166,9
Mars	192	149,9	182	193,4
Avril	175,7	139	155,8	176,7
Mai	166,6	134,4	157,4	169,9
Juin	148,3	111,8	145,3	158,4
Juillet	155,6	106,9	154,3	164

Août	182,2	129,7	169,9	184,8
Septembre	187,7	131,3	184	200,7
Octobre	202,2	145,9	207,2	208,6
Novembre	211,7	171,9	209,9	208,5
Décembre	222,5	182,1	206,3	194,7
Total	2 207	1 709	2 092	2 214

Pour mieux visualiser les variations saisonnières et les écarts entre les différentes sources, ces résultats sont représentés graphiquement à la Figure 7.

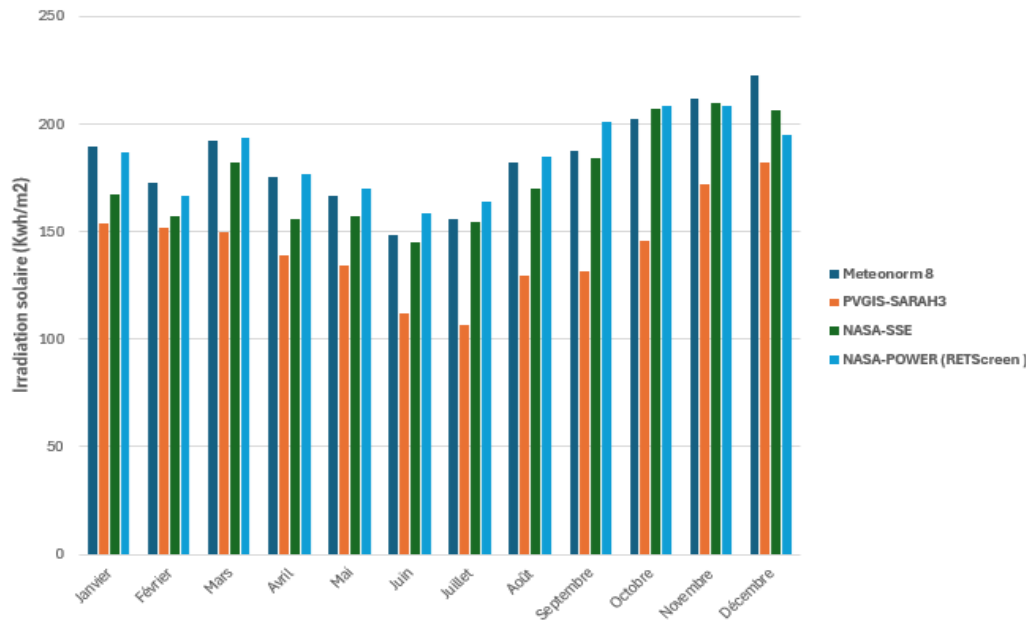


Figure 7 - Comparaison de l'irradiation solaire mensuelle à Moroni

Les différences observées entre les bases de données sont normales et s'expliquent par :

- La résolution spatiale propre à chaque modèle,
- Les caractéristiques des capteurs satellitaires utilisés,
- Les méthodes de reconstruction et de modélisation atmosphérique.

D'une manière générale :

- **PVGIS-SARAH3** fournit des estimations plus conservatrices ;
- **NASA-SSE** présente des valeurs plus élevées, avec une tendance connue à une légère surestimation;
- **Meteonorm 8** propose des valeurs intermédiaires, cohérentes et relativement stables pour la région de l'Afrique de l'Est et de l'océan Indien, ce qui convient à des simulations prudentes dans le cadre d'études de préféabilité.

- **RETScreen (NASA-POWER)** présente des valeurs très proches de Meteonorm et de NASA-SSE, ce qui reflète la nature hybride de cette base. Cette cohérence confirme la pertinence de RETScreen dans le contexte comorien, où il constitue l'outil de référence utilisé par les institutions nationales.

Pour la présente étude, Meteonorm 8 est retenu comme base climatique de référence, tant pour l'analyse du gisement solaire que pour les simulations énergétiques réalisées sous PVsyst 8.0.19, pour les raisons suivantes :

- Couverture homogène de l'ensemble de l'archipel des Comores ;
- Utilisation courante dans les projets appuyés par la Banque mondiale et d'autres bailleurs internationaux ;
- Cohérence avec les valeurs de potentiel photovoltaïque (PVOUT) publiées pour la Grande Comore ;
- Intégration native dans PVsyst 8, garantissant une cohérence complète entre les données climatiques et les modèles de calcul énergétique.

L'analyse croisée des différentes bases de données confirme que la ville de Moroni bénéficie d'un gisement solaire élevé, régulier et fiable, offrant des conditions particulièrement favorables au développement d'installations photovoltaïques en toiture. Cette ressource solaire constitue l'un des atouts majeurs pour la réussite du projet et justifie pleinement la mise en œuvre de systèmes photovoltaïques performants sur les bâtiments publics sélectionnés.

### 3.6 ÉLEVATION ET EXPOSITION AU RISQUE COTIER

L'urbanisation de la ville de Moroni s'est développée majoritairement le long de la plaine littorale occidentale de l'île de Grande Comore. Cette localisation, bien que favorable du point de vue de l'accessibilité et de la densité des bâtiments publics, implique une exposition potentielle à certains aléas côtiers, notamment les inondations ponctuelles et les phénomènes d'érosion liés aux fortes pluies et aux épisodes de houle.

La figure 8 présente la carte d'élévation de Moroni, issue de la base FloodMap, mettant en évidence la répartition altitudinale de la zone urbaine. Les teintes bleues correspondent aux secteurs de faible altitude, généralement inférieurs à 50 mètres au-dessus du niveau de la mer, tandis que les teintes violettes, rosées et orangées indiquent des altitudes progressivement plus élevées vers l'intérieur des terres.

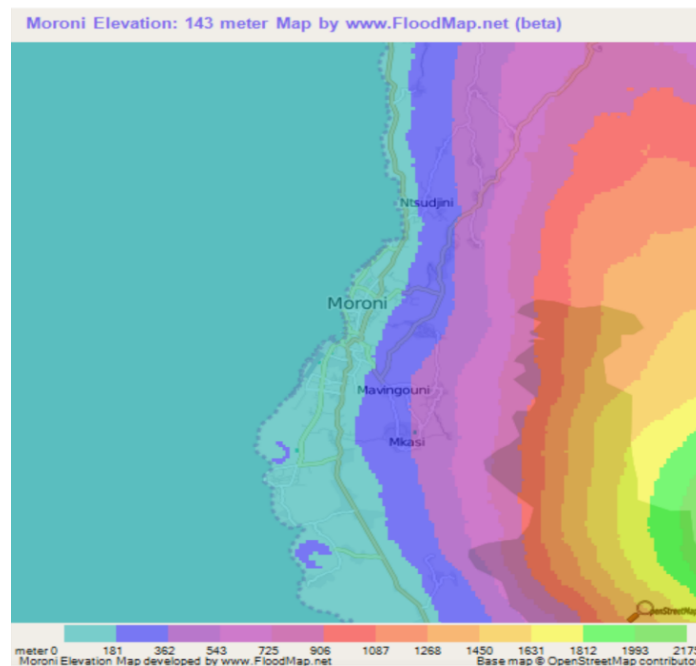


Figure 8– Carte d'élévation de Moroni – FloodMap

Cette cartographie montre que certaines zones situées à proximité immédiate du littoral présentent une altitude faible, pouvant les rendre plus sensibles aux phénomènes d'inondation localisée ou de ruissellement intense, en particulier lors d'événements météorologiques extrêmes. À l'inverse, une grande partie des bâtiments publics étudiés se situe à des altitudes intermédiaires, généralement supérieures à 50–100 mètres, offrant des conditions plus stables du point de vue topographique.

Dans le cadre de cette étude de préféabilité, l'élévation a été intégrée comme critère complémentaire d'analyse afin de :

- Identifier les bâtiments situés dans des zones très basses nécessitant une attention particulière
- Anticiper d'éventuelles contraintes liées à l'humidité, au drainage ou à l'accessibilité en période de fortes pluies ;
- Privilégier, lorsque cela est possible, des sites implantés à des altitudes plus favorables pour assurer la durabilité des installations photovoltaïques.

Il est toutefois important de souligner que, les systèmes photovoltaïques étant installés en toiture, les risques liés à l'élévation concernent principalement l'environnement immédiat du bâtiment et non directement les équipements solaires eux-mêmes. Ces éléments seront approfondis lors des phases ultérieures de faisabilité détaillée, notamment dans le cadre des études structurelles et des analyses de risques spécifiques par site.

### 3.7 DENSITE ET EMPRISE BATIE

La densité urbaine joue un rôle déterminant dans la sélection des bâtiments publics aptes à recevoir des panneaux photovoltaïques. Les zones à forte concentration de bâtiments offrent un potentiel de mutualisation des infrastructures (accès, maintenance, raccordement).

La carte ci-dessous, issue des données OpenStreetMap (OSM), présente l'ensemble des bâtiments identifiés dans le périmètre urbain de Moroni. Chaque point bleu correspond à une structure bâtie (habitation, école, ministère, etc.). On observe une densité élevée au centre-ville et le long du littoral, zones prioritaires pour l'implantation de systèmes photovoltaïques sur les toitures publiques.

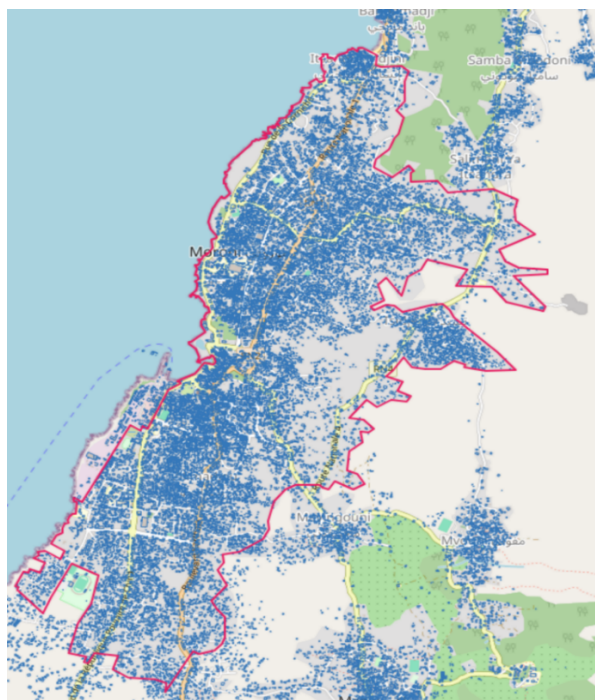


Figure 9 – Emprise des bâtiments de Moroni – Données OSM

Les ministères étant majoritairement regroupés dans les zones denses et bien desservies du centre-ville, ils disposent d'une accessibilité optimale pour l'installation, la maintenance et le raccordement au réseau, ce qui renforce leur pertinence dans une stratégie de production solaire distribuée.

## 4 SELECTION ET ANALYSE PRELIMINAIRE DES BATIMENTS PUBLICS

À la suite de l'analyse géospatiale de la ville de Moroni, une identification et une caractérisation préliminaire des bâtiments publics ont été réalisées afin d'évaluer, à un niveau de préféabilité, le potentiel des toitures pour l'installation de systèmes photovoltaïques.

Cette étape constitue une analyse préliminaire à dominante géospatiale, fondée sur l'exploitation conjointe d'images satellites et de données ouvertes, notamment issues de Google Earth, d'OpenStreetMap (OSM), et traitées à l'aide d'un système d'information géographique (SIG) sous QGIS. Elle vise à établir une base homogène de sites potentiels, sans exclusion définitive à ce stade.

Les informations présentées dans cette section reposent principalement sur l'analyse à distance et devront être confirmées et complétées lors de phases ultérieures, notamment à travers des visites techniques sur site et des relevés détaillés.

### 4.1 METHODOLOGIE DE REPERAGE ET D'EXTRACTION DES TOITURES

L'identification des bâtiments s'est appuyée sur un processus méthodologique combinant analyse géospatiale sous QGIS, observation visuelle et exploitation de données institutionnelles :

- Délimitation du périmètre urbain de Moroni : Identification de la bande urbaine principale située sur la côte ouest, où se concentrent les institutions publiques et les infrastructures administratives, à partir des données OpenStreetMap intégrées dans QGIS.
- Repérage des bâtiments gouvernementaux : Superposition des couches SIG « bâtiments » et « emprises urbaines » issues d'OpenStreetMap dans QGIS, complétée par une inspection visuelle détaillée à l'aide de Google Earth Pro afin d'identifier les ministères et bâtiments institutionnels.
- Analyse qualitative des toitures : Sélection des toitures présentant des caractéristiques favorables à l'installation photovoltaïque : géométrie régulière, surface exploitable suffisante, accessibilité apparente et niveau d'ombrage limité.
- Mesure des surfaces de toiture : Estimation des surfaces exploitables à l'aide :
  - Des outils de mesure surfacique sous QGIS,
  - Et de l'outil « Mesurer une aire » de Google Earth Pro, utilisé en complément pour affiner les estimations.
- Géoréférencement préliminaire des sites : Extraction des coordonnées géographiques (latitude / longitude) de chaque bâtiment afin de permettre leur intégration ultérieure dans les analyses SIG, les simulations énergétiques (PVsyst) et les bases de données du projet.

À titre illustratif, la Figure 10 présente deux exemples de polygones tracés pour estimer la surface exploitable des toitures du ministère de l'Intérieur et du Tribunal de première instance de Moroni.



Figure 10 — Exemple de délimitation des surfaces de toitures pour l'estimation des surfaces exploitables : ministère de l'Intérieur et Tribunal de première instance de Moroni.

Cette méthodologie permet d'obtenir une base de données spatiale cohérente, tout en tenant compte des limitations liées à l'absence de vérification terrain.

## 4.2 EXEMPLES DE BATIMENTS PUBLICS

La sélection des sites repose sur l'identification des principaux bâtiments administratifs de Moroni à partir de sources institutionnelles et de vérifications visuelles via l'imagerie satellite et les photographies publiques disponibles. L'objectif est de caractériser les types de toitures et configurations architecturales représentatives des ministères situés dans la capitale.

Afin d'illustrer la diversité architecturale observée, les figures suivantes présentent plusieurs exemples de bâtiments ministériels intégrés dans l'analyse, notamment :

- Le Ministère des Affaires étrangères et de la Coopération internationale ;
- Le Tribunal de première instance de Moroni ;
- Le Ministère de l'Énergie de l'Eau et des Hydrocarbures (MEEH), caractérisé par une grande toiture plate ;
- Le Ministère de l'Éducation nationale.

Ces exemples permettent de visualiser les typologies de toitures rencontrées et d'appuyer les observations réalisées à distance.



Figure 11— Ministère des Affaires étrangères et de la Coopération internationale de Moroni



Figure 12— Tribunal de première instance de Moroni



Figure 13— Ministère de l'Energie de l'Eau et des Hydrocarbures (MEEH)



Figure 14—Ministère de l'éducation nationale de Moroni

### 4.3 CARACTERISTIQUES OBSERVÉES

Les critères suivants ont été évalués sur la base de l'imagerie satellite et des données disponibles:

- Type de toiture : plate, inclinée ou pyramidale.
- Matériau : béton, tôle ou mixte.
- Surface exploitable : mesurée par polygone dans Google Earth Pro.
- Inclinaison approximative : estimation visuelle à partir de l'angle observé.
- État général apparent : bon, moyen ou nécessitant vérification.
- Ombrage : faible, moyen ou très faible selon la présence de végétation ou de bâtiments adjacents.
- Pertinence institutionnelle : importance du bâtiment dans les fonctions publiques.

L'inclinaison des toitures a été estimée à partir de l'analyse de l'imagerie satellite haute résolution, selon les catégories suivantes :

- 0–5° pour les toitures plates en béton ;
- 10–15° pour les toitures en tôle légèrement inclinées ;
- 15–25° pour les toitures fortement inclinées ;

Ces valeurs sont indicatives et devront être confirmées lors des phases ultérieures de vérification terrain, notamment pour valider la structure, la portance et les conditions d'accès.

### 4.4 SYNTHÈSE DES BÂTIMENTS IDENTIFIÉS

La Figure 15 présente la localisation géographique des ministères analysés dans cette étude. Elle permet de visualiser la concentration des bâtiments ministériels dans la zone centrale de Moroni ainsi que leur répartition le long de l'axe littoral. Cette représentation confirme que les ministères identifiés se situent majoritairement dans des zones facilement accessibles, à faible altitude, et bénéficiant d'un ensoleillement élevé.



Figure 15 — Localisation des principaux bâtiments ministériels de Moroni (source : Google Earth).

Le Tableau 2 présente la liste des bâtiments publics identifiés, accompagnés de leurs principales caractéristiques géospaciales et physiques. Ces données constituent une base préliminaire destinée à préparer les étapes suivantes de l'étude, notamment l'évaluation des performances énergétiques et la priorisation des sites.

Tableau 2— Caractéristiques géospaciales des bâtiments publics ministériels identifiés

N°	Nom du bâtiment / ministère	Latitude	Longitude	Inclinaison
1	Tribunal de première instance de Moroni	-11,70177	43,25481	0-5°
2	Ministère de l'Énergie de l'Eau et des Hydrocarbures (MEEH)	-11,70096	43,2525	0-5°
3	Ministère de l'Éducation nationale	-11,67974	43,25972	0-5°
4	Ministère des Affaires Étrangères et de la Coopération internationale	-11,70208	43,25237	15-20°
5	Ministère de la Jeunesse et des Sports	-11,68852	43.25849	15-20°
6	Ministère de l'Intérieur, de la Décentralisation et de l'Administration Territoriale chargée des relations avec les Institutions	-11,6834	43,26162	15-20°
7	Ministère des Postes, des Télécommunications et de l'Économie numérique	-11,7178	43,24498	20-25°

8	Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Intégration économique	-11,70091	43,25267	0-5°
9	Ministère de l'Éducation Régionale	-11,70156	43,25308	10-15°
10	Ministère de la justice, des Affaires Islamiques et de la Fonction Publique	-11,70267	43,25393	5-10°

Cette analyse repose exclusivement sur des observations à distance et ne permet pas à ce stade d'exclure des bâtiments. Elle vise à constituer une base homogène de sites potentiels pour les étapes ultérieures de validation des sites sélectionnés et d'analyse technico-économique.

#### 4.5 VALIDATION PRÉLIMINAIRE DES SITES SÉLECTIONNÉS

Les visites de reconnaissance ont permis de valider les sites identifiés lors de l'analyse géospatiale et d'actualiser la sélection des bâtiments sur la base des informations fournies par les partenaires locaux. À l'issue de cette phase, la liste initiale a été complétée par l'intégration de bâtiments supplémentaires, conduisant à une liste consolidée de 19 bâtiments publics, retenus pour la suite de l'étude de pré faisabilité.

Le tableau suivant présente, pour chacun des bâtiments analysés, les principales caractéristiques observées lors de cette phase, notamment le type de toiture, le matériau, l'inclinaison estimée, le niveau d'ombrage et l'état général apparent.

.

Tableau 3-Caractéristiques des toitures des bâtiments publics validées

N°	Nom du bâtiment	Type de toiture	Matériau	Inclinaison	Ombrage	État des bâtiments	
1	Ministère de l'Energie de l'Eau et des Hydrocarbures (MEEH)	Plate	Béton	0-5°	Faible	Moyen	
2	Ministère de l'Éducation Nationale	Plate	Béton	0-5°	Faible	Bon	
3	Ministère des Affaires Étrangères et de la Coopération Internationale	Inclinée	Tôle	15-20°	Faible	Bon	
4	Ministère de la Jeunesse et des Sports	Inclinée	Tôle	15-20°	Très faible	Bon	
5	Ministère de L'intérieur, de la Décentralisation et de L'Administration Territoriale chargée des relations avec les Institutions	Cabinet Ministériel	Inclinée	Tôle	15-20°	Moyen	Moyen
6		Direction Générale de la Police Nationale	Inclinée	Tôle	15-20°	Bon	Bon
7		Service Immigration	Inclinée	Tôle	15-20°	Bon	Bon
8		Commissariat Centrale de la Police Nationale	Inclinée	Béton	15-20°	Moyennement Bon	Moyennement Bon
9		Brigade Mixte	Plate	Béton	0-5°	Bon	Bon

Étude de préfaisabilité de l'utilisation de systèmes photovoltaïques sur les toits des bâtiments publics aux Comores, avec connexion au réseau, et définition d'une politique de net metering.

10	Ministère des Postes, des Télécommunications et de L'Économie numérique	Pyramidale	Tôle	20-25°	Faible	Moyen
11	Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Intégration économique / Vice-présidence Office commissariat au Plan	Plate	Tôle à renforcer	0-5°	Faible	Moyen
12	Ministère de l'Éducation Régionale	Inclinée légère	Tôle	10-15°	Moyen à fort	Moyen
13	Ministère de la justice, des Affaires Islamiques et de la Fonction Publique	Inclinée légère	Tôle à renforcer	5-10°	Faible	Moyen
14	Tribunal de première instance de Moroni	Plate	Béton	0-5°	Faible	Bon
15	Palais du Peuple	Plate	Béton	0-5°	Faible	Bon
16	Ministère de l'agriculture de la Pêche de l'Artisanat	Inclinée	Tôle	10-15°	Moyen à fort	Moyen à Bon
17	Ministère de l'Environnement / Direction de l'Environnement et des forêts	Plate	Béton	0-5°	Faible	Bon
18	Ministère de l'Aménagement du Territoire	Incliné	Tôle	10-15°	Faible	Bon
19	Direction Générale de l'Energie Des Mines et de l'Eau	Plate	Béton	0-5°	Faible	Bon

Les données disponibles sur les surfaces exploitables et les consommations électriques des bâtiments ont été rassemblées et présentées dans le Tableau 4, afin de préparer les étapes ultérieures de dimensionnement et d'analyse technico-économique.

Le Tableau 4 présente, pour chaque bâtiment, les surfaces de toiture ainsi que, le cas échéant, les surfaces exploitables des parkings et des bâtiments annexes susceptibles d'accueillir des modules photovoltaïques, ainsi que les consommations électriques internes communiquées par les autorités comoriennes. Ces informations résultent d'une combinaison des observations terrain à un niveau global, des mesures géospatiales et des données institutionnelles disponibles.

Tableau 4 - Surfaces exploitables et consommation électrique des bâtiments publics analysés

N°	Nom du bâtiment	Surface estimée (m <sup>2</sup> )	Surface exploitable du parking (m <sup>2</sup> )	Surface exploitable du Bâtiment annexe (m <sup>2</sup> )	Consommation interne (KWh/j)	Consommation interne (KWh/an)	
1	Ministère de l'Energie de l'Eau et des Hydrocarbures (MEEH)	551,39	0	0	1206,68	440 438,2	
2	Ministère de l'Éducation nationale	726,05	0	0	797,64	291 138,6	
3	Ministère des Affaires Étrangères et de la Coopération internationale	151,49	0	0	269,23	98 269,0	
4	Ministère de la Jeunesse et des Sports	84,86	0	0	382,74	139 700,1	
5	Ministère de l'Intérieur, de la Décentralisation et de l'Administration Territoriale chargée des relations avec les Institutions	Cabinet Ministériel	697,56	250	0	655,6	239 294,0
6		Direction Générale de la Police Nationale	201,4	0	0	201,4	73 511,0
7		Service Immigration	150	0	0	577,44	210 765,6
8		Commissariat Centrale de la Police Nationale	480	168	152	227,12	82 898,8
9		Brigade Mixte	120	0	0	105,28	38 427,2
10	Ministère des Postes, des Télécommunications et de l'Économie numérique	994,08	810	0	176	64 240,0	

Étude de pré faisabilité de l'utilisation de systèmes photovoltaïques sur les toits des bâtiments publics aux Comores, avec connexion au réseau, et définition d'une politique de net metering.

11	Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Intégration économique / Vice-présidence office commissariat au Plan	549,54	0	200	633,68	231 293,2
12	Ministère de l'Éducation Régionale	554,3	0	0	427,24	155 942,6
13	Ministère de la justice, des Affaires Islamiques et de la Fonction Publique	537,17	1200	350	104	37 960,0
14	Tribunal de première instance de Moroni	436,36	270	210	700	255 500,0
15	Palais du Peuple	4187,45	0	158	1600	584 000,0
16	Ministère de l'agriculture de la pêche de l'Artisanat	80	0	0	231,32	84 431,8
17	Ministère de l'Environnement / Direction de l'Environnement et des forêts	197,08	50	0	360	131 400,0
18	Ministère de l'Aménagement du territoire	197,08	80	0	536,6	195 859,0
19	Direction Générale de l'Energie des Mines et de l'Eau	197,08	75	0	78,95	28 816,8

De manière générale, la majorité des bâtiments publics visités présentent des conditions favorables pour l'installation de systèmes photovoltaïques, avec des toitures suffisamment dégagées, des niveaux d'ombrage limités et une accessibilité globalement compatible avec les travaux envisagés.

Ces constats permettent de confirmer la pertinence des sites maintenus à l'issue de la phase de validation préliminaire, et servent de base à l'analyse des contraintes et opportunités spécifiques à chaque bâtiment, présentée dans la section suivante.

## 4.6 ANALYSE DES CONTRAINTES ET OPPORTUNITES

### 4.6.1 CONTRAINTES GENERALES

L'environnement urbain et climatique de Moroni présente plusieurs contraintes techniques et logistiques qui devront être prises en compte lors de la planification du projet photovoltaïque :

- **Densité urbaine élevée** : les rues étroites et la proximité des bâtiments limitent parfois l'accès aux toitures pour le déploiement de grues ou d'équipements de levage, ce qui peut allonger les délais d'installation et complexifier la logistique de chantier.
- **Environnement maritime et humidité élevée** : la proximité de l'océan entraîne la présence d'embruns salins susceptibles d'accélérer la corrosion des structures métalliques, des cadres de modules et des connecteurs électriques. Ces conditions devront être intégrées dans le choix des équipements et des protections anticorrosion.
- **Toitures anciennes ou à forte pente** : certains bâtiments publics présentent des structures anciennes ou des toitures inclinées pouvant nécessiter des vérifications structurelles approfondies, voire des renforcements localisés, avant toute installation photovoltaïque.
- **Absence de plans architecturaux et structurels disponibles** : l'absence de documents techniques impose la réalisation de visites terrain afin de vérifier la composition des toitures, la portance présumée des structures et les charges admissibles.
- **Ombre** : les analyses d'ombrage réalisées à partir de l'imagerie satellite, et confirmées par les échanges terrain, indiquent que les ombrages présents sont globalement faibles et ne constituent pas un obstacle majeur à l'implantation photovoltaïque à ce stade de l'étude. Des vérifications ponctuelles resteront toutefois nécessaires lors de la phase de faisabilité détaillée afin de confirmer l'absence d'ombres pénalisantes à l'échelle horaire et saisonnière.
- **Contraintes d'accès et de sécurité aux toitures** : les conditions d'accès sont globalement contraintes pour la majorité des bâtiments visités. Pour les toitures en béton des bâtiments anciens, l'accès nécessite généralement la mise en place d'échafaudages. À l'inverse, certains bâtiments récents, notamment la Direction de l'Environnement et la Direction Générale de l'Énergie, disposent d'un accès plus aisé. Pour les toitures en tôle, l'accès est jugé difficile et les conditions de sécurité ne sont pas garanties à ce stade.

Ces contraintes n'annulent pas la faisabilité du projet, mais soulignent la nécessité d'une phase de vérification terrain approfondie, préalable à toute étude de conception détaillée et à la planification logistique des phases ultérieures.

### 4.6.2 OPPORTUNITES GENERALES

Malgré ces défis, la capitale comorienne présente un ensemble d'atouts notables qui renforcent la pertinence du recours au solaire en toiture :

- Irradiation solaire élevée : Moroni bénéficie d'une irradiation annuelle comprise entre 1 534 et 1 680 kWh/m<sup>2</sup>/an, offrant des conditions particulièrement favorables à la production photovoltaïque.
- Concentration des bâtiments publics : la plupart des infrastructures administratives et institutionnelles se situent dans un périmètre urbain compact, ce qui facilite la logistique d'installation, la supervision et la maintenance.
- Proximité du réseau électrique principal : les sites ciblés se trouvent à proximité du réseau basse tension de la capitale, limitant les coûts de raccordement et les pertes électriques.
- Visibilité institutionnelle : un projet solaire sur les toitures gouvernementales aurait une forte portée symbolique et pédagogique, illustrant l'engagement national en faveur de la transition énergétique.
- Structures adaptées : plusieurs bâtiments disposent de toitures plates en béton ou de toitures métalliques inclinées régulières, convenant parfaitement aux systèmes PV standards.

Ces conditions combinées offrent un potentiel technique et institutionnel élevé pour lancer un programme pilote photovoltaïque urbain à Moroni.

#### 4.6.3 CONTRAINTES ET OPPORTUNITES SPECIFIQUES PAR BATIMENT

Au-delà des contraintes générales identifiées à l'échelle urbaine, certains bâtiments présentent des spécificités propres liées à leur état apparent, à leur structure, à leurs conditions d'accès ou à leur environnement immédiat, susceptibles d'influencer leur aptitude à accueillir une installation photovoltaïque en toiture.

Afin de structurer et d'harmoniser l'analyse à l'échelle des sites, un registre par bâtiment a été établi. Ce registre permet de formaliser, pour chaque bâtiment analysé :

- Les contraintes techniques, logistiques et d'exploitation (structure présumée, type de toiture, accessibilité, sécurité, contraintes électriques) ;
- Les opportunités identifiées (surface exploitable, possibilité d'extension via parkings ou bâtiments annexes, pertinence institutionnelle) ;
- Les actions de vérification à réaliser lors de la phase suivante

Ce registre constitue un outil d'aide à la décision permettant de justifier de manière transparente le maintien des sites à ce stade de l'étude de préféabilité. Il sert également de base à la priorisation des bâtiments et à l'analyse technico-économique qui seront menées lors de la phase de faisabilité détaillée.

Le tableau 5 présente, pour chacun des bâtiments publics analysés, les contraintes observées, les opportunités identifiées ainsi que les principales actions de vérification à prévoir lors des phases ultérieures de l'étude.

Tableau 5-Registre des contraintes, opportunités et actions de vérification des bâtiments publics sélectionnés

N°	Nom du bâtiment	Contraintes observées	Opportunités identifiées	Actions de vérification requises
1	Ministère de l'Énergie de l'Eau et des Hydrocarbures (MEEH)	Accès à la toiture contraint, sécurité à adapter	Surface de toiture importante Ombrage faible Compteur électrique triphasé existant	Vérifier les conditions d'accès à la toiture Documenter le tableau électrique existant et le point de raccordement Inspection structurelle générale
2	Ministère de l'Éducation nationale	Accès à la toiture contraint sur bâtiment, sécurité à adapter	Grande surface exploitable Toiture en béton et faible ombrage Compteur triphasé existant	Vérifier les conditions d'accès à la toiture Documenter le tableau électrique existant et le point de raccordement Inspection structurelle générale
3	Ministère des Affaires Étrangères et de la Coopération internationale	Toiture en tôle avec accès et conditions de sécurité contraints	Présence d'une installation photovoltaïque existante (7020 Wc) Ombrage faible Compteur triphasé existant	Documenter le tableau électrique existant et le point de raccordement Évaluer les possibilités d'optimisation ou d'extension Vérifier les conditions d'accès à la toiture
4	Ministère de la Jeunesse et des Sports	Toiture en tôle avec accès et conditions de sécurité contraints	Ombrage très faible Compteur triphasé existant	Vérifier les conditions d'accès à la toiture Documenter le tableau électrique existant et le point de raccordement Vérification technique standard
5	Cabinet ministériel	Toiture en tôle inclinée avec état général moyen Accès aux toitures et conditions de sécurité contraints	Surface de toiture significative Surface de parking exploitable Présence d'une installation photovoltaïque existante (4600 Wc) Compteur triphasé existant	Vérifier l'état et la portance de la toiture Documenter le tableau électrique existant et le point de raccordement Évaluer les possibilités d'optimisation ou d'extension Définir les conditions d'accès et de sécurité

6	Direction Générale de la Police Nationale	Toiture en tôle avec accès contraint	État général satisfaisant Faible ombrage Compteur triphasé existant	Vérifier la portance de la toiture Documenter le tableau électrique existant et les éléments de l'installation
7	Service Immigration	Toiture en tôle inclinée avec Accès difficile et sécurité difficile Surface de toiture un peu limité	Ombrage faible Consommation électrique significative Compteur triphasé existant	Vérifier la faisabilité structurelle Documenter le tableau électrique existant et le point de raccordement
8	Commissariat Central de la Police Nationale	Accès aux toitures et conditions de sécurité contraints	Parking et bâtiment annexe exploitables Ombrage très faible Compteur triphasé existant	Vérifier la faisabilité des surfaces annexes Confirmer structures supports et accès Documenter le tableau électrique existant et le point de raccordement
9	Brigade Mixte	Accès aux toitures et conditions de sécurité contraints Surface exploitable modérée	Toiture en béton en bon état Faible ombrage Compteur triphasé existant	Analyser le potentiel énergétique du site au regard de la surface disponible Confirmer les conditions d'accès sécurisé Documenter le tableau électrique existant et le point de raccordement
10	Ministère des Postes, Télécommunications et Économie numérique	Toiture pyramidale en tôle géométrie complexe Accès aux toitures et conditions de sécurité contraints	Grande surface de toiture avec ombrage faible Parking exploitable Compteur triphasé existant	Vérifier la faisabilité technique de la toiture de parking Documenter le tableau électrique existant et le point de raccordement Confirmer les conditions d'accès sécurisé
11	Ministère de l'Économie / Vice-présidence – Commissariat au Plan	Toile à renforcer pour bâtiment annexe Accès aux toitures et conditions de sécurité contraints	Surface de toiture principale importante Ombrage faible Compteur triphasé existant	Vérifier la portance du bâtiment annexe Documenter le tableau électrique existant et le point de raccordement
12	Ministère de l'Éducation Régionale	Toiture en tôle avec état général moyen Accès aux toitures et conditions de sécurité contraints	Surface de toiture importante Compteur triphasé existant	Vérifier l'impact réel de l'ombrage Inspection et confirmation des conditions d'accès sécurisé

		Ombrage moyen à fort		Documenter le tableau électrique existant et le point de raccordement
13	Ministère de la Justice, des Affaires Islamiques et de la Fonction Publique (FOP)	Besoin de renforcement localisé au niveau du FOP Accès aux toitures et conditions de sécurité contraints	Surface de toiture principale significative avec surfaces annexes exploitables Compteur triphasé existant	Étude structure ciblée du FOP Validation des conditions d'accès sécurisé Documenter le tableau électrique existant et le point de raccordement
14	Tribunal de première instance de Moroni	Accès aux toitures et conditions de sécurité contraints	Toiture en béton en bon état Surfaces annexes exploitables Ombrage faible Compteur triphasé existant	Validation des conditions d'accès sécurisé Documenter le tableau électrique existant et le point de raccordement
15	Palais du Peuple	Accès toiture à confirmer compte tenu de la taille du bâtiment	Très grande surface de toiture Etat général bon avec faible ombrage Visibilité institutionnelle élevée Installation PV existante (2820 Wc) Compteur triphasé existant	Documenter l'installation PV existante et évaluer les possibilités d'optimisation ou d'extension Confirmer zones exploitables et accès Documenter le tableau électrique existant et le point de raccordement Vérification technique standard
16	Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Artisanat	Surface de toiture un peu limitée Ombrage ponctuel Accès aux toitures et conditions de sécurité contraints	Présence d'une installation photovoltaïque existante (3000 Wc) Compteur triphasé existant	Documenter l'installation existante Documenter le tableau électrique existant et le point de raccordement
17	Ministère de l'Environnement / Direction de l'Environnement et des Forêts	Contraintes faibles (bâtiment récent)	Toiture en béton Accès facilité et faible ombrage Installation PV existante (22000 Wc) Compteur triphasé existant	Documenter l'installation PV existante et évaluer les possibilités d'optimisation ou d'extension Documenter le tableau électrique existant et le point de raccordement Vérification technique standard

Étude de préfaisabilité de l'utilisation de systèmes photovoltaïques sur les toits des bâtiments publics aux Comores, avec connexion au réseau, et définition d'une politique de net metering.

18	Ministère de l'Aménagement du Territoire	Accès aux toitures et conditions de sécurité contraints	Bon état général avec faible ombrage Parking exploitable Compteur triphasé existant	Validation des conditions d'accès sécurisé Documenter le tableau électrique existant et le point de raccordement
19	Direction Générale de l'Énergie, des Mines et de l'Eau	Contraintes faibles (bâtiment récent)	Toiture en béton avec accès facilité Faible ombrage Compteur triphasé existant	Documenter le tableau électrique existant et le point de raccordement Vérification technique standard

À l'issue de cette analyse qualitative par bâtiment, aucun site n'a été exclu à ce stade sur la base de contraintes techniques bloquantes identifiées lors des vérifications réalisées. Les contraintes et opportunités recensées soulignent toutefois la nécessité de vérifications techniques complémentaires lors des phases ultérieures, notamment concernant l'état structurel des toitures, les conditions d'accès et de sécurité, ainsi que les modalités détaillées de raccordement électrique.

La réduction progressive du périmètre et la priorisation des bâtiments ont ensuite été opérées dans le cadre des étapes suivantes de l'étude, sur la base de critères quantitatifs issus des simulations énergétiques et des analyses technico-énergétique et financière, conformément au niveau de précision attendu pour une étude de préfaisabilité.

## 5 INSTALLATION SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

### 5.1 PRINCIPE GÉNÉRAL DE FONCTIONNEMENT D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE

L'énergie solaire est produite à partir de modules photovoltaïques dont la fonction est de convertir la lumière du soleil en électricité sous forme de courant continu (DC). Ce phénomène de conversion est entièrement statique : il ne comporte aucune pièce mécanique en mouvement et ne génère donc aucune nuisance sonore. Les modules photovoltaïques sont constitués de matériaux durables tels que le verre, l'aluminium et le silicium, ce qui leur confère une longue durée de vie et un haut niveau de fiabilité.

L'électricité produite en courant continu par le champ photovoltaïque est ensuite acheminée vers un onduleur, qui la transforme en courant alternatif (AC), identique à celui du réseau public de distribution. Cette conversion permet d'alimenter directement les équipements électriques des bâtiments en autoconsommation ou, lorsque la réglementation le permet, d'injecter un surplus éventuel sur le réseau du distributeur.

Les onduleurs nécessitent toujours la présence d'une tension de référence issue du réseau ou du tableau électrique principal du bâtiment. En l'absence de cette tension, ils ne peuvent pas fonctionner ni injecter d'énergie, ce qui constitue une protection essentielle pour la sécurité des opérateurs et du réseau.

La Figure 17 ci-dessous illustre le principe général de fonctionnement d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau, incluant la chaîne de conversion DC/AC et les modes de fonctionnement possibles (« autoconsommation » ou « injection réseau »).

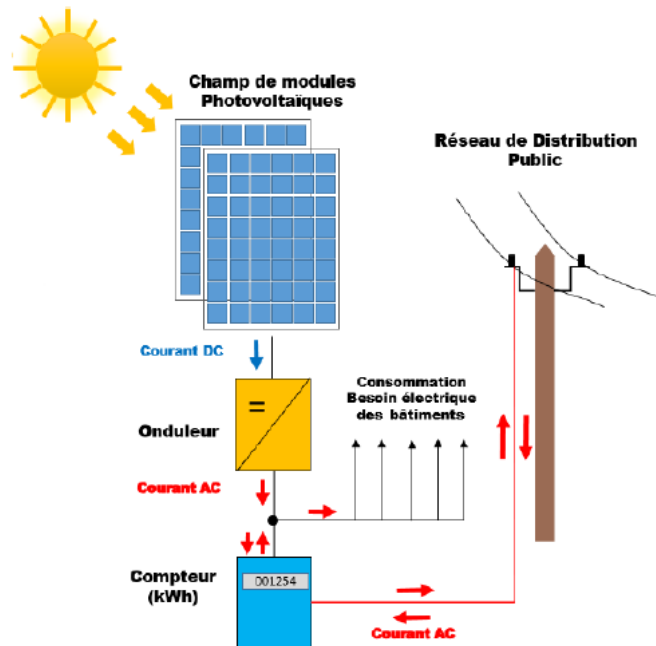


Figure 16 - Principe de fonctionnement d'une installation photovoltaïques

## 5.2 PRINCIPAUX COMPOSANTS DU SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

Cette partie présente les principales technologies et alternatives techniques des différents composants d'une centrale photovoltaïque en toiture :

- Les modules photovoltaïques ;
- Les structures supports de modules ;
- Les onduleurs ;
- Les systèmes de monitoring ;

### 5.2.1 MODULES PHOTOVOLTAÏQUES (PV)

#### 5.2.1.1 Cellules

Les modules photovoltaïques convertissent l'énergie solaire en énergie électrique. Il existe différentes technologies de cellules photovoltaïques. Les principales sont présentées ci-dessous.

##### 5.2.1.1.1 Silicium cristallin

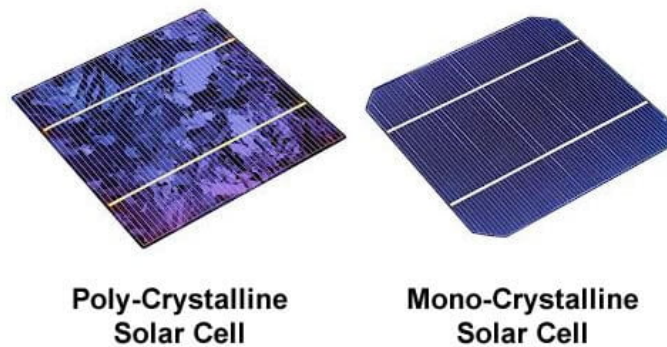
Ces modules sont composés de fines plaquettes de silicium. Les cellules en silicium cristallin se subdivisent en deux catégories principales (voir Figure 18) :

- Cellules monocristallines : Ces cellules sont fabriquées à partir de silicium issu d'un seul cristal et comptent parmi les plus efficaces disponibles sur le marché. Les panneaux monocristallins produisent davantage d'énergie par unité de surface que les autres technologies. Leur rendement moyen se situe actuellement entre 20 % et 24 %, ce qui correspond à une puissance d'environ 200 à 320 Wc/m<sup>2</sup> dans des conditions d'essai standard (puissance maximale d'environ 300 à 340 W/m<sup>2</sup>). En laboratoire, le rendement des cellules monocristallines a atteint 29,4 %, témoignant des progrès constants dans ce domaine.

Certains modèles à haut rendement, tels que les panneaux bifaciaux, peuvent même produire un supplément d'énergie dans des conditions optimales.

- Technologie PERC : La technologie PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) de dernière génération améliore encore les performances par rapport aux cellules photovoltaïques conventionnelles. Ces cellules, généralement fabriquées en silicium monocristallin, optimisent la capture de la lumière à la surface de la cellule afin d'accroître le rendement de conversion énergétique. Les cellules PERC atteignent des rendements commerciaux compris entre 22 % et 25 % et gagnent en popularité grâce à leur rentabilité, liée à des rendements supérieurs et à une production à plus grande échelle.
- Cellules polycristallines : Dans ce cas, le silicium est obtenu à partir de plusieurs cristaux. Les modules solaires polycristallins présentent une efficacité moyenne comprise entre 18,5 % et 21 %, correspondant à une puissance d'environ 185 à 210 Wp/m<sup>2</sup> dans des conditions d'essai standard.

Les avancées technologiques ont également permis d'atteindre en laboratoire des rendements d'environ 23,3 %, illustrant une amélioration continue des performances.



*Figure 17-Cellules mono et poly cristalline*

- Forces :
  - Simplicité d'utilisation : Les panneaux monocristallins et polycristallins sont faciles à installer et à intégrer dans divers environnements, ce qui en fait des choix privilégiés tant pour les applications résidentielles que commerciales.
  - Fiabilité élevée dans le temps : Ces panneaux sont réputés pour leur durabilité et leur longue durée de vie, maintenant un niveau de performance efficace pendant 25 à 40 ans avec une dégradation minimale.
- Faiblesses :
  - Perte de performance en environnement chaud : Les cellules monocristallines et polycristallines subissent une baisse d'efficacité à mesure que la température augmente. Le coefficient de température moyen est d'environ -0,38 %/°C, ce qui signifie qu'au-delà de 25°C (conditions d'essai standard), le rendement du panneau diminue d'environ 0,38 % par degré supplémentaire. Bien que ce coefficient soit resté relativement stable, les recherches actuelles visent à développer des matériaux et des technologies capables de réduire ces pertes thermiques.

#### 5.2.1.1.2 Modules à couches minces

Dans cette technologie, l'élément photovoltaïque est obtenu par le dépôt d'une fine couche de matériau actif sur un substrat. On ne parle plus ici de cellules individuelles, mais directement de modules photovoltaïques.

Les cellules solaires à couches minces continuent d'occuper une place importante sur le marché du photovoltaïque, reconnues pour leur flexibilité, leur faible poids, et leur meilleure performance en conditions de faible luminosité.

Ces cellules reposent principalement sur des matériaux tels que le tellure de cadmium (CdTe), le sélénure de cuivre, d'indium et de gallium (CIGS), et le silicium amorphe (a-Si).

- Rendement : Les cellules solaires à couches minces atteignent désormais des rendements commerciaux d'environ 20 % pour le CIGS et 19 % pour le CdTe dans des conditions d'essai standard. Les progrès réalisés en laboratoire ont permis de dépasser ces valeurs, atteignant des rendements supérieurs à 23 % pour certaines configurations expérimentales.
- Croissance du marché : Le marché mondial du photovoltaïque à couches minces est évalué à 14,68 milliards USD en 2024, avec un taux de croissance annuel moyen (CAGR) de 9,8 %. Cette croissance est soutenue par l'adoption croissante de technologies durables, la baisse du coût des matériaux et les améliorations continues des procédés de fabrication.
- Innovations technologiques : Les cellules solaires à jonction hétérogène à base de silicium (HJT) et les cellules tandem, combinant matériaux à couches minces et autres technologies, constituent des axes majeurs d'innovation visant à améliorer la performance et la scalabilité des systèmes.
- Applications : Les cellules à couches minces sont de plus en plus utilisées dans des applications nécessitant de la souplesse, telles que les photovoltaïques intégrés au bâtiment (BIPV), les dispositifs portables, ou encore l'alimentation d'infrastructures en zones isolées.

Dans le cadre de cette étude, l'analyse se concentre sur des technologies photovoltaïques matures, largement déployées à l'échelle internationale et adaptées aux installations en toiture de bâtiments publics.

#### 5.2.1.2 Modules photovoltaïques

##### 5.2.1.2.1 Monofaciaux

Les cellules mono-faciales, comme leur nom l'indique, ne comportent qu'une face pouvant procéder à l'effet photoélectrique. Il y a deux façons de les structurer, soit avec des couches bi-verre ou avec des couches verre-film (mono-verre).

Les cellules mono-verres, ont le côté absorbant la lumière recouverte d'une couche de verre trempé et l'autre côté, d'une matière film tel que l'aluminium par exemple. Les cellule bi-verres, sont recouvertes des deux côtés d'une couche de verre trempé. Les cellules bi-verres sont privilégiées lors des conditions météorologiques extrêmes comme une forte humidité par exemple. Le 6 offre une comparaison des avantages et inconvénients entre les technologies mono-verres et les technologies bi-verres.

Tableau 6- Comparaison cellules mono-verres et bi-verres

Structure	Avantages	Inconvénients
Bi-verre	Plus résistants aux conditions extrêmes (humidité, températures extrêmes, grêle, etc.) Durée de vie plus grande Plus rigides, et donc plus résistants aux stress mécaniques	Coûts plus élevés Poids plus grand Possibilité de craquer et se briser sous leur propre poids Risque plus élevé de se faire briser lors de la manipulation
Mono-verre	Moins cher Plus léger et donc plus facile à manipuler	Facteur de dégradation plus élevé (0.7% comparé à 0.5% pour les bi-verres) Possibilité plus élevée d'avoir des microfissures

Les cellules bi-verre sont souvent privilégiées dans les installations exposées à des conditions météorologiques extrêmes.

Leur conception à double vitrage offre également une meilleure résistance aux dommages physiques potentiels, tels que la grêle ou les vents violents, et contribue à atténuer les effets du vieillissement causés par le rayonnement ultraviolet (UV) ou les cycles thermiques répétés.

#### 5.2.1.2.2 Bifacial

Un module photovoltaïque bifacial est conçu pour produire de l'énergie à partir des faces avant et arrière simultanément. Cette technologie à double face lui permet de capter la lumière directe du soleil à l'avant et de réfléchir la lumière à l'arrière, offrant ainsi une production d'énergie plus élevée par rapport aux modules photovoltaïques mono-faciaux conventionnels.

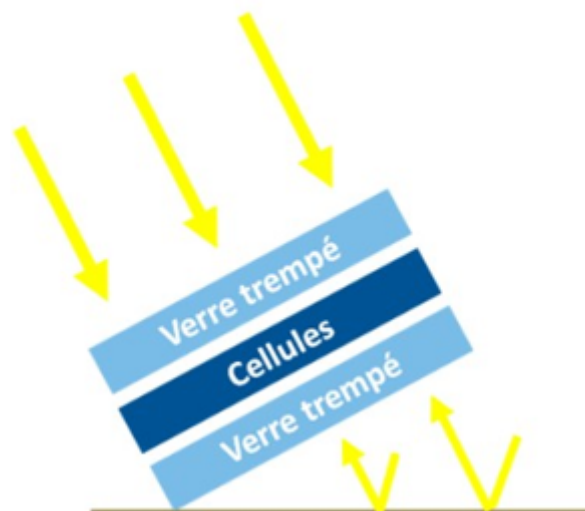


Figure 18-Module bifacial

La face arrière du module bifacial capte la lumière réfléchie, qui peut provenir de diverses sources, telles que l'albédo (la réflexion de la lumière du soleil sur des surfaces telles que la neige, le sable

ou les terrains de couleur claire) ou les rayonnements diffus. Cette réflexion augmente le rendement énergétique total, en particulier lorsque le module est installé dans des environnements où le sol est très réfléchissant, comme les régions enneigées ou les sols de couleur claire.

La structure des cellules arrière est conçue pour être symétrique aux cellules avant, maximisant ainsi l'absorption de la lumière solaire par la lumière réfléchie. La surface arrière est généralement équipée de verre trempé, ce qui améliore la robustesse et la durabilité du module.

L'un des principaux avantages des modules bifaciaux est leur durée de vie prolongée. L'utilisation de verre trempé à l'arrière offre une meilleure protection contre le délaminage, un processus où les couches du module commencent à se séparer en raison de facteurs externes tels que l'humidité, les fluctuations de température ou les défauts de fabrication. Cette conception réduit considérablement le risque de dégradation au fil du temps, contribuant ainsi à la longévité du système.

De plus, les garanties de performance des modules bifaciaux s'étendent généralement à 85 % d'efficacité sur 30 ans, ce qui garantit un niveau élevé de production d'énergie tout au long de la durée de vie du module. Cela fait des modules bifaciaux l'une des options les plus rentables en termes de coût actualisé de l'énergie (LCOE).

## 5.2.2 STRUCTURES DE SUPPORT

### 5.2.2.1 *Installation en toitures inclinées*

Sur les toitures inclinées, deux grands types de pose sont utilisés :

- Surimposition :

Le mode d'installation le plus pratiqué est la surimposition. Les panneaux solaires sont fixés sur la toiture existante, en parallèle du plan de toiture. Cette technique présente des avantages :

- Moins coûteux et plus simple à installer ;
  - Permet de surélever les panneaux solaires par rapport à la toiture, ce qui a pour effet de favoriser leur rafraîchissement ;
  - Limite les problèmes d'étanchéité de l'habitation et diminue les risques d'incendie.
- Intégration :

L'intégration au bâti (IAB) consiste à installer les panneaux solaires de manière qu'ils se substituent à la toiture de ce fait, ils assurent la fonction d'étanchéité. Les toitures photovoltaïques en IAB présentent plusieurs désavantages :

- L'IAB est généralement plus cher à installer ;
- L'IAB accroît les risques de fuite dans le logement ;
- Des panneaux solaires installés en IAB montent davantage en température ce qui diminue leur rendement, accroît les risques d'incendie et porte atteinte à la durée de vie de l'installation.

### 5.2.2.2 *Installation en toitures plates*

La pose des panneaux solaires sur une toiture plate peut être réalisée de plusieurs façons :

- Structure portante en métal :

Les modules PV sont montés sur une structure métallique attachée au moyen d'un lestage. Ce type de structure portante est généralement peu coûteux étant donné que les panneaux photovoltaïques peuvent être intégrés dans les structures métalliques en atelier, avant leur montage en toiture. Étant donné que le système est lesté, il est important de bien dimensionner l'ensemble pour résister aux conditions de vents les plus extrêmes, sans compromettre la structure de la toiture.

- Structure portante fixée à la structure du bâtiment :

La structure métallique est arrimée à la toiture de manière à assurer la fixation des panneaux sans utiliser de lestage. Ce type d'installation nécessite une étanchéité parfaite du revêtement de toiture au droit des fixations, afin d'éviter des problèmes d'infiltration d'eau.

- Console :

Les panneaux PV sont placés sur des supports en matériau synthétique (PEHD) remplis de lestage (gravier, blocs de béton) : de 80 à 100 kg/m<sup>2</sup>. Dans ce système simple et modulaire, les panneaux sont inclinés à l'angle de la console. L'avantage est la simplicité de mise en œuvre mais le désavantage est de ne pas offrir beaucoup de flexibilité au niveau de l'inclinaison et au niveau du nombre de module par rangée (un seul).

### 5.2.3 ONDULEURS

Les panneaux photovoltaïques produisent de l'énergie en courant continu (DC), qui doit être convertie en courant alternatif (AC) pour être utilisée par les bâtiments ou injectée sur le réseau public.

Deux types d'onduleurs sont couramment utilisés dans les installations en toiture :

- Onduleurs de chaîne (string)

Les onduleurs de chaîne sont des onduleurs de puissance moyenne, généralement compris entre 5 et 60 kVA pour les installations en toiture, et jusqu'à 125 kVA dans le cas de grandes toitures commerciales. Ils sont conçus pour être installés à l'extérieur (indice IP65), à proximité des champs photovoltaïques.

Ils constituent aujourd'hui la solution standard pour les bâtiments publics, en raison de :

- Leur bon rapport coût/performance,
- Leur facilité d'installation,
- Leur maintenance simple par échange standard,
- La présence de plusieurs MPPT, permettant d'optimiser la production lorsque les toitures présentent plusieurs orientations ou zones partiellement ombragées.

Ce type d'onduleur est adapté aux configurations de Moroni, où les puissances par bâtiment sont modérées et réparties sur plusieurs toitures indépendantes.



Figure 19- Onduleur de chaîne (string)

- Micro-onduleurs

Les micro-onduleurs sont installés directement derrière chaque module photovoltaïque. Ils assurent une conversion DC/AC individuelle pour chaque panneau, ce qui permet une optimisation très fine de la production.

- Avantages :
  - Meilleure performance si une partie du champ est ombragée ;
  - Suivi détaillé panneau par panneau.
- Inconvénients :
  - Coût plus élevé (1 micro-onduleur par module) ;
  - Installation plus longue ;
  - Maintenance plus complexe, car les équipements sont en toiture ;
  - Moins intéressant pour des systèmes de plusieurs dizaines de kWc

#### 5.2.4 DISPOSITIF DE MONITORING

Le système de monitoring permet d'assurer le suivi des performances énergétiques des installations photovoltaïques, la détection des dysfonctionnements et l'émission d'alertes en cas d'anomalie. Dans le cadre de cette étude, le monitoring est assuré principalement par les dispositifs intégrés aux onduleurs photovoltaïques.

Les données généralement mesurées et traitées par le système de monitoring sont :

- Les tensions et courants en courant continu (DC) et alternatif (AC)
- La puissance et l'énergie produites par l'installation
- L'état de fonctionnement des onduleurs

- La température ambiante, le cas échéant, l'irradiation solaire mesurée sur site

Il Deux grandes catégories de systèmes de monitoring sont couramment utilisées :

- Les systèmes propriétaires :

Ces systèmes sont fournis directement par les fabricants d'onduleurs et comprennent un enregistreur de données ainsi qu'une plateforme de visualisation accessible via une interface web. Ils offrent une solution simple et économique, adaptée aux installations photovoltaïques en toiture de bâtiments publics, avec un niveau de suivi suffisant pour la surveillance de la production et la maintenance de base.

- Les systèmes ouverts :

Les systèmes ouverts reposent sur des passerelles de communication universelles capables d'interfacer différents équipements et marques d'onduleurs. Les données sont transmises vers des plateformes logicielles spécialisées permettant une analyse avancée des performances et une supervision centralisée de plusieurs sites. Cette solution, plus complète, implique généralement des coûts supplémentaires liés aux licences et aux services d'exploitation.

La transmission des données peut être assurée soit par une connexion Internet existante sur le site, soit par l'installation d'un modem cellulaire (3G/4G) avec abonnement M2M (Machine to Machine), lorsque l'infrastructure réseau locale est insuffisante.

À ce stade de préféabilité, les systèmes de monitoring intégrés aux onduleurs sont considérés comme suffisants pour répondre aux besoins de suivi et de maintenance des installations photovoltaïques étudiées.

### 5.3 FACTEURS TECHNIQUES AFFECTANT LA PERFORMANCE

La performance d'un système photovoltaïque en toiture dépend de plusieurs paramètres techniques liés au site, à la configuration du système et aux contraintes locales. Dans le cadre de cette étude de préféabilité, une analyse détaillée a été menée pour identifier les éléments susceptibles d'influencer la production énergétique des installations projetées. Les principaux facteurs identifiés sont les suivants :

#### 5.3.1 ENSOLEILLEMENT ET CONDITIONS CLIMATIQUES

Le niveau d'irradiation solaire constitue le principal déterminant de la production d'un système photovoltaïque.

À Moroni, les données climatiques disponibles (GHI, DHI, température ambiante) indiquent :

- Une irradiation annuelle élevée, typique du climat tropical insulaire ;
- Une dominance de l'irradiation directe pendant la saison sèche ;
- Des températures quotidiennes élevées (27-31°C), entraînant une augmentation des pertes thermiques.

Ces conditions permettent une bonne production solaire annuelle, mais imposent également l'utilisation de modules à faible coefficient de température pour réduire les pertes de rendement liées à la chaleur.

### 5.3.2 ORIENTATION ET INCLINAISON DES TOITURES

L'analyse géospatiale et les validations terrain montrent que les toitures étudiées présentent :

- Des angles d'inclinaison variés (5° à 25° selon les bâtiments) ;
- Des orientations majoritairement Est-Ouest ou Nord-Sud avec des variations selon la configuration des bâtiments ;
- Un pourcentage significatif de toitures plates en béton.

Ces caractéristiques influencent directement :

- La quantité d'irradiation reçue par les modules,
- La nécessité d'ajouter une structure d'inclinaison (10-15°) sur les toitures plates,
- La compacité des rangées de modules et la longueur des chaînes.

Une inclinaison optimisée est essentielle pour capter le flux solaire maximal, réduire les ombrages inter-rangs et favoriser le nettoyage naturel des panneaux.

### 5.3.3 OMBRAGES ET OBSTACLES

La présence d'ombres est l'un des facteurs les plus critiques dans un projet photovoltaïque en toiture.

Les visites terrain ont permis d'identifier :

- Des ombrages ponctuels causés par des équipements en toiture (climatiseurs, antennes, paratonnerres) ;
- Des ombrages potentiels liés à des bâtiments adjacents, situés au nord ou à l'ouest ;
- Des obstacles permanents limitant la surface utile (murets, gaines techniques, ventilations).

Les ombrages réduisent localement l'irradiation et peuvent provoquer un phénomène de limitation de courant, où une cellule ou un module ombragé affecte toute la chaîne électrique. Leur prise en compte est indispensable lors de la modélisation PVsyst et du choix des chaînes.

### 5.3.4 CONTRAINTES STRUCTURELLES DES BATIMENTS

Les conditions structurelles influencent la faisabilité d'un système en toiture :

- Toitures en béton : généralement adaptées au PV, avec une bonne portance, mais nécessitant des études de charge pour valider l'ajout de structures inclinées.
- Toitures métalliques (tôle) : portance plus faible, risques accrus de corrosion, ancrage en points spécifiques (nervures), exigences d'étanchéité.
- Environnement maritime : exposition à l'air salin, augmentant le risque de corrosion des fixations et des cadres.

Chaque site devra faire l'objet d'une évaluation structurelle approfondie lors de la phase de faisabilité afin de confirmer la portance résiduelle, l'état réel du support, les risques d'infiltration et la compatibilité avec les ancrages PV.

### 5.3.5 CONTRAINTES ELECTRIQUES ET INTEGRATION AU RESEAU

La performance dépend également de la capacité du bâtiment à accueillir les équipements électriques associés :

- Espace pour les onduleurs et protections DC/AC ;
- Distance au tableau général basse tension (TGBT) ;
- Longueur et cheminement des câbles ;
- Compatibilité avec un compteur bidirectionnel en vue du net metering.

La proximité du point d'injection électrique est essentielle pour réduire les pertes ohmiques et les coûts d'installation.

## 6 PLAN DE RACCORDEMENT DES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES

La présente section décrit le principe de raccordement électrique des installations photovoltaïques prévues sur les bâtiments publics retenus dans le cadre de la présente étude de préféabilité. Elle précise les modalités de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau électrique interne des bâtiments, au niveau du point de couplage commun (PCC), ainsi que les principes d'échange d'énergie avec le réseau public.

Pour l'ensemble des bâtiments retenus, un schéma type de raccordement a été défini afin d'assurer la cohérence technique des installations, la facilité d'exploitation et la standardisation des équipements. Les installations photovoltaïques sont raccordées au tableau général basse tension (TGBT) existant du bâtiment, au niveau du PCC, de préférence à proximité du point de livraison, afin de limiter les pertes électriques et d'optimiser l'intégration au réseau existant.

Selon la puissance installée et les caractéristiques du point de livraison, le raccordement électrique est envisagé en basse tension (BT). Le schéma de raccordement intègre un dispositif de comptage bidirectionnel permettant la mesure de l'énergie autoconsommée, injectée vers le réseau public et soutirée depuis celui-ci.

Le schéma de raccordement intègre également les dispositifs de protection électrique nécessaires à la sécurité de l'installation et du réseau existant, notamment les protections contre les surintensités et les surtensions, ainsi que les dispositifs de coupure et de sectionnement conformes aux pratiques usuelles en basse tension.

Le mode de fonctionnement retenu est l'autoconsommation avec injection du surplus vers le réseau public, ainsi que le soutirage d'énergie depuis le réseau en cas d'insuffisance de production photovoltaïque. Les modalités définitives de raccordement et de comptage seront précisées lors des phases ultérieures du projet, en coordination avec le gestionnaire du réseau public et conformément au cadre réglementaire en vigueur.

La Figure 21 présente le plan de raccordement basse tension (BT) en autoconsommation avec injection du surplus. Elle illustre notamment :

- L'autoconsommation prioritaire de l'énergie photovoltaïque produite ;
- L'injection du surplus d'énergie vers le réseau public ;
- Le soutirage d'énergie depuis le réseau en cas d'insuffisance de production solaire.

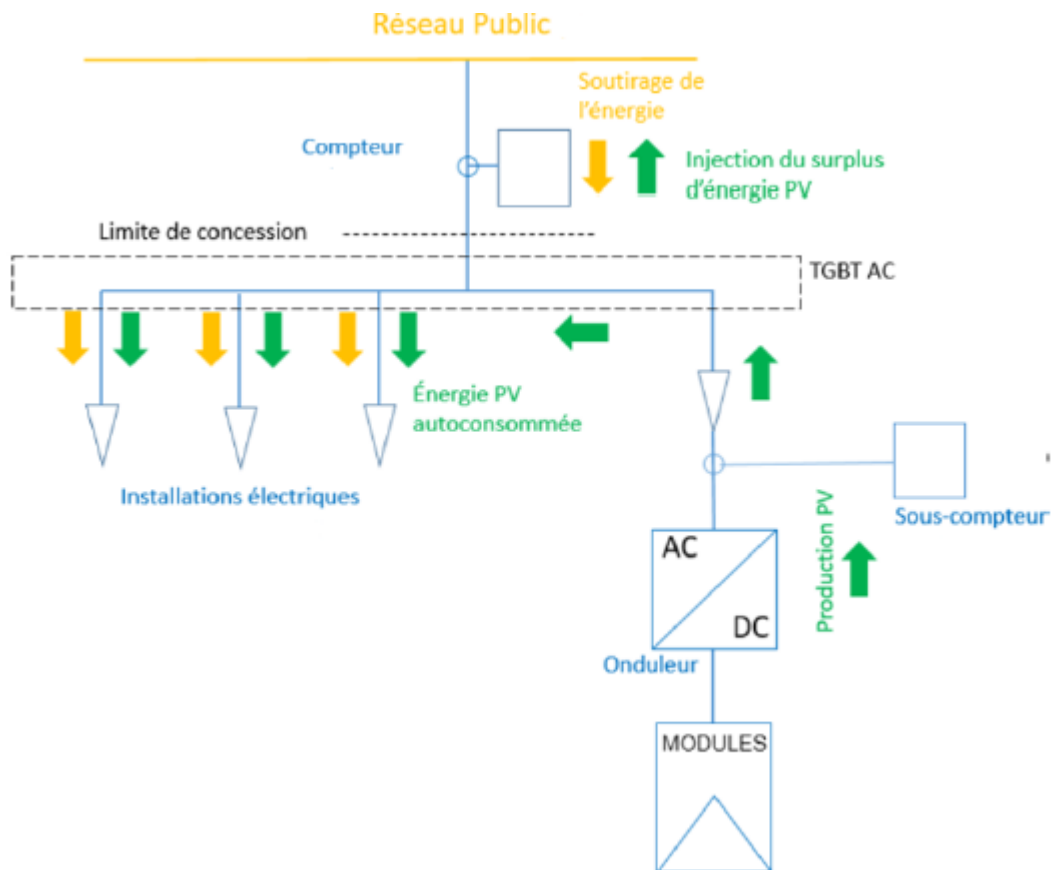


Figure 20-Raccordement BT en autoconsommation avec vente du surplus

## 7 ANALYSE DU POTENTIEL PHOTOVOLTAÏQUE DES BÂTIMENTS

La présente section vise à estimer, pour chaque bâtiment public étudié, le potentiel photovoltaïque installable à partir des surfaces de toiture réellement exploitables, et la performance énergétique attendue (production annuelle, productible spécifique, fraction solaire), en tenant compte des principaux facteurs pouvant affecter le rendement des systèmes photovoltaïques en toiture

Les résultats présentés constituent des estimations compatibles avec un niveau de préféabilité. Les valeurs devront être confirmées et ajustées lors des phases ultérieures, notamment après visites terrain, vérifications structurelles et définition détaillée de l'architecture électrique par site.

### 7.1 MÉTHODOLOGIE D'ESTIMATION DU POTENTIEL EN TOITURE

Le potentiel photovoltaïque des bâtiments a été estimé à partir de la surface exploitable nette identifiée lors de l'analyse géospatiale. Cette surface correspond aux zones de toiture pouvant accueillir des modules photovoltaïques après exclusion :

- Des obstacles (antennes, unités de climatisation, équipements techniques, émergences),
- Des marges de sécurité périphériques,

- Des zones ombragées identifiables,
- Ainsi que des contraintes d'exploitation et de maintenance (cheminements, accès, zones à préserver).

Afin de dimensionner les installations de manière réaliste, une approche de calepinage basée sur une implantation physique théorique des modules sur les toitures a été appliquée. Cette approche repose sur les hypothèses suivantes :

- Occupation moyenne d'environ 2,6 m<sup>2</sup> par module, incluant la surface du module, les espacements nécessaires et les accès techniques ;
- Modules photovoltaïques monocristallins de 550 Wc ;
- Estimation du nombre de modules installables à partir de la surface réellement mobilisable, puis déduction de la puissance photovoltaïque installable correspondante.

À titre illustratif, la figure ci-dessous présente un exemple de calepinage photovoltaïque théorique réalisé sur la toiture d'un bâtiment public. Cette représentation permet de visualiser :

- L'organisation des modules photovoltaïques en rangées ;
- Les espacements laissés libres entre les rangées afin de limiter l'ombrage inter-rangées ;
- La présence de zones non occupées permettant la circulation du personnel pour les opérations de maintenance, de nettoyage et d'inspection ;



*Figure 21– Illustration du principe d'implantation de modules photovoltaïques sur toiture – exemple du Tribunal de première instance de Moroni*

Toutefois, la surface exploitable nette ne peut être intégralement occupée par des modules photovoltaïques. Afin de tenir compte des contraintes réelles d'implantation, des taux d'occupation surfacique ont été appliqués, conformément aux pratiques couramment utilisées dans les études de pré faisabilité photovoltaïque :

- Un taux de 60 % pour les toitures plates, intégrant les espacements nécessaires pour limiter l'ombrage inter-rangées, les accès de maintenance et les marges de sécurité ;
- Un taux de 70 % pour les toitures inclinées, pour lesquelles les modules peuvent être installés de manière plus compacte, parallèlement au plan de la toiture.

Ces valeurs, issues de la pratique industrielle et de retours d'expérience sur des projets photovoltaïques en milieu urbain, permettent d'obtenir une estimation prudente, réaliste et techniquement cohérente de la surface réellement mobilisable à l'échelle d'une étude de préfaisabilité.

Cette méthode permet d'obtenir une estimation réaliste et techniquement cohérente de la puissance photovoltaïque maximale pouvant être installée sur chaque bâtiment.

Les puissances ainsi déterminées ont ensuite été utilisées comme données d'entrée pour des simulations énergétiques réalisées avec le logiciel PVsyst, à partir des données climatiques Meteonorm représentatives de la ville de Moroni.

Les modèles ont été configurés de manière à refléter les conditions d'installation typiques des systèmes photovoltaïques en toiture sur des bâtiments publics, notamment :

- Utilisation de modules photovoltaïques monocristallins sur toitures plates ou inclinées ;
- Ventilation naturelle des modules, privilégiée afin de limiter les pertes thermiques en climat tropical ;
- Fonctionnement en autoconsommation sans stockage, adapté aux profils de consommation et aux usages des bâtiments publics.

Cette approche permet d'obtenir des estimations homogènes et comparables entre sites, compatibles avec le niveau de précision attendu pour une étude de préfaisabilité.

## 7.2 ANALYSE DES PERTES ATTENDUES

L'évaluation du rendement énergétique d'une installation photovoltaïque en toiture ne dépend pas uniquement du potentiel solaire disponible, mais également de l'ensemble des pertes techniques et environnementales susceptible d'affecter la production nette.

À l'échelle de la préfaisabilité, ces pertes sont prises en compte de manière globale à travers les hypothèses intégrées dans les simulations réalisées sous PVsyst, complétées par une appréciation qualitative issue de l'analyse géospatiale et des visites de reconnaissance.

Le tableau ci-après présente les principales pertes techniques et environnementales retenues, ainsi que les hypothèses associées utilisées dans les simulations

Tableau 7-Synthèse des pertes énergétiques prises en compte dans les simulations PVsyst

Catégorie	Facteur / perte	Description / impact sur la production	Approche retenue à l'échelle de la pré faisabilité
Ressource solaire et géométrie	Orientation et inclinaison des modules	Influence directe sur l'irradiation incidente reçue par les modules et sur la production annuelle	Paramétrage dans PVsyst selon le type de toiture (plate ou inclinée) et les orientations dominantes observées
Ombrages	Ombrages proches (acrotères, équipements techniques, bâtiments voisins)	Réduction de l'irradiation utile et pertes électriques associées (effets mismatch)	Prise en compte indirecte par l'exclusion des zones ombragées lors du calepinage ; hypothèses prudentes dans PVsyst. À affiner lors des visites terrain
Optique	Pertes angulaires (IAM)	Augmentation de la réflexion sur le verre du module lorsque l'angle d'incidence s'écarte de la normale	Intégrées via les modèles standards des modules dans PVsyst (fichiers PAN)
Salissures	Encrassement des modules (poussières, fientes, pollution)	Diminution progressive de la transmission lumineuse et baisse de production	Hypothèse globale cohérente avec le climat local ; dépendra de la fréquence réelle de nettoyage et de l'accessibilité des toitures
Température	Échauffement des modules en fonctionnement	Réduction du rendement électrique par rapport aux conditions STC	Modélisé dans PVsyst à partir des données climatiques Meteonorm et d'une ventilation naturelle des modules
Contraintes mécaniques	Charge au vent / exposition	Contraintes sur l'implantation et limitation des inclinaisons	Prise en compte qualitative via structures fixes, inclinaisons modérées et absence de tracking
Pertes électriques DC	Mismatch et pertes ohmiques en courant continu	Pertes Joule dans les câbles et dispersion des caractéristiques électriques des modules	Valeurs standards PVsyst, représentatives d'installations en toiture de taille comparable
Conversion DC/AC	Rendement des onduleurs et seuils de fonctionnement	Pertes liées à la conversion DC/AC et aux plages de fonctionnement des onduleurs	Modélisé dans PVsyst sur la base des caractéristiques typiques d'onduleurs de chaîne
Disponibilité des systèmes	Maintenance corrective et préventive	Réduction ponctuelle du temps de fonctionnement effectif	Prise en compte qualitative à ce stade ; à préciser ultérieurement dans le cadre d'un contrat O&M
Réseau électrique	Indisponibilités réseau / downtime	Limitation temporaire de l'énergie injectée ou autoconsommée	Appréciation qualitative à ce stade ; les hypothèses seront consolidées lors de la phase de faisabilité détaillée en fonction des informations disponibles auprès de l'opérateur du réseau.

D'après l'expérience acquise en Afrique de l'Est et de l'Ouest, l'impact cumulé des pertes se situe généralement entre 12 % et 18 % de la production brute annuelle dans des conditions similaires à celles de Moroni.

Sur la base des données géospatiales, des mesures terrain et des caractéristiques structurelles des bâtiments, une modélisation énergétique a été réalisée sous PVSyst afin d'estimer la performance annuelle de chaque installation photovoltaïque.

### **7.3 RÉSULTATS DES SIMULATIONS PAR BÂTIMENT**

Le tableau ci-après présente les résultats consolidés des simulations photovoltaïques réalisées sous PVSyst pour chacun des bâtiments publics étudiés. Il synthétise, pour chaque site, le nombre estimé de modules photovoltaïques, la puissance installable, la production annuelle simulée sous PVSyst, Énergie utile issue du solaire, Énergie injectée au réseau, la fraction solaire (FS) ainsi que la ration de performance (PR).

Les résultats présentés reposent sur des hypothèses homogènes de calepinage, de configuration électrique et de ressource solaire (données Meteonorm 8), garantissant la comparabilité des performances énergétiques entre les différents bâtiments

À ce stade de la préféabilité, les bâtiments disposant d'installations photovoltaïques existantes ont été considérés comme non équipés dans les simulations, afin d'évaluer de manière homogène le potentiel photovoltaïque additionnel de chaque site et de garantir la comparabilité des résultats

Tableau 8-Résultats des simulations photovoltaïques sous PVsyst par bâtiment

N°	Nom du bâtiment	Nombre de modules	Puissance PV installable (kWc)	Production annuelle (MWh/an)	Énergie utile issue du solaire (MWh/an)	Énergie injectée au réseau (MWh/an)	Ratio de performance (PR) (%)	Fraction solaire (%)	
1	Ministère de l'Énergie de l'Eau et des Hydrocarbures (MEEH)	128	70,40	129,870	126,560	3,310	81,82	28,74	
2	Ministère de l'Éducation nationale	168	92,40	169,620	108,350	61,270	81,42	37,22	
3	Ministère des Affaires Étrangères et de la Coopération internationale	42	23,10	42,703	33,847	8,855	81,99	34,44	
4	Ministère de la Jeunesse et des Sports	24	13,20	24,120	24,150	0,000	81,04	17,28	
5	Ministère de l'Intérieur, de la Décentralisation et de l'Administration Territoriale chargée des relations avec les Institutions	Cabinet Ministériel	285	157,00	284,200	98,940	185,270	80,42	41,34
6		Direction Générale de la Police Nationale	56	30,80	56,570	28,883	27,687	81,46	39,29
7		Service Immigration	42	23,10	42,703	42,700	0,000	81,99	20,26
8		Commissariat Centrale de la Police Nationale	255	140,00	253,880	36,290	217,590	80,29	43,77
9		Brigade Mixte	28	15,40	28,289	14,984	13,305	81,47	38,99
10	Ministère des Postes, des Télécommunications et de l'Économie numérique	580	319,00	585,720	29,537	556,190	81,44	45,98	

Étude de préféabilité de l'utilisation de systèmes photovoltaïques sur les toits des bâtiments publics aux Comores, avec connexion au réseau, et définition d'une politique de net metering.

11	Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Intégration économique / Vice-présidence office commissariat au Plan	204	112,00	206,660	93,020	113,640	81,69	40,22
12	Ministère de l'Éducation Régionale	150	82,50	151,860	63,290	88,560	81,64	40,59
13	Ministère de la justice, des Affaires Islamiques et de la Fonction Publique	740	407,00	748,780	17,891	730,880	81,60	47,13
14	Tribunal de première instance de Moroni	288	158,00	292,050	105,250	186,810	81,78	41,19
15	Palais du Peuple	1024	563,00	1031,600	248,000	783,600	81,24	42,46
16	Ministère de l'agriculture de la pêche de l'Artisanat	22	12,10	21,871	21,852	0,019	80,11	25,88
17	Ministère de l'Environnement / Direction de l'Environnement et des forêts	65	35,80	65,436	47,160	18,280	81,18	35,89
18	Ministère de l'Aménagement du territoire	84	46,20	84,845	67,470	11,373	81,45	34,45
19	Direction Générale de l'Energie des Mines et de l'Eau	75	41,30	75,910	12,483	63,427	81,62	43,32

L'analyse consolidée des résultats des simulations photovoltaïques met en évidence des niveaux de potentiel photovoltaïque contrastés selon les bâtiments, principalement en fonction de la surface exploitable en toiture, des profils de consommation électrique et des contraintes techniques propres à chaque site.

Les puissances photovoltaïques installables varient d'environ 12 kWc pour les bâtiments de petite taille tel que le Ministère de l'Agriculture à plus de 560 pour des bâtiments disposant de grandes surfaces exploitables, comme le Palais du Peuple. Cette variabilité se traduit par des productions annuelles simulées comprise entre 20 MWh/an pour les sites les plus contraints et plus de 1 000 MWh/an pour les bâtiments à fort potentiel photovoltaïque.

Les performances énergétiques simulées sont globalement homogènes, avec des ratios de performance (PR) compris entre 80 % et 82 %, traduisant la cohérence des hypothèses de conception et la qualité de la ressource solaire locale.

La fraction solaire (FS) constitue un indicateur central pour apprécier l'adéquation entre la production photovoltaïque simulée et la consommation électrique interne des bâtiments. Plusieurs sites présentent une fraction solaire élevée, supérieure à 40 %, traduisant une capacité significative de couverture de leurs besoins électriques par le photovoltaïque. À l'inverse, certains bâtiments affichent une fraction solaire plus faible, principalement en raison d'une consommation électrique élevée par rapport aux surfaces exploitables disponibles. Pour ces sites, le photovoltaïque demeure pertinent pour une réduction partielle de la facture énergétique, sans toutefois assurer une couverture significative des besoins totaux à ce stade.

Dans l'ensemble, les résultats confirment que la majorité des bâtiments publics analysés à Moroni présentent un potentiel photovoltaïque exploitable, tant du point de vue énergétique que technique. Ces résultats constituent la base de la sélection technico-énergétique des bâtiments, présentée dans la section suivante.

## 7.4 SÉLECTION TECHNICO-ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS

Sur la base des résultats obtenus, une étape de sélection technico-énergétique a été mise en œuvre afin d'identifier les bâtiments les plus pertinents pour la poursuite de l'étude. Cette sélection repose sur une grille multicritère, construite à partir des résultats des simulations photovoltaïques réalisées sous PVsyst et des informations qualitatives issues des visites de reconnaissance.

Quatre critères principaux ont été retenus :

- **La fraction solaire (FS)**, permettant d'évaluer la part de la consommation électrique du bâtiment couverte par la production photovoltaïque simulée, et donc le niveau de valorisation énergétique de l'installation
- **La puissance photovoltaïque installable (kWc)**, reflétant le potentiel physique du site en fonction des surfaces de toiture exploitable.
- **L'état général du bâtiment et de la toiture**, évalué en fonction du type de toiture, de son état structurel, et de la présence ou non de besoins de renforcement identifiés.
- **Les conditions d'accès et de sécurité**, influençant la faisabilité des travaux d'installation, d'exploitation et de maintenance.

Chaque critère est évalué selon une échelle de notation à trois niveaux (0 à 2), adaptée au niveau de préféabilité de l'étude :

- 2 : condition favorable
- 1 : condition intermédiaire ou nécessitant des vérifications complémentaires
- 0 : condition défavorable.

Le score maximal par bâtiment est ainsi de 8 points.

Le tableau suivant présente la grille de sélection retenue ainsi que les règles de notation associées pour chacun des critères.

*Tableau 9- Grille de sélection technico-énergétique et règles de notation retenues*

Critère	Score 2	Score 1	Score 0
Fraction solaire (FS)	FS ≥ 40 %	25 % ≤ FS < 40 %	FS < 25 %
Puissance PV installable (kWc)	≥ 100 kWc	30 ≤ kWc < 100	< 30 kWc
État général du bâtiment et de la toiture	Toiture en béton en bon état, sans besoin de renforcement identifié	Toiture en tôle ou état moyen, renforcement localisé à vérifier	État dégradé ou renforcement structurel important requis
Accès et sécurité	Accès acceptable et conditions de sécurité maîtrisables	Accès contraint ou sécurité à adapter	Accès difficile et sécurité difficile à garantir

D'un point de vue méthodologique, les toitures en béton en bon état ont été considérées comme plus favorables en termes de durabilité et de portance que les toitures en tôle, même lorsque celles-ci sont en état satisfaisant.

Par ailleurs, aucun bâtiment n'a été identifié comme présentant un état structurel dégradé à ce stade de l'étude.

Sur la base du score total, les bâtiments ont été classés selon les seuils suivants :

- Les bâtiments présentant un score inférieur ou égal à 2 ont été écartés dès cette phase, en raison de contraintes techniques et/ou énergétiques majeures ;
- Les bâtiments ayant un score compris entre 3 et 5 sont conservés sous réserve et feront l'objet d'une analyse économique et financière ;
- Les bâtiments présentant un score supérieur ou égal à 6 sont considérés comme prioritaires et retenus pour l'analyse économique détaillée.

Le Tableau ci-dessous présente les scores obtenus pour chaque critère par bâtiment ainsi que le score total associé

Tableau 10-Résultats de la grille de sélection technico-énergétique des bâtiments publics

Nom du bâtiment	Score État	Score Accès et sécurité	Score (FS)	Score (kWc)	Total/8
Commissariat Centrale de la Police Nationale	2	1	2	2	7
Tribunal de première instance de Moroni	2	1	2	2	7
Palais du Peuple	2	2	2	2	8
Direction Générale de l'Energie des Mines et de l'Eau	2	2	2	1	7
Cabinet Ministériel	1	1	2	2	6
Ministère des Postes, des Télécommunications et de l'Économie numérique	1	1	2	2	6
Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Intégration économique / Vice-présidence office commissariat au Plan	1	1	2	2	6
Ministère de la justice, des Affaires Islamiques et de la Fonction Publique	1	1	2	2	6
Ministère de l'Environnement / Direction de l'Environnement et des forêts	2	2	1	1	6
Ministère de l'Energie de l'Eau et des Hydrocarbures (MEEH)	2	1	1	1	5
Ministère de l'Éducation nationale	2	1	1	1	5
Ministère de l'Éducation Régionale	1	1	2	1	5
Direction Générale de la Police Nationale	1	1	1	1	4
Brigade Mixte	2	1	1	0	4
Ministère de l'Aménagement du territoire	1	1	1	1	4
Ministère des Affaires Étrangères et de la Coopération internationale	1	1	1	0	3
Ministère de l'agriculture de la pêche de l'Artisanat	1	1	1	0	3
Ministère de la Jeunesse et des Sports	1	1	0	0	2
Service Immigration	1	0	0	0	1

Sur la base de ce classement, deux bâtiments ont été écartés dès cette phase de sélection en raison d'un score global insuffisant, traduisant des contraintes techniques et énergétiques significatives :

- Le Service Immigration
- Le Ministère de la Jeunesse et des Sports.

Les 17 bâtiments restants ont été conservés pour la poursuite de l'analyse économique et financière.

Cette approche permet d'assurer une sélection progressive, transparente et cohérente, en distinguant clairement la pertinence technico-énergétique des sites avant l'évaluation économique et financière. Elle permet également d'optimiser le périmètre d'analyse en concentrant les étapes suivantes de l'étude sur les bâtiments présentant le meilleur compromis entre potentiel énergétique et faisabilité technique.

## **8 ESTIMATION DES COÛTS DES INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES**

La présente section vise à estimer les coûts d'investissement (CAPEX) et les coûts d'exploitation et de maintenance (OPEX) associés aux installations photovoltaïques en toiture envisagées pour les 17 bâtiments publics retenus à l'issue de la sélection technico-énergétique.

### **8.1 COÛTS D'INVESTISSEMENT (CAPEX)**

Le Tableau 11 présente une estimation détaillée des coûts d'investissement (CAPEX) pour chacun des bâtiments retenus établies à partir des puissances photovoltaïques installables issues des simulations PVsyst et de références issues de projets photovoltaïques en toiture réalisés dans des contextes comparables.

Le CAPEX est structuré selon les postes suivants :

- Fourniture des modules photovoltaïques,
- Fourniture des onduleurs,
- Autres équipements électriques et de protection (câbles, coffrets, protections, monitoring),
- Études, ingénierie et analyses,
- Transport, installation et mise en service (EPC).

Les montants sont exprimés en euros (€) et correspondent à des ordres de grandeur compatibles avec une étude de pré faisabilité. Ils seront affinés lors des phases ultérieures du projet, notamment après des visites des terrains techniques détaillées, des études structurelles approfondies et des consultations auprès des fournisseurs et entreprises EPC.

Tableau 11- Estimation détaillée des coûts d'investissement (CAPEX) par bâtiment

Nom du bâtiment		Coût des Modules photovoltaïques (EUR)	Coût Onduleurs (EUR)	Autres équipements électriques et de protection (EUR)	Études, ingénierie et analyses (EUR)	Installation, transport et mise en service (EUR)	CAPEX total (EUR)	Coût spécifique (EUR/Wc)
Ministère de l'Énergie de l'Eau et des Hydrocarbures (MEEH)		38 400	20 000	12 000	11 000	28 600	110 000	1,56
Ministère de l'Éducation nationale		50 400	30 000	12 000	11 000	33 000	136 400	1,48
Ministère des Affaires Étrangères et de la Coopération internationale		12 600	5 500	4 400	3 000	10 560	36 060	1,56
Ministère de l'Intérieur, de la Décentralisation et de l'Administration Territoriale chargée des relations avec les Institutions	Cabinet Ministériel	85 500	45 000	14 000	11 000	50 300	205 800	1,31
	Direction Générale de la Police Nationale	16 800	10 000	4 900	3 000	13 080	47 780	1,55
	Commissariat Centrale de la Police Nationale	76 500	40 000	14 000	11 000	47 100	188 600	1,34
	Brigade Mixte	8 400	5 000	4 200	3 000	8 440	29 040	1,89
Ministère des Postes, des Télécommunications et de l'Économie numérique		174 000	72 000	34 000	20 000	101 800	401 800	1,26
Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Intégration économique / Vice-présidence office commissariat au Plan		61 200	30 000	14 000	11 000	37 520	153 720	1,37
Ministère de l'Éducation Régionale		45 000	25 000	12 000	11 000	36 000	129 000	1,56

Étude de pré faisabilité de l'utilisation de systèmes photovoltaïques sur les toits des bâtiments publics aux Comores, avec connexion au réseau, et définition d'une politique de net metering.

Ministère de la justice, des Affaires Islamiques et de la Fonction Publique	222 000	96 000	41 500	20 000	125 400	509 900	1,25
Tribunal de première instance de Moroni	86 400	45 000	14 000	11 000	50 600	207 000	1,31
Palais du Peuple	307 200	120 000	63 000	20 000	159 400	674 600	1,2
Ministère de l'agriculture de la pêche de l'Artisanat	6 800	5 000	3 800	3 000	7 960	26 560	2,2
Ministère de l'Environnement / Direction de l'Environnement et des forêts	19 500	11 000	6 800	3 000	15 100	55 400	1,55
Ministère de l'Aménagement du territoire	25 200	15 000	6 800	3 500	18 820	69 320	1,5
Direction Générale de l'Energie des Mines et de l'Eau	22 500	15 000	6 800	3 000	16 100	63 400	1,54

Les écarts de CAPEX observés entre les bâtiments s'expliquent principalement par :

- La puissance photovoltaïque installable et la surface exploitable des toitures.
- Le type de toiture et les structures de support associées.
- La complexité d'accès et d'implantation.
- Ainsi que, pour certaines institutions, la dispersion spatiale des bâtiments, impliquant des contraintes logistiques et d'installation supplémentaires.

À l'échelle des bâtiments analysés, le CAPEX total estimé varie d'environ 25 000 € pour les installations de petite puissance à plus de 670 000 € pour les grandes toitures à fort potentiel, traduisant une forte hétérogénéité des tailles de projets et des investissements associés.

## 8.2 COÛTS D'EXPLOITATION ET DE MAINTENANCE (OPEX)

Les coûts d'exploitation et de maintenance (OPEX) regroupent l'ensemble des dépenses nécessaires au maintien des performances des installations photovoltaïques sur leur durée de vie. Ils incluent notamment :

- La maintenance préventive et corrective des modules photovoltaïques et des onduleurs,
- Les inspections électriques périodiques,
- Le nettoyage des modules, compte tenu des conditions climatiques locales
- Les interventions ponctuelles de dépannage et de remise en service.
- L'assurance des installations.

Compte tenu de la simplicité des installations photovoltaïques en toiture considéré dans cette étude, notamment l'absence de stockage, une architecture décentralisée, des équipements standards, les coûts d'exploitation sont considérés comme modérés à ce stade.

Afin d'estimer le coût d'exploitation sur la durée de vie du projet, une inflation moyenne de 5 % par an est considérée sur une période de 25 ans conformément aux hypothèses retenues dans les simulations PVsyst et aux pratiques standard des études préliminaires. Cette inflation reflète l'augmentation progressive des coûts liés à la main-d'œuvre, aux consommables et aux prestations de maintenance.

Le Tableau 12 présente, pour chaque bâtiment, le CAPEX total, l'OPEX annuel estimé et l'OPEX cumulé actualisé sur la durée de vie du projet.

Tableau 12-Estimation des coûts d'exploitation et de maintenance (OPEX) par bâtiment

Nom du bâtiment	CAPEX total (EUR)	OPEX annuel ((EUR)/an)	OPEX cumulé actualisé sur 25 ans (EUR)
Ministère de l'Énergie de l'Eau et des Hydrocarbures (MEEH)	110 000	5000	94 017
Ministère de l'Éducation nationale	136 400	6000	112 820
Ministère des Affaires Étrangères et de la Coopération internationale	36 060	2350	44 188
Cabinet Ministériel	205 800	8000	150 427

Ministère de l'Intérieur, de la Décentralisation et de l'Administration Territoriale chargée des relations avec les Institutions	Direction Générale de la Police Nationale	47 780	2800	52 649
	Commissariat Centrale de la Police Nationale	188 600	8000	150 427
	Brigade Mixte	29 040	2200	41 367
Ministère des Postes, des Télécommunications et de l'Économie numérique		401 800	12300	231 281
Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Intégration économique / Vice-présidence office commissariat au Plan		153 720	6500	122 222
Ministère de l'Éducation Régionale		129 000	5500	103 418
Ministère de la justice, des Affaires Islamiques et de la Fonction Publique		509 900	13900	261 366
Tribunal de première instance de Moroni		207 000	8000	150 427
Palais du Peuple		674 600	21000	394 870
Ministère de l'agriculture de la pêche de l'Artisanat		26 560	2700	50769
Ministère de l'Environnement / Direction de l'Environnement et des forêts		55 400	2900	54 530
Ministère de l'Aménagement du territoire		69 320	3500	65 812
Direction Générale de l'Energie des Mines et de l'Eau		63 400	3500	65 812

**À noter :** les valeurs d'OPEX intègrent également une provision annuelle pour le remplacement des onduleurs, conformément aux paramètres PVsyst. Cette provision représente une part significative du coût d'exploitation annuel, ce qui explique que le ratio OPEX/CAPEX puisse paraître élevé pour certaines installations. Sans cette provision, l'OPEX annuel se situerait généralement dans la fourchette couramment observée de 2 à 3 % du CAPEX pour des systèmes photovoltaïques en toiture.

- **Exemple illustratif – Ministère de l'Éducation Régionale :**

Pour ce site, le CAPEX est de 129 000 € et l' OPEX total annuel est de 5 500 €, dont 2 500 € correspondent à la provision pour remplacement des onduleurs.

Ainsi :

- la provision représente 45,5 % de l'OPEX annuel ;
- elle correspond à 1,94 % du CAPEX ;
- le ratio OPEX/CAPEX atteint 4,26 % ;
- sans provision, ce ratio retomberait à 2,33 %, ce qui est conforme aux pratiques usuelles pour des installations PV en toiture.

Cet exemple confirme que la provision de remplacement des onduleurs constitue l'un des principaux facteurs expliquant le niveau d'OPEX observé, tout en reflétant les pratiques standard de modélisation PVsyst pour l'analyse du cycle de vie sur 25 ans.

De manière générale, les coûts d'exploitation croissent de façon quasi proportionnelle à la puissance installée, tout en restant faibles au regard de l'investissement initial, ce qui est caractéristique des installations photovoltaïques en toiture sans stockage.

Cette performance économique s'explique notamment par :

- La fiabilité des équipements retenus,
- La simplicité de l'architecture des systèmes,
- La possibilité de mutualiser certaines opérations de maintenance entre plusieurs bâtiments publics situés dans un périmètre urbain restreint.

À l'échelle de l'ensemble des 17 bâtiments étudiés, les coûts d'exploitation annuels par bâtiment se situent typiquement dans une plage comprise entre environ 2 000 € et 21 000 € par an, selon la taille des installations.

Ces résultats confirment que les charges d'exploitation associées aux installations photovoltaïques en toiture restent maîtrisées et compatibles avec une exploitation durable des systèmes, tout en justifiant l'intérêt économique des sites présentant les meilleurs niveaux de production et de coût de l'énergie.

## 9 ANALYSE FINANCIÈRE

En complément d'estimation des coûts d'investissement (CAPEX) et des coûts d'exploitation et de maintenance (OPEX), une analyse financière indicative a été réalisée pour les bâtiments publics retenus à l'issue de la sélection technico-énergétique, soit 17 bâtiments.

Cette analyse vise à comparer la performance économique relative des sites à un niveau de préfaisabilité, et à appuyer la priorisation des bâtiments, sans constituer une analyse financière détaillée ni un engagement contractuel.

### 9.1 INDICATEURS FINANCIERS RETENUS

Les principaux indicateurs économiques et financiers considérés sont les suivants :

- **Coût actualisé de l'énergie (LCOE) :** Le LCOE représente le coût moyen actualisé de production de l'électricité photovoltaïque sur l'ensemble de la durée de vie du projet. Il intègre l'investissement initial (CAPEX), les coûts d'exploitation et de maintenance (OPEX) ainsi que la production énergétique attendue. Il constitue un indicateur clé pour comparer la compétitivité économique des installations photovoltaïques entre les bâtiments et par rapport au tarif de l'électricité du réseau.
- **Valeur actuelle nette (VAN) :** La valeur actuelle nette compare la valeur actualisée des flux économiques générés par le projet sur toute sa durée de vie à l'investissement initial. Une VAN positive indique que le projet est économiquement pertinent, les bénéfices actualisés étant supérieurs au coût d'investissement initial. À l'inverse, une VAN négative traduit une rentabilité insuffisante dans les conditions considérées.

- **Taux de rentabilité interne (TRI)** : Le taux de rentabilité interne correspond au taux d'actualisation pour lequel la VAN du projet est nulle. Il représente le rendement économique attendu de l'investissement. Plus le TRI est élevé, plus le projet est considéré comme attractif sur le plan financier.
- **Retour sur investissement (ROI)** : Le retour sur investissement exprime le rapport entre le gain économique cumulé généré par l'installation photovoltaïque et le coût d'investissement initial. Il permet d'apprécier de manière synthétique l'efficacité globale de l'investissement.
- **Temps de retour simple** : Le temps de retour simple correspond au nombre d'années nécessaires pour que les économies générées par le système photovoltaïque compensent l'investissement initial, sans prise en compte de l'actualisation.

## 9.2 HYPOTHÈSES FINANCIERS ET TARIFAIRES

Afin de garantir la comparabilité des résultats entre les différents bâtiments étudiés, les hypothèses financières retenues sont homogènes pour l'ensemble des sites analysés. Elles reposent sur les paramètres suivants :

- Une durée de vie du projet de 25 ans ; correspondant à la durée d'exploitation usuelle des installations photovoltaïques ;
- Un taux de dégradation annuelle des modules de **0,6 %/an à partir de la deuxième année de fonctionnement**, conformément aux paramètres utilisés dans les simulations PVsyst et en accord avec les performances typiques des modules monocristallins ;
- Un taux d'inflation annuelle moyen de 5 %, appliquée aux coûts d'exploitation et de maintenance, reflétant un contexte insulaire importateur d'énergie ;
- Un taux d'actualisation de 7 %, conforme aux pratiques courantes pour des projets d'infrastructure énergétique dans des contextes à risque modéré à élevé
- Des coûts d'exploitation proportionnels au CAPEX, constants en structure sur la durée du projet.
- Les investissements sont supposés être réalisés entièrement en fonds propres, sans recours à l'endettement. En conséquence, aucune charge financière liée au service de la dette n'est intégrée dans l'analyse financière.
- Le prix de l'électricité retenu pour l'analyse financière correspond au tarif moyen actuel de l'électricité aux Comores, estimé à 120 francs comoriens par kWh, soit environ 0,24 €/kWh. Ce tarif est utilisé :
  - Pour la valorisation de l'électricité autoconsommée, correspondant aux économies réalisées par les bâtiments publics du fait de la réduction des achats d'électricité au réseau ;
  - Comme référence de comparaison pour l'évaluation de la compétitivité du coût de l'énergie photovoltaïque produite.

À ce stade, aucun cadre réglementaire formalisé de type net metering n'est encore pleinement opérationnel aux Comores pour les bâtiments publics. Toutefois, afin de disposer d'un cadre économique cohérent à un niveau de préféabilité, l'analyse considère une hypothèse de vente du surplus d'électricité photovoltaïque injecté au réseau.

La valorisation de cette énergie injectée repose sur un tarif d'achat indicatif de 0,15 €/kWh avec une durée de garantie de 20 ans et une évolution annuelle du tarif de +1 %, conformément aux paramètres standards utilisés dans PVsyst.

Ce tarif ne constitue pas une hypothèse contractuelle, mais un ordre de grandeur destiné à :

- Représenter une valorisation prudente du surplus injecté ;
- Permettre la comparaison économique entre bâtiments ;
- Anticiper l'évolution future possible vers des mécanismes de net metering, d'autoconsommation avec compensation ou de contrats d'achat dédiés pour les bâtiments publics.

Dans un scénario de net metering futur, la valeur économique du surplus pourrait être équivalente au tarif de l'électricité évitée, ce qui améliorerait mécaniquement les indicateurs financiers présentés.

Les résultats financiers présentés reposent sur des hypothèses standards de coûts, cohérentes avec le niveau de précision attendu pour une étude de préféabilité. Ils doivent être interprétés comme des ordres de grandeur comparatifs, sans préjuger des ajustements qui seront réalisés lors des phases ultérieures.

Le tableau 13 ci-après présente la synthèse des indicateurs financiers pour l'ensemble des bâtiments étudiés

Tableau 13- indicateurs financiers

Nom du bâtiment		LCOE (EUR/kWh)	Valeur actuelle nette (VAN)- (EUR)	Taux de rentabilité interne (TRI) %	Retour sur investissement (ROI) %	Temps de retour simple (ans)
Ministère de l'Énergie de l'Eau et des Hydrocarbures (MEEH)		0,14	168 487,53	22,68	153,2	5,3
Ministère de l'Éducation nationale		0,13	175 247,75	20,42	128,5	6
Ministère des Affaires Étrangères et de la Coopération internationale		0,17	33 701,20	17,76	93,5	6,8
Ministère de l'Intérieur, de la Décentralisation et de l'Administration Territoriale chargée des relations avec les Institutions	Cabinet Ministériel	0,11	264 846,78	20,29	128,7	6
	Direction Générale de la Police Nationale	0,16	33 223,96	15,19	69,5	8,1
	Commissariat Centrale de la Police Nationale	0,12	158 972,20	16,26	84,3	7,7
	Brigade Mixte	0,22	-2 982,65	0	-10,3	Non rentable
Ministère des Postes, des Télécommunications et de l'Économie numérique		0,1	456 184,56	18,68	113,5	6,7
Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Intégration économique / Vice-présidence office commissariat au Plan		0,12	198 634,40	20,44	129,2	6

Étude de préféabilité de l'utilisation de systèmes photovoltaïques sur les toits des bâtiments publics aux Comores, avec connexion au réseau, et définition d'une politique de net metering.

Ministère de l'Éducation Régionale	0,14	110 815,79	16,4	85,9	7,6
Ministère de la justice, des Affaires Islamiques et de la Fonction Publique	0,09	599 578,99	18,95	117,6	6,6
Tribunal de première instance de Moroni	0,11	284 690,63	21,08	137,5	5,8
Palais du Peuple	0,09	1 062 585,30	22,62	157,5	5,4
Ministère de l'agriculture de la pêche de l'Artisanat	0,3	-10 496,02	-100,01	-39,5	Non rentable
Ministère de l'Environnement / Direction de l'Environnement et des forêts	0,15	59 643,14	18,74	107,7	6,5
Ministère de l'Aménagement du territoire	0,14	91 656,19	20,96	132,2	5,8
Direction Générale de l'Energie des Mines et de l'Eau	0,15	21 503,04	11,3	33,9	11,2

L'analyse des indicateurs financiers présentés met en évidence une forte hétérogénéité des performances économiques entre les bâtiments étudiés, confirmant l'intérêt d'une approche de priorisation différenciée.

Les coûts indicatifs de l'énergie photovoltaïque (LCOE) se situent globalement dans une plage comprise entre 0,09 et 0,3 €/kWh, selon les caractéristiques techniques et énergétiques propres à chaque site.

Les valeurs les plus faibles sont observées pour les bâtiments disposant de grandes surfaces exploitables, d'une bonne compacité des installations et d'une adéquation favorable entre production photovoltaïque et consommation interne, tels que Le Palais du Peuple. Ces sites présentent des VAN fortement positives, des TRI élevés (souvent supérieurs à 18-20 %) et des temps de retour simples courts, généralement compris entre 5 et 7 ans, traduisant une rentabilité économique élevée à l'échelle de la préfaisabilité.

À l'inverse, certains bâtiments affichent des coûts unitaires de l'énergie plus élevés, associés à des VAN faibles ou négatives, des TRI faibles voire nuls, et des temps de retour très longs ou non atteignables notamment le cas de La Brigade Mixte.

Ces performances économiques limitées s'expliquent principalement par :

- Une puissance installable réduite,
- Une faible fraction solaire, liée à une inadéquation entre production et consommation,
- Des coûts d'investissement unitaires élevés rapportés à l'énergie produite.

De manière générale, l'analyse financière confirme que les indicateurs économiques (LCOE, VAN, TRI, et ROI) sont fortement corrélés à :

- La taille des installations,
- La fraction solaire atteinte,
- La capacité de valorisation de l'énergie produite, que ce soit par autoconsommation ou par injection réseau.

Les résultats présentés mettent en évidence des différences significatives de performance économique entre les bâtiments étudiés, ainsi que des arbitrages entre les principaux indicateurs financiers analysés. Ces éléments justifient la mise en place d'une méthodologie de priorisation structurée, permettant de classer les bâtiments de manière cohérente et comparable.

### 9.3 ANALYSE DE SENSIBILITÉ AU COÛT D'INVESTISSEMENT (CAPEX)

Afin d'évaluer la robustesse économique des projets photovoltaïques proposés, une analyse de sensibilité a été réalisée sur le coût d'investissement initial (CAPEX). Dans le cadre d'une étude de préfaisabilité, les coûts d'installation peuvent varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment l'évolution des prix des équipements photovoltaïques, les conditions logistiques propres au contexte insulaire, ainsi que les coûts d'installation et de transport.

Pour apprécier l'impact de ces incertitudes, une variation de  $\pm 10\%$  du CAPEX a été appliquée aux investissements estimés pour chaque bâtiment. L'impact de cette variation a été évalué sur le temps de retour simple, un indicateur directement lié au niveau d'investissement initial.

Les résultats détaillés de cette analyse de sensibilité sont présentés dans le tableau 14 ci-après, qui compare pour chaque bâtiment le scénario de référence avec les scénarios d'augmentation et de diminution du CAPEX.

Tableau 14 - Analyse de sensibilité du temps de retour simple à une variation du CAPEX ( $\pm 10\%$ )

Nom du bâtiment		CAPEX (EUR)	Temps de retour simple (ans)	CAPEX +10 %	Temps de retour simple (CAPEX +10 %)	CAPEX -10 %	Temps de retour simple (CAPEX -10 %)
Ministère de l'Énergie de l'Eau et des Hydrocarbures (MEEH)		110 000	5,3	121000	5,83	99000	4,77
Ministère de l'Éducation nationale		136 400	6	150040	6,6	122760	5,4
Ministère des Affaires Étrangères et de la Coopération internationale		36 060	6,8	39666	7,48	32454	6,12
Ministère de l'Intérieur, de la Décentralisation et de l'Administration Territoriale chargée des relations avec les Institutions	Cabinet Ministériel	205 800	6	226380	6,6	185220	5,4
	Direction Générale de la Police Nationale	47 780	8,1	52558	8,91	43002	7,29
	Commissariat Centrale de la Police Nationale	188 600	7,7	207460	8,47	169740	6,93
	Brigade Mixte	29 040	Non rentable	31944	Non rentable	26136	Non rentable
Ministère des Postes, des Télécommunications et de l'Économie numérique		401 800	6,7	441980	7,37	361620	6,03
Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Intégration économique / Vice-présidence office commissariat au Plan		153 720	6	169092	6,6	138348	5,4
Ministère de l'Éducation Régionale		129 000	7,6	141900	8,36	116100	6,84

Étude de pré faisabilité de l'utilisation de systèmes photovoltaïques sur les toits des bâtiments publics aux Comores, avec connexion au réseau, et définition d'une politique de net metering.

Ministère de la justice, des Affaires Islamiques et de la Fonction Publique	509 900	6,6	560890	7,26	458910	5,94
Tribunal de première instance de Moroni	207 000	5,8	227700	6,38	186300	5,22
Palais du Peuple	674 600	5,4	742060	5,94	607140	4,86
Ministère de l'agriculture de la pêche de l'Artisanat	26 560	Non rentable	29216	Non rentable	23904	Non rentable
Ministère de l'Environnement / Direction de l'Environnement et des forêts	55 400	6,5	60940	7,15	49860	5,85
Ministère de l'Aménagement du territoire	69 320	5,8	76252	6,38	62388	5,22
Direction Générale de l'Energie des Mines et de l'Eau	63 400	11,2	69740	12,32	57060	10,08

Les résultats montrent que, pour la majorité des bâtiments étudiés :

- Une **augmentation de 10 % du CAPEX** entraîne un allongement modéré du temps de retour simple (généralement inférieur à une année supplémentaire).
- Une **réduction de 10 % du CAPEX** permet au contraire de réduire sensiblement le temps de retour, améliorant ainsi la rentabilité globale.
- Les bâtiments présentant déjà un temps de retour élevé ou un profil non rentable conservent ces caractéristiques sous un choc de  $\pm 10\%$ , ce qui confirme la cohérence interne de l'analyse.

De manière générale, cette analyse montre que la plupart des installations conservent un temps de retour simple inférieur à 8 ans, même en intégrant une marge de variation raisonnable sur les coûts d'investissement. Cela témoigne de la solide viabilité économique des projets photovoltaïques proposés au stade de préféabilité.

#### 9.4 SÉLECTION FINANCIÈRE ET PRIORISATION DES BÂTIMENTS

À l'issue de l'analyse comparative des indicateurs financiers (LCOE, VAN, TRI, ROI et temps de retour simple), une seconde phase de sélection est réalisée afin d'identifier les bâtiments présentant les meilleures performances économiques et d'écarter les projets structurellement non rentables à ce stade de la préféabilité.

Cette approche vise à :

- Consolider la robustesse économique du portefeuille de projets ;
- Hiérarchiser les investissements dans un contexte de ressources financières limitées ;
- Appuyer la prise de décision par des critères financiers objectivés, complémentaires aux critères techniques analysés précédemment.

Dans un premier temps, une règle d'exclusion est appliquée aux bâtiments dont les indicateurs financiers traduisent une absence de rentabilité économique, à savoir :

- Une VAN négative ou nulle ;
- Un TRI nul ou inférieur au taux d'actualisation retenu (7 %) ;
- Un temps de retour simple non atteignable sur la durée de vie du projet.

Sur la base de ces critères, deux bâtiments qui sont **la Brigade Mixte et le Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Artisanat**, sont considérés comme non rentables à ce stade et sont exclus de la phase de priorisation financière, 15 bâtiments sont donc à garder pour la priorisation.

Ainsi, l'analyse des résultats montre que :

- Certains bâtiments présentent un LCOE faible, mais un temps de retour plus long ;
- D'autres affichent un temps de retour court, malgré un LCOE plus élevé.

Ces situations traduisent des logiques économiques différentes :

- Le LCOE reflète le coût unitaire de production de l'énergie sur le long terme, incluant implicitement le CAPEX et l'OPEX ;
- La VAN et le TRI mesurent la création de valeur globale du projet ;

- Le temps de retour simple constitue un indicateur de lisibilité budgétaire et de rapidité de récupération de l'investissement.

Afin d'assurer une priorisation équilibrée, une grille de notation financière a été mise en place, reposant sur trois indicateurs clés. Chaque critère est noté sur une échelle de 1 à 3, selon les seuils définis ci-après :

*Tableau 15-Grille de notation financière et seuils d'évaluation retenus*

Critère	Score 3	Score 2	Score 1
Coût actualisé de l'énergie (LCOE) (€/kWh)	$\leq 0,10$	$0,11 < \text{LCOE} \leq 0,15$	$> 0,15$
Valeur actuelle nette (VAN) (€)	$\geq 400\ 000$	$150\ 000 \leq \text{VAN} < 400\ 000$	$< 150\ 000$
Temps de retour simple (ans)	$\leq 6$	$6 < \text{TR} \leq 8$	$> 8$

Le score financier global de chaque bâtiment correspond à la somme des scores obtenus pour les trois critères, soit un score maximal de 9 points.

Sur cette base, les bâtiments sont classés selon les catégories suivantes :

- Score total compris entre 7 et 9 : priorité financière élevée ;
- Score total compris entre 5 et 6 : priorité financière moyenne ;
- Score total inférieur ou égal à 4 : priorité financière faible.

Cette classification permet d'identifier les bâtiments présentant le meilleur compromis entre coût de l'énergie, rentabilité globale et rapidité de retour sur investissement.

Le tableau ci-après présente, pour chaque bâtiment étudié, les scores attribués aux indicateurs financiers retenus ainsi que le score financier total et le classement associé pour les 15 bâtiments retenus :

Tableau 16-Résultats de la priorisation financière des bâtiments retenus

N°	Nom du bâtiment	Score LCOE	Score VAN	Score Temps de retour	Score total
1	Palais du Peuple	3	3	3	9
2	Ministère de la Justice, des Affaires Islamiques et de la Fonction Publique	3	3	2	8
3	Ministère des Postes, Télécommunications et de l'Économie numérique	3	3	2	8
4	Tribunal de première instance de Moroni	2	2	3	7
5	Cabinet ministériel – Ministère de l'Intérieur	2	2	3	7
6	Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Intégration économique / Vice-présidence – Plan	2	2	3	7
7	Ministère de l'Énergie de l'Eau et des Hydrocarbures (MEEH)	2	2	3	7
8	Ministère de l'Éducation nationale	2	2	3	7
9	Commissariat Central de la Police nationale	2	2	2	6
10	Ministère de l'Aménagement du territoire	2	1	3	6
11	Ministère de l'Éducation Régionale	2	1	2	5
12	Ministère de l'Environnement / Direction de l'Environnement et des forêts	2	1	2	5
13	Ministère des Affaires Étrangères et de la Coopération internationale	1	1	2	4
14	Direction Générale de la Police nationale	2	1	1	4
15	Direction Générale de l'Énergie, des Mines et de l'Eau	2	1	1	4

Sur la base de la grille de notation financière appliquée et conformément aux objectifs de la présente étude de préféabilité :

- Les bâtiments classés en priorité financière élevée ont été retenus en raison de la robustesse de leurs indicateurs économiques, caractérisés par un coût actualisé de l'énergie compétitif, des valeurs actuelles nettes significativement positives et des temps de retour compatibles avec les contraintes budgétaires publiques. Ces sites sont particulièrement adaptés à une mise en œuvre photovoltaïque à court terme.
- Les bâtiments classés en priorité financière moyenne ont également été intégrés afin de compléter le portefeuille de projets par des sites présentant un potentiel économique avéré, mais avec des marges de performance plus modérées. Leur mise en œuvre reste pertinente dans une logique de déploiement progressif, notamment sous réserve d'optimisations techniques, d'un ajustement du dimensionnement ou d'une amélioration des conditions d'autoconsommation.

Les bâtiments classés en priorité financière faible ne sont pas retenus à ce stade de l'étude. Leur exclusion s'explique principalement par une rentabilité économique insuffisante, traduite par

des valeurs actuelles nettes faibles ou négatives, des temps de retour longs ou non atteignables et, par conséquent, un impact financier limité à l'échelle du programme, malgré des indicateurs ponctuellement positifs.

## 10 BÂTIMENTS RETENUS

Conformément aux objectifs de la présente étude de pré faisabilité et au cadrage des termes de référence, l'analyse a été recentrée sur un sous-ensemble de 12 bâtiments, situé dans l'intervalle recommandé de 3 à 15 sites.

Sur cette base :

- Les 8 bâtiments classés en priorité financière élevée ont été retenus en raison de leur impact énergétique significatif, de leur bonne adéquation production–consommation et de la robustesse de leurs indicateurs technico-économiques, les rendant particulièrement adaptés à une mise en œuvre photovoltaïque à court terme ;
- Les 4 bâtiments classés en priorité financière moyenne ont été intégrés afin de compléter le portefeuille de projets par des sites présentant un potentiel photovoltaïque avéré, mais avec un levier énergétique ou économique plus modéré, et pour lesquels une mise en œuvre reste pertinente dans une logique de déploiement progressif ou après optimisation du dimensionnement et des conditions d'autoconsommation.

Le tableau ci-après présente la synthèse des principales caractéristiques énergétiques et financières des 12 bâtiments retenus.

Tableau 17-*Caractéristiques énergétiques et financières des bâtiments retenus*

N°	Nom du bâtiment	Puissance PV installable (kWc)	Production annuelle (MWh/an)	Fraction solaire (%)	CAPEX (EUR)	LCOE (EUR/kWh)	Valeur actuelle nette (VAN)-(EUR)	Taux de rentabilité interne (TRI) %	Retour sur investissement (ROI) %	Temps de retour simple (ans)	Économies annuelles estimées (EUR)
1	Palais du Peuple	563	1031,6	42,46	674 600	0,09	1 062 585,30	22,62	157,5	5,4	247 584
2	Ministère de la justice, des Affaires Islamiques et de la Fonction Publique	407	748,78	47,13	509 900	0,09	599 578,99	18,95	117,6	6,6	179 707
3	Ministère des Postes, des Télécommunications et de l'Économie numérique	319	585,72	45,98	401 800	0,1	456 184,56	18,68	113,5	6,7	140 573
4	Tribunal de première instance de Moroni	158	292,05	41,19	207 000	0,11	284 690,63	21,08	137,5	5,8	70 092
5	Cabinet Ministériel	157	284,2	41,34	205 800	0,11	264 846,78	20,29	128,7	6	68 208
6	Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Intégration économique / Vice-présidence office commissariat au Plan	112	206,66	40,22	153 720	0,12	198 634,40	20,44	129,2	6	49 598
7	Ministère de l'Énergie de l'Eau et des Hydrocarbures (MEEH)	70,4	129,87	28,74	110 000	0,14	168 487,53	22,68	153,2	5,3	31 169
8	Ministère de l'Éducation nationale	92,4	169,62	37,22	136 400	0,13	175 247,75	20,42	128,5	6	40 709

Étude de préfaisabilité de l'utilisation de systèmes photovoltaïques sur les toits des bâtiments publics aux Comores, avec connexion au réseau, et définition d'une politique de net metering.

9	Commissariat Centrale de la Police Nationale	140	253,88	43,77	188 600	0,12	158 972,20	16,26	84,3	7,7	60 931
10	Ministère de l'Aménagement du territoire	35,8	65,436	34,45	69 320	0,14	91 656,19	20,96	132,2	5,8	15 705
11	Ministère de l'Éducation Régionale	82,5	151,86	40,59	129 000	0,14	110 815,79	16,4	85,9	7,6	36 446
12	Ministère de l'Environnement / Direction de l'Environnement et des forêts	35,8	65,436	35,89	55 400	0,15	59 643,14	18,74	107,7	6,5	15 705

Les bâtiments retenus représentent une puissance photovoltaïque totale installable d'environ 2,17 MWc, permettant une production annuelle estimée à près de 3,99 GWh d'électricité solaire.

Le coût total d'investissement du programme est estimé à 2,84 millions d'euros.

Sur la base d'un tarif moyen de l'électricité de 0,24 €/kWh, les économies annuelles agrégées pour les bâtiments publics étudiés sont estimées à environ 956 427 euros par an.

Ces résultats confirment le potentiel significatif du déploiement de systèmes photovoltaïques sur les bâtiments publics étudiés, tant du point de vue énergétique qu'économique.

Le tableau ci-après présente une synthèse des principaux indicateurs énergétiques et économiques du programme photovoltaïque envisagé.

*Tableau 18-Synthèse des indicateurs énergétiques et économiques du programme photovoltaïque*

Indicateur	Valeur
Nombre de bâtiments	12
Puissance photovoltaïque totale	2,17 MWc
Production annuelle estimée	3,99 GWh
CAPEX total	2 841 540 €
Économies annuelles estimées	956 427 €/an

## 11 RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE CO<sub>2</sub>

La mise en œuvre d'installations photovoltaïques en toiture sur les bâtiments publics étudiés contribue directement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, en substituant une production d'électricité renouvelable à une électricité majoritairement issue de sources thermiques fossiles.

Le système électrique des Comores repose principalement sur des centrales thermiques fonctionnant au diesel, avec une contribution limitée des énergies renouvelables. Dans ce contexte, le facteur d'émission du réseau électrique est relativement élevé.

À défaut de données officielles détaillées et consolidées spécifiques aux Comores, l'analyse adopte un facteur d'émission moyen du réseau électrique de 700 kgCO<sub>2</sub>/MWh, valeur représentative d'un système électrique insulaire fortement dépendant des combustibles fossiles.

Cette hypothèse est cohérente avec les ordres de grandeur généralement retenus pour des réseaux insulaires comparables et est jugée adaptée au niveau de précision attendu pour une étude de pré faisabilité.

La production d'électricité photovoltaïque est considérée comme une production à émissions opérationnelles nulles. Les émissions liées au cycle de vie des équipements photovoltaïques (fabrication, transport, fin de vie) ne sont pas prises en compte à ce stade, conformément à l'objectif comparatif et préliminaire de l'étude.

Les émissions annuelles de CO<sub>2</sub> évitées par chaque installation photovoltaïque sont calculées à partir de la relation suivante :

$$\text{Émissions évitées (tCO}_2\text{/an)} = \text{Production PV annuelle (MWh/an)} \times 700$$

Où :

- La production photovoltaïque annuelle est issue des simulations réalisées sous PVsyst,
- Le facteur 700 correspond au facteur d'émission du réseau électrique exprimé en kgCO<sub>2</sub>/MWh.

Cette approche permet d'obtenir un ordre de grandeur des bénéfices environnementaux associés à chaque bâtiment, compatible avec le niveau de pré faisabilité de l'étude.

Le tableau 19 présente, pour chaque bâtiment sélectionné les émissions de CO<sub>2</sub> évitées associées.

Tableau 19-Émissions de CO<sub>2</sub> évitées par bâtiment

N°	Nom du bâtiment	Émissions évitées (tCO <sub>2</sub> /an)
1	Palais du Peuple	722,12
2	Ministère de la justice, des Affaires Islamiques et de la Fonction Publique	524,15
3	Ministère des Postes, des Télécommunications et de l'Économie numérique	410,01
4	Tribunal de première instance de Moroni	204,44
5	Cabinet Ministériel	198,94
6	Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Intégration économique / Vice-présidence office commissariat au Plan	144,66
7	Ministère de l'Energie de l'Eau et des Hydrocarbures (MEEH)	90,91
8	Ministère de l'Éducation nationale	118,73
9	Commissariat Centrale de la Police Nationale	177,7
10	Ministère de l'Aménagement du territoire	45,80
11	Ministère de l'Éducation Régionale	106,30
12	Ministère de l'Environnement / Direction de l'Environnement et des forêts	45,81
Total des émissions évitées		2 789,57

Afin de compléter l'analyse environnementale et d'illustrer l'efficacité économique des investissements réalisés du point de vue climatique, un indicateur complémentaire a été estimé : le coût d'investissement par tonne de CO<sub>2</sub> évitée.

Cet indicateur est obtenu en rapportant le coût d'investissement initial (CAPEX) aux émissions cumulées de CO<sub>2</sub> évitées sur la durée de vie du projet. Dans le cadre de cette étude de préféabilité, une durée de vie des installations photovoltaïques de 25 ans est retenue, conformément aux hypothèses utilisées dans l'analyse financière.

Le coût d'investissement par tonne de CO<sub>2</sub> évitée est ainsi calculé selon la relation suivante :

$$\text{Coût d'investissement par tCO}_2 = \frac{\text{CAPEX}}{\text{Émissions évitées annuelles} \times 25}$$

Cet indicateur permet d'apprécier l'efficacité environnementale des investissements photovoltaïques proposés et de fournir un ordre de grandeur du coût de réduction des émissions de gaz à effet de serre associé à chaque bâtiment.

Le tableau ci-après présente, pour chaque bâtiment retenu, une estimation du coût d'investissement par tonne de CO<sub>2</sub> évitée sur la durée de vie des installations photovoltaïques.

Tableau 20 - Coût d'investissement par tonne de CO<sub>2</sub> évitée pour les bâtiments retenus

N°	Nom du bâtiment	CAPEX (EUR)	Émissions évitées (tCO <sub>2</sub> /an)	Coût d'investissement par tonne de CO <sub>2</sub> évité (€/tCO <sub>2</sub> )
1	Palais du Peuple	674 600	722,12	37,37
2	Ministère de la justice, des Affaires Islamiques et de la Fonction Publique	509 900	524,15	38,91
3	Ministère des Postes, des Télécommunications et de l'Économie numérique	401 800	410,01	39,20
4	Tribunal de première instance de Moroni	207 000	204,44	40,50
5	Cabinet Ministériel	205 800	198,94	41,38
6	Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Intégration économique / Vice-présidence office commissariat au Plan	153 720	144,66	42,51
7	Ministère de l'Énergie de l'Eau et des Hydrocarbures (MEEH)	110 000	90,91	48,40
8	Ministère de l'Éducation nationale	136 400	118,73	45,95
9	Commissariat Centrale de la Police Nationale	188 600	177,7	42,45
10	Ministère de l'Aménagement du territoire	69 320	45,8	60,54
11	Ministère de l'Éducation Régionale	129 000	106,3	48,54
12	Ministère de l'Environnement / Direction de l'Environnement et des forêts	55 400	45,81	48,37

Les résultats montrent que le coût d'investissement par tonne de CO<sub>2</sub> évitée varie globalement entre 37 et 61 €/tCO<sub>2</sub> selon les bâtiments étudiés.

Les bâtiments présentant les puissances installables les plus importantes et les productions photovoltaïques les plus élevées tendent à afficher les coûts de réduction des émissions les plus faibles, en raison d'effets d'échelle favorables.

À titre de comparaison, l'Agence internationale de l'énergie (IEA) indique que les coûts d'abattement du solaire photovoltaïque se situent généralement dans une plage comprise entre 0 et 100 \$/tCO<sub>2</sub><sup>2</sup>, selon les contextes énergétiques et les hypothèses technologiques. Plus largement, certaines estimations internationales situent ces coûts dans une fourchette d'environ 40 et 120 €/tCO<sub>2</sub>, selon les conditions climatiques, énergétiques et économiques propres à chaque région<sup>3</sup>. Dans ce contexte, les valeurs obtenues dans la présente étude apparaissent cohérentes avec les ordres de grandeur observés à l'échelle internationale.

<sup>2</sup> IEA (2020), *Sustainable Recovery: Evaluation of Possible Recovery Measures*, International Energy Agency.

<sup>3</sup> Thunder Said Energy (2023), *Wind and Solar: What CO<sub>2</sub> Abatement Costs of Renewables?*

Dans l'ensemble, ces valeurs apparaissent relativement compétitives et illustrent le potentiel des installations photovoltaïques sur bâtiments publics comme levier efficace de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le contexte énergétique des Comores.

À l'échelle de l'ensemble des bâtiments étudiés, les installations photovoltaïques permettraient d'éviter environ 2 790 tonnes de CO<sub>2</sub> par an, soit près de 69 700 tonnes de CO<sub>2</sub> sur la durée de vie des installations (25 ans). Elles contribuent ainsi significativement à la réduction des émissions liées à la production d'électricité et participent aux objectifs de transition énergétique, de réduction de la dépendance aux combustibles fossiles importés et d'amélioration du bilan environnemental des bâtiments publics.

Les valeurs d'émissions évitées présentées constituent des ordres de grandeur indicatifs. Elles pourront être affinées lors des phases ultérieures du projet, notamment par :

- L'utilisation de facteurs d'émission officiels actualisés spécifiques aux Comores,
- L'intégration d'une analyse de cycle de vie complète de l'électricité photovoltaïque,
- La prise en compte des modalités réelles d'autoconsommation et d'injection réseau.

Néanmoins, au stade de la préfaisabilité, l'approche retenue permet de comparer de manière cohérente et homogène l'impact environnemental des différents sites étudiés et de renforcer la pertinence du classement des bâtiments prioritaires.

## 12 FICHES TECHNIQUES PAR BÂTIMENT

Pour chaque bâtiment public retenu, une fiche technique spécifique a été élaborée.

Ces fiches constituent le support principal de description de l'architecture du système photovoltaïque par site. Elles présentent, pour chaque bâtiment, les caractéristiques du système proposé, les principaux paramètres énergétiques et économiques, ainsi que les hypothèses de raccordement électrique, lesquelles seront confirmées lors des phases ultérieures du projet.

Les diagrammes unifilaires correspondants à chaque bâtiment sélectionné sont présentés en annexe du présent rapport.

Les tableaux ci-dessous présentent les fiches techniques des bâtiments retenus.

Fiche technique 1 - Palais du Peuple

Identification du bâtiment 1	
Nom du bâtiment	Palais du Peuple
Localisation	Moroni-Comores
Coordonnées GPS	-11,71807 ; 43,24647
Type de toiture	Plate en béton
Surface totale exploitable (m <sup>2</sup> )	2670,47
Inclinaison retenue (°)	15°
Niveau d'ombrage	Faible
Configuration photovoltaïque	
Technologie	Monocristallin
Puissance unitaire module (Wc)	550 Wc
Nombre de modules	1024
Puissance PV installée totale (kWc)	563,00
Configuration électrique	64 chaînes × 16 modules
Implantation des modules	Toiture principale + Toiture Bâtiment annexe
Onduleurs et équipements électriques	
Type d'onduleur	Onduleur de chaîne (string)
Puissance onduleur(s) (kWac)	30 kWac
Nombre d'onduleurs	15
Puissance AC totale installée	450 kWac
Ratio DC/AC	1.25
Raccordement électrique	
Régime électrique	Triphasé – BT
Compteur	Compteur électrique bidirectionnel
Mode de fonctionnement	Autoconsommation prioritaire de l'énergie photovoltaïque, avec soutirage du réseau en complément et vente du surplus injecté dans le réseau, sous réserve du cadre réglementaire applicable.
Schéma unifilaire	En annexe
Résultats énergétiques	
Production annuelle (MWh/an)	1031,600
Productible spécifique (kWh/kWc.an)	1832
Performance Ratio – PR (%)	81,24
Consommation du bâtiment (MWh/an)	584
Fraction solaire (%)	42,46
Analyse économique – ordre de grandeur	
CAPEX total estimé (€)	674 600
Coût de l'énergie – LCOE (€/kWh)	0,09
Temps de retour simple (ans)	5,4
Contraintes et conditions climatiques	
Températures élevées prises en compte dans la conception Vent marin et corrosion considérés dans le choix des matériaux Ventilation naturelle des modules assuré	
Commentaires et réserves	
Cette fiche constitue une description technique du système photovoltaïque permettant le lancement d'une phase de financement et de réalisation. Les données seront confirmées lors des études d'exécution.	

Fiche technique 2-Ministère de la justice, des Affaires Islamiques et de la Fonction Publique

<b>Identification du bâtiment 2</b>	
Nom du bâtiment	Ministère de la justice, des Affaires Islamiques et de la Fonction Publique
Localisation	Moroni-Comores
Coordonnées GPS	-11,70267 43,25393
Type de toiture	Inclinée en tôle à renforcer
Surface totale exploitable (m <sup>2</sup> )	1926,02
Inclinaison retenue (°)	15°
Niveau d'ombrage	Faible
<b>Configuration photovoltaïque</b>	
Technologie	Monocristallin
Puissance unitaire module (Wc)	550 Wc
Nombre de modules	740
Puissance PV installée totale (kWc)	407
Configuration électrique	37 chaînes × 20 modules
Implantation des modules	Toiture principale+ Toiture Bâtiment annexe+ parking
<b>Onduleurs et équipements électriques</b>	
Type d'onduleur	Onduleur de chaîne (string)
Puissance onduleur(s) (kWac)	30 kWac
Nombre d'onduleurs	12
Puissance AC totale installée	360 kWac
Ratio DC/AC	1.13
<b>Raccordement électrique</b>	
Régime électrique	Triphasé- BT
Compteur	Compteur électrique bidirectionnel.
Mode de fonctionnement	Autoconsommation prioritaire de l'énergie photovoltaïque, avec soutirage du réseau en complément et vente du surplus injecté dans le réseau, sous réserve du cadre réglementaire applicable
Schéma unifilaire	En annexe
<b>Résultats énergétiques</b>	
Production annuelle (MWh/an)	748,78
Productible spécifique (kWh/kWc.an)	1840
Performance Ratio - PR (%)	81,60
Consommation du bâtiment (MWh/an)	37,96
Fraction solaire (%)	47,13
<b>Analyse économique - ordre de grandeur</b>	
CAPEX total estimé (€)	509 900
Coût de l'énergie - LCOE (€/kWh)	0,09
Temps de retour simple (ans)	6,6
<b>Contraintes et conditions climatiques</b>	
Températures élevées prises en compte dans la conception Vent marin et corrosion considérés dans le choix des matériaux Ventilation naturelle des modules assuré	
<b>Commentaires et réserves</b>	
Cette fiche constitue une description technique du système photovoltaïque permettant le lancement d'une phase de financement et de réalisation. Les données seront confirmées lors des études d'exécution.	

Fiche technique 3- Ministère des Postes, des Télécommunications et de l'Économie numérique

<b>Identification du bâtiment 3</b>	
Nom du bâtiment	Ministère des Postes, des Télécommunications et de l'Économie numérique
Localisation	Moroni-Comores
Coordonnées GPS	-11,7178 ; 43,24498
Type de toiture	Inclinée en tôle
Surface totale exploitable (m <sup>2</sup> )	1505,86
Inclinaison retenue (°)	15°
Niveau d'ombrage	Faible
<b>Configuration photovoltaïque</b>	
Technologie	Monocristallin
Puissance unitaire module (Wc)	550 Wc
Nombre de modules	580
Puissance PV installée totale (kWc)	319
Configuration électrique	29 chaînes × 20 modules
Implantation des modules	Toiture principale
<b>Onduleurs et équipements électriques</b>	
Type d'onduleur	Onduleur de chaîne (string)
Puissance onduleur(s) (kWac)	30 kWac
Nombre d'onduleurs	9
Puissance AC totale installée	270kWac
Ratio DC/AC	1.18
<b>Raccordement électrique</b>	
Régime électrique	Triphasé- BT
Compteur	Compteur électrique bidirectionnel
Mode de fonctionnement	Autoconsommation prioritaire de l'énergie photovoltaïque, avec soutirage du réseau en complément et vente du surplus injecté dans le réseau, sous réserve du cadre réglementaire applicable
Schéma unifilaire	En annexe
<b>Résultats énergétiques</b>	
Production annuelle (MWh/an)	585,720
Productible spécifique (kWh/kWc.an)	1836
Performance Ratio - PR (%)	81,44
Consommation du bâtiment (MWh/an)	64,24
Fraction solaire (%)	45,98
<b>Analyse économique - ordre de grandeur</b>	
CAPEX total estimé (€)	401 800
Coût de l'énergie - LCOE (€/kWh)	0,1
Temps de retour simple (ans)	6,7
<b>Contraintes et conditions climatiques</b>	
Températures élevées prises en compte dans la conception Vent marin et corrosion considérés dans le choix des matériaux Ventilation naturelle des modules assuré	
<b>Commentaires et réserves</b>	
Cette fiche constitue une description technique du système photovoltaïque permettant le lancement d'une phase de financement et de réalisation. Les données seront confirmées lors des études d'exécution.	

Fiche technique 4-Tribunal de première instance

Identification du bâtiment 4	
Nom du bâtiment	Tribunal de première instance
Localisation	Moroni-Comores
Coordonnées GPS	-11,70158 ; 43,25478
Type de toiture	Plate en béton
Surface totale exploitable (m <sup>2</sup> )	741,82
Inclinaison retenue (°)	15°
Niveau d'ombrage	Faible
Configuration photovoltaïque	
Technologie	Monocristallin
Puissance unitaire module (Wc)	550 Wc
Nombre de modules	288
Puissance PV installée totale (kWc)	158
Configuration électrique	18 chaînes × 16 modules
Implantation des modules	Toiture principale+ Toiture Bâtiment annexe+ parking
Onduleurs et équipements électriques	
Type d'onduleur	Onduleur de chaîne (string)
Puissance onduleur(s) (kWac)	15 kWac
Nombre d'onduleurs	9
Puissance AC totale installée	135 kWac
Ratio DC/AC	1.17
Raccordement électrique	
Régime électrique	Triphasé – BT
Compteur	Compteur électrique bidirectionnel.
Mode de fonctionnement	Autoconsommation prioritaire de l'énergie photovoltaïque, avec soutirage du réseau en complément et vente du surplus injecté dans le réseau, sous réserve du cadre réglementaire applicable
Schéma unifilaire	En annexe
Résultats énergétiques	
Production annuelle (MWh/an)	292,05
Productible spécifique (kWh/kWc.an)	1844
Performance Ratio – PR (%)	81,78
Consommation du bâtiment (MWh/an)	255,5
Fraction solaire (%)	41,19
Analyse économique – ordre de grandeur	
CAPEX total estimé (€)	207 000
Coût de l'énergie – LCOE (€/kWh)	0,11
Temps de retour simple (ans)	5,8
Contraintes et conditions climatiques	
Températures élevées prises en compte dans la conception Vent marin et corrosion considérés dans le choix des matériaux Ventilation naturelle des modules assuré	
Commentaires et réserves	
Cette fiche constitue une description technique du système photovoltaïque permettant le lancement d'une phase de financement et de réalisation. Les données seront confirmées lors des études d'exécution.	

Fiche technique 5-Cabinet Ministériel

Identification du bâtiment 5	
Nom du bâtiment	Cabinet Ministériel
Localisation	Moroni-Comores
Coordonnées GPS	-11,6834 ; 43,26162
Type de toiture	Inclinée en tôle
Surface totale exploitable (m <sup>2</sup> )	738,29
Inclinaison retenue (°)	15°
Niveau d'ombrage	Moyen
Configuration photovoltaïque	
Technologie	Monocristallin
Puissance unitaire module (Wc)	550 Wc
Nombre de modules	285
Puissance PV installée totale (kWc)	157,00
Configuration électrique	19 chaînes × 15 modules
Implantation des modules	Toiture principale+ parking
Onduleurs et équipements électriques	
Type d'onduleur	Onduleur de chaîne (string)
Puissance onduleur(s) (kWac)	15 kWac
Nombre d'onduleurs	9
Puissance AC totale installée	135 kWac
Ratio DC/AC	1.16
Raccordement électrique	
Régime électrique	Triphasé- BT
Compteur	Compteur électrique bidirectionnel.
Mode de fonctionnement	Autoconsommation prioritaire de l'énergie photovoltaïque, avec soutirage du réseau en complément et vente du surplus injecté dans le réseau, sous réserve du cadre réglementaire applicable
Schéma unifilaire	En annexe
Résultats énergétiques	
Production annuelle (MWh/an)	284,200
Productible spécifique (kWh/kWc.an)	1813
Performance Ratio - PR (%)	80,42
Consommation du bâtiment (MWh/an)	239,29
Fraction solaire (%)	41,34
Analyse économique - ordre de grandeur	
CAPEX total estimé (€)	205 800
Coût de l'énergie - LCOE (€/kWh)	0,11
Temps de retour simple (ans)	6
Contraintes et conditions climatiques	
Températures élevées prises en compte dans la conception Vent marin et corrosion considérés dans le choix des matériaux Ventilation naturelle des modules assuré	
Commentaires et réserves	
Cette fiche constitue une description technique du système photovoltaïque permettant le lancement d'une phase de financement et de réalisation. Les données seront confirmées lors des études d'exécution.	

Fiche technique 6-Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Intégration économique

Identification du bâtiment 6	
Nom du bâtiment	Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Intégration économique / Vice-présidence office commissariat au Plan
Localisation	Moroni-Comores
Coordonnées GPS	-11,71034 ; 43,24603
Type de toiture	Plate en tôle
Surface totale exploitable (m <sup>2</sup> )	529,72
Inclinaison retenue (°)	15°
Niveau d'ombrage	Faible
Configuration photovoltaïque	
Technologie	Monocristallin
Puissance unitaire module (Wc)	550 Wc
Nombre de modules	204
Puissance PV installée totale (kWc)	112
Configuration électrique	8 chaînes × 16 modules
Implantation des modules	Toiture principale+ Toiture Bâtiment annexe
Onduleurs et équipements électriques	
Type d'onduleur	Onduleur de chaîne (string)
Puissance onduleur(s) (kWac)	15 kWac
Nombre d'onduleurs	4
Puissance AC totale installée	60 kWac
Ratio DC/AC	1,17
Raccordement électrique	
Régime électrique	Triphasé- BT
Compteur	Compteur électrique bidirectionnel.
Mode de fonctionnement	Autoconsommation prioritaire de l'énergie photovoltaïque, avec soutirage du réseau en complément et vente du surplus injecté dans le réseau, sous réserve du cadre réglementaire applicable
Schéma unifilaire	En annexe
Résultats énergétiques	
Production annuelle (MWh/an)	206,660
Productible spécifique (kWh/kWc.an)	1845
Performance Ratio - PR (%)	81,69
Consommation du bâtiment (MWh/an)	231,29
Fraction solaire (%)	40,22
Analyse économique - ordre de grandeur	
CAPEX total estimé (€)	153 720
Coût de l'énergie - LCOE (€/kWh)	0,12
Temps de retour simple (ans)	6
Contraintes et conditions climatiques	
Températures élevées prises en compte dans la conception Vent marin et corrosion considérés dans le choix des matériaux Ventilation naturelle des modules assuré	
Commentaires et réserves	
Cette fiche constitue une description technique du système photovoltaïque permettant le lancement d'une phase de financement et de réalisation. Les données seront confirmées lors des études d'exécution.	

Fiche technique 7- Ministère de l'Energie de l'Eau et des Hydrocarbures (MEEH)

Identification du bâtiment 7	
Nom du bâtiment	Ministère de l'Energie de l'Eau et des Hydrocarbures (MEEH)
Localisation	Moroni-Comores
Coordonnées GPS	-11,70096 ; 43,2525
Type de toiture	Plate en béton
Surface totale exploitable (m <sup>2</sup> )	330,83
Inclinaison retenue (°)	15°
Niveau d'ombrage	Faible
Configuration photovoltaïque	
Technologie	Monocristallin
Puissance unitaire module (Wc)	550 Wc
Nombre de modules	128
Puissance installée totale (kWc)	70,4
Configuration électrique	8 chaînes × 16 modules
Implantation des modules	Toiture principale
Onduleurs et équipements électriques	
Type d'onduleur	Onduleur de chaîne (string)
Puissance onduleur(s) (kWac)	15 kWac
Nombre d'onduleurs	4
Puissance AC totale installée	60 kWac
Ratio DC/AC	1,17
Raccordement électrique	
Régime électrique	Triphasé- BT
Compteur	Compteur électrique bidirectionnel
Mode de fonctionnement	Autoconsommation prioritaire de l'énergie photovoltaïque, avec soutirage du réseau en complément et vente du surplus injecté dans le réseau, sous réserve du cadre réglementaire applicable.
Schéma unifilaire	En annexe
Résultats énergétiques	
Production annuelle (MWh/an)	129,87
Productible spécifique (kWh/kWc.an)	1845
Performance Ratio - PR (%)	81,82
Consommation du bâtiment (MWh/an)	440,44
Fraction solaire (%)	28,74
Analyse économique - ordre de grandeur	
CAPEX total estimé (€)	110 000
Coût de l'énergie - LCOE (€/kWh)	0,14
Temps de retour simple (ans)	5,3
Contraintes et conditions climatiques	
Températures élevées prises en compte dans la conception Vent marin et corrosion considérés dans le choix des matériaux Ventilation naturelle des modules assuré	
Commentaires et réserves	
Cette fiche constitue une description technique du système photovoltaïque permettant le lancement d'une phase de financement et de réalisation. Les données seront confirmées lors des études d'exécution.	

Fiche technique 8-Ministère de l'Éducation nationale

Identification du bâtiment 8	
Nom du bâtiment	Ministère de l'Éducation nationale
Localisation	Moroni-Comores
Coordonnées GPS	-11,67974 ; 43,25972
Type de toiture	Plate en béton
Surface totale exploitable (m <sup>2</sup> )	435,63
Inclinaison retenue (°)	15°
Niveau d'ombrage	Faible
Configuration photovoltaïque	
Technologie	Monocristallin
Puissance unitaire module (Wc)	550 Wc
Nombre de modules	168
Puissance PV installée totale (kWc)	92,4
Configuration électrique	12 chaînes × 14 modules
Implantation des modules	Toiture principale
Onduleurs et équipements électriques	
Type d'onduleur	Onduleur de chaîne (string)
Puissance onduleur(s) (kWac)	15 kWac
Nombre d'onduleurs	6
Puissance AC totale installée	90 kWac
Ratio DC/AC	1.03
Raccordement électrique	
Régime électrique	Triphasé- BT
Compteur	Compteur électrique bidirectionnel.
Mode de fonctionnement	Autoconsommation prioritaire de l'énergie photovoltaïque, avec soutirage du réseau en complément et vente du surplus injecté dans le réseau, sous réserve du cadre réglementaire applicable
Schéma unifilaire	En annexe
Résultats énergétiques	
Production annuelle (MWh/an)	169,620
Productible spécifique (kWh/kWc.an)	1836
Performance Ratio - PR (%)	81,42
Consommation du bâtiment (MWh/an)	291,14
Fraction solaire (%)	37,22
Analyse économique - ordre de grandeur	
CAPEX total estimé (€)	136 400
Coût de l'énergie - LCOE (€/kWh)	0,13
Temps de retour simple (ans)	6
Contraintes et conditions climatiques	
Températures élevées prises en compte dans la conception Vent marin et corrosion considérés dans le choix des matériaux Ventilation naturelle des modules assuré	
Commentaires et réserves	
Cette fiche constitue une description technique du système photovoltaïque permettant le lancement d'une phase de financement et de réalisation. Les données seront confirmées lors des études d'exécution.	

Fiche technique 9- Commissariat Centrale de la Police Nationale

Identification du bâtiment 9	
Nom du bâtiment	Commissariat Centrale de la Police Nationale
Localisation	Moroni-Comores
Coordonnées GPS	-11,717154 ; 43,247302
Type de toiture	Inclinée en béton
Surface totale exploitable (m <sup>2</sup> )	656,00
Inclinaison retenue (°)	15°
Niveau d'ombrage	Très Faible
Configuration photovoltaïque	
Technologie	Monocristallin
Puissance unitaire module (Wc)	550 Wc
Nombre de modules	255
Puissance PV installée totale (kWc)	140
Configuration électrique	17 chaînes × 15 modules
Implantation des modules	Toiture principale+ Toiture Bâtiment annexe+ parking
Onduleurs et équipements électriques	
Type d'onduleur	Onduleur de chaîne (string)
Puissance onduleur(s) (kWac)	15 kWac
Nombre d'onduleurs	8
Puissance AC totale installée	120 kWac
Ratio DC/AC	1,17
Raccordement électrique	
Régime électrique	Triphasé- BT
Compteur	Compteur électrique bidirectionnel.
Mode de fonctionnement	Autoconsommation prioritaire de l'énergie photovoltaïque, avec soutirage du réseau en complément et vente du surplus injecté dans le réseau, sous réserve du cadre réglementaire applicable.
Schéma unifilaire	En annexe
Résultats énergétiques	
Production annuelle (MWh/an)	253,88
Productible spécifique (kWh/kWc.an)	1810
Performance Ratio - PR (%)	80,29
Consommation du bâtiment (MWh/an)	82,90
Fraction solaire (%)	43,77
Analyse économique - ordre de grandeur	
CAPEX total estimé (€)	188 600
Coût de l'énergie - LCOE (€/kWh)	0,12
Temps de retour simple (ans)	7,7
Contraintes et conditions climatiques	
Températures élevées prises en compte dans la conception Vent marin et corrosion considérés dans le choix des matériaux Ventilation naturelle des modules assuré	
Commentaires et réserves	
Cette fiche constitue une description technique du système photovoltaïque permettant le lancement d'une phase de financement et de réalisation. Les données seront confirmées lors des études d'exécution.	

Fiche technique 10-Ministère de l'Aménagement du territoire

Identification du bâtiment 10	
Nom du bâtiment	Ministère de l'Aménagement du territoire
Localisation	Moroni-Comores
Coordonnées GPS	-11,693812 ; 43,259942
Type de toiture	Inclinée en tôle
Surface totale exploitable (m <sup>2</sup> )	217,96
Inclinaison retenue (°)	15°
Niveau d'ombrage	Faible
Configuration photovoltaïque	
Technologie	Monocristallin
Puissance unitaire module (Wc)	550 Wc
Nombre de modules	84
Puissance PV installée totale (kWc)	46,20
Configuration électrique	6 chaînes × 14 modules
Implantation des modules	Toiture principale+ parking
Onduleurs et équipements électriques	
Type d'onduleur	Onduleur de chaîne (string)
Puissance onduleur(s) (kWac)	15 kWac
Nombre d'onduleurs	3
Puissance AC totale installée	45 kWac
Ratio DC/AC	1.03
Raccordement électrique	
Régime électrique	Triphasé- BT
Compteur	Compteur électrique bidirectionnel.
Mode de fonctionnement	Autoconsommation prioritaire de l'énergie photovoltaïque, avec soutirage du réseau en complément et vente du surplus injecté dans le réseau, sous réserve du cadre réglementaire applicable.
Schéma unifilaire	En annexe
Résultats énergétiques	
Production annuelle (MWh/an)	84,845
Productible spécifique (kWh/kWc.an)	1836
Performance Ratio - PR (%)	81,45
Consommation du bâtiment (MWh/an)	195,86
Fraction solaire (%)	34,45
Analyse économique - ordre de grandeur	
CAPEX total estimé (€)	69 320
Coût de l'énergie - LCOE (€/kWh)	0,14
Temps de retour simple (ans)	5,8
Contraintes et conditions climatiques	
Températures élevées prises en compte dans la conception Vent marin et corrosion considérés dans le choix des matériaux Ventilation naturelle des modules assuré	
Commentaires et réserves	
Cette fiche constitue une description technique du système photovoltaïque permettant le lancement d'une phase de financement et de réalisation. Les données seront confirmées lors des études d'exécution.	

Fiche technique 11-Ministère de l'Éducation Régionale

<b>Identification du bâtiment 10</b>	
Nom du bâtiment	Ministère de l'Éducation Régionale
Localisation	Moroni-Comores
Coordonnées GPS	-11,70156 ; 43,25308
Type de toiture	Inclinée en tôle
Surface totale exploitable (m <sup>2</sup> )	388,01
Inclinaison retenue (°)	15°
Niveau d'ombrage	Moyen à fort
<b>Configuration photovoltaïque</b>	
Technologie	Monocristallin
Puissance unitaire module (Wc)	550 Wc
Nombre de modules	150
Puissance PV installée totale (kWc)	82,50
Configuration électrique	10 chaînes × 15 modules
Implantation des modules	Toiture principale
<b>Onduleurs et équipements électriques</b>	
Type d'onduleur	Onduleur de chaîne (string)
Puissance onduleur(s) (kWac)	15 kWac
Nombre d'onduleurs	5
Puissance AC totale installée	75 kWac
Ratio DC/AC	1,10
<b>Raccordement électrique</b>	
Régime électrique	Triphasé- BT
Compteur	Compteur électrique bidirectionnel.
Mode de fonctionnement	Autoconsommation prioritaire de l'énergie photovoltaïque, avec soutirage du réseau en complément et vente du surplus injecté dans le réseau, sous réserve du cadre réglementaire applicable.
Schéma unifilaire	En annexe
<b>Résultats énergétiques</b>	
Production annuelle (MWh/an)	151,86
Productible spécifique (kWh/kWc.an)	1841
Performance Ratio - PR (%)	81,64
Consommation du bâtiment (MWh/an)	155,94
Fraction solaire (%)	40,59
<b>Analyse économique - ordre de grandeur</b>	
CAPEX total estimé (€)	188 600
Coût de l'énergie - LCOE (€/kWh)	0,12
Temps de retour simple (ans)	7,7
<b>Contraintes et conditions climatiques</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Températures élevées prises en compte dans la conception</li> <li>✓ Vent marin et corrosion considérés dans le choix des matériaux</li> <li>✓ Ventilation naturelle des modules assuré</li> </ul>	
<b>Commentaires et réserves</b>	
<p>Cette fiche constitue une description technique du système photovoltaïque permettant le lancement d'une phase de financement et de réalisation. Les données seront confirmées lors des études d'exécution.</p>	

Fiche technique 12-Ministère de l'Environnement / Direction de l'Environnement et des forêts

Identification du bâtiment 12	
Nom du bâtiment	Ministère de l'Environnement / Direction de l'Environnement et des forêts
Localisation	Moroni-Comores
Coordonnées GPS	-11,73637 ; 43.24798
Type de toiture	Plate en béton
Surface totale exploitable (m <sup>2</sup> )	168,25
Inclinaison retenue (°)	15°
Niveau d'ombrage	Faible
Configuration photovoltaïque	
Technologie	Monocristallin
Puissance unitaire module (Wc)	550 Wc
Nombre de modules	65
Puissance PV installée totale (kWc)	35,80
Configuration électrique	5 chaînes × 13 modules
Implantation des modules	Toiture principale + parking
Onduleurs et équipements électriques	
Type d'onduleur	Onduleur de chaîne (string)
Puissance onduleur(s) (kWac)	20 kWac
Nombre d'onduleurs	2
Puissance AC totale installée	40 kWac
Ratio DC/AC	0,89
Raccordement électrique	
Régime électrique	Triphasé - BT
Compteur	Compteur électrique bidirectionnel.
Mode de fonctionnement	Autoconsommation prioritaire de l'énergie photovoltaïque, avec soutirage du réseau en complément et vente du surplus injecté dans le réseau, sous réserve du cadre réglementaire applicable.
Schéma unifilaire	En annexe
Résultats énergétiques	
Production annuelle (MWh/an)	65,436
Productible spécifique (kWh/kWc.an)	1830
Performance Ratio - PR (%)	81,18
Consommation du bâtiment (MWh/an)	131,40
Fraction solaire (%)	35,89
Analyse économique - ordre de grandeur	
CAPEX total estimé (€)	55 400
Coût de l'énergie - LCOE (€/kWh)	0,15
Temps de retour simple (ans)	6,5
Contraintes et conditions climatiques	
Températures élevées prises en compte dans la conception Vent marin et corrosion considérés dans le choix des matériaux Ventilation naturelle des modules assuré	
Commentaires et réserves	
Cette fiche constitue une description technique du système photovoltaïque permettant le lancement d'une phase de financement et de réalisation. Les données seront confirmées lors des études d'exécution.	

## 13 EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS PUBLICS

L'efficacité énergétique regroupe l'ensemble des mesures visant à réduire la consommation d'énergie d'un bâtiment sans affecter la qualité des services rendus. Dans le cadre des bâtiments publics de Moroni, l'amélioration de l'efficacité énergétique constitue un levier complémentaire essentiel à l'installation de systèmes photovoltaïques en toiture.

La réduction de la demande électrique permet :

- D'augmenter la part d'autoconsommation de l'énergie solaire produite,
- D'améliorer la rentabilité économique des installations photovoltaïques,
- Et de limiter les contraintes sur le réseau électrique existant.

Les mesures d'efficacité énergétique applicables aux bâtiments publics étudiés peuvent être regroupées en deux catégories : les mesures passives et les mesures actives.

- Mesures d'efficacité énergétique passive :

Les mesures d'efficacité énergétique passive sont liées aux caractéristiques intrinsèques des bâtiments et à leur interaction avec le climat local. Pour les bâtiments publics étudiés, les actions suivantes peuvent être envisagées :

- Optimisation de la ventilation naturelle des locaux afin de limiter le recours à la climatisation ;
- Réduction des apports thermiques excessifs par une gestion adaptée des ouvertures et des protections solaires ;
- Amélioration du confort thermique intérieur par des solutions simples (stores, brise-soleil, peinture claire des toitures).

Ces mesures contribuent à réduire les besoins de refroidissement, particulièrement importants dans le contexte climatique tropical des Comores.

- Mesures d'efficacité énergétique active :

Les mesures d'efficacité énergétique active concernent les équipements et les usages électriques au sein des bâtiments. Elles incluent notamment :

- Le remplacement progressif de l'éclairage existant par des luminaires LED à haut rendement ;
- L'installation de détecteurs de présence et de minuteries dans les zones à occupation intermittente (couloirs, sanitaires, salles de réunion) ;
- Le remplacement progressif des équipements électriques anciens (climatiseurs, réfrigérateurs, équipements bureautiques) par des appareils à haute efficacité énergétique ;
- La sensibilisation des agents publics aux bonnes pratiques de gestion de l'énergie (extinction des équipements hors usage, optimisation des horaires de fonctionnement).

La mise en œuvre de ces mesures, généralement peu coûteuses, permet de réduire durablement la consommation électrique des bâtiments.

## 14 EXPLOITATION ET MAINTENANCE DES INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES

### 14.1 STRATÉGIE O&M

L'exploitation et la maintenance (O&M) des systèmes photovoltaïques en toiture visent à assurer la fiabilité, la sécurité et la performance optimale du système tout au long de sa durée de vie.

Une surveillance continue du fonctionnement et du rendement est requise afin de détecter rapidement toute anomalie de performance et d'y remédier.

La stratégie O&M repose sur les principes suivants :

- Mise en place d'un plan de maintenance préventive et corrective ;
- Suivi régulier du rendement énergétique et des indicateurs clés (PR, SOC, disponibilité) ;
- Sécurité des opérations et respect des consignes des fabricants ;
- Optimisation des coûts par mutualisation des ressources locales et formation ciblée du personnel.

### 14.2 RESSOURCES HUMAINES ET FORMATION

Chaque site sera supervisé par :

- Un technicien local formé à la maintenance de base (nettoyage, contrôle visuel, remplacement de pièces simples) ;
- Un ingénieur ou superviseur régional chargé du suivi des performances et des interventions majeures.

Une formation initiale est prévue pour le personnel local afin de garantir l'autonomie du village dans l'exploitation quotidienne du système.

Cette formation couvrira :

- L'utilisation du système de surveillance et de mesure ;
- Les procédures de maintenance préventive ;
- Les règles de sécurité électrique ;
- Le nettoyage des modules et la vérification du système de stockage.

Des sessions de formation complémentaires ou de mise à niveau pourront également être organisées périodiquement afin d'assurer le maintien des compétences l'actualisation des bonnes pratiques d'exploitation et l'adaptation aux éventuelles évolutions des équipements ou du système de supervision.

### 14.3 PLAN DE MAINTENANCE ET SUIVI

Les opérations de maintenance sont classées comme suit :

- Maintenance préventive, incluant :
  - Inspections visuelles périodiques des modules, des structures et des câbles ;
  - Vérification du bon fonctionnement des onduleurs et des protections électriques ;

- Nettoyage régulier des modules, particulièrement en saison sèche, afin de limiter les pertes liées à l'encrassement.
- **Maintenance corrective**, consistant en des interventions ponctuelles à la suite de pannes ou d'anomalies détectées par le système de supervision ou lors des inspections.

#### 14.4 NETTOYAGE ET ENTRETIEN DU SITE

L'inclinaison des modules à 15° favorise le nettoyage naturel des panneaux par ruissellement de la pluie, réduisant ainsi l'accumulation de poussière.

Cependant, durant la saison sèche, lorsque les précipitations sont rares, un nettoyage régulier devient nécessaire afin de maintenir la performance du champ solaire.

L'encrassement des modules peut entraîner une baisse significative du rendement énergétique s'il n'est pas traité.

Le nettoyage sera réalisé à l'aide de brosses souples et d'eau claire uniquement, sans recours à des produits chimiques, afin d'éviter toute détérioration de la surface vitrée.

Un réseau d'eau interne, doté de points d'accès proches des rangées de panneaux, facilitera les opérations de nettoyage et réduira les pertes d'eau.

Les interventions seront planifiées aux heures de faible ensoleillement (tôt le matin ou en fin d'après-midi) afin de minimiser les pertes de production et assurer la sécurité du personnel.

La fréquence de nettoyage sera ajustée selon les conditions locales : niveau de poussière, saisonnalité et proximité de pistes non revêtues

#### 14.5 PIÈCES DE RECHANGE ET ÉQUIPEMENTS DE SÉCURITÉ

Afin d'assurer la continuité d'exploitation et la sécurité des installations photovoltaïques en toiture, il est recommandé de prévoir un stock minimal de pièces de rechange et des équipements de sécurité adaptés aux interventions en milieu bâti.

- Pièces de rechange

Un stock minimal de pièces de rechange sera conservé afin de permettre des interventions rapides en cas de défaillance mineure et de limiter les arrêts de production. Ce stock comprendra notamment :

- Quelques modules photovoltaïques de réserve (environ 2 à 3 % du nombre total installé) ;
  - Des fusibles, connecteurs DC/AC et sections de câbles couramment utilisés ;
  - Des composants de protection électrique (parafoudres, disjoncteurs) ;
  - Le cas échéant, un onduleur de remplacement ou un contrat de maintenance garantissant des délais d'intervention réduits.
- Équipements de sécurité

Les interventions d'exploitation et de maintenance sur les installations photovoltaïques en toiture nécessitent le respect strict des règles de sécurité électrique et du travail en hauteur. Le

personnel intervenant devra disposer d'un équipement de protection individuelle (EPI) adapté, comprenant notamment :

- Gants isolants et équipements de protection électrique ;
- Casques et chaussures de sécurité ;
- Harnais et dispositifs antichute pour les interventions en toiture ;
- Extincteurs adaptés aux installations électriques.

Les dispositifs de protection électrique (mise à la terre, disjoncteurs, parafoudres) feront l'objet de vérifications périodiques conformément aux normes IEC applicables et aux recommandations des fabricants.

## 15 RECOMMANDATIONS TECHNIQUES

Cette étude de pré faisabilité a permis d'identifier les bâtiments présentant le meilleur potentiel pour accueillir des installations photovoltaïques en toiture, de définir des puissances installables cohérentes et d'estimer les performances énergétiques et économiques attendues. Sur cette base, plusieurs recommandations techniques peuvent être formulées pour orienter la phase de faisabilité détaillée et la préparation des levées de financement.

### 15.1 CHOIX TECHNOLOGIQUE RECOMMANDE POUR LES BATIMENTS PRIORITAIRES

Pour les bâtiments classés en haute priorité, il est recommandé de privilégier des solutions technologiques simples, robustes et largement éprouvées, adaptées aux conditions climatiques tropicales et insulaires.

Les systèmes photovoltaïques pourront reposer sur :

- Des modules photovoltaïques monocristallins adaptés aux environnements chauds et humides, présentant de bonnes performances thermiques et des garanties de long terme ;
- Des structures de fixation compatibles avec les typologies de toitures (béton, tôle), assurant une bonne ventilation des modules et une protection contre la corrosion ;
- Une architecture d'onduleurs décentralisée ou semi-décentralisée adaptée aux bâtiments publics, offrant une flexibilité d'exploitation, une facilité de maintenance et une bonne gestion des ombrages éventuels.

Les choix technologiques définitifs, ainsi que les configurations électriques détaillées, devront être précisés lors de la phase de faisabilité détaillée, sur la base d'études techniques approfondies et de consultations fournisseurs.

### 15.2 GESTION DES BATIMENTS AVEC INSTALLATIONS SOLAIRES EXISTANTES

Avant toute extension ou nouvelle installation, il sera nécessaire de réaliser des audits techniques spécifiques afin d'évaluer :

- L'état général des modules, des structures et des câblages ;
- Le fonctionnement des équipements électriques existants ;

- La conformité des installations aux normes de sécurité en vigueur.

Selon les résultats de ces audits, différentes stratégies pourront être envisagées lors de la phase de faisabilité détaillée, allant de la réutilisation partielle des équipements existants à leur rénovation ou à leur remplacement complet.

### 15.3 TOITURES NECESSITANT ENTRETIEN

Pour plusieurs bâtiments, l'analyse géospatiale et les observations visuelles suggèrent la nécessité de travaux préalables sur les toitures (étanchéité, corrosion, vieillissement des matériaux, renforcement structurel).

Dans ces cas, il est recommandé de :

- Réaliser une inspection structurelle détaillée (état du béton, de la tôle, des fixations, charges admissibles) ;
- Programmer, le cas échéant, des travaux de réfection de toiture (étanchéité, remplacement de tôles, traitement anticorrosion) avant l'installation des structures photovoltaïques ;
- Intégrer ces coûts dans les scénarios d'investissement afin d'éviter d'installer des systèmes solaires sur des toitures fragiles ou en fin de vie.

Cette approche permet de sécuriser les installations sur le long terme et de limiter les risques d'infiltration ou de dégradation prématurée liés au poids et aux ancrages des modules.

## 16 IMPACTS ATTENDUS DU DEPLOIEMENT PHOTOVOLTAÏQUE A MORONI

L'installation de systèmes photovoltaïques sur les bâtiments publics de Moroni représente un levier majeur pour renforcer la sécurité énergétique de l'Union des Comores. Les impacts attendus du projet s'inscrivent à la fois dans une logique économique, environnementale, institutionnelle et sociale.

### 16.1 REDUCTION DES DEPENSES PUBLIQUES D'ELECTRICITE

La production solaire locale permettra de :

- Diminuer la consommation d'électricité issue des centrales thermiques au diesel,
- Réduire la facture énergétique annuelle des ministères,
- Libérer des ressources publiques pour d'autres priorités (santé, éducation, infrastructures).

Les bâtiments priorisés affichent un potentiel significatif d'autoconsommation, avec plusieurs sites capables de couvrir une part significative de leurs besoins.

### 16.2 RENFORCEMENT DE LA RESILIENCE ENERGETIQUE DE L'ÉTAT

Les bâtiments administratifs jouent un rôle stratégique dans la gestion des services publics. Le solaire en toiture permettra de :

- Réduire la dépendance aux délestages récurrents ;
- Assurer une continuité minimale de service dans plusieurs ministères ;

- Améliorer la stabilité du réseau en journée grâce à l'injection locale.

Dans une seconde phase, certains sites critiques pourraient être équipés de stockage ou maintenus avec leurs groupes électrogènes existants pour renforcer leur autonomie.

### 16.3 REDUCTION DES EMISSIONS DE CO<sub>2</sub>

Le remplacement partiel de l'énergie diesel par du photovoltaïque contribuera à :

- Diminuer les émissions de gaz à effet de serre liées à la production électrique,
- Réduire la pollution atmosphérique locale,
- Aligner le pays avec ses engagements climatiques internationaux, notamment les Contributions Déterminées au niveau National (NDC) dans le cadre de l'Accord de Paris.

### 16.4 DEPLOIEMENT D'UN MODELE EXEMPLAIRE POUR TOUT LE PAYS

L'installation de systèmes solaires visibles sur les toitures des ministères constitue :

- Un signal politique fort,
- Une vitrine technologique pour encourager les secteurs privé et résidentiel,
- Un catalyseur pour structurer une filière solaire nationale.

Ce projet pilote contribuera également à renforcer les capacités notamment celles des installateurs, ingénieurs, techniciens et institutions réglementaires.

### 16.5 PREPARATION A L'INTRODUCTION D'UNE POLITIQUE DE NET METERING

L'étude crée les conditions favorables à la mise en place :

- D'un cadre législatif permettant l'autoconsommation,
- De compteurs bidirectionnels,
- D'un schéma de vente ou compensation du surplus pour les producteurs publics.

Ce projet servira de base de référence pour l'élaboration d'une politique énergétique moderne, inclusive et durable.

### 16.6 ACCELERATION DE LA TRANSITION ENERGETIQUE DES COMORES

Le déploiement du solaire dans la capitale peut constituer :

- Une expérience structurante, susceptible d'alimenter une réflexion sur un déploiement plus large du photovoltaïque dans d'autres villes et régions du pays ;
- Un outil de réduction des risques liés à la fluctuation des prix du diesel, en diminuant la dépendance du secteur électrique aux carburants fossiles importés ;
- Un moyen d'accroître progressivement la part des énergies renouvelables dans le mix électrique national, tout en valorisant les toitures existantes et en contribuant à la décarbonation du système électrique.

## CONCLUSION

La présente étude de pré faisabilité a permis d'évaluer de manière structurée et réaliste le potentiel de déploiement du photovoltaïque en toiture sur les bâtiments publics de la ville de Moroni. En combinant une analyse géospatiale, des vérifications terrain ciblées, des simulations énergétiques réalisées sous PVsyst et une analyse économique et financière préliminaire, le rapport fournit une base technique et décisionnelle cohérente pour orienter les prochaines étapes du projet.

L'analyse a porté sur un ensemble initial de 19 bâtiments publics, identifiés comme techniquement compatibles avec l'implantation de systèmes photovoltaïques au niveau de la pré faisabilité. Le croisement progressif des critères technico-énergétiques et financiers a ensuite conduit à la sélection d'un portefeuille resserré de 12 bâtiments présentant les conditions les plus favorables pour une mise en œuvre prioritaire.

La préanalyse économique et financière confirme que le coût de l'électricité photovoltaïque est compétitif par rapport à l'électricité produite à partir de centrales thermiques au diesel, dans un contexte insulaire marqué par une forte dépendance aux carburants fossiles importés. La priorisation des bâtiments, fondée sur des critères objectifs et transparents, puissance installable, fraction solaire, LCOE, VAN et temps de retour, permet d'identifier les sites présentant le meilleur compromis entre faisabilité technique, performance énergétique et viabilité économique à court et moyen terme.

Au-delà des bénéfices énergétiques et économiques, le développement du photovoltaïque sur les bâtiments publics constitue un levier stratégique pour l'Union des Comores. Il contribue à la réduction des dépenses publiques d'électricité, au renforcement de la résilience des services administratifs, à la diminution de la dépendance au diesel et à la préparation de mécanismes réglementaires modernes tels que l'autoconsommation avec compensation ou le net metering. Ces projets présentent également un caractère structurant et exemplaire pour le développement du marché solaire national et le renforcement des capacités institutionnelles.

Les prochaines étapes devront porter sur des audits techniques approfondis, des vérifications structurelles et électriques, l'affinement des hypothèses économiques sur la base de données fournisseurs, ainsi que l'analyse du cadre réglementaire et institutionnel applicable au déploiement de systèmes photovoltaïques sur les bâtiments publics. Ces travaux permettront de sécuriser la mise en œuvre opérationnelle des projets identifiés et de faciliter leur mobilisation financière.

Enfin, il convient de souligner que, bien que la présente étude de pré faisabilité se concentre sur un ensemble de bâtiments prioritaires identifiés à partir des analyses géospatiales et des données disponibles, le périmètre du projet demeure volontairement évolutif. Dans le cadre des étapes ultérieures, notamment les études de faisabilité détaillées, de nouveaux bâtiments publics pourront être intégrés sur demande des autorités comoriennes ou en fonction de l'évolution des priorités institutionnelles et des financements disponibles. La méthodologie développée, incluant le repérage géospatial, l'analyse technico-énergétique et les simulations PVsyst, est entièrement reproductible et pourra être appliquée à tout nouveau site. Cette flexibilité garantit que le programme de solaire en toiture pourra s'adapter à l'évolution des besoins du pays et maximiser l'impact du déploiement photovoltaïque.

En conclusion, cette étude démontre que la ville de Moroni dispose d'un potentiel photovoltaïque réel, mobilisable et économiquement pertinent sur ses bâtiments publics. Elle constitue une base robuste pour initier un programme structuré et progressif de solaire en toiture, contribuant de

manière concrète à la transition énergétique, à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur électrique et au renforcement durable de la sécurité énergétique de l'Union des Comores.

## ANNEXES

*Rapports PVsyst des bâtiments retenus — incluant les schémas unifilaires, les paramètres de simulation et les résultats détaillés pour chacun des bâtiments retenus, sont fournis séparément en fichiers PDF.*

MRV Energy Consulting Inc.  
630 W Sherbrooke St, 1210  
Montreal, Quebec  
H3A 1E4 Canada

MRV Energy - Sucursal de Cabo Verde  
21 Avenida OUA  
Achada Santo Antonio  
Cidade da Praia, Cabo Verde

[info@mrvenergy.com](mailto:info@mrvenergy.com)  
[www.mrvenergy.com](http://www.mrvenergy.com)

