Proceedings of Book Series PBS -Vol 42, pp.22-28 **Advances in Energy Transition and Environmental Impacts**

Planification et Optimisation du Nexus Eau-Énergie-Alimentation au Sahel : Diagnostic MAED-MESSAGE du Mix Énergétique du Niger à l'Horizon 2021–2050

Planning and Optimizing the Water-Energy-Food Nexus in the Sahel: MAED-MESSAGE Diagnostic of Niger's Energy Mix, 2021–2050

Ibrahim ISSA SEIDI[#1], Ibrahim HALIDOU[#2]

[#]*Laboratoire d'Energétique-Electronique-Electrotechnique Automatique et Informatique Industrielle,*

Université Abdou Moumouni

BP 10662, Niamey, Niger

[1] seidiibrahim74@gmail.com

[2] ibrahim.halidou@uam.edu.ne

***Résumé*— Aucune étude n'avait couplé, sur l'horizon complet 2021–2050, une demande MAED et une offre MESSAGE issues de la même modélisation propre pour quantifier l'effort d'investissement du nexus WEF au Sahel, lacune comblée ici. Les pays du Sahel partagent une triple vulnérabilité structurelle : pauvreté énergétique, stress hydrique et dépendance à la biomasse traditionnelle, trois dimensions imbriquées dans le nexus Eau-Énergie-Alimentation (WEF). Cette étude applique la chaîne intégrée MAED-MESSAGE de l'AIEA comme protocole diagnostique du nexus WEF au Niger sur l'horizon 2021–2050, sous trois scénarios contrastés (S1-BAU, S2-SNAE+, S3-NDC+). Le diagnostic révèle une trajectoire non monotone du mix électrique : un pic de performance nexus en 2035 (souveraineté 100 %, part bas-carbone ENR + nucléaire jusqu'à 91,5 %) suivi d'un repli mécanique jusqu'en 2050 (23,5–31,7 %), faute de seconde vague de planification du parc de production. À l'inverse, les co-bénéfices eau-alimentation portés par la substitution biomasse-électricité restent stables sur tout l'horizon. Un score nexus composite, fondé sur des seuils quantitatifs explicites, confirme cette asymétrie. Combler le repli post-2035 requiert un investissement de 13,3 à 21,7 Md$ selon le scénario ; fait notable, le scénario le plus ambitieux (NDC+) présente aussi la meilleure intensité capitalistique. Ce diagnostic, calibré sur des données nationales officielles, constitue un protocole transposable aux autres pays du Sahel.**

***Mots Clefs*— nexus eau-énergie-alimentation ; MAED-MESSAGE ; Sahel ; Niger ; Kandadji ; feuille de route énergétique ; CDN ; planification reproductible**

***Abstract*— No prior study had coupled MAED demand and MESSAGE supply from the same in-house modeling over the full 2021–2050 horizon to quantify the WEF nexus investment effort for the Sahel, a gap this study addresses. Sahelian countries share a structural triple vulnerability: energy poverty, water stress, and dependence on traditional biomass. This study applies the IAEA's integrated MAED-MESSAGE modeling chain as a WEF nexus diagnostic protocol for Niger over 2021–2050, under three contrasted scenarios (S1-BAU, S2-SNAE+, S3-NDC+). The diagnostic reveals a non-monotonic electricity mix trajectory: a nexus performance peak in 2035 (100% sovereignty, low-carbon share renewables plus nuclear up to 91.5%) followed by a mechanical decline through 2050 (23.5–31.7%), due to the absence of a second planning wave beyond 2035. Water-food co-benefits, driven by biomass-to-electricity substitution, remain stable throughout. A composite nexus score confirms this asymmetry. Closing the post-2035 gap requires USD 13.3–21.7 billion depending on the scenario; the most ambitious scenario (NDC+) also shows the best capital intensity. This diagnostic constitutes a reproducible protocol transposable to other Sahelian countries.**

***Keywords*— water-energy-food nexus; MAED-MESSAGE; Sahel; Niger; Kandadji; energy roadmap; NDC; reproducible planning**

Copyright © 2026
ISSN: 2961-6611

Proceedings of Book Series PBS -Vol 42, pp.22-28 **Advances in Energy Transition and Environmental Impacts**

I. INTRODUCTION

Les pays sahéliens, notamment Mali, Burkina Faso, Niger partagent une vulnérabilité énergétique particulièrement aiguë, au sein d'un espace sahélien plus vaste dont la définition institutionnelle (Stratégie Intégrée des Nations Unies pour le Sahel) couvre dix pays du Sénégal au Nigeria [1], mais dont les profils énergétiques restent très contrastés : accès électrique limité, dépendance à la biomasse traditionnelle, vulnérabilité hydrique croissante et marges budgétaires restreintes pour financer la transition. Le nexus Eau-Énergie-Alimentation (WEF), formalisé à Bonn en 2011 [2], constitue le cadre analytique retenu ici.

Le Niger illustre ces défis de façon aiguë : 22,53 % d'accès à l'électricité en 2023 [3], 71 % d'électricité importée du Nigeria [3], 72,99 % de l'énergie primaire issue de la biomasse [4], provoquant ~365 000 ha/an de dégradation forestière [5] qui affecte directement le fleuve Niger, dont les débits connaissent un changement historique depuis les années 1970. Le barrage de Kandadji (130 MW, 629 GWh/an, 45 000 ha d'irrigation) y constitue l'infrastructure nexus la plus stratégique, faisant progresser simultanément les ODD 2, 6, 7 et 15 [6].

Ce travail prolonge une étude antérieure du même groupe de recherche portant sur le diagnostic nexus WEF associé au Niger, présentée au symposium ISSD-WM 2026 [7]. Les trajectoires de demande électrique utilisées ici comme contrainte d'entrée de l'optimisation MESSAGE sont issues d'une modélisation MAED-D v2.0 propre, calibrée sur les paramètres socio-économiques, démographiques et sectoriels du Niger (INS, CNEDD, NIGELEC). Cette étude constitue le prolongement direct de [7] : elle couple, pour la première fois sur l'horizon complet 2021–2050, une demande MAED et une offre MESSAGE issues de la même modélisation propre, en ajoutant trois éléments absents des travaux précédents du groupe : la monétisation de l'effort d'investissement, l'extension explicite à 2035-2050, et une feuille de route chiffrée par jalons. Trois contributions originales : (i) une trajectoire non monotone des co-bénéfices nexus électriques, contrastée à la stabilité des co-bénéfices eau-alimentation ; (ii) un protocole de chiffrage de l'investissement pour aligner la trajectoire électrique sur les hypothèses climatiques ; (iii) une grille de score nexus révisée et dynamique sur deux horizons (2035 et 2050), reproductible pays par pays, qui prolonge l'évaluation ponctuelle de 2035 dans [7].

II. MÉTHODOLOGIE

A. La chaîne MAED-MESSAGE

MAED quantifie la demande énergétique finale à partir des déterminants socio-économiques et des choix politiques nationaux ; MESSAGE optimise ensuite l'approvisionnement électrique au coût minimum sous les contraintes de chaque scénario, avec un taux d'actualisation de 10 % appliqué aux flux d'investissement [8], [9] (Fig. 1). Le modèle MAED utilise 2021 comme année de référence, avec un écart de −4,8 % par rapport à la consommation observée, à l'intérieur du seuil d'acceptabilité de ±20 % recommandé par l'AIEA, confirmant la représentativité du calibrage [7]. Le problème d'optimisation linéaire dynamique de MESSAGE repose sur le théorème de dualité forte : à chaque contrainte est associé un prix fictif (shadow price), qui mesure la variation du coût total actualisé du système lorsque cette contrainte est relâchée d'une unité ; appliqué aux contraintes de Kandadji, il fournit une estimation de la valeur économique marginale de l'ouvrage [6], [10].

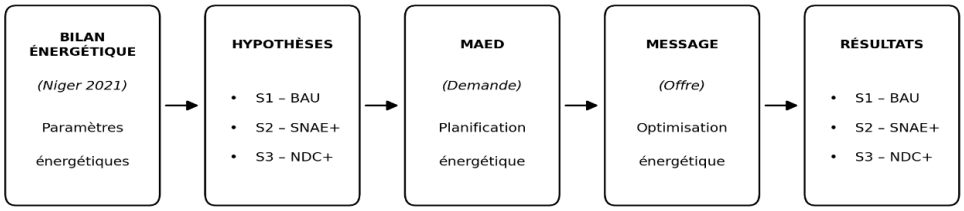


Fig. 1 Chaîne de modélisation intégrée MAED-MESSAGE : de la demande à l'offre optimisée.

B. Scénarios et données

Trois scénarios couvrent 2021–2050 : S1-BAU (PIB +4,5 %/an), S2-SNAE+ (Stratégie Nationale d'Accès à l'Électricité, PIB +6,0 %/an, 30 % ENR) et S3-NDC+ (CDN révisée, PIB +7,0 %/an, 60 % ENR, −45 % GES). Ces trajectoires encadrent les projections du FMI pour le Niger, croissance de 6,9 % (2025) et 7,0 % (2026e), potentiel structurel à moyen terme estimé à ~6 % [11], S1-BAU représentant un scénario prudent, S3-NDC+ un scénario haut aligné sur les pics récents. Sources : INS Niger [12], NIGELEC [3], CNEDD [4], [13], [14], AIEA

Copyright © 2026
ISSN: 2961-6611

Proceedings of Book Series PBS -Vol 42, pp.22-28 **Advances in Energy Transition and Environmental Impacts**

[8], [9]. Cette étude ne teste pas la sensibilité des résultats à une croissance du PIB inférieure aux trajectoires retenues ; une telle analyse constituerait une extension utile des travaux futurs.

C. Grille de score nexus révisée

L'étude [7] note déjà chaque scénario sur des ancrages quantitatifs (taux d'électrification, % de réduction de la biomasse, ha de forêt préservée) mais sur la seule année 2035, sans dimension temporelle. Cette étude prolonge cette grille en deux points : elle la rend dynamique sur deux horizons (2035 et 2050), et révise sa composition sur quatre piliers pondérés à parts égales (25 % chacun) : la part bas-carbone du mix électrique (ENR + nucléaire), la souveraineté électrique, la forêt préservée (proxy ODD 6) et le taux d'électrification rurale à 2050 (proxy ODD 2). Chaque pilier est noté de 1 à 5 selon des seuils propres, puis moyenné pour obtenir le score composite. La composition différant de [7], les scores 2035 obtenus ici ne sont pas directement comparables à ceux de [7] pour la même année.

TABLEAU I
SEUILS DE NOTATION DE LA GRILLE DE SCORE NEXUS (§II.C)

Pilier	Score 1/5	Score 5/5
Bas-carbone (ENR + nucléaire)	< 20 %	> 80 %
Souveraineté électrique	< 70 %	≥ 97 %
Forêt préservée	0 ha/an	≥ 25 000 ha/an
Électrification rurale 2050	< 50 %	> 95 %

Formellement : Score = (P_bas-carbone + P_souveraineté + P_eau + P_alimentation) / 4.

III. RÉSULTATS

A. Demande énergétique (MAED)

La demande totale converge vers 8,4–9,0 Mtep en 2050 (×3,2 à ×3,4 depuis 2021), portée par la croissance démographique (+3,9 %/an). L'électricité s'impose comme vecteur différenciant (×7,5 à ×12,9 selon le scénario) tandis que la biomasse traditionnelle recule de 28 % sous NDC+, préservant ~27 000 ha/an de forêt du bassin du Niger. Cette substitution biomasse-électricité et donc les co-bénéfices eau et alimentation qui en découlent est fixée par les hypothèses de demande MAED (démographie, urbanisation, électrification), qui ne varient pas avec les choix d'offre électrique post-2035 ; c'est cette dépendance aux seuls paramètres de demande, communs aux trois scénarios sur tout l'horizon, qui explique la stabilité de ces deux piliers, par opposition aux piliers électricité et souveraineté, tributaires du parc de production effectivement construit.

B. Trajectoire électrique non monotone (MESSAGE)

En 2035, l'achèvement simultané des grands projets ENR (Kandadji 130 MW, Tarka-Madaoua 250 MW, solaire multi-sites 327 MW) et du parc nucléaire (1 000 MW) porte la part bas-carbone du mix (ENR + nucléaire) à un pic : 91,5 % (S1-BAU), 78,9 % (S2-SNAE+), 63,9 % (S3-NDC+), avec 100 % de souveraineté électrique dans les trois scénarios (Fig. 2). Cette part est à distinguer de la part ENR seule (29,02 %, hors nucléaire) rapportée dans [7] pour la même année, la différence tenant uniquement au filtrage ou non de la production nucléaire (1 000 MW, soit l'essentiel du socle bas-carbone 2035), et non à un résultat contradictoire entre les études.

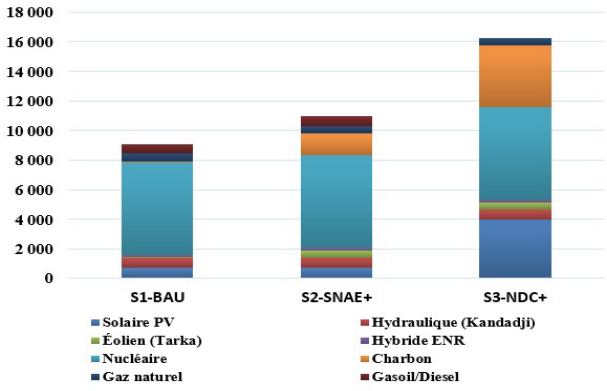


Fig. 2 Mix électrique optimal en 2035 par technologie et scénario (MESSAGE).

Copyright © 2026
ISSN: 2961-6611

Proceedings of Book Series PBS -Vol 42, pp.22-28 **Advances in Energy Transition and Environmental Impacts**

Faute de nouvelle centrale ENR programmée au-delà de 2035 dans les instruments de planification consultés SNAE 2018, Document de Politique Nationale de l'Électricité, Compact Énergétique National (CEN) [15], programme HASKÉ [16], la capacité renouvelable se stabilise à son niveau de 2035 pendant que la demande continue de croître. La part bas-carbone recule mécaniquement à 31,7 % (S1-BAU), 23,5 % (S2-SNAE+) et 25,0 % (S3-NDC+) en 2050. Les émissions CO_2 électriques, après un creux à 0,122 Mt (S1-BAU, 2035), remontent à 5,3–9,9 Mt en 2050 (Fig. 3).

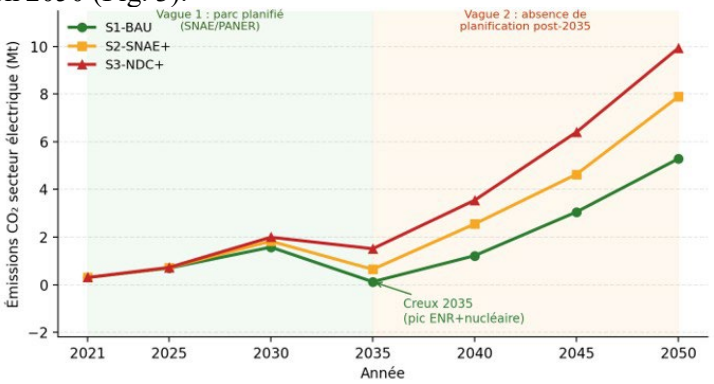


Fig. 3 Trajectoire des émissions CO_2 du secteur électrique, 2021–2050 : creux 2035, repli post-2035.

C. Feuille de route 2035–2050

Cette trajectoire en cloche n'est pas un artefact de modélisation mais le reflet fidèle d'une planification électrique nationale qui s'arrête structurellement à 2035 : aucune des centrales recensées dans les instruments consultés n'a de date de mise en service postérieure à 2035 [15], [16], [17]. Le comblement de cet écart nécessite un effort chiffré et daté (Tableau II), le besoin en capacité (colonne « Gap ENR post-2035 ») reprend les résultats de l'optimisation MESSAGE : Vague 1 (2021–2035, déjà planifiée), commune aux trois scénarios ; Vague 2 (2036–2050, à engager dès maintenant), avec un horizon de maturation de 8 à 10 ans pour un grand parc solaire ou barrage. Sur le plan technologique, le solaire PV serait à privilégier en priorité (délai de déploiement le plus court), suivi d'un renforcement hydraulique et nucléaire à plus long terme. Cette robustesse de Kandadji est confirmée par l'analyse des prix fictifs de MESSAGE, développée en Discussion (§IV).

TABLEAU II
EFFORT D'INVESTISSEMENT PAR VAGUE ET INTENSITE CAPITALISTIQUE

Scénario	Vague 1 (Md$) 2021-2035	Gap ENR post-2035 (MW)	Vague 2 (Md$) 2036-2050	TOTAL (Md$)	Intensité (k$/GWh)
S1-BAU	4,04	8 884	13,33	17,37	639
S2-SNAE+	4,04	12 487	18,73	22,78	622
S3-NDC+	4,04	14 485	21,73	25,77	545

D. Score nexus révisé et intensité capitalistique

Le score composite (§II.C), recalculé pilier par pilier, confirme l'asymétrie sans reconduire les valeurs qualitatives antérieures (Tableau III) : il recule de 4,8/5 à 4,3/5 sous NDC+, de 3,8/5 à 3,3/5 sous SNAE+ et de 3,0/5 à 2,3/5 sous BAU, un repli proportionnellement comparable dans les trois scénarios, mais un niveau absolu toujours dominé par NDC+. Sur le plan économique, malgré un investissement cumulé plus élevé en valeur absolue, NDC+ affiche la meilleure intensité capitalistique (545 k$/GWh produit, contre 639 pour S1-BAU).

TABLEAU III
SCORE NEXUS REVISE (GRILLE A SEUILS QUANTITATIFS, §II.C), 2035 VS 2050

Scénario	Score Nexus 2035	Score Nexus 2050	Recul
S1-BAU	3,0/5	2,3/5	−0,7 pt
S2-SNAE+	3,8/5	3,3/5	−0,5 pt
S3-NDC+	4,8/5	4,3/5	−0,5 pt

Copyright © 2026
ISSN: 2961-6611

Proceedings of Book Series PBS -Vol 42, pp.22-28 **Advances in Energy Transition and Environmental Impacts**

IV. Discussion

Le repli post-2035, signal générique pour le Sahel. Ce décalage entre l'horizon des stratégies électriques nationales (souvent 2035) et celui des objectifs climatiques internationaux (2050) n'est probablement pas spécifique au Niger, mais caractérise plusieurs pays sahéliens à l'architecture de planification comparable [18], que le protocole MAED-MESSAGE permet de transformer en feuille de route chiffrée et actionnable.

1) Asymétrie de robustesse entre piliers du nexus: Les co-bénéfices eau-alimentation, portés par des choix de demande déjà engagés (MAED), sont structurellement plus robustes que les co-bénéfices de décarbonation électrique (MESSAGE), qui dépendent d'un renouvellement continu des investissements. Ce résultat, cohérent avec les cadres de gouvernance nexus récents [19], invite à ne pas extrapoler la robustesse d'un pilier à l'ensemble du système.

2) Kandadji, valeur nexus la plus stable: Sur toute la période, les 130 MW, le réservoir de 1,596 Md m³, les 45 000 ha d'irrigation et la régulation des débits de Kandadji ne sont pas affectés par le repli du reste du mix, un enseignement transposable aux grands ouvrages hydrauliques polyvalents du Sahel (Manantali, Kainji) [6], [20]. Cette stabilité suppose toutefois un débit du fleuve Niger conforme aux hypothèses retenues (629 GWh/an) ; la baisse historique déjà documentée depuis les années 1970 illustre un risque climatique qui pourrait, à terme, affecter cette hypothèse d'offre.

L'analyse des prix fictifs de MESSAGE apporte un éclairage supplémentaire : seule la contrainte de rythme de construction autorisé par période (« inst ») est active pour Kandadji, la ressource hydraulique n'étant jamais contraignante une fois l'ouvrage bâti. Cette valeur, strictement identique dans les trois scénarios (Tableau IV), passe de 2 800 US$/kW en 2030 à un plateau de 1 247 US$/kW dès 2045 : son invariance révèle un plafond technique exogène plutôt qu'un arbitrage de coût du modèle, le système énergétique valoriserait une capacité additionnelle au-delà de ce qui est programmé, quel que soit le scénario. Ce cas est renforcé par la vocation multi-usages de l'ouvrage : au-delà de l'électricité (130 MW), le réservoir de 1,596 Md m³ sécurise l'eau potable de Niamey (~1,5 million d'habitants), étendant les co-bénéfices au-delà du seul secteur électrique.

TABLEAU IV
PRIX FICTIF MESSAGE DE LA CAPACITE KANDADJI (US$/KW, VALEUR 2000), IDENTIQUE DANS S1-S2-S3

Année	2021	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Prix fictif (US$/kW)	0	0	2 800	2 502	2 021	1 247	1 247

Ce prix fictif ne valorise toutefois que la seule fonction électrique de l'ouvrage : l'objectif de coût minimum de MESSAGE ne monétise ni l'irrigation des 45 000 ha, ni la préservation des sols du bassin versant, ni la sécurisation de l'eau potable de Niamey, alors que le réservoir et le régime de débit restent inchangés quel que soit le niveau de demande électrique.

Le chiffre de 1 247 US$/kW doit donc se lire comme un plancher de la valeur socio-économique de l'infrastructure plutôt que comme son évaluation complète, un biais méthodologique commun à la quasi-totalité des études qui abordent les grands ouvrages hydrauliques multi-usages du Sahel sous le seul angle électrique.

3) Comparaison avec la littérature récente: Ces résultats rejoignent les indices nexus quantitatifs continentaux [21] et les diagnostics récents de cohérence des politiques nexus en Afrique de l'Ouest [19], ainsi que les perspectives énergétiques de l'AIE [22].

4) Faisabilité du nucléaire: Le parc nucléaire (1 000 MW), qui porte l'essentiel du socle bas-carbone 2035, reste une hypothèse de planification dont la faisabilité n'est pas discutée ici : accès à l'eau de refroidissement en zone sahélienne, montage financier (les programmes nucléaires civils reposent, y compris dans les économies avancées, sur des mécanismes de financement mixte et des partenariats internationaux), et cadre institutionnel de sûreté encore à construire au Niger. Ces conditions préalables, non chiffrées ici, conditionnent en pratique la réalisation du scénario et mériteraient un traitement dédié dans un travail ultérieur.

5) Limites: Le système électrique nigérien évolue en continu (nouvelles centrales, révisions de la SNAE et du CEN [15]) ; le diagnostic nécessite une actualisation périodique, caractéristique attendue d'un protocole dynamique plutôt qu'une limite intrinsèque.

Copyright © 2026
ISSN: 2961-6611

Proceedings of Book Series PBS -Vol 42, pp.22-28 **Advances in Energy Transition and Environmental Impacts**

V. CONCLUSION

Trois enseignements se dégagent. Premièrement, la transition énergétique nigérienne est à deux vitesses : co-bénéfices eau-alimentation stables, décarbonation électrique en cloche (pic 2035, repli 2050) faute de seconde vague d'investissement. Deuxièmement, Kandadji illustre sans exception la valeur d'une infrastructure nexus multidimensionnelle, confirmée par un prix fictif MESSAGE invariant selon les scénarios (2 800 à 1 247 US$/kW). Troisièmement, le protocole MAED-MESSAGE, enrichi ici d'une grille de score à seuils quantitatifs et d'un chiffrage CAPEX transparent, permet de dater et chiffrer précisément l'effort nécessaire, 13,3 à 21,7 Md$ selon le scénario, pour aligner la trajectoire électrique nationale sur les hypothèses climatiques de long terme. Message pour les décideurs : engager dès maintenant la planification de la Vague 2 (2036–2050), compte tenu du délai de maturation de 8 à 10 ans des grands projets ENR. Ce protocole, calibré sur des données officielles, est transposable aux autres pays du Sahel.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Université Abdou Moumouni (UAM), l'ED SET, la NIGELEC, le CNEDD, la SONIDEP et l'INS Niger pour leur soutien institutionnel.

RÉFÉRENCES

[1] United Nations, *United Nations Integrated Strategy for the Sahel (UNISS)*, Report of the Secretary-General to the Security Council, S/2013/354. New York, 2013 (recalibrated 2017).
[2] H. Hoff, *Understanding the Nexus*. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011.
[3] NIGELEC, *Statistiques d'accès à l'électricité*, données internes DEP. Niamey, 2026.
[4] CNEDD, *Premier Rapport Biennal de Transparence du Niger (BTR1-Niger)*. Niamey: CNEDD/CCNUAC, 2024.
[5] Ministère de l'Énergie du Niger, *Plan d'Action National des Énergies Renouvelables (PANER)*. Niamey, 2015.
[6] Agence du Barrage de Kandadji (ABK), *Programme Kandadji P-KRESMIN*. Niamey, 2022; World Bank, *Niger Basin Water Resources Development and Sustainable Ecosystems Management Program (Kandadji Programme)*, Project P130174. Washington, DC, 2021.
[7] I. ISSA SEIDI and I. HALIDOU, "Water–Energy Nexus in the Sahel: Integrated MAED–MESSAGE Analysis for Sustainable Energy Planning in Niger (2021–2050)," presented at the *2nd Int. Symposium on Innovations in Solar Desalination and Water Management (ISSD-WM 2026)*, Tangier, Morocco, Jul. 2026.
[8] IAEA, *Model for Analysis of Energy Demand (MAED-2), User's Manual*, Computer Manual Series No. 18. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2006.
[9] IAEA, *Model for Energy Supply Strategy Alternatives (MESSAGE), User's Manual*. Vienna: IAEA, 2007.
[10] D. Bertsimas and J. N. Tsitsiklis, *Introduction to Linear Optimization.* Belmont, MA: Athena Scientific, 1997.
[11] IMF, *Niger: 2024 Article IV Consultation and Sixth Review*, Country Report No. 25/25. Washington, DC: International Monetary Fund, 2025.
[12] INS Niger, *Annuaire Statistique du Niger 2017-2021*. Niamey: Ministère du Plan, 2022.
[13] CNEDD, *Impacts des changements climatiques dans le secteur de l'énergie au Niger*, Rapport final, Projet Africa Adaptation Programme (AAP/Niger), PNUD–Japon. Niamey: Cabinet du Premier Ministre / CNEDD, déc. 2011.
[14] CNEDD, *Contribution Déterminée au niveau National révisée du Niger (CDN 2021)*. CCNUAC, 2021.
[15] République du Niger, *Compact Énergétique National – Mission 300*. Niamey: Gouvernement du Niger / Banque Mondiale, 2025.
[16] World Bank, *Niger – Accelerating Electricity Access Project (Haské)*, Project P174034, Report No. PAD4519. Washington, DC: World Bank, 2022.
[17] Agence Nigérienne de Presse (ANP), "Nationalisation de la NIGELEC : Une étape de plus dans la marche vers la souveraineté énergétique au Niger," 2025.
[18] N. S. Ouedraogo, "Energy consumption and economic growth: Evidence from the economic community of West African States (ECOWAS)," *Energy Economics*, vol. 36, pp. 637-647, 2013. doi: 10.1016/j.eneco.2012.11.011.
[19] A. Ballo et al., "A Multi-Criteria Policy Coherence Index for Water–Energy–Food Nexus Governance and Energy Transition Pathways in Sub-Saharan Africa," *Energies*, vol. 19, no. 13, art. 3178, 2026. doi: 10.3390/en19133178.
[20] IRENA, *Renewable Energy in the Water, Energy & Food Nexus*. Abu Dhabi: IRENA, 2015.
[21] G. B. Simpson, G. P. W. Jewitt, T. Mabhaudhi, C. Taguta, and J. Badenhorst, "An African perspective on the water-energy-food nexus," *Scientific Reports*, vol. 13, art. 16842, 2023. doi: 10.1038/s41598-023-43606-9.
[22] IEA, *Africa Energy Outlook 2022*. Paris: International Energy Agency, 2022.

Copyright © 2026
ISSN: 2961-6611