Revue Internationale DAMBE

ISSN :1987-1996

Volume 2 – Numéro 2 - Juin 2026

Valorisation des Savoirs Endogènes et Promotion de la Recherche Scientifique

Revue semestrielle multidimensionnelle du CERFDES
Bamako - Mali
https://revuedambe.cerfdesconsulting.com/

CC BY

Revue Internationale DAMBE

Valorisation des savoirs endogènes et promotion de la recherche scientifique.

ISSN :1987-1996

PRESENTATION

Tirant son nom du mot bambara « **Dambé** », qui signifie la dignité, la revue Internationale « **Dambé** » vise à promouvoir la recherche scientifique en mettant en valeur les savoirs endogènes en Afrique et ailleurs. C'est une revue semestrielle adossée au Centre d'études, de Recherche et de Formation sur les Dynamiques Économiques, Environnementales et Sociales (CERFDES). À l'exception des numéros spéciaux dont la publication est conjoncturelle, la revue publie deux numéros par an (Juin et Décembre).

Ayant un intérêt particulier pour les sciences sociales, elle reçoit des contributions de doctrine livrant des réflexions sur toutes les questions ou problématiques actuelles dans des domaines tels que, la géographie, l'économie, le droit, la santé et tout autre sujet concernant les sciences sociales, humaines et environnementales.

Les articles soumis à la revue Dambé sont évalués de façon rigoureuse par un comité scientifique et de lecture composés de chercheurs et d'enseignants-chercheurs de diverses nationalités et de spécialités variées. Tous les articles publiés restent accessibles librement par les auteurs ainsi que par les lecteurs sur le site de la revue.

COMITE EDITORIAL

Président du Comité Scientifique

Pr Balla DIARRA, Professeur titulaire en Géographie, École Nationale d'Administration

Coordinateur Scientifique

Dr Issa DIALLO, Maître de conférences en sociologie de la santé, INFTS

Rédacteur en Chef

Dr Idrissa DEMBELE, Maître assistant en droit, USJPB

Rédacteur en Chef Adjoint

Dr Adama Koné, Géographe, CERFDES

Coordonnateur des Rubriques Sciences de la Santé

Dr Abdoul Salam DIARRA, Maître assistant en Santé Publique, CNRST, Bamako, Mali

Directeur de publication

Dr Malick TIMBINE, Maître assistant en Géographie, environnement et santé, ISH

COMITE SCIENTIFIQUE

Pr Balla DIARRA, Géographie, Ecole Nationale d'Administration, Mali

Pr Flatie OUATTARA, philosophie, Université Joseph K. Zerbo, Burkina Faso

Pr Seydou MARIKO, Géographie, Ensup de Bamako, Mali

Pr Cheich Hamala TOURE, Professeur titulaire, Université des Sciences Juridiques et Politiques de Bamako (USJPB), Mali

Pr Brema Ely DICKO, Sociologue, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako (ULSHB), Mali

Pr Aboubacar Sidiki COULIBALY, littérature anglaise, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako (ULSHB), Mali

Pr Belco OUOLOGUEM, Philosophie, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako (ULSHB), Mali

Dr Bazoumana DIARRASSOUBA, Géographie, Maître de conférences, CAMES, Université Alassane Ouattara de Bouaké, Côte d'Ivoire

Dr Nouhoum TANDINA, Maitre de Conférences CAMES, USJPB

Dr Amadou TRAORE, Maître de conférences CAMES en sociologie, Université de Ségou.

Dr Fodié TANDJIGORA, Sociologie, Maitre de conférences CAMES, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako (ULSHB), Mali

Dr Ibrahima TRAORE, Sciences de l'Education, Maitre de conférences CAMES, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako (ULSHB), Mali

Dr Boureima TOURE, Anthropologie, Maitre de conférences CAMES, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako (ULSHB), Mali

Dr Seydou LOUA, Sciences de l'Education, Maitre de conférences CAMES, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako (ULSHB), Mali

Dr Abdoulaye GUINDO, Anthropologie médicale, Maitre de conférences CAMES, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako (ULSHB), Mali

Dr Kawélé TOGOLA, Anthropologie, Maitre de conférences CAMES, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako (ULSHB), Mali

Dr Almamy SYLLA, Anthropologie, Maitre de conférences CAMES, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako (ULSHB), Mali

Dr Arouna DEMBELE, Géographie, Maître de conférences, USSGB Mali

Dr Amadou BAMBA, Maître de conférences en Économie, USSGB, Mali

Dr Baba COULIBALY, Géographie Maître de Recherche à l'ISH. Mali

Dr Aimé Assué YAO, Géographie, Maître de conférences CAMES, Université Alassane Ouattara de Bouaké, Côte D'ivoire.

Dr Tuo PEGA, Géographie de la santé, Maître de conférences CAMES, Université Félix Houphouët Boigny.

Dr Papa Fara DIALLO, Maitre de conférences en sciences politiques, Université Gaston Berger de saint Louis, Sénégal

Dr Boubacar dit Dédé TRAORE, Archéologie, Maître de conférences à l'ISH.

Dr N'Gna TRAORE, anthropologie, Maître de conférences à l'ISH.

Dr Issa DIALLO, Maitre de conférences en sociologie de la santé, INFTS.

Dr Souleymane KEITA, Maître de conférences, philosophe, USLHB.

Dr Moctar SIDIBE, Maitre-assistant CAMES, Maitre de conférences, sciences de l'éducation, USLHB.

Dr Mory DIALLO, Maitre-assistant CAMES, Maitre de Conférences, USJPB

Dr Allaye NIANGALY, Maitre de Conférences, USJPB

Dr Abdoul SOGODOGO, Maitre-assistant CAMES, Maitre de Conférences, USJPB

Dr Oumar Toumaly DIALLO, Maitre de conférences, USJPB

Dr Samba SOGOBA, Maître de Conférences, USJPB

Dr Yamadou CAMARA, Maitre de Conférences, USJPB

Dr Ahmed SAMAKE, Maitre de Conférences, USJPB

Dr Mariam SIDIBE, Maitre-assistant CAMES, Maitre de Conférences, USJPB

Dr Fousseyni DOUMBIA, Maitre de Conférences, USJPB

Dr Sounko SISSOKO, Maitre de Conférences, Université de Ségou

Dr Lamine SANDY, Sociologie, Maitre de recherche, INFTS, Mali

COMITE DE LECTURE

Dr Bazoumana DIARRASSOUBA, Géographie, Maître de conférences, CAMES, Université Alassane Ouattara de Bouaké, Côte d'Ivoire

Dr Arouna DEMBELE, Géographie, Maître de conférences, USSGB Mali

Dr Issa DIALLO, Maître de conférences des Universités du CAMES en sociologie de la santé, INFTS

Dr Souleymane KEITA, Maître de conférences, philosophe, USLHB.

Dr Moctar SIDIBE, Maitre-assistant CAMES, Maitre de conférences, sciences de l'éducation, USLHB

Dr Tuo PEGA, Géographie de la santé, Maître de conférences CAMES, Université Félix Houphouët Boigny.

Dr Ibrahima TRAORE, Sciences de l'Éducation, Maitre de conférences CAMES, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako (ULSHB), Mali

Dr Mory DIALLO, Maitre-assistant CAMES, Maitre de Conférences, USJPB

Dr Mariam SIDIBE, Maitre-assistant CAMES, Maitre de Conférences, USJPB

Dr Yacouba TENGUERI, Maître-assistant CAMES Sociologie, Université de Dédougou, Burkina Faso.

Dr Amadou BAMBA, Maitre-assistant CAMES, Maître de conférences en Économie, USSGB, Mali

Dr Yéo LANZENI, Maître-assistant CAMES en Géographie, Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan.

Dr Mesmer Luther GUEUYOU, Centre d'études de droit international de l'université Paris Ouest, Enseignant chercheur à l'université de Nantes.

Dr Solim ALEKA, Docteur en Droit public, Ministère de la Santé du TOGO.

Dr Hamidou NAPARE, Sciences de l'éducation, Chargé de Recherches à l'INFSS.

Dr Bakaye TOGOLA, Anglais, études africaines et postcoloniales, UCAD

Dr Issa TOGOLA, Maître assistant en Géographie, Institut de sciences humaines, Bamako.

Dr Soufiana Souleymane MAIGA, didactique des langues université de touba Arabe.

Dr Drissa TRAORE, Maître assistant CAMES, Université de Daloa, RCI.

Dr Tiecoura Hamed COULIBALY, Université Péléforo Gon Coulibaly de Korhogo.

Dr Siaka DOUMBIA, Maître assistant en Géographie, Université de Ségou.

Dr Francis Birama Daba SARR, philosophe, Université cheikh Anta Diop de Dakar.

Dr Falingué KEITA, Économie, USSGB.

Dr Harouna BAGAYOKO, Géographie, USSGB.

Dr Adama KONÉ, Géographie, Université de gestion et de développement durable de Bamako.

Dr Amadou SOW, Droit, Centre d'Etudes, de Recherche et de Prospective en Afrique – CERPA (Mali).

Dr Ibrahima BAMBA, Droit, Institut de pédagogie universitaire de Bamako (IPU)

Dr Lassine DIARRA, Maître-Assistant USJPB.

Dr Adama KONE, Géologie, Maître-Assistant à la FST

Dr Issa OUATTARA, Maître assistant en Géographie, INFTS de Bamako.

Dr Oumar DEMBELE, Géographie, point SUD.

Dr Oumar KONÉ, philosophie, USLHB.

Dr Abdou Bougoury TRAORE, Économie de l'environnement, USSGB.

Dr Lassina TOGOLA, logisticien, USSGB.

Dr Ousmane DOUMBIA, Marketing communication, USSGB.

Dr Toumani KANTE, sciences agronomiques, IER.

Dr Youssouf GUINDO, Géographie de l'environnement, ENSUP.

Dr YAO Koffi Bertrand, Maître assistant CAMES en Géographie, Université Félix Houphouet Boigny d'Abidjan.

Dr Abdoulaye MAIGA, Économie politique, USSGB.

Dr Abdoul wahab Issiaka MAIGA, Administration Éducative et planification. Université privée Attaoune (UPA), BAMAKO

Dr Ousmane Famagan KONATE, Droit public.

Dr Malick TIMBINE, Géographie, environnement et Santé, Maître-Assistant à l'ISH.

Dr Moussa FOFANA, anthropologie de la santé, Maître-Assistant à L'ISH.

Dr Lala Aïché TRAORE, Lettre Moderne, Maître- Assistant à l'ISH.

Dr Yaya SIDIBE, Économie, Maître Assistant à l'USSGB.

Dr Mamoutou BERTHE, Philosophie à l'ENSup.

Dr Abdoulaye N'Tigui KONARE, économiste, Maître- Assistant à l'USSGB.

Dr Boubacar KONATE, Maître-Assistant à l'INFTS.

Dr Ousmane SY, Maître de recherche, Epidémiologiste, Direction Générale de la Santé et de l'Hygiène Publique, Bamako, Mali.

Dr Abdoul Salam Diarra, Maître assistant en Santé Publique, CNRST, Bamako, Mali.

Dr Idrissa DEMBELE, droit, Maitre-Assistant, USJPB

Dr Bengaly GUINDO, Science politique, Maitre-Assistant USJPB

Dr Sory Ibrahim Maiga, Science politique, Maitre-Assistant USJPB

Dr Mohamed BERTHE, droit Maitre-Assistant, École supérieur de journalisme et des sciences de la communication, Bamako

Dr Seydou MALLET, droit, USJPB

Dr Oumar CAMARA, droit, Maitre-Assistant en droit USJPB

Dr Bakary KONE, Maitre-Assistant à l'Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako.

Dr Lamine Boua COULIBALY, Géographie, Maitre-Assistant à l'Université de Ségou.

Dr Soumaila COULIBALY, Psychologie, Enseignant chercheur à l'université des sciences sociales et de gestion de Bamako.

Dr Seydou Soungalo COULIBALY, Sciences de l'éducation, à l'IPU de Bamako.

Dr Ibrahim Amara DIALLO, Philosophie politique et morale, ULSHB.

Dr Ibrahim KONE, relations internationales, FSAP, Bamako

Dr Moïse Jean, Docteur en droit public à l'Université de Nanterre, Chercheur postdoctoral à l'Université de Genève.

SOMMAIRE

Diakaridia SIDIBE, Yaya DOGONI, Bakary DAGNO

ANALYSE DE L'EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA DENSITE, LA STRUCTURE ET LA PRODUCTION LIGNEUSE DANS LA FORET CLASSEE DES MONTS MANDINGUES AU MALI 1

ANALYSIS OF THE EFFECT OF CLIMATE CHANGE ON THE DENSITY, STRUCTURE AND WOOD PRODUCTION IN THE CLASSIFIED FOREST OF THE MANDINGUE MOUNTAINS IN MALI..... 1

ADJAWOUTO Kossi Tozo, DANDONOUGBO Iléri, HETCHELI Follygan

MAUVAIS ETAT DU RESEAU ROUTIER ET LA PRODUCTION DU SODABI (BOISSON LOCALE) DANS LES MILIEUX RURAUX DE LA PREFECTURE DU MOYEN-MONO AU TOGO 13

POOR CONDITION OF THE ROAD NETWORK AND THE PRODUCTION OF SODABI (LOCAL DRINK) IN RURAL AREAS OF THE MOYEN-MONO PREFECTURE IN TOGO..... 13

Komi DOSSE, Koudzo SOKEMAWU

LES DÉTERMINANTS DE LA CONSOMMATION DU LAPIN D'ÉLEVAGE DANS LA DISTRICT AUTONOME DU GRAND LOMÉ AU SUD-TOGO..... 32

DETERMINANTS OF FARMED RABBIT MEAT CONSUMPTION IN THE GREATER LOMÉ AUTONOMOUS DISTRICT, SOUTHERN TOGO..... 32

Bakary BERTHE, Boubacar SY, Abdoulaye KEITA, Houdou Attikou DIALLO, Bokary DIALLO

ANALYSE DU PROCESSUS D'ORGANISATION ET DE GESTION DES ÉVACUATIONS SANITAIRES AUX SERVICES D'ACCUEIL DES URGENCES (SAU): CAS DU CENTRE HOSPITALIER UNIVERSITAIRE (CHU) DE GABRIEL TOURE 43

ANALYSIS OF THE ORGANIZATION AND MANAGEMENT PROCESS OF MEDICAL EVACUATIONS IN EMERGENCY DEPARTMENTS (EDS) : CASE OF THE GABRIEL TOURE UNIVERSITY HOSPITAL CENTER (CHU) 43

Tantely Aro Tafika Notahina Anjarasoa RAKOTONINDRINA, Tantely Ny Andry Nomena Anjarasoa RAKOTONINDRINA, Tantely Oliva RAKOTONINDRINA, Faly Tinasoa ANDRIANANDRASANIRINA

IMPACT DE L'USAGE DES LEARNING LABS SUR L'INNOVATION PÉDAGOGIQUE DANS L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR : CAS DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE L'UNIVERSITÉ DE FIANARANTSOA, MADAGASCAR) 58

IMPACT OF LEARNING LAB USE ON PEDAGOGICAL INNOVATION IN HIGHER EDUCATION: CASE OF THE ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE OF THE UNIVERSITY OF FIANARANTSOA, MADAGASCAR 58

KOUAKOU Amenan Ester, DAGNOGO Gnéré Laeticia Blama

PETITES ÉPARGNES, GRANDES VICTOIRES »: POUR UNE ANALYSE COMMUNICATIONNELLE DU PROGRAMME FILETS SOCIAUX PRODUCTIFS DANS LA COMMUNE DE SOUBRÉ EN CÔTE D'IVOIRE 70

SMALL SAVING, BIG VICTORIES »: A COMMUNICATION ANALYSIS OF THE PRODUCTIVE SOCIAL SAFETY NET PROGRAMM IN THE COMMUNE OF SOUBRÉ IN IVORY COAST 70

Tantely Ny Andry Nomena Anjarasoa RAKOTONINDRINA, Tantely Aro Tafika Notahina Anjarasoa RAKOTONINDRINA, RATSIMBAZAFY, Tantely Oliva RAKOTONINDRINA

MODERNITÉ, ÉDUCATION FAMILIALE ET RÉSULTATS SCOLAIRES : LE CAS DE LA RÉGION DIANA À MADAGASCAR 85

MODERNITY, FAMILY EDUCATION AND ACADEMIC ACHIEVEMENT: THE CASE OF THE DIANA REGION IN MADAGASCAR 85

Djibril Abdoulaye SABANE, Boubacar SY

EFFETS DES POLITIQUES DE SUBVENTIONS AGRICOLES SUR LA CROISSANCE ECONOMIQUE AU MALI 102

EFFECTS OF AGRICULTURAL SUBSIDY POLICIES ON ECONOMIC GROWTH IN MALI 102

NGBANGA MOSALA CLAUDE

ANALYSE DES BESOINS DU PEUPLE BUDJA À TRAVERS LE VÉCU DES PHÉNOMÈNES ‘’PSI ‘’ 110

ANALYSIS OF THE NEEDS OF THE BUDJA PEOPLE THROUGH THEIR EXPERIENCE OF PSI PHENOMENA 110

TSHIKAMA KALAMBA Alfred

ENTREPRENEURIAT CULTUREL À KINSHASA: ENJEUX ET PERSPECTIVES DE CRÉATION D'UNE INDUSTRIE CRÉATIVE (CAS DE L'ATELIER ALTSHIK. C.A.F) 124

CULTURAL ENTREPRENEURSHIP IN KINSHASA: ISSUES AND PROSPECTS FOR CREATING A CREATIVE INDUSTRY (CASE OF THE ALTSHIK WORKSHOP. C.A.F) 124

IPOBA MENAKUNTIMA Léonard, LONGI MASALA Rachel, MATAND TUILWENG Alphonse, KIPALA ESANGO Nestor

EVOLUTION DE L'HABITAT DANS L'AIRE URBAINE DE KINSHASA : ETAT DE LIEUX ET PERSPECTIVES 132

HOUSING TRENDS IN THE KINSHASA URBAN AREA : CURRENT SITUATION AND OUTLOOK 132

Issoufou COULIBALY

APPORTS DES TECHNOLOGIES INTELLIGENTES ET NUMÉRIQUES DANS L'AGRICULTURE MALIENNE 145

EMERGING ECOLOGICAL TRANSITION: CONTRIBUTIONS OF INTELLIGENT AND DIGITAL TECHNOLOGIES TO MALIAN AGRICULTURE 145

LUKUBAMA MUMBELA Reddy, BAKUMBA MANGITUKULU Guy

DE LA PRÉCARITÉ À L'AUTOFINANCEMENT DU FONCIER : LE REMEMBREMENT FONCIER COMME LEVIER DE TRANSFORMATION DES QUARTIERS SPONTANÉS À KINSHASA 158

FROM PRECARITY TO LAND SELF-FINANCING: LAND READJUSTMENT AS A LEVER FOR TRANSFORMING INFORMAL SETTLEMENTS IN KINSHASA 158

Issa Koné

CARBONE POREUX HIÉRARCHIQUE DOPÉ AVEC DU FER, DE L'AZOTE ET DU SOUFRE (FENS/HPC) POUR LA RÉACTION DE RÉDUCTION DE L'OXYGÈNE (ORR) 179

HIERARCHICAL POROUS CARBON DOPED WITH IRON, NITROGEN, AND SULFUR (FENS/HPC) FOR THE OXYGEN REDUCTION REACTION (ORR) 179

CAMARA Soumaila, COULIBALY Souleymane

ÉVALUATION DES PERFORMANCES D'UN SYSTÈME DE REFROIDISSEMENT À ABSORPTION À SIMPLE EFFET ENTRAÎNÉ PAR UN CAPTEUR SOLAIRE À DOUBLE ACTION EN CLIMAT CHAUD 193

PERFORMANCE EVALUATION OF A SINGLE-EFFECT ABSORPTION COOLING SYSTEM DRIVEN BY A DUAL-ACTION SOLAR COLLECTOR IN A HOT CLIMATE 193

Natié COULIBALY

RÉSILIENCE ÉDUCATIVE AU MALI: QUELLES STRATÉGIES DES ACTEURS DE L'ÉCOLE EN CONTEXTE D'INSÉCURITÉ? 210

EDUCATIONAL RESILIENCE IN MALI: WHAT STRATEGIES DO SCHOOL ACTORS ADOPT IN A CONTEXT OF INSECURITY?.....210

Darcy LUTUMBA NKANGA

ARBRE DE DÉCISION: FONCTIONNEMENT ET IMPACT DANS LE DOMAINE DE LA SANTÉ.....220

DECISION TREE: HOW IT WORKS AND ITS IMPACT IN THE HEALTHCARE SECTOR.....220

KONAN Kouakou Gildas

L'IMAGINATION MATÉRIELLE CHEZ JOSUÉ GUÉBO : UN PROCÈS EN COURS DANS SONGE À LAMPEDUSA.....229

MATERIAL IMAGINATION IN JOSHUA GUEBO : A TRIAL IN PROGRESS IN A DREAM IN LAMPEDUSA.....229

Darcy LUTUMBA NKANGA, Richard KITONDUA LUBANZADIO, Cédric KABEYA TSHISEBA, Pierre KAFUNDA KATALAY, Josué NZUZI TSASA, Tommy BUKASA MUTOMBO, Merveil LUMBALA KATUMBA

OPTICS: FONCTIONNEMENT ET IMPACT DANS LE DOMAINE DE LA SANTÉ.....240

OPTICS: HOW IT WORKS AND ITS IMPACT IN THE HEALTHCARE SECTOR.....240

Oumar DEMBELE, Issa OUATTARA, Adama KONE, Mounérou DJIRE

EMIGRATION ET CHANGEMENTS SOCIOÉCONOMIQUES DE LA VILLE DE KITA - MALI.....250

EMIGRATION AND SOCIO-ECONOMIC CHANGES IN THE CITY OF KITA-MALI.....250

Dabiré Der, Fayama Tionyélé, Ouiminga Idrissa, Sondé T Larissa, Berre David, Toé Patrice

TYPOLOGIE DES INTERACTIONS EN JEU DANS LA GOUVERNANCE DES RESSOURCES PASTORALES POUR S'ADAPTER AUX EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS LA COMMUNE RURALE DE KOUMBIA AU BURKINA FASO: ENTRE HIÉRARCHIE, MÉDIATION, COOPÉRATION ET CONFLIT.....264

A TYPOLOGY OF INTERACTIONS INVOLVED IN THE GOVERNANCE OF PASTORAL RESOURCES TO ADAPT TO THE EFFECTS OF CLIMATE CHANGE IN THE RURAL COMMUNE OF KOUMBIA, BURKINA FASO: BETWEEN HIERARCHY, MEDIATION, COOPERATION, AND CONFLICT.....264

Mahmoud Ag ALY, Cheick Kader M'BAYE, Falingué KEITA

INVESTISSEMENTS EN INFRASTRUCTURES ÉNERGÉTIQUES ET CROISSANCE ÉCONOMIQUE AU MALI 274

INVESTMENT IN ENERGY INFRASTRUCTURE AND ECONOMIC GROWTH IN MALI 274

Sékou Dit Karamoko KEITA, Boubacar SY

RÔLE DE LA FIXATION DU PRIX DU COTON ET LA CROISSANCE ÉCONOMIQUE DU MALI 284

THE ROLE OF COTTON PRICING IN MALI'S ECONOMIC GROWTH 284

Oumar SK DEMBELE, ABDOUL Karim CAMARA

HÉTÉROGÉNÉİTE ÉNONCIATIVE ET CONSTRUCTION DU SENS: UNE LECTURE DISCURSIVE À LA LUMIÈRE DES TRAVAUX DE JACQUELINE AUTHIER-REVUZ..... 294

ENUNCIATIVE HETEROGENEITY AND THE CONSTRUCTION OF MEANING: A DISCURSIVE ANALYSIS IN LIGHT OF THE WORK OF JACQUELINE AUTHIER-REVUZ..... 294

ÉVALUATION DES PERFORMANCES D'UN SYSTEME DE REFROIDISSEMENT A ABSORPTION A SIMPLE EFFET ENTRAINE PAR UN CAPTEUR SOLAIRE A DOUBLE ACTION EN CLIMAT CHAUD

PERFORMANCE EVALUATION OF A SINGLE-EFFECT ABSORPTION COOLING SYSTEM DRIVEN BY A DUAL-ACTION SOLAR COLLECTOR IN A HOT CLIMATE

Dr CAMARA Soumaila[1, *], Maître Assistant, Email : camarasoumailas@gmail.com

[1]DER Sciences Fondamentales de Base, Institut Polytechnique Rural de Formation et de Recherche Appliquée (IPR/IFRA), Katibougou, BP 06, Koulikoro, Mali.

Dr COULIBALY Souleymane[2], Maître Assistant, Email : csouleymane34@yahoo.fr

[2]DER Génie Mécanique, Energétique et Mines, Ecole Normale d'Enseignement Technique et Professionnel (ENETP), Cité universitaire de Kabala, Bamako, Mali.

Résumé

La croissance industrielle, conjuguée à la recherche constante de confort thermique dans les bâtiments, entraîne une hausse de la demande énergétique, notamment dans le secteur du refroidissement. Cette tendance s'explique par l'augmentation des charges thermiques et l'évolution des pratiques constructives. Les systèmes de refroidissement solaire, diversifiés et respectueux de l'environnement, constituent une alternative économique aux solutions conventionnelles. Dans ce contexte, cette étude propose et évalue un refroidisseur à absorption H_2O–LiBr à simple effet, alimenté par un capteur solaire à double action, adapté aux conditions climatiques de Bamako (12,65° N, 8° E). Les analyses thermo-économique, énergétique et exergétique montrent que les performances optimales sont atteintes pour des températures de 85 °C au générateur, 40 °C au condenseur et 8 °C à l'évaporateur. La production frigorifique annuelle du système s'élève à 52,272 MWh, pour un apport solaire annuel de 138,778 MWh sur la surface d'ouverture du capteur solaire à double action. L'efficacité énergétique annuelle est de 0,39, tandis que l'efficacité exergétique atteint environ 2,5 %. L'investissement est estimé à 36,9 k€, et le temps de retour sur investissement simple à 10,4 ans.

Mots clés : refroidissement solaire ; refroidissement par absorption ; capteur solaire combiné ; coefficient de performance ; efficacité exergétique.

Abstract:

Industrial growth, combined with the constant search for thermal comfort in buildings, is leading to an increase in energy demand, especially in the cooling sector. This trend is explained by the increase in thermal loads and the evolution of constructive practices. Diversified and environmentally friendly solar cooling systems are an economical alternative to conventional solutions. In this context, this study proposes and evaluates a single-acting H_2O-LiBr absorption chiller, powered by a double-acting solar collector, adapted to the climatic conditions of Bamako (12.65 ° N, 8° E). The thermo-economic, energy and exergetic analyses show that optimal performances are achieved for temperatures of 85 °C. at the generator, 40 °C. at the condenser and 8 °C. at the evaporator. The annual refrigeration production of the system amounts to 52,272 MWh, for an annual solar input of 138,778 MWh on the opening surface of the double-acting sensor. The annual energy efficiency is 0.39, while the exergetic efficiency reaches about 2.5%. The investment is estimated at € 36.9 k and the return time on simple investment at 10.4 years.

Keywords: solar cooling; absorption cooling; combined solar collector; coefficient of performance; energy efficiency.

Introduction

La croissance de l'activité industrielle et la demande de confort intérieur entraînent une hausse de la production énergétique. Dans le secteur du refroidissement, la demande énergétique augmente sous l'effet de l'accroissement des charges thermiques et de l'évolution architecturale des bâtiments (M. S. A. Khan et al., 2018). La consommation pour le refroidissement devrait tripler entre 2016 et 2050, passant de 850 GW à 3350 GW (International Energy Agency., 2012). Par ailleurs, la demande mondiale d'énergie a augmenté de 4,6 % en 2021, principalement couverte par les combustibles fossiles (El Marazgioui & El Fadar, 2022), dont l'épuisement est imminent (Salameh et al., 2021). Ces contraintes favorisent le recours aux systèmes de refroidissement solaires (Mehregan et al., 2022). Les énergies renouvelables, et notamment l'énergie solaire, constituent une alternative viable (Bellos & Tzivanidis, 2017; Liang et al., 2019), non nocive pour l'environnement (Bellos & Tzivanidis, 2018a) et abondante (Shirazi et al., 2017). Leur couplage à des dispositifs à haut rendement offre des solutions efficaces (Chen et al., 2022). Dans les pays à fort potentiel solaire, les technologies de refroidissement solaire représentent un atout majeur pour lutter contre le changement climatique (Mikovits et al., 2021; Muhammed et al., 2021).

Cependant, le refroidissement radiatif nocturne est une solution passive prometteuse, dissipant la chaleur avec faible consommation énergétique. Il utilise le ciel comme puits de froid radiatif, plus froid que l'environnement immédiat (Aketouane et al., 2022), via les longueurs d'onde de la fenêtre atmosphérique (8–14 µm) (Camara et Sulin, 2020). Ce phénomène dépend fortement du site et des conditions climatiques (Zevenhoven & Fält, 2018).

De plus, de nombreuses études ont porté sur la production combinée de refroidissement radiatif et de chauffage solaire. Zhao et al. (Zhao et al., 2019) ont exploré les matériaux et applications. Sanaye et Sarrafi ont conçu un système hybride pour bâtiments isolés, réduisant de 4,95 % la consommation d'électricité par osmose inverse et de 67 % les émissions de CO2 (Sanaye & Sarrafi, 2021). Chen, Li et Sun ont montré que les capteurs PVT-film offrent un rendement annuel supérieur de 10 à 32 % aux capteurs vitrés ou non (Chen et al., 2022). Wang et coauteurs ont observé une réduction des impacts respiratoires (28,4 %) et d'acidification (6,7 %) avec des capteurs partiellement recouverts (Wang et al., 2021). Les travaux de (M. Hu et al., 2016, 2018 ; T. Hu et al., 2022) rapportent un rendement thermique moyen de 65–80 % et une puissance de refroidissement de 20–80 W/m² selon le climat. (Tsoy et al., 2020) ont évalué l'efficacité énergétique d'un système combiné par simulation. (Yan et al., 2020) ont montré, pour un bureau moyen à Atlanta, des réductions de 46 % (réchauffement climatique), 98 % (eau) et 93 % (acidification), mais avec un coût de cycle de vie plus élevé. Ces résultats confirment l'intérêt des capteurs combinés pour le chauffage diurne et le refroidissement nocturne.

Les systèmes de refroidissement à absorption simple effet avec capteurs solaires basse température ont été étudiés (Xu & Wang, 2017), notamment avec capteurs plans ou tubes sous vide (Asadi et al., 2018). Mortadi et el Fadar (Mortadi & El Fadar, 2022) ont comparé différentes technologies et trouvé que le système photovoltaïque-thermique offre le meilleur SCOP (36–52 % selon le climat). (M. S. Khan et al., 2022) ont proposé une corrélation pour prédire les performances de refroidisseurs à absorption simple effet de différentes capacités. Des analyses économiques, énergétiques et exergétiques concluantes ont été mené par (Ibrahim et al., 2021), (Zheng et al., 2021), (Liu et al., 2021). (Hashem et al., 2021) ont expérimentalement observé un COP de refroidisseur descendant de 0,71 à 0,64, proche du simple effet. (Liu et al., 2021) ont montré qu'ajouter un stockage thermique par absorption augmente la puissance frigorifique totale de 4,44 % et le COP moyen de 3,5 %.

Dans notre précédente étude (Soumaila & Sulin Aleksandr, 2022), un modèle mathématique d'un capteur combiné à double action (chauffage solaire diurne / refroidissement radiatif

nocturne) a été développé et évalué pour les conditions climatiques de Bamako. Ce capteur peut alimenter un refroidisseur à absorption simple effet.

Ainsi, La présente étude vise l'utilisation efficace d'un refroidisseur H2O-LiBr à simple effet couplé à ce capteur à double action à Bamako (12,65° N, 8° E). La nouveauté réside dans la conception du système et ses analyses thermo-économique, énergétique et exergétique sous le climat de Bamako.

1. Méthodologie de recherche

○ Description du système:

Le système de refroidissement solaire à absorption alimenté par un capteur solaire à double action (CSDA) est analysé sous les angles thermo-économique, énergétique et exergétique pour les conditions climatiques de Bamako. En journée, le CSDA chauffe l'eau du réservoir 1; la nuit, il refroidit l'eau du réservoir 2 par rayonnement vers le ciel dans la fenêtre atmosphérique (8–13 µm) (Camara et al., 2022). Les paramètres de fonctionnement sont optimisés en régime permanent. Les principaux composants étudiés sont: le champ du capteur solaire à double-action (CSDA), les réservoirs de stockage et l'unité du refroidisseur à absorption simple effet. Le refroidisseur utilise le couple eau / bromure de lithium.

En journée, l'eau chaude du réservoir 1 alimente le générateur du refroidisseur à absorption simple effet. La nuit, l'eau sous-refroidie du réservoir 2 refroidit le condenseur et l'absorbeur en journée. Une tour de refroidissement n'est activée que lorsque l'eau du réservoir 2 devient insuffisante. Le refroidissement nocturne réduit en outre les pertes d'eau par évaporation dans la tour.

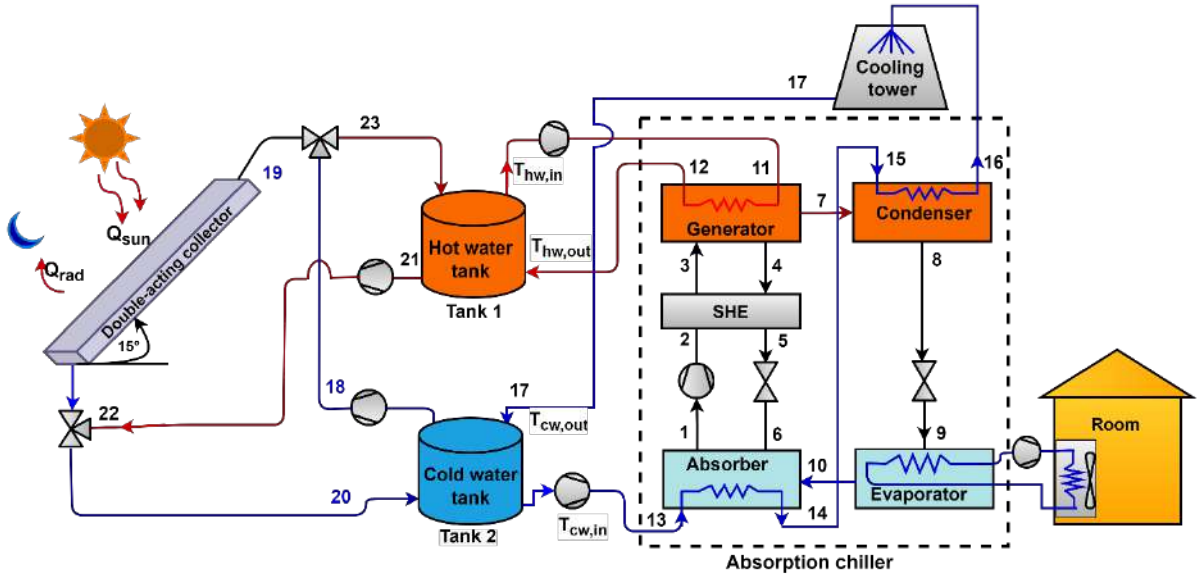


Figure 2. Schéma de structure du refroidisseur à absorption simple-effet entraîné par un CSDA(Soumaila & Sulin Aleksandr, 2022)

La simulation du système repose sur des hypothèses courantes issues de la littérature (Bellos et al., 2016; Gogoi & Konwar, 2016). Ces hypothèses sont exprimées sous forme d'équations.

La température du générateur s'écrit comme suit (1) :

$$T_g = T_{ec,e} - 10 \qquad (1)$$

où $T_{ec,e}$ est la température d'entrée de l'eau chaude dans le réservoir 1, en K.

La température de l'eau chaude après le générateur est inférieure de 5 K à sa température d'entrée, conformément aux spécifications du refroidisseur, et s'exprime par (2) :

$$T_{ec,s} = T_{ec,e} - 5 \qquad (2)$$

où $T_{ec,s}\ et\ T_{ec,e}$ sont respectivement les températures de sortie et d'entrée de l'eau chaude, en K.

L'absorbeur et le condenseur sont refroidis par le fluide caloporteur stocké dans le réservoir 2. Ces deux composants sont supposés fonctionner à la même température. Ainsi, la température du condenseur s'écrit comme suit (3) (Soumaila & Sulin Aleksandr, 2022):

$$T_c = T_a = T_{am,h} + 10 \qquad (3)$$

où $T_{am,h}$ est la température ambiante humide, en K.

Le volume du tank ou du réservoir est donné par l'équation (4)(Bellos et al., 2016) :

$$V_T = \frac{A_c}{30} \qquad (4)$$

Où A_c est la surface du capteur solaire en m²

Le débit massique dans le capteur solaire (CSDA) est donné par (5) (Bellos & Tzivanidis, 2017) :

$$\dot{m}_c = 0.02 * A_{col} \qquad (5)$$

Le débit massique circulant dans le capteur solaire et le débit massique d'eau chaude alimentant le générateur sont identiques (Duffie & Beckman, 2013) :

$$\dot{m}_c = \dot{m}_{ec,tank} \qquad (6)$$

La surface du capteur solaire à double action est de 60 m², dont les performances ont été évaluées sous le climat de Bamako. Chaque réservoir de stockage a un volume de 2 m³. La puissance frigorifique du refroidisseur à absorption à simple effet est de 17,6 kW ; ses paramètres de fonctionnement sont présentés dans le Tableau 1. Selon le logiciel Météonorm, le potentiel solaire mensuel à Bamako est de 205 kWh.m^{-2}, avec des valeurs de 220 kWh.m^{-2} d'octobre à mars et de 165 kWh.m^{-2} de juin à septembre. De mars à mai, la température diurne peut atteindre 45 °C. Les paramètres d'optimisation du refroidisseur à absorption à simple effet H_2O-LiBr sont les suivants : température au condenseur comprise entre 35 et 45 °C, température au générateur entre 80 et 95 °C, et température à l'évaporateur entre 4 et 10 °C. Les principaux paramètres de l'étude thermodynamique sont regroupés dans le Tableau 2.

Tableau 1 : Paramètres du refroidisseur à absorption simple-effet Eau-Bromure de Lithium

Paramètres		**Unité**	**Valeur**
Puissance frigorifique		*kW*	17.6
Eau glacée	Eau de refroidissement	*°C*	12.5 entrée / 7 sortie
	Débit nominal d'eau	*kg. s^{-1}*	0.77
	Débit d'eau admissible	*%*	80 – 100
Fluide caloporteur	Débit nominal d'eau	*kg. s^{-1}*	2.55
	Débit d'eau permissible	*%*	100 - 120
Eau chaude (Source)	Température d'entrée admissible	*°C*	70 min - 95 max
	Débit nominal d'eau	*kg. s^{-1}*	1.2
	Débit d'eau admissible	*%*	30 - 120

Source: SEAC, Marque YAZAKI, réf. (SC-5)

Tableau 2: Paramètres de l'étude thermodynamique

Paramètres	**Unité**	Mode chauffage	Mode refroidissement
Irradiation solaire	*W.m^{-2}*	750	0
Vitesse du vent	*m.s^{-1}*	2.7	2.85
Température ambiante moyenne	*°C*	36	31
Température d'entrée de l'eau	*°C*	28	28
Débit massique du DAC	*kg. s^{-1}*	1.2	0.4
Inclinaison des capteurs	*(°)*	15	15
Surface du champ solaire	*m²*	60	00
Volume des réservoirs de stockage	*m^3*	2.0	2.0
Débit massique de la source	*kg. s^{-1}*	1.2	0.4
Coefficient de pertes thermiques du réservoir de stockage	*Wm^{-2} K^{-1}*	0.5	0.5
Efficacité de l'échangeur de chaleur de la solution	-	0.80	-

Source: Auteurs,2026

- **Modélisation mathématique:**

L'utilisation des lois de la physique sur les capteurs solaires basse température et des lois de conservation des masses et de l'énergie sur les machines à absorption frigorifique permet d'atteindre les objectifs de cette étude. La modélisation mathématique concerne les différents composants du système: DAC, réservoir et unité SEAC. L'analyse financière reposera sur le calcul des indicateurs économiques de base d'un système de refroidissement à absorption

solaire. La modélisation s'appuie sur plusieurs équations, dont la plupart ont été décrites (Kanabar & Bharatkumar Maganbhai Ramani, 2016). Les équations de base sont présentées ci-dessous.

- **Modélisation du capteur solaire à double-action:**

Les principales équations pour la modélisation du capteur solaire sont présentées dans le Tableau 3.

Tableau 3. Principales équations pour la modélisation du CSDA.

Description	**Équation**
Énergie solaire instantanée disponible (jour)	$Q_s = G_t \cdot A_c$
Chaleur utile extraite par le fluide caloporteur	$Q_u = \dot{m}_c \, c_p \, (T_{ec,s} - T_{ec,e})$
Chaleur utile via le rendement thermique	$Q_u = A_c \, G_t \, \eta_{th}$
Rendement thermique général du capteur	$\eta_{th} = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_{f,e} - T_{am})}{G_t}$
Rendement thermique spécifique	$\eta_{th} = 0{,}734 - 4{,}51 \frac{(T_{f,e} - T_{am})}{G}$
Puissance de refroidissement radiatif (nuit)	$P_{ref} = \frac{\dot{m}_c \, c_p \, (T_{ef,e} - T_{ef,s})}{A_c}$

Source : (Bellos et al., 2021 ; Bellos & Tzivanidis, 2017, 2018b ; Camara S. et al., 2022 ; Soumaila & Sulin Aleksandr, 2022).

G_t = irradiance solaire (W/m²), A_c = surface du capteur (m²), $\dot{m}_c$ = débit du fluide (kg/s), c_p = capacité thermique massique de l'eau (J/kg·K), T_{ec} = température de l'eau chaude (K), T_{ef} = température de l'eau de refroidissement (K), $T_{f,e}$ = température d'entrée du fluide (K), T_{am} = température ambiante (K), F_R = facteur d'enlèvement de chaleur, $(\tau\alpha)$ = produit transmittance-absorptance, U_L = coefficient global de pertes thermiques (W/m²·K).

- **Modélisation du réservoir de stockage (Bellos et al., 2021)**

Tableau 4. Principales équations pour la modélisation du réservoir de stockage:

Description	**Équation**
Bilan énergétique global du réservoir de stockage sensible	$Q_{s,tank} = Q_u - Q_g - Q_{pertes}$
Pertes thermiques du réservoir	$Q_{pertes} = A_T \, U_T \, (T_{s,tank} - T_a)$
Surface externe du réservoir	$A_T = 5{,}536 \, V^{2/3}$
Apport thermique au générateur	$Q_g = \dot{m}_{ec} \, c_p \, (T_{ec,e} - T_{ec,s})$

Source: (Bellos et al., 2021 ; Bellos & Tzivanidis, 2017, 2018b ; Camara S. et al., 2022 ; Soumaila & Sulin Aleksandr, 2022).

$Q_{s,tank}$ = énergie thermique stockée (J), Q_u = chaleur utile du CSDA (W), Q_g = chaleur fournie au générateur (W), Q_{pertes} = pertes thermiques (W), A_T = surface externe du réservoir (m²), U_T = coefficient de pertes thermiques (W/m²·K), $T_{s,tank}$ = température dans le réservoir

(K), T_a = température ambiante (K), V = volume du réservoir (m³), $\dot{m}_{ec}$ = débit d'eau chaude (kg/s), c_p = capacité thermique massique (J/kg·K), $T_{ec,e}$ et $T_{ec,s}$ = températures d'entrée et sortie de l'eau chaude (K).

- **Modélisation du refroidisseur à absorption à simple-effet**

Les principales formules pour la modélisation du refroidisseur à absorption H_2O/LiBr à simple-effet sont présentés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : les équations pour la modélisation du refroidisseur à absorption

Description	**Équation**
Bilan de masse global du générateur	$\dot{m}_{ws} = \dot{m}_r + \dot{m}_{ss}$
Bilan de masse du sel (générateur)	$\dot{m}_{ws} \cdot X_{ws} = \dot{m}_{ss} \cdot X_{ss}$
Débit de solution faible	$\dot{m}_{ws} = \frac{X_{ss}}{X_{ss} - X_{ws}} \dot{m}_r$
Débit de solution forte	$\dot{m}_{ss} = \frac{X_{ws}}{X_{ss} - X_{ws}} \dot{m}_r$
Débits du réfrigérant	$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 = \dot{m}_9 = \dot{m}_{10} = \dot{m}_r$
Débits de la solution forte	$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_{ss}$
Débits de la solution faible	$\dot{m}_3 = \dot{m}_2 = \dot{m}_1 = \dot{m}_{ws}$
Bilan énergétique du générateur	$Q_g = \dot{m}_r h_7 + \dot{m}_{ws} h_4 - \dot{m}_{ss} h_3$
Bilan énergétique de l'absorbeur	$Q_a = \dot{m}_{ss} h_1 - \dot{m}_r h_{10} - \dot{m}_{ws} h_6$
Chaleur rejetée au condenseur	$Q_c = \dot{m}_r (h_8 - h_7)$
Flux absorbé par l'évaporateur	$Q_e = \dot{m}_r (h_{10} - h_9)$
Bilan de l'échangeur de chaleur	$T_5 = T_4(1 - \varepsilon_{SHE}) + \varepsilon_{SHE}\, T_2$
COP avec puissance de pompe	$COP = \frac{Q_e}{Q_g + W_p}$
Puissance de la pompe	$W_p = \dot{m}_{ws}(h_2 - h_1)$
COP simplifié (pompe négligée)	$COP = \frac{Q_e}{Q_g}$

Source: (Camara & Sulin, 2022; Saleh & Mosa, 2014)

$\dot{m}$ = débit massique (kg/s), X = concentration (%), h = enthalpie spécifique (J/kg), T = température (K), ε_{SHE} = efficacité de l'échangeur (80 %), Q_g = chaleur au générateur (W), Q_a = chaleur à l'absorbeur (W), Q_c = chaleur au condenseur (W), Q_e = puissance frigorifique (W), W_p = puissance de la pompe (W).

- **Étude énergétique et exergétique du système:**

Le rendement énergétique du système est calculé par le coefficient de performance global du système (SCOP), exprimé comme suit (Li et al., 2016) :

$$SCOP = \frac{Q_e}{Q_s} = COP \cdot \eta_{th} \qquad (7)$$

Le rendement exergétique du système est exprimé par (Bellos et al., 2021) :

$$\eta_{ex} = SCOP \cdot \frac{\left(\frac{T_0}{T_e} - 1\right)}{\left[1 - \frac{4}{3}\frac{T_0}{T_{sun}} + \frac{1}{3}\left(\frac{T_0}{T_{sun}}\right)^4\right]} \qquad (8)$$

où T_0 est la température de référence, fixée à 298,15 K ; T_e est la température d'évaporation du fluide actif ; et T_{sun} est la température effective du Soleil, égale à 5770 K (Bellos et al., 2021).

- **Étude économique du système**

Le coût en capital du système est évalué en additionnant les coûts de tous les composants, tels que le réservoir de stockage, le capteur solaire et l'unité de refroidisseur à absorption (Bellos et al., 2021) :

$$C_O = K_{\text{tank}} \cdot V + K_{\text{cap}} \cdot A_{\text{cap}} + K_{\text{ch}} \cdot Q_e + K_{\text{CT}} \cdot Q_{\text{CT}} \qquad (9)$$

où C_O est le coût en capital en €, K_{tank} le coût du réservoir de stockage en €/m³, V le volume du réservoir en m³, K_{cap} le coût du capteur solaire en €/m², A_{cap} la surface du capteur en m², K_{ch} le coût du refroidisseur à absorption en €/kW_{cool}, Q_e la capacité de refroidissement en kW, K_{TR} le coût de la tour de refroidissement en €/kW et Q_{TR} la capacité de la tour de refroidissement en kW.

Le flux de trésorerie annuel du système est calculé comme suit (10) :

$$CF = K_{\text{ref}} \cdot E_{\text{ref}} - (O\&M) \qquad (10)$$

où CF est le flux de trésorerie en €, E_{ref} la production annuelle de froid en kWh et K_{ref} le coût du froid en €/kWh. Le coût annuel d'exploitation et de maintenance $(O\&M)$ est évalué à 1% du coût en capital, conformément à Bellos et Tzivanidis (Bellos & Tzivanidis, 2017).

Le coût du froid est déterminé comme suit (11) :

$$K_{\text{ref}} = \frac{K_{\text{el}}}{\text{COP}_{\text{eq}}} \qquad (36)$$

où K_{el} est le coût de l'électricité et COP_{eq} le COP équivalent du climatiseur à compression mécanique conventionnel. À Bamako, le coût de l'électricité K_{el} est d'environ 0,23 €/kWh.

La durée de vie équivalente du projet est donnée par :

$$R = \frac{(1+r)^N - 1}{r(1+r)^N} \qquad (12)$$

où r est le taux d'actualisation et N la durée de vie de l'investissement.

La valeur actuelle nette de l'investissement s'écrit :

$$NPV = -C_O + R \cdot CF \qquad (13)$$

La période de retour sur investissement simple est :

$$SPP = \frac{C_O}{CF} \qquad (14)$$

Les paramètres de l'analyse financière sont indiqués dans le Tableau 6, selon Bellos et Tzivanidis (Bellos & Tzivanidis, 2017).

Tableau 6 : Paramètres financiers pour l'évaluation économique

Paramètre	**Valeur**
Coût du capteur solaire (K_{col})	250 €/m²
Coût du réservoir de stockage (K_{tank})	1000 €/m³
Coût du refroidisseur à absorption (K_{ch})	600 €/kW
Coût de la tour de refroidissement humide (K_{TR})	200 €/kW
Taux d'actualisation (r)	3%
Durée de vie de l'investissement (N)	25 ans
Exploitation et maintenance ($O\&M$)	1%

Source: (Bellos & Tzivanidis, 2017)

2. Résultats et discussion

2.2.Analyse thermodynamique:

La simulation a été menée en supposant le système en régime permanent à la date du 5 mai à Bamako. D'après PVGIS, l'irradiance solaire moyenne est de 750 W/m², la température ambiante diurne moyenne est de 36 °C et la température nocturne moyenne est de 31 °C.

L'influence de la température du générateur (80 à 90°C) sur le coefficient de performance frigorifique (COP) et le coefficient de performance du système entier (SCOP) pour différentes températures de condensation (35 à 42,5 °C) a été analysé. Lorsque la température du générateur dépasse 90 °C, le risque de cristallisation augmente. Le COP diminue quand la température du générateur ou du condenseur augmente, et augmente avec la température d'évaporation.

Pour l'ensemble des scénarios étudiés, le COP varie entre 0,7291 et 0,7675. Le point de fonctionnement optimal à Bamako correspond à une température de condensation de 40 °C, une température de générateur de 85 °C et une température d'évaporation de 8 °C, ce qui permet d'atteindre un COP de 0,75 et un SCOP de 0,55. La simulation révèle également une efficacité exergétique maximale de 4,8 %, obtenue pour une température de condensation de 40 °C et une température d'évaporation du fluide de travail de 8 °C. La figure 2 présente l'influence de la température du générateur sur le coefficient de performance frigorifique (COP), pour une température d'évaporation du fluide de travail fixée à 8 °C et des températures de condensation variant entre 35 et 42,5 °C.

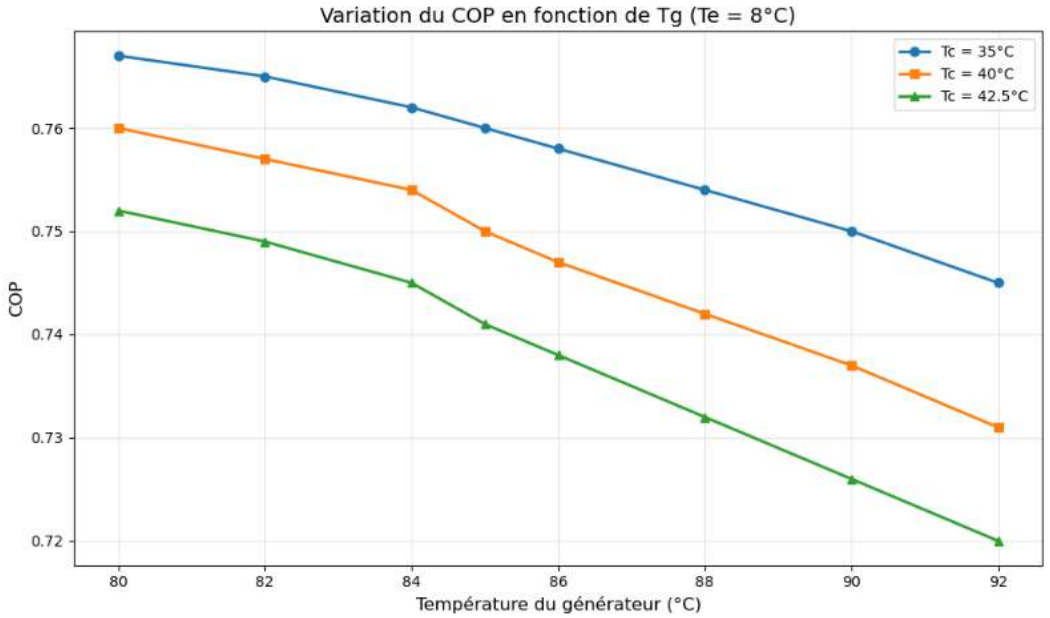


Figure 3 : L'influence de la température du générateur sur la variation du COP

2.3. **Validation du modèle**

Les hypothèses et la méthode de simulation du refroidisseur à absorption sont établies. L'originalité du système étudié réside dans le refroidissement du condenseur et de l'absorbeur par eau refroidie par rayonnement nocturne vers le ciel clair, via un capteur solaire à double-action (CSDA), et stockée dans un réservoir séparé. Le Tableau 7 compare les résultats obtenus avec ceux de la littérature: les écarts de COP et SCOP sont compris entre 0,3 % et 3 %. Contrairement aux systèmes existants, ce système réduit le temps de fonctionnement de la tour de refroidissement humide, permettant ainsi des économies d'eau et d'énergie, particulièrement en régions chaudes et arides.

Tableau 7 : Comparaison des résultats su système étudié avec les données de la littérature

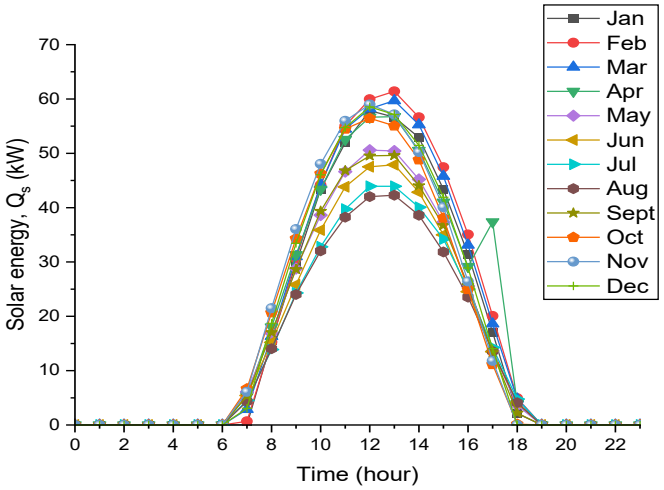
T_g ($°C$)	T_c ($°C$)	T_a ($°C$)	T_e ($°C$)	COP Littérature	COP Ce travail	Ecart (%)
85	40	40	5	0.75 (Nikbakhti et al., 2020)	0.7478	0.29
85	35	35	8	0.7789 (Manu & Chandrashekar, 2016)	0.7585	2.62
90	35	35	5	0.77 (Kaynakli & Kilic, 2007)	0.7490	2.73
90	35	35	5	0.74 (Eicker & Pietruschka, 2009)	0.7490	-1.20
90	40	40	5	0.76 (Karamangil et al., 2010)	0.7455	1.91
90	40	40	5	0.75 (Kaynakli & Kilic, 2007)	0.7455	0.60

Source : Auteurs

2.4.Analyse des performances annuelles

À Bamako, l'ensoleillement moyen annuel est d'environ 12 h, avec un climat chaud presque toute l'année, sauf en décembre et janvier. Les paramètres retenus pour l'analyse annuelle sont :$T_g = 85\,°C$,$T_c = 40\,°C$et$T_e = 8\,°C$.

La figure 3 montre l'énergie solaire mensuelle reçue sur la surface du capteur solaire, en heures, sur toute l'année. L'évolution des courbes des figures 3 et 4 est similaire, car le gain thermique utile (Q_u) dépend de l'énergie solaire reçue (Q_s) et du rendement thermique du capteur solaire à double-action. Sur la figure 5, deux courbes montrent une évolution similaire: l'énergie solaire reçue sur la surface d'ouverture du CSDA (en rouge) et le gain de chaleur utile (en jaune). L'énergie solaire atteint un maximum de 61,4 kW en février à 13 h et un minimum de 42,29 kW en août à 13 h.
La courbe jaune, le gain de chaleur utile présente un maximum de 45,07 kW en février à 13 h et un minimum de 31,04 kW en août à 13 h.



Source : Auteurs

Figure 4. L'énergie solaire mensuelle reçue sur la surface d'ouverture du CSDA

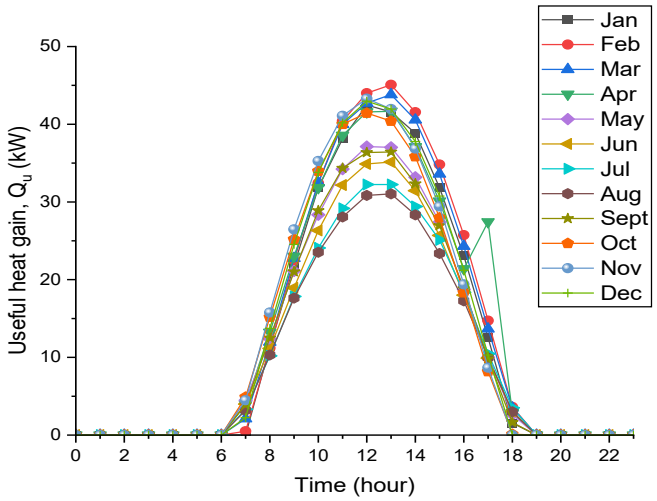


Figure 5. Le gain thermique utile sur la surface d'ouverture du CSDA

Source : Auteurs

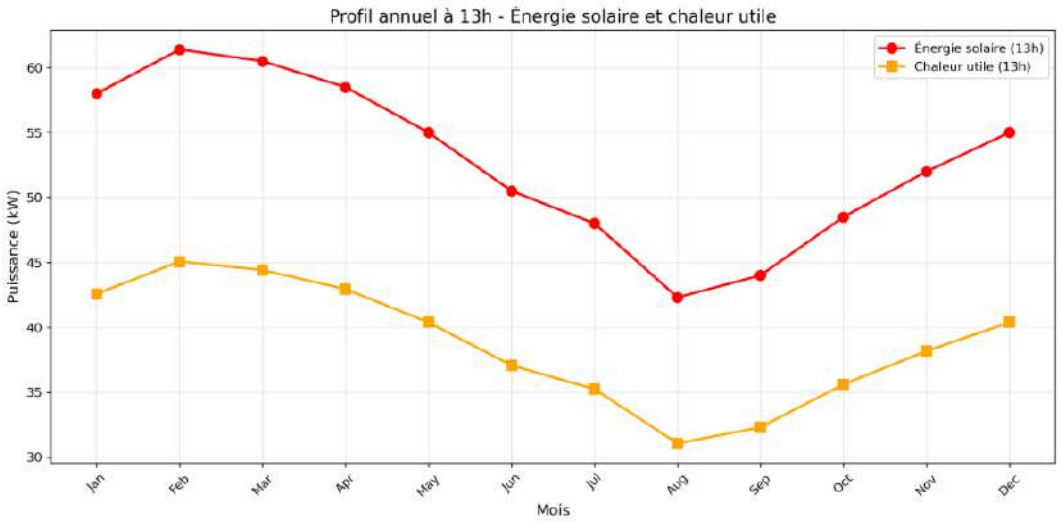


Figure 6. Variation mensuelle de l'énergie solaire et le gain de chaleur utile à 13h.

Source: Auteurs

La Figure 6 présente l'énergie solaire mensuelle reçue sur la surface d'ouverture du capteur solaire (CSDA) ainsi que la production frigorifique correspondante. Celle-ci est maximale de mai à juillet, période estivale à Bamako. Les besoins en froid sont critiques toute l'année, mais réduits de novembre à janvier, la période la plus fraîche. La production frigorifique atteint 5 022 kWh en mai et juillet, contre 3 780 kWh en novembre. La période de forte demande coïncide avec une légère baisse du potentiel solaire, due à la saison des pluies et à la nébulosité.

Ainsi, la production frigorifique annuelle du système s'élève à 52,272 MWh, pour une énergie solaire annuelle reçue sur la surface d'ouverture du capteur de 138,778 MWh. Le coefficient de performance du système (SCOP) annuel est de 0,39, et l'efficacité exergétique atteint environ 2,5 %. La Figure 7 présente les résultats mensuels de ces deux indicateurs, dont les tendances sont similaires, l'efficacité exergétique étant fonction du SCOP. La performance maximale est observée en juillet (SCOP = 0,53 et η_{ex} = 0,035).

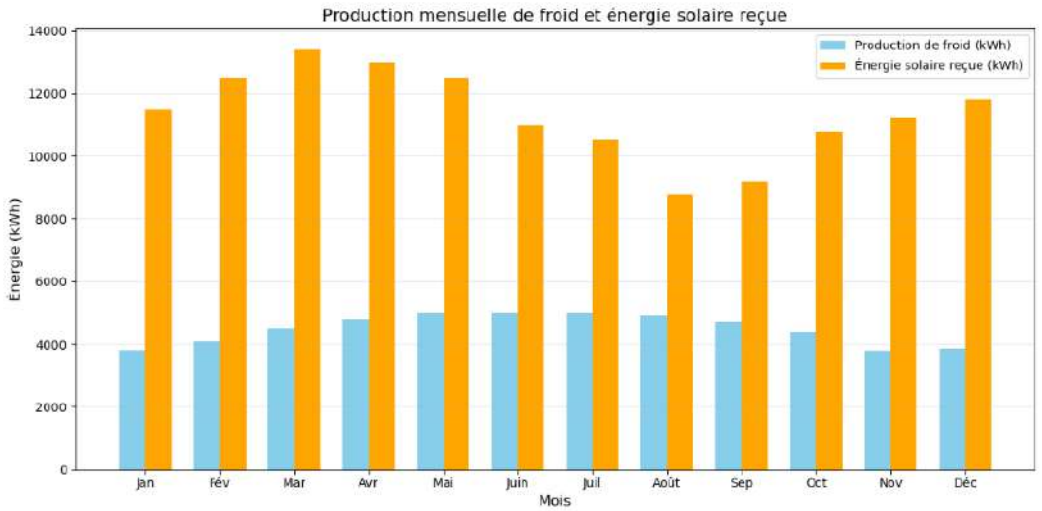


Figure 7. Production mensuelle de froid et d'énergie solaire

Source : Auteurs

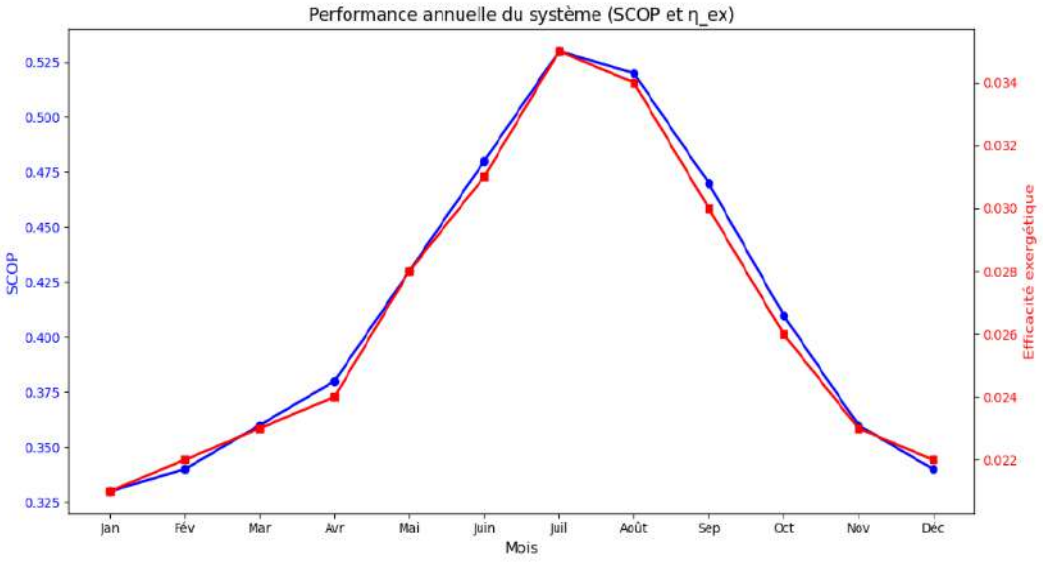


Figure 8. Efficacité énergétique et exergétique du système pour toute l'année.

Source: Auteurs

Dans les régions à climat chaud, ce type de système présente deux avantages principaux: il réduit d'une part le temps de fonctionnement de la tour de refroidissement, générant ainsi des économies d'eau et d'énergie, et d'autre part, il diminue l'empreinte carbone tout en favorisant l'indépendance vis-à-vis des énergies fossiles.

2.5.Analyse économique:

Les principaux résultats de l'analyse économique du système figurent dans le Tableau 8. L'intérêt économique tient à l'utilisation d'un capteur unique combinant chauffage solaire diurne et refroidissement radiatif nocturne, ce qui diminue la consommation d'énergie de la tour de refroidissement.

Tableau 8: les résultats de l'étude économique

Indicateur	**Valeur**
Coût d'investissement total	36 900 €
Coût de refroidissement	0,08 €/kWh
Flux de trésorerie annuel.	3 549 €
Coût O&M (1% invest.)	369 €
Durée de vie équivalente	~17,4 ans
Délai de retour simple	~10,4 ans
Valeur actuelle nette (VAN)	24 907 €

Source: Auteurs

Conclusion

Cet article présente une analyse thermo-économique, énergétique et exergétique d'un système de climatisation à absorption H_2O/LiBr à simple effet, couplé à un capteur solaire à double action, adapté aux régions chaudes. Le système comprend un capteur solaire à double action de 60 m² (pour le chauffage solaire diurne et le refroidissement radiatif nocturne vers le ciel clair)),

deux réservoirs de stockage de 2 m³ chacun, et une machine de refroidissement à absorption d'une puissance frigorifique de 17,6 kW. L'étude est menée dans les conditions climatiques de Bamako. Les principales conclusions sont les suivantes:

(3) Les performances optimales sont obtenues pour une température au générateur de 85 °C, une température de condensation de 40 °C et une température d'évaporation de 8 °C.

(4) La production frigorifique annuelle du système atteint 52,272 MWh, pour un apport solaire annuel sur la surface d'ouverture du capteur solaire à double action de 138,778 MWh. L'efficacité énergétique annuelle du système est de 0,39, et l'efficacité exergétique d'environ 2,5 %.

(5) L'analyse financière indique un coût d'investissement de 36,9 k€, une valeur actuelle nette (VAN) de 34,9 k€, et un temps de retour sur investissement d'environ 10,4 ans.

Dans les régions chaudes, ce système réduit la consommation d'énergies fossiles et l'utilisation de frigorigènes nocifs pour la couche d'ozone et l'effet de serre. L'eau refroidie par rayonnement nocturne via le capteur solaire à double-action et stockée dans le réservoir 2 sert à refroidir le condenseur et l'absorbeur de la machine. Cela diminue le temps de fonctionnement de la tour de refroidissement, générant ainsi des économies d'eau et d'énergie. Ce système à absorption simple effet couplé à un capteur solaire à double action constitue donc une alternative écologique aux climatisations classiques dans les zones chaudes et arides.

Des travaux futurs pourraient évaluer la durée de refroidissement du condenseur et de l'absorbeur par l'eau refroidie par rayonnement nocturne via le capteur solaire à double action, puis quantifier les économies d'eau et d'énergie en cas de fonctionnement sans tour de refroidissement.

Références bibliographiques

Aketouane, Z., Bruneau, D., Sempey, A., Bouzouidja, R., Lagiere, P., Raji, S., & Roger, P. (2022). Development of a night-time radiative sky cooling production & storage system: A proposal for a robust sizing and potential estimation methodology. *Applied Thermal Engineering*, *211*, 118378. https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2022.118378

Asadi, J., Amani, P., Amani, M., Kasaeian, A., & Bahiraei, M. (2018). Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of absorption cooling system driven by various solar collectors. *Energy Conversion and Management*, *173*. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.013

Bellos, E., Chatzovoulos, I., & Tzivanidis, C. (2021). Yearly investigation of a solar-driven absorption refrigeration system with ammonia-water absorption pair. *Thermal Science and Engineering Progress*, *23*, 100885.

Bellos, E., & Tzivanidis, C. (2017). Energetic and financial analysis of solar cooling systems with single effect absorption chiller in various climates. *Applied Thermal Engineering*, *126*, 809–821. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.005

Bellos, E., & Tzivanidis, C. (2018a). Multi-objective optimization of a solar driven trigeneration system. *Energy*, *149*, 47–62. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.02.054

Bellos, E., & Tzivanidis, C. (2018b). Multi-objective optimization of a solar driven trigeneration system. *Energy*, *149*, 47–62. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.02.054

Bellos, E., Tzivanidis, C., & Antonopoulos, K. A. (2016). Exergetic and energetic comparison of LiCl-H2O and LiBr-H2O working pairs in a solar absorption cooling system. *Energy Conversion and Management*, *123*, 453–461. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2016.06.068

Camara, S., & Sulin, A. B. (2022). Study of a double-acting solar collector for use in the absorption cooling system in hot regions. *Thermal Science and Engineering Progress*, *31*, 101286. https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2022.101286

Camara S., Sulin A. B., & Lysev V. I. (2022). Analyzing the performance of a combined type collector for solar heating and night radiation cooling. *Journal of International Academy of Refrigeration*, (1), 26–36.

Chen, H., Li, Z., & Sun, B. (2022). Performance evaluation and parametric analysis of an integrated diurnal and nocturnal cooling system driven by photovoltaic-thermal collectors with switchable film insulation. *Energy Conversion and Management*, *254*. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115197

Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition. In *Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition*. https://doi.org/10.1002/9781118671603

Eicker, U., & Pietruschka, D. (2009). Design and performance of solar powered absorption cooling systems in office buildings. *Energy and Buildings*, *41*(1). https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.07.015

El Marazgioui, S., & El Fadar, A. (2022). Impact of cooling tower technology on performance and cost-effectiveness of CSP plants. *Energy Conversion and Management*, *258*, 115448. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2022.115448

Gogoi, T. K., & Konwar, D. (2016). Exergy analysis of a H2O–LiCl absorption refrigeration system with operating temperatures estimated through inverse analysis. *Energy Conversion and Management*, *110*, 436–447. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2015.12.037

Hashem, G., Mahkamov, K., Belgasim, B., Elsharif, N., & Makhkamova, I. (2021). Development and experimental investigation of a novel solar-powered cooling system. *Energy Conversion and Management*, *244*. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114486

Hu, M., Pei, G., Wang, Q., Li, J., Wang, Y., & Ji, J. (2016). Field test and preliminary analysis of a combined diurnal solar heating and nocturnal radiative cooling system. *Applied Energy*, *179*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.066

Hu, M., Zhao, B., Ao, X., Su, Y., & Pei, G. (2018). Parametric analysis and annual performance evaluation of an air-based integrated solar heating and radiative cooling collector. *Energy*, *165*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.127

Hu, T., Kwan, T. H., & Pei, G. (2022). An all-day cooling system that combines solar absorption chiller and radiative cooling. *Renewable Energy*, *186*, 831–844. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2022.01.058

Ibrahim, N. I., Al-Sulaiman, F. A., Rehman, S., Saat, A., & Ani, F. N. (2021). Economic analysis of a novel solar-assisted air conditioning system with integral absorption energy storage. *Journal of Cleaner Production*, *291*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125918

International Energy Agency. (2012). *Technology roadmap: solar heating and cooling.*

Kanabar, B. K., & Bharatkumar Maganbhai Ramani. (2016). Energy and exergy analysis of vapour absorption refrigeration cycle —A Review . *Journal of The Institution of Engineers (India)*, *C 97*, 479–491.

Karamangil, M. I., Coskun, S., Kaynakli, O., & Yamankaradeniz, N. (2010). A simulation study of performance evaluation of single-stage absorption refrigeration system using conventional working fluids and alternatives. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 14, Number 7). https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.04.008

Kaynakli, O., & Kilic, M. (2007). Theoretical study on the effect of operating conditions on performance of absorption refrigeration system. *Energy Conversion and Management*, *48*(2). https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.06.005

Khan, M. S. A., Badar, A. W., Talha, T., Khan, M. W., & Butt, F. S. (2018). Configuration based modeling and performance analysis of single effect solar absorption cooling system in TRNSYS. *Energy Conversion and Management*, *157*, 351–363. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2017.12.024

Khan, M. S., Kadam, S. T., Kyriakides, A.-S., Papadopoulos, A. I., Hassan, I., Rahman, M. A., & Seferlis, P. (2022). A new correlation for performance prediction of small and large capacity single-effect vapor absorption refrigeration systems. *Cleaner Energy Systems*, *1*. https://doi.org/10.1016/j.cles.2022.100002

Li, M., Xu, C., Hassanien, R. H. E., Xu, Y., & Zhuang, B. (2016). Experimental investigation on the performance of a solar powered lithium bromide–water absorption cooling system. *International Journal of Refrigeration*, *71*. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.07.023

Liang, H., Han, H., Wang, F., Cheng, Z., Lin, B., Pan, Y., & Tan, J. (2019). Experimental investigation on spectral splitting of photovoltaic/thermal hybrid system with two-axis sun tracking based on SiO2/TiO2 interference thin film. *Energy Conversion and Management*, *188*, 230–240. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.03.060

Liu, M., Cheng, Y., Cheng, W., & Zhan, C. (2021). Dynamic performance analysis of a solar driving absorption chiller integrated with absorption thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, *247*. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114769

Manu, S., & Chandrashekar, T. K. (2016). A simulation study on performance evaluation of single-stage LiBr–H2O vapor absorption heat pump for chip cooling. *International Journal of Sustainable Built Environment*, *5*(2). https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.08.002

Mehregan, M., Abbasi, M., Khalilian, P., Majid Hashemian, S., & Madadi, A. (2022). Energy, economic, environmental investigations and optimization of a combined cooling, heating and power system with hybrid prime mover of gas engine and flat plate solar collector. *Energy Conversion and Management*, *251*. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115018

Mikovits, C., Schauppenlehner, T., Scherhaufer, P., Schmidt, J., Schmalzl, L., Dworzak, V., Hampl, N., & Sposato, R. G. (2021). *Geo-Information A Spatially Highly Resolved Ground Mounted and Rooftop Potential Analysis for Photovoltaics in Austria*. https://doi.org/10.3390/ijgi10060418

Mortadi, M., & El Fadar, A. (2022). Performance, economic and environmental assessment of solar cooling systems under various climates. *Energy Conversion and Management*, *252*. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114993

Muhammed, E., Morsy, S., & El-Shazly, A. (2021). Building rooftops extraction for solar pv potential estimation using GIS-based methods. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *44*(M–3). https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-M-3-2021-119-2021

Nikbakhti, R., Wang, X., Hussein, A. K., & Iranmanesh, A. (2020). Absorption cooling systems – Review of various techniques for energy performance enhancement. In *Alexandria Engineering Journal* (Vol. 59, Number 2). https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.01.036

Salameh, T., Zhang, D., Juaidi, A., Alami, A. H., Al-Hinti, I., & Olabi, A. G. (2021). Review of solar photovoltaic cooling systems technologies with environmental and economical assessment. *Journal of Cleaner Production*, *326*, 129421. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.129421

Saleh, A., & Mosa, M. (2014). Optimization study of a single-effect water-lithium bromide absorption refrigeration system powered by flat-plate collector in hot regions. *Energy Conversion and Management*, *87*. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.098

Sanaye, S., & Sarrafi, A. (2021). Cleaner production of combined cooling, heating, power and water for isolated buildings with an innovative hybrid (solar, wind and LPG fuel) system. *Journal of Cleaner Production*, *279*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123222

Shirazi, A., Taylor, R. A., Morrison, G. L., & White, S. D. (2017). A comprehensive, multi-objective optimization of solar-powered absorption chiller systems for air-conditioning applications. *Energy Conversion and Management*, *132*. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.039

Soumaila, C., & Sulin Aleksandr, B. (2022). Study of a double-acting solar collector for use in the absorption cooling system in hot regions. *Thermal Science and Engineering Progress*, 101286. https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2022.101286

Tsoy, A. P., Baranenko, A. V., Granovsky, A. S., Tsoy, D. A., & Dzhamasheva, R. A. (2020). Energy efficiency analysis of a combined cooling system with night radiative cooling. *AIP Conference Proceedings*, *2285*. https://doi.org/10.1063/5.0026908

Wang, J., Zhou, Y., Zhang, X., Ma, Z., Gao, Y., Liu, B., & Qin, Y. (2021). Robust multi-objective optimization with life cycle assessment of hybrid solar combined cooling, heating and power system. *Energy Conversion and Management*, *232*. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113868

Xu, Z. Y., & Wang, R. Z. (2017). Simulation of solar cooling system based on variable effect LiBr-water absorption chiller. *Renewable Energy*, *113*. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.069

Yan, J., Broesicke, O. A., Wang, D., Li, D., & Crittenden, J. C. (2020). Parametric life cycle assessment for distributed combined cooling, heating and power integrated with solar energy and energy storage. *Journal of Cleaner Production*, *250*, 119483. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.119483

Zevenhoven, R., & Fält, M. (2018). Radiative cooling through the atmospheric window: A third, less intrusive geoengineering approach. *Energy*, *152*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.084

Zhao, B., Hu, M., Ao, X., & Pei, G. (2019). Performance evaluation of daytime radiative cooling under different clear sky conditions. *Applied Thermal Engineering*, *155*. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.028

Zheng, J., Castro, J., Oliva, A., & Oliet, C. (2021). Energy and exergy analysis of an absorption system with working pairs LiBr-H2O and Carrol-H2O at applications of cooling and heating. *International Journal of Refrigeration*, *132*, 156–171. https://doi.org/10.1016/J.IJREFRIG.2021.09.011