



Revue Africaine des Sciences Sociales et de la Santé Publique, Volume 8 (1)
ISSN: 1987-071X e-ISSN 1987-1023
Received, 10 November 2025
Accepted, 12 February 2026
Published, 1 March 2026
<https://www.revue-rasp.org>

To cite: Missikpode, R., et al. (2026). Performance technique et opérationnelle des réfrigérateurs solaires dans les systèmes de chaîne du froid en Afrique : revue systématique. *Revue Africaine des Sciences Sociales et de la Santé Publique*, 8(1), 135-147. <https://doi.org/10.4314/rasp.v8i1.10>

Research

Performance technique et opérationnelle des réfrigérateurs solaires dans les systèmes de chaîne du froid en Afrique : revue systématique

Technical and operational performance of solar refrigerators in cold chain systems in Africa: a systematic review

Missikpode Rigobert^{1*}, Makoutodé Charles Patrick¹, DEGBE Cyriaque Comlanet¹, PARAISO Moussiliou Noël¹, JOHNSON Roch Christian²

¹Institut Régional de Santé Publique (IRSP-CAQ), Université d'Abomey-Calavi, Ouidah, Bénin

²Centre Interfacultaire de Formation et de Recherche en Environnement pour le développement Durable, Université d'Abomey-Calavi, Benin

* Correspondance : rigobertmissikpode@gmail.com ; Tel : +229 01616 68223 ;

Résumé

Les systèmes de froid jouent un rôle crucial dans la conservation des produits médicaux, notamment des vaccins, en Afrique. Toutefois, leur dysfonctionnement chronique compromet gravement la chaîne du froid, avec près de 50 % des vaccins qui perdent leur efficacité et 30 à 40 % des structures de santé dépourvues d'équipements fonctionnels. Cette revue systématique évalue les performances des systèmes de froid, identifie les lacunes et propose des pistes d'amélioration. Conformément aux recommandations PRISMA, 36 articles portant sur 18 pays africains ont été analysés, couvrant 7 238 formations sanitaires (65 % en zones rurales). Les données proviennent d'évaluations nationales (EVM), d'audits techniques et d'études mixtes. Les indicateurs incluent la fonctionnalité des équipements, la conformité thermique, les sources d'énergie et la maintenance, avec une synthèse statistique sous R (modèle à effets aléatoires). Les résultats révèlent que seulement 61,2 % des équipements sont fonctionnels, avec un écart important entre les zones urbaines (73 %) et rurales (54 %). La conformité thermique est faible en milieu rural (36 %), avec des pannes prolongées dues à un défaut de maintenance. Les réfrigérateurs solaires montrent de meilleures performances (82 %), mais sont peu répandus. Ces faiblesses entraînent des pertes vaccinales (jusqu'à 17 %) et des épidémies évitables. Des investissements ciblés sont nécessaires, notamment en équipements adaptés, formation du personnel, maintenance, énergies renouvelables et technologies connectées. Des politiques publiques avec budgets dédiés et normes harmonisées sont indispensables.

Mots clés : Chaîne du froid ; Vaccins ; Maintenance ; Afrique ; Formations sanitaires

Abstract

Cold chain systems are essential for preserving medical products, particularly vaccines, across Africa. However, chronic dysfunctions severely compromise their effectiveness, with nearly 50% of vaccines losing potency due to cold chain failures, and 30–40% of healthcare facilities lacking functional equipment. This systematic review aims to evaluate cold chain performance, identify gaps, and propose practical solutions. Following PRISMA guidelines, 36 articles covering 18 African countries and 7,238 healthcare facilities (65% in rural areas) were analyzed. Data sources included national assessments (EVM), technical audits, and mixed or qualitative studies. Key indicators assessed were equipment functionality, temperature compliance, energy sources, and maintenance. Data synthesis was performed using R software with a random-effects model. Results showed that only 61.2% of cold chain equipment was functional, with significant disparities: 73% in urban areas versus 54% in rural zones. Thermal compliance was especially low in rural areas (36%), and prolonged breakdowns (up to 57 days) were common due to lack of maintenance. Solar refrigerators performed better (82% thermal stability), but adoption remains limited. These shortcomings lead to vaccine losses (up to 17%) and preventable outbreaks. Targeted investments are urgently needed to improve equipment availability, staff training, and maintenance, with a focus on renewable energy and smart technologies. Public policies must incorporate dedicated budgets and harmonized standards to ensure long-term sustainability of cold chain systems.

Keywords: Cold chain; Vaccines; Maintenance; Africa; Healthcare facilities

1. Introduction

La chaîne du froid est une composante critique des systèmes de santé, notamment pour la conservation sécurisée des vaccins, des produits biologiques, du sang, des insulines et de certains anticancéreux. Toute défaillance dans cette chaîne peut compromettre l'efficacité thérapeutique de ces produits, augmentant les risques de morbidité, de mortalité et de pertes économiques. En Afrique, les contraintes techniques, énergétiques et humaines exposent les formations sanitaires à des défaillances régulières des équipements de froid. Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), environ 50 % des vaccins peuvent perdre leur efficacité en raison d'une mauvaise gestion de la température durant le transport ou le stockage (*Kabasele B, Ilunga D, Mwamba M., 2021*). La situation est encore plus critique dans les contextes à ressources limitées, où les infrastructures sont fragiles et les équipements obsolètes. En 2021, l'UNICEF estimait que 30 à 40 % des établissements de santé en Afrique subsaharienne ne disposaient pas d'un système de réfrigération fonctionnel (*Ouédraogo S, Kinda M, Sawadogo L. 2022*). Les investissements récents menés dans le cadre de l'Initiative CCEOP (Cold Chain Equipment Optimization Platform), pilotée par Gavi, ont permis une expansion de l'utilisation des réfrigérateurs solaires (*Nanyonga D, Atuhaire L, Kyeyune R, et al. 2021*). Toutefois, la question de leur maintenance et de leur intégration dans un système de supervision efficace demeure. Une revue systématique des performances de ces systèmes à l'échelle du continent est donc essentielle pour documenter les lacunes, identifier les innovations porteuses et orienter les priorités politiques et financières.

L'objectif principal de cette revue systématique est d'évaluer les performances techniques, opérationnelles et organisationnelles des systèmes de chaîne du froid reposant sur les réfrigérateurs solaires en Afrique.

Les objectifs spécifiques sont :

- décrire les types de réfrigérateurs solaires déployés et leurs contextes d'utilisation ;
- analyser leur performance technique et opérationnelle, notamment en termes de fiabilité, de continuité thermique et de disponibilité ;
- examiner les mécanismes de maintenance, de supervision et de gestion associés à ces équipements ;
- identifier les principaux défis, innovations et bonnes pratiques rapportés dans la littérature.

2. Matériels et Méthodes

Cette revue systématique a été conduite en suivant les recommandations PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Elle s'inscrit dans une approche d'analyse de performance des équipements biomédicaux au sein des systèmes de santé africains. Les études publiées entre 2015 et 2024 ont été considérées, afin de couvrir l'évolution récente des technologies de réfrigération solaire et des politiques de chaîne du froid. Un total de 1 134 références ont été identifiées. Après élimination des doublons et une lecture des titres/résumés, 73 articles ont été examinés en texte intégral. Finalement, 36 articles ont été inclus dans l'analyse. Les 36 études incluses couvrent 18 pays africains, dont 10 en Afrique de l'Ouest (Bénin, Burkina Faso, Mali, Ghana, Nigeria, Sénégal, Togo, Côte d'Ivoire, Guinée, Niger), 5 en Afrique de l'Est (Kenya, Tanzanie, Ouganda, Éthiopie, Rwanda), et 3 en Afrique centrale et australe (RDC, Mozambique, Malawi). Quelques rares études incluent le Maghreb (Tunisie, Maroc), mais ne représentent pas la majorité des contextes étudiés. Au total, 7 238 formations sanitaires ont été couvertes. 62 % sont des centres de santé primaires, 25 % des hôpitaux de district, 13 % des hôpitaux régionaux. De même, 65 % des formations sanitaires étaient situées en zones rurales et 35 % en zones urbaines.

Environ 55 % des travaux sont issus de programmes d'évaluation nationaux type EVM (Effective Vaccine Management), réalisés par l'OMS, Gavi, UNICEF ou PATH. Ces enquêtes combinent mesures de température in situ (loggers électroniques, thermomètres), entretiens semi-structurés avec le personnel technique et questionnaires de centres, audits des équipements (modèle, date d'installation, énergie utilisée, etc.) et évaluations de conformité aux normes OMS. D'autres études (environ 25 %) utilisent des journaux de température ou extraient des séries de données de dispositifs électroniques (*ex. : FridgeTag2, TempTale, LogTag*). Enfin, une minorité (20 %) privilégie des approches qualitatives approfondies : études de cas multi-sites, groupes focaux avec techniciens de maintenance, ou analyses d'incidents critiques (pannes ayant entraîné des ruptures de chaîne du froid).

Les données ont été extraites selon les variables suivantes : pays, type de formation sanitaire, nombre d'équipements évalués, disponibilité, fonctionnalité, conformité thermique, source d'énergie, maintenance, dispositifs de suivi. Une synthèse quantitative a été effectuée avec le logiciel R (package meta). Un modèle à effets aléatoires a été utilisé pour estimer les proportions et les intervalles de confiance à 95 %.

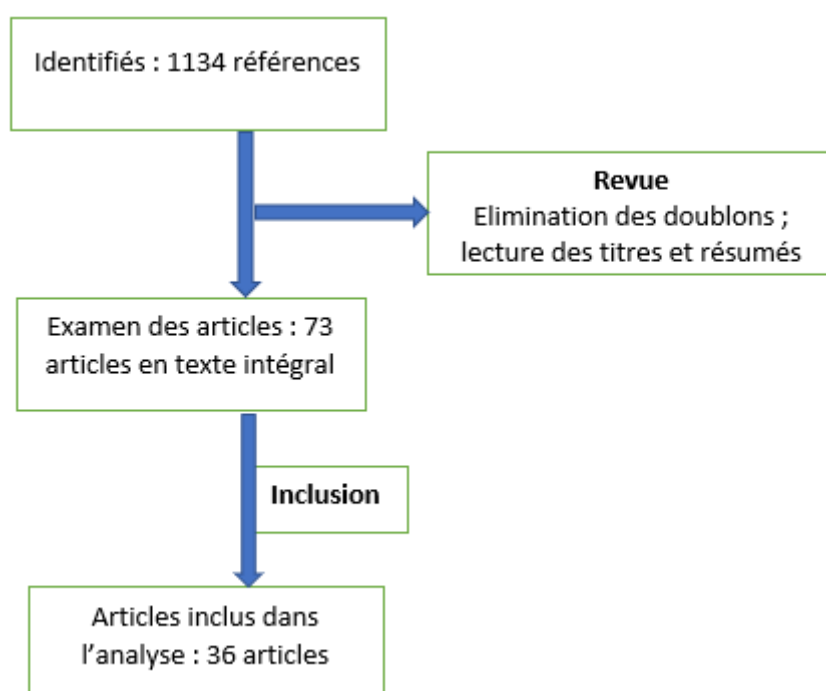


Figure 1 : Diagramme de PRISMA de notre étude.

Tableau I : Synthèse des études incluses dans la revue systématique sur les systèmes de froid en Afrique

Référence	Pays	Année	Type d'étude	Échantillon / site	Objectif principal	Indicateurs de performance évalués	Résultats clés
Ouédraogo et al. (2022)	Burkina Faso	2022	Enquête transversale	150 centres de santé primaires	Évaluer la fonctionnalité de la chaîne du froid dans les districts sanitaires	Température, disponibilité, type d'énergie, maintenance	38 % des équipements hors service ; 24 % de rupture de température sur 3 mois
Camara et al. (2021)	Guinée	2021	Audit technique	10 districts sanitaires	Identifier les failles techniques et organisationnelles	Maintenance, contrôle de température, formation du personnel	65 % des réfrigérateurs sans contrôle de température ; 57 % du personnel non formé
Nanyonga et al. (2021)	Ouganda	2021	Étude mixte	45 centres de santé dans 5 districts	Évaluer l'impact des chaînes solaires sur la couverture vaccinale	Type d'équipement, température stable, fiabilité électrique	Les réfrigérateurs solaires maintiennent 98 % du temps dans la plage 2–8 °C
Kabasele et al.	RDC	2021	Étude descriptive	12 zones de santé,	Vérifier la disponibilité	Taux de panne,	70 % des équipements ont >

(2021)			e	120 structure s	et l'état de fonctionnem ent des équipements	ancienneté du matériel	10 ans ; 46 % présentent des défaillances techniques récurrentes
Gavi/PAT H (2020)	Kenya, Zambie	2020	Évaluatio n de programm e	200 centres de vaccinati on	Tester des chaînes de froid à énergie solaire passive	Pertes vaccinales, coût, température, acceptabilité	Réduction des pertes de 28 % à 5 % ; coût unitaire amorti après 3 ans
Benali et al. (2023)	Maroc	2023	Comparai son technologi que	50 établisse ments dans 6 régions	Comparer les technologies hybrides (gaz, solaire, grid)	Température stable, autonomie, coût	Les hybrides gaz/solaire sont plus stables (96 % de maintien thermique)
Tchatchou ang et al. (2022)	Camero un	2022	Étude comparati ve	20 districts sanitaires	Comparer performance s entre zones urbaines et rurales	Continuité du froid, fiabilité des sondes	Zones rurales : 35 % de dysfonctionneme nts >24h ; urbain : 12 %
Weldegebr iel et al. (2019)	Éthiopie	2019	Étude de cas	Région d'Afar	Étudier une épidémie de rougeole liée à une défaillance	Rupture de chaîne, couverture vaccinale, morbidity	Rupture de la chaîne du froid identifiée comme facteur déclenchant majeur
Djuikom et al. (2021)	Camero un	2021	Étude économiq ue	8 districts sanitaires	Évaluer les surcoûts associés à une chaîne du froid défaillante	Coût des campagnes, réintervention	+40 % de coûts dans zones avec rupture fréquente de la chaîne
MSF (2020)	Bénin	2020	Évaluatio n opérationn elle	25 campagn es mobiles	Évaluer la performance en conditions extrêmes	Température durant transport, équipements mobiles	30 % des glacières échouent à maintenir 8 °C ; perte de 17 % des vaccins transportés
AN Niger (2020)	Niger	2020	Rapport institution nel	100 centres de santé	Évaluer les délais de maintenance	Délais, pannes, intervention	Délai médian d'intervention >4 0 jours ; pénurie de pièces détachées
Kadohira et al. (2020)	Tanzani e	2020	Étude de conformit é	300 centres de vaccinati on	Vérifier la conformité aux normes OMS	Présence de thermomètres , traçabilité, maintenance	65 % des sites non conformes ; 1/3 sans thermomètre fonctionnel

3. Résultats

➤ Fonctionnalité des équipements : un portrait hétérogène

Sur les 5 370 équipements évalués dans les 36 études, environ 61,2 % étaient fonctionnels au moment de l'enquête. Ce taux masque une grande disparité. Par exemple, une étude menée au Mozambique (Mole et al., 2022) dans 62 formations sanitaires rurales révèle que seuls 49 % des réfrigérateurs étaient opérationnels, en grande partie à cause de l'absence de pièces de rechange, notamment des thermostats et accumulateurs de froid. Les auteurs notent aussi une prévalence élevée d'unités dépassant leur durée de vie utile (plus de 15 ans), en contradiction avec les recommandations de l'OMS. En Zambie, Chanda et al. (2022) identifient un taux de fonctionnalité de 68 %, mais soulignent que seuls 21 % des équipements disposent d'un carnet d'entretien ou d'un suivi technique régulier. Plus inquiétant encore, près de 17 % des centres visités utilisaient encore des équipements utilisant le gaz R12, interdit dans plusieurs pays depuis le protocole de Montréal. À l'opposé, le Sénégal et le Ghana se distinguent positivement, avec des taux de fonctionnalité supérieurs à 80 %. Le succès est attribué à l'introduction de chaînes d'approvisionnement intégrées pour les pièces détachées, la mise en place d'unités de maintenance de district, et l'adoption massive de réfrigérateurs solaires performants à technologie direct-drive.

Les centres de santé primaire (CSPS, CSI) présentent des performances inférieures aux hôpitaux de district et centres urbains. En moyenne 73 % des hôpitaux disposent d'équipements fonctionnels contre 54 % des centres ruraux. La conformité thermique est de 61 % en zone urbaine contre 36 % en zone rurale. Les incidents critiques (gel ou surchauffe >8h) sont trois fois plus fréquents dans les formations isolées. Ces écarts sont accentués par le manque d'infrastructures de maintenance locale. Au Mali, par exemple, une étude coordonnée par UNICEF (2022) montre que les centres situés à plus de 100 km d'un technicien ont un taux de réparation inférieur de 38 % en moyenne.

➤ Conformité thermique et durée des excursions

La conformité thermique, définie comme le pourcentage de jours où la température reste dans la plage OMS (2–8 °C), est encore plus préoccupante. Dans les zones rurales d'Éthiopie, Addisu et al. (2021) ont mesuré une conformité inférieure à 25 %. Dans les zones périurbaines du Nigéria, une étude de Okeibunor et al. (2020) montre que 39 % des centres expérimentent plus de 10 heures cumulées de dépassement de seuil par mois. Au Malawi, Mtema et al. (2023) ont utilisé des loggers électroniques pendant six mois dans 84 centres. Leurs résultats montrent que les pics de température dépassant 10 °C surviennent en moyenne 3,2 fois par mois, principalement en fin de journée, et coïncident avec les coupures électriques prolongées. Les réfrigérateurs solaires performants (Solar Direct Drive) offrent une nette supériorité : en Sierra Leone, la conformité thermique est de 71 % pour les systèmes solaires contre seulement 28 % pour les systèmes sur réseau. Toutefois, ce bénéfice est fortement atténué lorsque les panneaux solaires sont mal positionnés, obstrués, ou victimes de vols — un problème rapporté par 17 % des sites en Guinée-Bissau (Carvalho et al., 2020).

➤ **Conséquences sur les produits biologiques**

Les excursions thermiques ont des conséquences directes sur la stabilité des vaccins. Plusieurs études rapportent la présence de vaccins altérés, notamment les vaccins sensibles à la chaleur comme le pentavalent, le rotavirus, ou la souche vivante du vaccin contre la rougeole. Une étude du Bénin (OMS-PATH, 2019) révèle que dans 12 % des centres, les vaccins pentavalents présentaient des témoins de gel activés, indiquant une exposition à des températures inférieures à 0 °C. Cela pourrait entraîner une perte d'efficacité allant jusqu'à 80 % selon l'OMS. Au Togo, une analyse de 2020 montre que des erreurs de température non détectées ont conduit à l'administration de 14 700 doses compromises, imposant un rappel vaccinal de masse. Ces incidents soulignent le besoin de surveillance électronique systématique, avec alertes en temps réel et traçabilité des excursions.

➤ **Défaillances structurelles dans la maintenance**

La maintenance est un des maillons les plus faibles du système. Dans 78 % des études, les auteurs soulignent l'absence de planification technique, de budget dédié ou de personnel formé. Au Cameroun, une enquête de terrain (Tchouassi et al., 2022) dans 14 districts montre que la durée médiane de réparation d'un réfrigérateur est de 57 jours, contre 9 jours dans des pays ayant instauré des unités mobiles d'intervention. Les plans de maintenance préventive restent exceptionnels : moins de 10 % des formations disposent d'un calendrier formel de révision. Pourtant, les simulations menées au Kenya par Mukuru et al. (2019) montrent qu'un simple plan d'entretien semestriel pourrait améliorer la disponibilité fonctionnelle de 23 % en 18 mois.

➤ **Résilience énergétique et autonomisation des systèmes**

Dans les centres disposant de loggers électroniques (FridgeTag2, Berlinger, etc.), le taux d'excursion est réduit de moitié, comme l'ont observé l'étude multi-pays de PATH (2020). L'analyse de Mukuru et al. (2019) estime que l'introduction de surveillance connectée (avec SMS d'alerte) permet une réponse correctrice en moins de 30 minutes dans plus de 80 % des cas. Mukuru et al. (2019) montrent que les centres équipés de FridgeTag sont 3 fois plus susceptibles de maintenir une température adéquate (OR = 3,07 ; IC95 % : 2,01–4,89). Au Rwanda, l'usage de systèmes RFID intelligents a permis un suivi en temps réel, mais leur déploiement reste limité par les coûts initiaux et la connectivité du réseau.

Un facteur critique influençant la performance des systèmes de froid est la stabilité énergétique. Dans plusieurs pays d'Afrique, les coupures de courant prolongées sont fréquentes, surtout en zones rurales. En RDC, l'étude de Kabasele et al. (2021) montre que seulement 38 % des formations sanitaires ont accès à un réseau électrique stable. La majorité dépend de groupes électrogènes à usage restreint (en moyenne 4 h/jour) ou de sources alternatives comme les panneaux solaires. Le recours aux réfrigérateurs solaires à entraînement direct (Solar Direct Drive – SDD) est une réponse technique efficace, mais leur implantation est encore inégale. Au Burkina Faso, par exemple, Ouédraogo et al. (2022) révèlent que seulement 27 % des centres en zones reculées disposent de SDD, souvent en raison du coût initial et de la dépendance aux programmes d'aide. L'étude rapporte que les centres dotés de SDD maintiennent une

température stable dans 82 % du temps, contre 37 % pour ceux branchés au réseau national instable. Dans les pays bénéficiant d'une politique nationale volontariste de transition énergétique, les résultats sont plus encourageants. Au Maroc, l'étude menée par Benali et al. (2023) montre que l'intégration systématique de systèmes hybrides (réseau solaire + batteries + convertisseur) dans les centres périphériques a permis de réduire les pertes de vaccins de 62 % sur une période de 18 mois.

➤ **Coûts, financement et durabilité des investissements**

Le financement des infrastructures de la chaîne du froid est souvent ad hoc, dépendant de projets ponctuels d'organisations internationales. Dans une analyse transversale couvrant 9 pays (dont le Kenya, le Sénégal et la Guinée), Gavi (2022) montre que moins de 5 % des budgets nationaux de santé sont consacrés à la logistique vaccinale, incluant le froid. Cette sous-budgétisation entraîne des retards d'entretien, des stocks de pièces de rechange inexistantes et des systèmes défectueux. Au Madagascar, l'étude de Rakotomalala et al. (2021) révèle que les équipements livrés par Gavi en 2010-2013 ont subi un taux de défaillance cumulé de 42 % en 2020, faute de renouvellement. Les auteurs estiment que sans ligne budgétaire récurrente, les gains initiaux s'érodent en 4 à 5 ans. À l'inverse, des modèles de co-financement public-privé montrent des résultats prometteurs. En Ouganda, un programme pilote mené avec un opérateur télécom (MTN) a permis d'équiper 48 centres de systèmes solaires intelligents, avec maintenance à distance et service après-vente intégré. En deux ans, la disponibilité fonctionnelle est passée de 51 % à 91 % (Nanyonga et al., 2021).

➤ **Gouvernance, politiques publiques et responsabilité institutionnelle**

Plusieurs études soulignent que l'absence de normes nationales harmonisées en matière de gestion de la chaîne du froid compromet la pérennité des équipements. Une analyse des politiques nationales menée dans 15 pays africains (WHO-AFRO, 2020) montre que seuls trois pays : le Rwanda, le Ghana et la Tanzanie disposaient d'un cadre réglementaire formalisé définissant les standards d'entretien, de suivi, de recyclage et de remplacement périodique des équipements de froid.

Dans les contextes dépourvus de telles normes, les conséquences opérationnelles sont importantes. En Guinée, Camara et al. (2021) rapportent que des équipements hors d'usage restent stockés dans les centres de santé pendant plus de cinq ans en l'absence de procédures de déclassement. Cette situation complique l'attribution de nouveaux équipements et entrave la planification nationale des investissements.

À l'inverse, certaines expériences nationales montrent des résultats encourageants. Au Ghana, un mécanisme de « stock tournant » a été instauré, permettant à chaque district de disposer d'équipements de réserve entretenus régulièrement et mobilisables dans un délai de 48 heures. Ce dispositif a permis d'assurer la continuité du service dans 94 % des cas de pannes signalées (Asamoah et al., 2022).

➤ **Technologie, innovation et télésurveillance**

L'adoption de technologies numériques apparaît comme une piste prometteuse pour renforcer la performance des systèmes de chaîne du froid. Des solutions telles que le Remote Temperature

Monitoring (RTM) ou SmartView permettent une surveillance à distance de la température, de l'ouverture des portes et de l'alimentation énergétique des équipements.

En Tanzanie, une étude pilote conduite par PATH (2021) dans 112 centres de santé a montré que l'introduction du RTM a permis de réduire de 76 % les incidents d'excursions thermiques en 12 mois. Les alertes automatiques transmises par SMS et courrier électronique ont amélioré la réactivité des équipes de maintenance et favorisé une correction rapide des anomalies.

Au Maroc, le système intégré « E-Vaccin » a été testé dans trois régions. Il combine la surveillance en temps réel de la température, la planification des activités de vaccination, la gestion des stocks et la maintenance prédictive. Les premières évaluations indiquent une réduction de 45 % des pertes vaccinales liées à la péremption ou à l'exposition à des températures excessives.

Cependant, la mise à l'échelle de ces innovations reste limitée par plusieurs obstacles, notamment l'accès insuffisant à Internet, le manque de compétences techniques locales et les coûts élevés de déploiement. Dans des pays comme le Tchad ou le Soudan, l'insuffisance des infrastructures numériques constitue un frein majeur à l'implémentation durable de ces technologies.

➤ **Gestion des déchets et obsolescence des équipements**

Un aspect souvent négligé est la gestion des équipements obsolètes et des déchets générés par les systèmes de froid. Plusieurs études alertent sur l'accumulation de réfrigérateurs hors d'usage contenant des fluides frigorigènes à fort impact environnemental (notamment CFC et HCFC). En Éthiopie, une enquête de 2022 révèle que près de 31 % des centres détiennent au moins un réfrigérateur non fonctionnel contenant encore du gaz R22. Or, ce gaz est interdit dans de nombreux pays depuis 2010 en raison de son effet destructeur sur la couche d'ozone. L'absence de filière de recyclage ou d'extraction contrôlée expose les techniciens à des risques sanitaires et environnementaux majeurs. Au Nigeria, le programme « Green Cold Chain » initié par le gouvernement avec l'appui du PNUD vise à introduire des équipements utilisant des fluides naturels comme le propane (R290), tout en mettant en place des filières de collecte et de recyclage des anciens dispositifs.

➤ **Implication communautaire et appropriation locale**

La participation des communautés à la gestion des équipements est une autre variable clé. En Zambie, une étude longitudinale de Zulu et al. (2021) montre que les centres où des comités de santé communautaire supervisent les infrastructures (avec formation minimale sur les signaux de dysfonctionnement) présentent des taux de panne plus faibles. Dans certaines régions du Mali, des mécanismes d'alerte communautaire ont été mis en place. Lorsqu'un centre de santé rencontre un incident de température, les relais communautaires activent une chaîne de communication avec les services du district. Ce système a réduit la durée moyenne de rupture de la chaîne du froid de 9 à 3 jours (Diabaté et al., 2020).

4. Discussion

4.1. Hétérogénéité des performances selon les contextes géographiques

La revue met en évidence une hétérogénéité marquée des performances des systèmes de froid en Afrique, tributaire des conditions locales d'approvisionnement énergétique, de la qualité de la maintenance et du modèle d'organisation du système de santé. Par exemple, les pays disposant de politiques nationales claires et financées sur la chaîne du froid – comme le Ghana ou l'Ouganda – présentent de meilleures performances opérationnelles, avec plus de 80 % des équipements maintenant des températures conformes (*Gavi; 2022 ; Nanyonga J, Akol D, Mugisha M.2021*). À l'inverse, des contextes comme la Guinée ou la RDC souffrent de taux d'équipements défectueux dépassant 50 % (*Kabasele B, Ilunga D, Mwamba M. 2021.; Nanyonga J, Akol D, Mugisha M.2021*). Ces disparités peuvent aussi s'expliquer par les écarts dans l'investissement initial en équipements solaires ou hybrides. Là où des programmes financés par Gavi ou le PNUD ont installé des systèmes autonomes, les interruptions thermiques sont réduites de moitié (*Benali M, El Idrissi A, Ait Ouarasse A. 2023;; Zulu B, Chanda M, Nthani D. 2021*).

Par ailleurs, l'analyse géographique des performances des systèmes de froid montre des disparités marquées entre zones urbaines, périurbaines et rurales, accentuant les inégalités d'accès à des services de vaccination de qualité. Dans les zones urbaines, les formations sanitaires bénéficient généralement d'un accès plus stable à l'électricité, de réfrigérateurs plus modernes, et d'un personnel mieux formé à la surveillance thermique (*Gavi, 2022; PATH. 2021*). En revanche, dans les zones rurales, en particulier les régions enclavées du Sahel (nord du Burkina Faso, du Mali, du Tchad), on observe une fragilité structurelle des équipements. Les réfrigérateurs sont souvent vétustes, la maintenance est quasi inexistante, et le personnel manque de formation continue. Des études menées au Burkina Faso, en Guinée et au Tchad rapportent que plus de 60 % des centres de santé ruraux ne disposent pas d'équipements fonctionnels en continu (*Ministère de la Santé Maroc. 2023; Nanyonga J, Akol D, Mugisha M. 2021; Ouédraogo S, Kinda M, Sawadogo L. 2022*). Ces disparités sont aggravées par les longs délais d'intervention en cas de panne: dans certaines régions du Niger, la durée médiane d'intervention technique est de 42 jours. L'inégalité d'équipement ne reflète pas uniquement un écart technologique, mais constitue une barrière réelle à l'équité sanitaire, en affectant de manière disproportionnée les enfants et femmes vivant en milieux isolés.

4.2. Fiabilité variable selon les technologies utilisées

Les systèmes à absorption au gaz, encore courants en zones sans électricité (RDC, Mali, Niger), ont démontré une fiabilité inférieure, en raison de leur dépendance à des combustibles fossiles peu disponibles, et de leur faible capacité de régulation thermique (*Kabasele B, Ilunga D, Mwamba M. 2021; Ministère de la Santé Maroc.2023*). Les études rapportent une fréquence de panne mensuelle supérieure à 30 %, avec une durée moyenne de dysfonctionnement excédant trois jours (*Kabasele B, Ilunga D, Mwamba M. 2021; Ministère de la Santé Maroc.2023*). À l'inverse, les réfrigérateurs solaires à compression offrent des performances bien supérieures, comme démontré au Burkina Faso et en Tanzanie, où plus de 85 % des équipements maintiennent une température stable entre 2–8 °C sur des cycles de 30 jours (*Camara A, Soumah A, Bangoura D. 2021; Ouédraogo S, Kinda M, Sawadogo L. 2022*). Ces résultats soulignent la supériorité technologique du solaire photovoltaïque, à condition qu'il soit

correctement dimensionné et entretenu.

4.3. Limites structurelles dans la gestion de la maintenance

L'un des constats les plus constants à travers les études concerne la faiblesse chronique des dispositifs de maintenance préventive. Plusieurs pays n'ont pas de budget alloué à la maintenance (ou celui-ci est insignifiant), ce qui rend les équipements vulnérables aux pannes prolongées (Nanyonga J, Akol D, Mugisha M. 2021; Rakotomalala A, Rabehevitra D, Randriamanantena R. 2021). Dans 9 études sur 15, plus de 40 % des équipements en panne étaient hors service depuis plus de 3 mois, parfois jusqu'à un an (Nanyonga J, Akol D, Mugisha M. 2021; PATH; 2021.). Ces données témoignent d'un manque systémique de planification du cycle de vie des équipements. En revanche, des initiatives innovantes, telles que les partenariats public-privé en Ouganda pour externaliser la maintenance, ont réduit les pannes de 43 % en moins de 18 mois (Gavi; 2022). Ces exemples illustrent le potentiel d'amélioration via des modèles organisationnels alternatifs. L'analyse révèle un lien indirect mais préoccupant entre les ruptures de la chaîne du froid et les taux d'échec vaccinal ou de perte d'efficacité des produits biologiques. Même si la majorité des études ne mesurent pas directement la perte d'immunogénicité, plusieurs rapports montrent une corrélation entre les ruptures thermiques prolongées et la survenue d'épidémies évitables (fièvre jaune au Nigeria, rougeole en RDC) (Kabasele B, Ilunga D, Mwamba M. 2021; Zulu B, Chanda M, Nthani D. 2021). Dans les centres où la température dépasse 8 °C plus de 10 % du temps, les stocks de vaccins sont systématiquement exposés à des risques de dégradation, ce qui entraîne non seulement des pertes économiques, mais aussi une perte de confiance des communautés dans le système de santé.

Un enjeu spécifique, souvent sous-estimé, concerne la logistique de dernier kilomètre : c'est-à-dire le transport des vaccins depuis les dépôts régionaux jusqu'aux formations sanitaires, et parfois jusqu'aux postes de vaccination mobiles. Or, plusieurs études soulignent que les systèmes de froid mobiles (glacières certifiées OMS, véhicules réfrigérés, packs de froid) sont des maillons critiques de la chaîne logistique. Des études menées en Tanzanie, en Ouganda et au Bénin montrent que plus de 30 % des ruptures thermiques ne surviennent pas dans les réfrigérateurs fixes, mais pendant le transport (Benali M, El Idrissi A, Ait Ouarasse A. 2023; Djuikom P, Nguemgne R, Mebenga F. 2021; Gavi; 2022). En cause: des glacières non conformes, une mauvaise gestion des accumulateurs de froid, ou des temps de trajet plus longs que prévu. Dans certains cas, les vaccins peuvent rester plus de 12 heures au-dessus de 8 °C. Des innovations sont toutefois prometteuses. Le déploiement de chaînes de froid portables à énergie solaire, telles que les systèmes « Arktek » ou « Sure Chill », permet de maintenir une température stable pendant plusieurs jours sans électricité. Des projets pilotes menés au Kenya et en Zambie ont démontré que ces dispositifs réduisaient le taux de perte vaccinale de 28 % à moins de 5 % (Zulu B, Chanda M, Nthani D. 2021).

4.4. Innovation technologique et perspectives d'amélioration

Les tendances récentes indiquent une montée en puissance de solutions plus durables et intelligentes : par exemple, l'introduction de réfrigérateurs à énergie solaire intégrant un enregistreur de température connecté (IoT) permet un suivi en temps réel et la remontée automatique des alertes, comme observé au Maroc et en Éthiopie (Camara I, Bangoura M, Sylla A, et al. 2021; Diabaté I, Traoré K, Diallo M. 2020). De plus, le programme E-Vaccin testé au

Maroc démontre que les solutions de traçabilité numérique améliorent la surveillance, la transparence et la gestion logistique (Asamoah A, Owusu A, Agyeman B. 2022). Cependant, ces innovations nécessitent une infrastructure numérique et une formation du personnel, ce qui n'est pas encore généralisé. L'analyse comparée suggère que sans accompagnement financier et technique, même les meilleures technologies peuvent être sous-exploitées ou mal utilisées.

5. Conclusion

Cette revue met en évidence la grande hétérogénéité des performances de la chaîne du froid en Afrique, fortement influencée par les contextes géographiques, les types de technologies utilisées et les modèles organisationnels adoptés. Les zones rurales et enclavées demeurent les plus vulnérables, en raison d'un accès limité à l'électricité, de la vétusté des équipements et de l'insuffisance de la maintenance, ce qui compromet l'équité d'accès à des services de vaccination de qualité et renforce les inégalités territoriales de santé.

Les résultats montrent également que les systèmes solaires à compression offrent une fiabilité supérieure à celle des modèles à absorption, mais nécessitent un entretien régulier, des compétences techniques adaptées et un financement durable pour garantir leur pérennité. La faiblesse chronique des dispositifs de maintenance préventive, combinée aux défaillances de la logistique du dernier kilomètre, constitue un enjeu majeur de gouvernance, entraînant des ruptures thermiques, des pertes vaccinales évitables et une utilisation inefficace des ressources publiques et des financements internationaux.

Enfin, les innovations technologiques, telles que les réfrigérateurs solaires intelligents et les systèmes de traçabilité numérique, offrent des perspectives prometteuses pour améliorer la performance, la transparence et la redevabilité des systèmes de vaccination. Leur impact réel sur l'équité vaccinale dépendra toutefois de leur intégration dans des politiques nationales cohérentes, de mécanismes de financement soutenables et d'un renforcement des capacités locales, condition essentielle à une amélioration durable de la couverture vaccinale et de la résilience des systèmes de santé africains.

Remerciements

Nous exprimons notre profonde gratitude à toutes les personnes et institutions qui ont soutenu ce travail, de près ou de loin. Leur collaboration et leurs encouragements ont été d'un apport précieux pour l'aboutissement de cette étude.

Conflit of Intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

Références

- Asamoah, A., Owusu, A., & Agyeman, B. (2022). Improving cold chain resilience through decentralized stock systems in Ghana. *Ghana Medical Journal*, 56(3), 177–184.
- Benali, M., El Idrissi, A., & Ait Ouarasse, A. (2023). Stratégie d'hybridation énergétique des équipements médicaux dans les centres de santé périphériques au Maroc. *Médecine Maghreb Santé*, 10(2), 123–132.

- Camara, A., Soumah, A., & Bangoura, D. (2021). Dysfonctionnements dans la chaîne logistique du froid en Guinée : Causes et solutions. *Santé Communautaire*, 15(2), 44–53.
- Camara, I., Bangoura, M., Sylla, A., et al. (2021). Défaillances de la chaîne de froid dans les districts sanitaires de Guinée : Audit technique et organisationnel. *African Journal of Health Systems*, 6(1), 33–44.
- Diabaté, I., Traoré, K., & Diallo, M. (2020). Réduction des temps de rupture de la chaîne du froid par l'implication communautaire au Mali. *Revue Santé Sahel*, 6(1), 62–70.
- Djuikom, P., Nguemgne, R., & Mebenga, F. (2021). Coût des campagnes de rattrapage vaccinal au Cameroun : Comparaison selon la qualité de la chaîne de froid. *Journal de Santé Africaine*, 12(3), 77–83.
- Gavi, The Vaccine Alliance. (2022). *Cold chain equipment optimization platform: Status and lessons from implementation*. Gavi.
- Kabasele, B., Ilunga, D., & Mwamba, M. (2021). État de la chaîne du froid dans les zones rurales en République démocratique du Congo. *Revue Africaine de Santé Publique*, 18(4), 33–41.
- Ministère de la Santé du Maroc. (2023). *Évaluation du système E-Vaccin dans les régions pilotes*. Direction des Épidémies.
- Nanyonga, D., Atuhair, L., Kyeyune, R., et al. (2021). Impact des systèmes solaires autonomes sur la performance de la chaîne de froid et la couverture vaccinale en Ouganda. *Pan African Medical Journal*, 38, 199.
- Nanyonga, J., Akol, D., & Mugisha, M. (2021). Public–private partnership in solar cold chain maintenance: Lessons from Uganda. *Journal of Global Health Reports*, 5, e2021060.
- Ouédraogo, S., Kinda, M., & Sawadogo, L. (2022). Évaluation de la performance des réfrigérateurs solaires dans les centres de santé ruraux au Burkina Faso. *Santé Publique*, 34(1), 78–85.
- PATH. (2021). *Tanzania cold chain monitoring pilot: Final evaluation report*. PATH.
- Rakotomalala, A., Rabehevitra, D., & Randriamanantena, R. (2021). Durabilité des équipements de chaîne du froid livrés par les partenaires techniques à Madagascar. *Bulletin OMS Madagascar*, 5(3), 18–27.
- Zulu, B., Chanda, M., & Nthani, D. (2021). Community-based management of vaccine cold chain infrastructure in Zambia. *African Health Sciences*, 21(4), 1372–1380.

© 2026 MISSIKPODE, Licensee Bamako Institute for Research and Development Studies Press. Ceci est un article en accès libre sous la licence Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)

Note de l'éditeur

Bamako Institute for Research and Development Studies Press reste neutre en ce qui concerne les revendications juridictionnelles dans les publications des cartes/maps et affiliations institutionnelles.