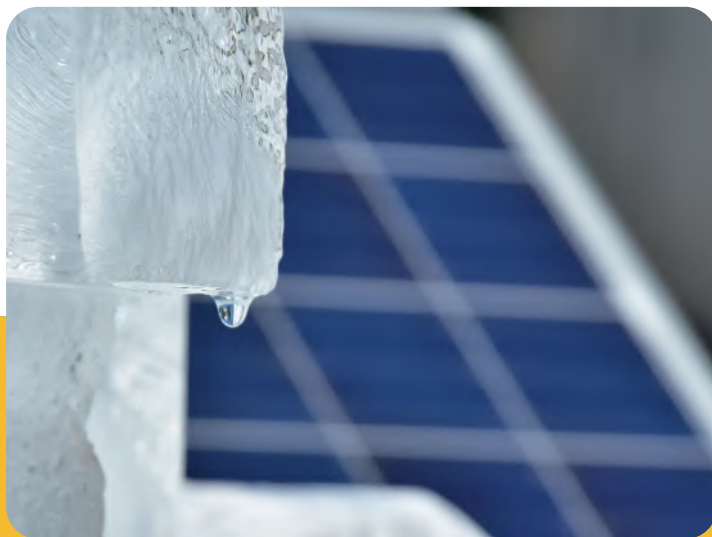




SOPHIA

Sustainable Off-grid solutions for
Pharmacies and Hospitals In Africa



NOTE
D'ORIENTATION

LES Frigorigènes naturels en Afrique



Remerciements

À propos du projet SophiA

Le projet SophiA (« Sustainable Off-grid solutions for Pharmacies and Hospitals in Africa ») permettra à un nombre croissant d'habitants du continent africain d'accéder à une énergie neutre en carbone pour l'électricité, le chauffage et le refroidissement des médicaments et des aliments, ainsi qu'à une eau potable sûre et propre, améliorant ainsi la qualité de vie de manière durable.

Ce projet a été rendu possible grâce à la Commission européenne. Il a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation de l'Union européenne Horizon 2020, au titre de l'accord de subvention n° 101036836.

À propos de la note d'orientation

Cette note d'orientation a été préparée par Michael Kauffeld (Université des sciences appliquées de Karlsruhe, coordinateur SophiA), Daniel Colbourne (Re-Phridge Ltd), Monique Baha (IIF), Yosr Allouche (directrice générale de l'IIF), Abdoulaye Gaye (ROCA Sénégal), Marco Duran (IIF), Hubert Nsoh Zan (Commission de l'énergie du Ghana), Alain Tchoua (U-3ARC), Lassine Katilé (U-3ARC).

De précieuses contributions ont été apportées par les experts suivants : Marco Buoni (REAL Alternatives, Centro Studi Galileo, Italie), Nils Hansen (GIZ), Nnaemeka Ikegwuonu (ColdHubs, Nigéria).

La note a été relue par Daniel Colbourne (Re-Phridge Ltd), Bassam Elassaad (ONU RTOC), Xinfang Wang (Université de Birmingham, Royaume-Uni), Marco Duran (IIF), Yosr Allouche (directrice générale de l'IIF), Alex Pachai (IIF) et Madi Sakandé (U-3ARC).

Cette note d'orientation a été rédigée à l'initiative de Mihaela Dudita-Kauffeld (SPF-OST). Elle a été corrigée par Monique Baha (rédactrice scientifique, IIF), traduite par Maud Grasmenil (traductrice, IIF) et mise en page par Marie-Christelle Attila (graphiste, IIF).

Cette publication a bénéficié du soutien de l'Institut International du Froid (IIF) pour la relecture, la conception graphique et l'édition.



INSTITUT INTERNATIONAL DU FROID
INTERNATIONAL INSTITUTE OF REFRIGERATION

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|----|
| Remerciements | 2 |
| Acronymes | 3 |
| 1. PERSPECTIVE HISTORIQUE | 4 |
| 2. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES FRIGORIGÈNES DE SYNTHÈSE | 6 |
| - Encadré 1: Empêcher l'importation nocive d'équipements en Afrique | 8 |
| 3. PROPRIÉTÉS DES FRIGORIGÈNES NATURELS ET APPLICATIONS DANS LES SYSTÈMES FRIGORIFIQUES | 9 |
| 4. OBSTACLES À L'ADOPTION DES FRIGORIGÈNES NATURELS | 12 |
| 4.1. Absence d'un cadre réglementaire adapté | 13 |
| 4.2. Accès limité à une formation adéquate | 14 |
| 4.3. Disponibilité limitée des composants | 14 |
| 4.4. Disponibilité limitée des frigorigènes naturels | 15 |
| 5. RECOMMANDATIONS POLITIQUES | 16 |
| 5.1. Mettre en place ou refondre des programmes de formation | 17 |
| - Encadré 2 : Exemples d'initiatives de formation en Afrique | 18 |
| 5.2. Sensibiliser et accompagner | 19 |
| 5.3. Présenter les technologies développées | 19 |
| - Encadré 3 : Systèmes fonctionnant avec des frigorigènes naturels en service en Afrique | 20 |
| 5.4. Développer le marché des frigorigènes naturels en Afrique | 23 |
| 5.5. Débloquer l'accès aux financements | 23 |
| 5.6. Développer l'infrastructure réglementaire en faveur des frigorigènes naturels en Afrique | 24 |
| 6. RÉFÉRENCES | 25 |

ACRONYMES

| | |
|------|--|
| CFC | Chlorofluorocarbure |
| GES | Gaz à effet de serre |
| PRP | Potentiel de réchauffement planétaire |
| HCFC | Hydrochlorofluorocarbure |
| HFC | Hydrofluorocarbure |
| HFO | Hydrofluorocarbure |
| SAO | Substances qui appauvrissent la couche d'ozone |
| TFA | Acide trifluoroacétique |
| PFAS | Substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées |

01 **Perspective historique**

Depuis le XIX^e siècle, le choix des frigorigènes a évolué, passant de substances naturelles à des fluides de synthèse, en fonction de facteurs environnementaux, climatiques, sécuritaires et économiques. Au Ghana, l'ammoniac utilisé dans les installations du port de pêche de Tema a été remplacé par des frigorigènes de synthèse dans les années 1990 mais est aujourd'hui réintroduit en raison de ses moindres coûts d'exploitation.

Promouvoir les frigorigènes naturels est essentiel en Afrique pour répondre aux défis environnementaux et favoriser la mise en œuvre d'accords internationaux tels que l'amendement de Kigali au protocole de Montréal.

01. Perspective historique

Depuis l'invention du froid mécanique au XIX^e siècle, le choix des frigorigènes n'a cessé d'évoluer sous l'effet de facteurs environnementaux, climatiques, sécuritaires et économiques ^[1,2]. En l'absence d'industrie chimique à l'époque, les premiers systèmes frigorifiques reposaient sur des frigorigènes naturels tels que l'ammoniac, le dioxyde de carbone, l'éther diméthylque, le dioxyde de soufre ou encore l'eau ^[3,4].

Au cours des années 1930 et 1940, l'invention des frigorigènes halogénés, alors promus comme des solutions de remplacement sûres, a favorisé la large adoption des systèmes frigorifiques. Dans de nombreuses applications – à l'exception du froid industriel et des systèmes frigorifiques de l'industrie pétrochimique, qui continuèrent à utiliser respectivement l'ammoniac et les hydrocarbures –, les frigorigènes naturels furent remplacés par des frigorigènes de synthèse à base d'hydrocarbures chlorés et/ou fluorés, parfois enrichis en atomes de brome.

Ainsi, au Ghana, avant la décennie 1990, ce sont des usines centralisées à l'ammoniac refroidies à l'eau qui dominaient les installations d'entreposage frigorifique dans le port de pêche de Tema. Dans les années 1990, l'usine centralisée à l'ammoniac du marché de l'entreposage frigorifique a été remplacée par une unité de condensation fonctionnant avec des frigorigènes de synthèse, dont l'avantage résidait dans un moindre coût initial ^[5]. Dans les années 2010, les systèmes à l'ammoniac ont été progressivement réintroduits dans le port de pêche de Tema en raison de leurs faibles coûts d'exploitation en

matière de consommation énergétique et de maintenance ^[6].

À cette époque, des études menées par le PNUE et l'ONUDI ont examiné les stratégies et les possibilités de surmonter les obstacles à l'adoption de frigorigènes à faible potentiel de réchauffement planétaire (PRP), notamment les frigorigènes naturels, dans les pays visés par l'article 5 du protocole de Montréal ^[7,8].

Elles ont mis en évidence l'importance de l'accès à l'information et de l'engagement des parties prenantes, essentiels pour favoriser l'utilisation des frigorigènes naturels par les représentants de l'industrie et des politiques dans les pays en développement et les économies émergentes.

Cette note d'orientation vise à accompagner l'adoption de technologies utilisant des frigorigènes naturels en s'appuyant sur des considérations environnementales, climatiques, sécuritaires et économiques. La promotion de ces frigorigènes en Afrique repose sur des preuves scientifiques des effets néfastes des frigorigènes de synthèse sur la couche d'ozone, le réchauffement planétaire et d'autres aspects environnementaux. Elle est considérée comme un levier essentiel pour la mise en œuvre réussie d'accords internationaux tels que l'amendement de Kigali au protocole de Montréal.

Vue aérienne du port de Tema
au Ghana © Shutterstock



02

Impact environnemental des frigorigènes de synthèse

L'Afrique est particulièrement vulnérable aux effets du changement climatique, devant mettre en place des mesures d'adaptation coûteuses. Bien que les efforts menés dans le cadre du protocole de Montréal aient permis de quasiment éliminer les substances appauvrissant la couche d'ozone, les systèmes utilisant des HCFC représentent encore près de la moitié du marché africain du conditionnement d'air. Le recours à des substituts respectueux du climat constitue donc un besoin urgent.

02. Impact environnemental des frigorigènes de synthèse

L'Afrique est l'un des continents les plus vulnérables aux effets du changement climatique, devant assumer des coûts démesurément élevés pour mettre en œuvre des mesures d'adaptation climatique essentielles^[9]. Les économies du continent sont grandement tributaires de secteurs sensibles aux conditions climatiques. Dans ce contexte, l'industrie du froid et du conditionnement d'air devient un pilier majeur et essentiel pour parvenir à un développement durable.

Malheureusement, les gaz de synthèse utilisés dans les systèmes frigorifiques constituent une source importante d'émissions de gaz à effet de serre (GES). Les chlorofluorocarbures (CFC) et les hydrochlorofluorocarbures (HCFC) sont des frigorigènes contenant du chlore, qui endommage la couche d'ozone. Cette menace pour la biosphère terrestre a conduit en 1987 à la signature du protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone. Grâce à ses divers amendements et à sa ratification universelle, les CFC et les HCFC ont désormais été pratiquement éliminés des nouveaux systèmes de froid et de conditionnement d'air, même si ces molécules persisteront dans l'atmosphère durant plusieurs décennies.

Selon le PNUE, en 2024, les parties signataires du protocole de Montréal avaient éliminé près de 99 % des substances appauvrissant la couche d'ozone à l'échelle mondiale par rapport aux niveaux de 1990^[10]. La couche d'ozone est actuellement en bonne voie de résorption et devrait retrouver son état d'avant l'introduction des CFC et des HCFC d'ici 2100^[11]. Néanmoins, en Afrique, les climatiseurs contenant du frigorigène R-22, un HCFC, représentent encore près de la moitié du marché^[12]. Voir l'encadré 1 sur la question de l'importation nocive d'équipements contenant des frigorigènes obsolètes en Afrique.

Les frigorigènes hydrofluorocarbures (HFC) ont été introduits sur le marché à la fin des années 1980 et au début des années 1990 comme substituts aux CFC et HCFC, considérés comme des substances inoffensives pour la couche d'ozone. La plupart des HFC et des mélanges à base de ces frigorigènes présentent toutefois un PRP relativement élevé. Les HFC font donc actuellement l'objet d'une réduction progressive, voire d'une élimination dans certaines régions, conformément à l'amendement de Kigali au protocole de Montréal, adopté en 2016. En 2024, 45 des 54 pays du continent africain avaient ratifié l'amendement de Kigali, s'engageant à diminuer leur production et leur consommation de HFC de 80 % d'ici 2045^[13]. Selon le calendrier établi, les pays africains – au même titre que la plupart des pays en développement, parties visées à l'article 5 – étaient tenus de geler leur consommation de HFC en 2024 et doivent entamer une réduction progressive à partir de 2029, jusqu'en 2045. Certaines régions du monde ont mis en place des politiques encore plus strictes, telles que le règlement européen relatif aux gaz fluorés, révisé en 2024, qui limite la quantité de HFC pouvant être commercialisée à 2 % des niveaux de 2015 d'ici 2048^[14].

En réponse à la réduction progressive des HFC, les fabricants de frigorigènes commercialisent des hydrofluoroléfines (HFO), une autre catégorie de substances fluorées caractérisée par un PRP très faible. De récents travaux ont montré que lors de leur dégradation dans l'atmosphère, certains frigorigènes HFO peuvent se décomposer en R-23, un gaz à effet de serre HFC puissant et à longue durée de vie^[15], ou produire de l'acide trifluoroacétique (TFA)^[16]. Le TFA est la plus répandue des substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées (PFAS), aussi appelées « polluants éternels ». En raison de la courte durée de vie atmosphérique des HFO, le TFA formé au cours de la dégradation de ces molécules a tendance à s'accumuler dans les sols et les eaux de surface non loin du lieu où s'est produite la fuite du frigorigène. Le TFA est un polluant fortement persistant et est suspecté d'avoir des impacts néfastes sur les organismes biologiques à de plus fortes concentrations, avec notamment une toxicité potentielle pour les systèmes reproducteurs^[17]. Des résidus de TFA ont été détectés dans des échantillons d'eau, d'air et de sol prélevés dans le monde entier, y compris en Afrique (au Malawi et en Afrique du Sud, par exemple)^[16,17].

Plusieurs recherches ont montré que la dégradation du R-1234yf, un HFO utilisé en remplacement du R-134a (un HFC) dans les systèmes de climatisation automobile, entraîne presque exclusivement (~100 %) la formation de TFA en quelques jours en raison de la courte durée de vie atmosphérique du frigorigène^[18]. Selon Holland et al., si toutes les émissions mondiales de R-134a étaient remplacées par des émissions de R-1234yf, les simulations prévoient une multiplication par 33 des dépôts de TFA à l'échelle mondiale (ce facteur pouvant atteindre jusqu'à 250 en Europe centrale)^[19].

Des études sont en cours pour mieux comprendre la formation de TFA comme produit de la dégradation des HFO. À l'inverse, il est bien établi que les frigorigènes naturels ne forment pas de TFA dans l'atmosphère et sont donc moins susceptibles d'être soumis à de futures restrictions réglementaires.

Vieux réfrigérateurs congélateurs © Shutterstock



Encadré 1 : Empêcher l'importation nocive d'équipements en Afrique

La plupart des climatiseurs individuels commercialisés sur le continent africain sont inefficaces et fonctionnent avec des frigorigènes de type HCFC ou HFC, qui doivent respectivement être progressivement éliminés ou réduits en vertu du protocole de Montréal ^[12]. La commercialisation d'appareils sous-optimaux, neufs ou usagés, qui ne répondent pas aux normes d'efficacité énergétique et environnementales en vigueur dans les marchés plus développés et réglementés, dans des régions où la réglementation est moins stricte ou non appliquée, est qualifiée de «*dumping environnemental*», c'est-à-dire d'importation nocive pour l'environnement. Cette pratique non seulement appauvrit les acheteurs, qui n'ont pas les moyens de payer les coûts d'électricité, mais complique également le respect des engagements du protocole de Montréal, car elle introduit sur le marché des frigorigènes qui doivent être éliminés ou réduits. En outre, elle contribue à l'augmentation des émissions de GES ^[20] et provoque une pollution de l'air, de l'eau et des sols en raison des substances toxiques libérées lors du traitement des déchets et des frigorigènes issus des appareils obsolètes ^[22].

Le Ghana, au nom des États africains parties au protocole de Montréal, a soumis des documents de séance visant à mettre fin au déversement préjudiciable à l'environnement d'appareils frigorifiques et de conditionnement d'air inefficaces, neufs ou usagés, dans toutes les Parties visées par l'article 5 ^[21]. Ces propositions ont conduit à l'adoption unanime de la Décision XXXV/13 lors de la réunion des parties au protocole de Montréal tenue en 2023. Cette décision reconnaît la responsabilité partagée entre les parties dans l'interdiction de l'exportation d'équipements de refroidissement ne répondant pas à leurs réglementations ou normes nationales ^[22]. Le principe de responsabilité partagée entre autorités importatrices et exportatrices permet également d'ouvrir les marchés des pays en développement aux meilleures technologies disponibles utilisant des frigorigènes respectueux du climat.

En décembre 2023, l'Agence américaine pour la protection de l'environnement (EPA) a finalisé son règlement sur l'élimination progressive des HFC, qui inclue l'interdiction d'exporter des produits manufacturés non homologués pour la vente sur le marché intérieur ^[23]. En février 2024, l'Union européenne a adopté le règlement (UE) 2024/573 relatif aux GES fluorés (dit règlement F-Gaz), qui interdit l'exportation de certains équipements neufs ou usagés contenant des GES fluorés néfastes pour le climat ^[14]. Peu après, le Secrétaire général des Nations unies, António Guterres, a lancé un appel à l'action contre les fortes chaleurs, soulignant l'importance d'arrêter le déversement dans les pays en développement d'appareils de refroidissement neufs inefficaces et fonctionnant avec des frigorigènes obsolètes ^[24].

L'étape suivante consiste en la conquête des marchés africains, ainsi que ceux d'autres pays en développement, par les fabricants mondiaux de climatiseurs écoénergétiques utilisant des frigorigènes respectueux du climat grâce à des mécanismes de financement innovants et des partenariats stratégiques, avec notamment un appui financier potentiel du Fonds multilatéral pour l'application du protocole de Montréal (FMPM).

03

Propriétés des frigorigènes naturels et applications dans les systèmes frigorifiques

Lorsqu'ils sont correctement choisis pour une application adaptée, intégrés dans des systèmes bien conçus et gérés selon des protocoles de sécurité rigoureux, les frigorigènes naturels peuvent être utilisés de manière sûre, écoénergétique et rentable dans les systèmes de froid, de conditionnement d'air et de pompes à chaleur les plus avancés.

03. Propriétés des frigorigènes naturels et applications dans les systèmes frigorifiques

Les frigorigènes naturels, qui incluent l'ammoniac, le dioxyde de carbone, les hydrocarbures, l'eau et l'air, sont des substances présentes dans la nature et faisant partie intégrante de la biosphère. Leur utilisation modérée et leurs émissions ne présentent pas d'effets inconnus sur l'environnement, contrairement aux CFC, HCFC, HFC et HFO. Bien que les frigorigènes naturels soient produits de manière industrielle, les émissions d'équivalent CO₂ liées à leur fabrication ne représentent qu'une fraction de celles générées par les substances fluorées ^[25] et ils peuvent aussi être dérivés de processus végétaux ^[26].

Lorsqu'ils sont correctement choisis pour une application adaptée, intégrés dans des systèmes bien conçus et gérés selon des protocoles de sécurité rigoureux, les frigorigènes naturels peuvent être utilisés de manière sûre, écoénergétique et rentable dans les systèmes de froid, de conditionnement d'air et de pompes à chaleur les plus avancés. Grâce à leurs propriétés thermodynamiques favorables, ils permettent souvent d'atteindre une efficacité énergétique supérieure à celle des systèmes fonctionnant avec des frigorigènes fluorés, réduisant ainsi les émissions indirectes de CO₂

liées à la production d'électricité. Le tableau 1 synthétise les principales caractéristiques des frigorigènes naturels (pour un panorama complet, voir IIF, 2016 ^[27]).

Comme pour les CFC, HCFC, HFC ou HFO, il n'existe pas de solution universelle parmi les frigorigènes naturels. Chaque option doit être évaluée en fonction de facteurs tels que la disponibilité, la sécurité pour l'environnement local et planétaire, l'efficacité énergétique, le coût ou tout autre critère pertinent. Le tableau 2 répertorie une sélection de frigorigènes naturels, ainsi que leurs applications courantes et futures potentielles. D'autres hydrocarbures, non inclus dans le tableau 2, conviennent à des applications spécifiques, tels que le pentane (R-601) et l'isopentane (R-601a) pour les pompes à chaleur à haute température, ou encore l'éthane (R-170) pour les systèmes à ultra-basse température.

En ce qui concerne l'expansion future de l'utilisation des hydrocarbures, par exemple dans les systèmes de conditionnement d'air, d'importantes mesures d'atténuation ont été élaborées afin de répondre aux enjeux de sécurité liés à leur inflammabilité.

Tableau 1

Principales caractéristiques des HFC, des HFO et d'une sélection de frigorigènes naturels

| Frigorigène | PRP | PFAS | Inflammabilité | Toxicité | Coûts comparatifs (2) | |
|--------------------|-----------------------|--|--------------------------|---|-----------------------|--------------|
| | | | | | Frigorigènes | Installation |
| HFC | Élevé | Certains le sont, et quelques-uns forment du TFA | Non PRP <750, modérée | Faible, mais fumées toxiques lors de la combustion | Modérés | Faibles |
| HFO | Faible ⁽¹⁾ | Certains le sont et plusieurs forment du TFA | Modérée | Non aiguë, mais fumées toxiques lors de la combustion | Élevés | Modérés |
| Hydrocarbures | Faible | Non | Oui | Faible | Faibles | Modérés |
| Dioxyde de carbone | Faible | Non | Non | Supérieure à 10 % | Faibles | Modérés |
| Ammoniac | Nul | Non | Modérée | Élevé | Faibles | Modérés |
| Eau | Nul | Non | Non | Non | Faibles | Modérés |

Tableau 2

Applications actuelles courantes et futures d'une sélection de frigorigènes naturels

| | | Hydrocarbures | | | Ammoniac | Eau | CO ₂ |
|--|---|---------------|---------|---------|----------|-------|-----------------|
| | | HC-290 | HC-600a | HC-1270 | R-717 | R-718 | R-744 |
| Appareils frigorifiques hermétiquement scellés | Réfrigérateurs domestiques Appareils | | ✓ | | | | |
| | commerciaux intégrés | ✓ | | | | | ✓ (2) |
| | Sèche-linges à pompe à chaleur | ✓ | | | | | |
| Commerce alimentaire | Équipements autonomes | ✓ | | | | | ✓ (2) |
| | Unités de condensation | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ (2) |
| | Systèmes centralisés | ✓ (1) | | ✓ (1) | ✓ (1) | | ✓ |
| | Systèmes distribués | ✓ | | ✓ | | | ✓ |
| Transport frigorifique | Camions, semi-remorques, fourgons | ✓ | | ✓ | | | ✓ (2) |
| | Transport frigorifique ferroviaire | ✓ | | ✓ | | | ✓ (2) |
| | Conditionnement d'air ferroviaire | ✓ | | | | | |
| | Conteneurs maritimes | ✓ | | ✓ | | | ✓ (2) |
| | Navires | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ (2) |
| Climatiseurs et pompes à chaleur air-air | Petits climatiseurs autonomes | ✓ | | | | | |
| | Climatiseurs de type split simple | ✓ | | | | | |
| | Climatiseurs de type multi-split | (✓) | | (✓) | | | |
| Systèmes de refroidissement appliqués aux bâtiments | Systèmes de conditionnement d'air à gaine | ✓ (1) | | ✓ (1) | | | |
| | Refroidisseurs pour conditionnement d'air | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | |
| | Systèmes de conditionnement d'air à débit de frigorigène variable (2) | (✓) | | (✓) | | | |
| Conditionnement d'air et pompes à chaleur mobiles | Moteur à combustion interne | (✓) | | | | | ✓ |
| | Véhicules électriques | ✓ | | | | | ✓ |
| Froid et pompes à chaleur industriels | Transformation de produits alimentaires | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ |
| | Entreposage frigorifique | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ |
| | Applications de loisirs | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | Production de froid dans les processus industriels | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | Pompes à chaleur et récupération de chaleur industrielles | ✓ | ✓ (4) | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ (5) |
| Pompes à chaleur pour chauffage uniquement | Chauffe-eaux à pompe à chaleur | ✓ | | ✓ | | | ✓ |
| | Pompes à chaleur pour chauffage de locaux | ✓ | | ✓ | | | ✓ |

1. Uniquement en combinaison avec un fluide caloporteur, pas en évaporation directe dans un espace public.
2. Dans des conditions chaudes, efficacité inférieure à celle d'autres frigorigènes en raison du fonctionnement transcritique. Les systèmes centralisés fonctionnant au R-744 incluent des fonctionnalités techniques qui garantissent leur efficacité même en climat chaud.
3. Détente/évaporation directe dans les échangeurs à chaleur placés dans les pièces/zones individuelles d'un bâtiment.
4. Pompes à chaleur haute température pour la production de vapeur.
5. Pour le chauffage de l'eau, de fluide ou autre produit avec d'importantes fluctuations de la température (glissement de température) de la substance chauffée.

(✓) Une fois les limites de charge des normes de sécurité respectées.

1. Certains HFO se dégradent dans l'atmosphère sous forme de HFC-23. Celui-ci a un PRP₁₀₀ de 14 700.

2. À titre indicatif uniquement, les coûts dépendent fortement du degré de maturité du marché.

04

Obstacles à l'adoption des frigorigènes naturels

L'absence d'un cadre réglementaire adapté constitue le principal obstacle à l'adoption généralisée des frigorigènes naturels en Afrique, se traduisant par une formation inadéquate et une sensibilisation limitée des techniciens. L'accessibilité limitée des frigorigènes naturels, ainsi que des composants et équipements connexes, entrave encore davantage leur adoption.

04. Obstacles à l'adoption des frigorigènes naturels

L'absence d'un cadre réglementaire adapté constitue sans doute le principal obstacle à l'adoption généralisée des frigorigènes naturels en Afrique, se traduisant par une formation inadéquate et une sensibilisation limitée des techniciens frigoristes. La figure 1 présente les défis et obstacles associés à l'introduction et à l'utilisation de frigorigènes naturels en Afrique.

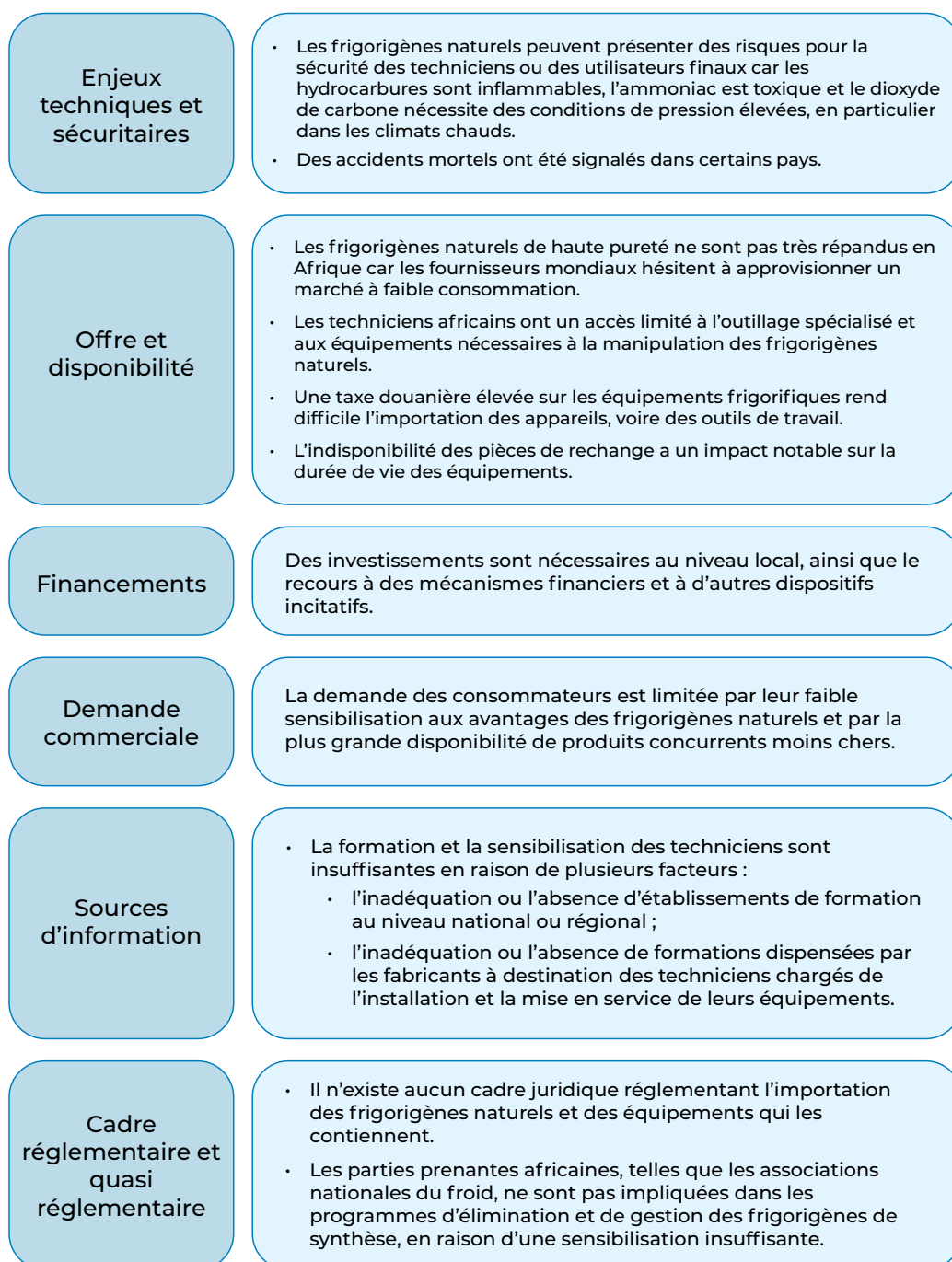


Figure 1

Défis et obstacles associés à l'introduction et à l'utilisation de frigorigènes naturels en Afrique

4.1. Absence d'un cadre réglementaire adapté

La plupart des pays africains ont signé et ratifié le protocole de Montréal et son amendement de Kigali. Les pays du continent ont aussi adhéré aux clauses de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques en signant et en ratifiant les différents accords internationaux sur le climat, et nombre d'entre eux ont inclus les HFC dans leur inventaire des émissions de GES. Cependant, les cadres réglementaires, restrictions et consignes afférents, nécessaires pour atteindre ces objectifs, ne sont pas encore mis en œuvre ou tardent à être appliqués à cause d'une méconnaissance du secteur du froid, de capacités techniques et de ressources limitées, ainsi que d'une volonté politique parfois insuffisante.

Certains pays, comme le Sénégal ^[28,29] ou le Kenya ^[30], ont instauré un cadre réglementaire afin d'honorer leurs engagements internationaux en matière de protection de la couche d'ozone et de lutte contre le changement climatique, en particulier par l'élimination progressive des HCFC et la réglementation des importations de HFC. Toutefois, un vide juridique subsiste concernant la réglementation des frigorigènes naturels.

4.2. Accès limité à une formation adéquate

Bien que certains pays africains aient mis en place des programmes destinés aux techniciens, tels que le Comité sud-africain de qualification et certification ^[31], le secteur du froid en Afrique existe de façon majoritairement informelle. Malgré les efforts des autorités publiques pour mettre en place des programmes de formation formels, la majorité des travailleurs s'appuient encore sur des méthodes d'« apprentissage traditionnel » pour obtenir leur qualification professionnelle ^[32,33]. Or cet apprentissage ne s'adosse ni à des programmes clairs ni à des structures organisationnelles formelles, échappant largement au contrôle de l'administration responsable de la formation. La structure de ces formations est insuffisante et inadaptée pour satisfaire les exigences actuelles en matière de qualification requises pour une transition rapide et sûre vers les frigorigènes naturels ^[34].

Les lacunes dans la formation sur les frigorigènes naturels ne se limitent pas au secteur informel. Si de nombreuses structures publiques et privées proposent des formations en froid et conditionnement d'air, les programmes ne sont pas adaptés aux enjeux environnementaux et aux technologies du froid utilisant des frigorigènes naturels. Il est donc nécessaire de revoir l'offre de formation globale dans ce domaine, en tenant compte des spécificités nationales.

4.3. Disponibilité limitée des composants

La plupart des pays africains n'ont pas accès à des installations de production de systèmes de froid et de conditionnement d'air et dépendent des importations. Des droits de douane élevés sur les équipements frigorifiques (allant de 40 à 111 % dans certains pays) rendent malheureusement difficile l'importation des appareils, voire des outils de travail. Quelques pays font exception, avec des taxes douanières sur les équipements frigorifiques inférieures à la moyenne régionale, comme le Kenya (22 %), l'Algérie (23 %) et le Maroc (23 %) ^[35].



Sur le marché actuel des climatiseurs à HFC ou HCFC, l'Égypte, la Tunisie et le Nigéria disposent de capacités d'assemblage et d'exportation vers le reste du marché africain grâce à des partenariats et des entreprises communes formées avec des fabricants d'équipements frigorifiques non africains ^[12]. Or de tels partenariats concernent rarement des équipements fonctionnant aux frigorigènes naturels, ce qui entrave les initiatives d'élimination progressive des HCFC ^[36,37]. Les techniciens frigoristes africains ont donc un accès limité à l'outillage spécifique et aux équipements nécessaires à la manipulation de frigorigènes inflammables.

4.4. Disponibilité limitée des frigorigènes naturels

En l'absence d'une demande significative, les frigorigènes naturels de haute pureté sont peu accessibles en Afrique à des prix compétitifs. Les fournisseurs mondiaux de frigorigènes se montrent souvent réticents à approvisionner les pays africains, où la consommation reste faible ou limitée à des phases d'expérimentation.

En guise d'alternative, la possibilité d'une production locale de frigorigènes naturels a été explorée dans le cadre d'initiatives pilotes. En 2015, le Nigéria a mis en service sa première usine produisant des frigorigènes hydrocarbures de haute pureté à partir de gaz de pétrole liquéfié d'origine locale ^[38]. L'usine de l'entreprise Pamaque Nigeria Ltd dispose d'une capacité annuelle de production de 200 tonnes pour chacun des frigorigènes R-600a et R-290a, soit un total de 400 tonnes par an. Le coût d'investissement estimé d'une usine produisant 200 tonnes par an est d'environ 460 000 dollars américains, incluant les frais d'expérimentation et de certification de l'installation ^[39]. À terme, le coût des frigorigènes naturels devrait être nettement inférieur à celui des frigorigènes fluorés, comme en témoignent les marchés établis tels que l'Europe.



Usine de production d'hydrocarbures de l'entreprise Pamaque Nigeria Ltd au Nigéria ^[39]

05

Recommandations politiques

Dans le contexte africain, la réussite de la transition vers les frigorigènes naturels nécessitera des interventions proactives de la part des acteurs gouvernementaux et industriels, des consommateurs finaux et des partenaires de développement.

- Mettre en place ou refondre des programmes de formation
- Sensibiliser et accompagner
- Présenter les technologies développées
- Développer le marché des frigorigènes naturels en Afrique
- Débloquer l'accès aux financements
- Développer l'infrastructure réglementaire en faveur des frigorigènes naturels en Afrique

05. Recommandations politiques

Dans le cadre de l'amendement de Kigali au protocole de Montréal, l'utilisation des HFC diminue progressivement dans les pays ayant ratifié le texte, selon des calendriers différenciés. Cet engagement mondial a gagné en ampleur, suscitant des discussions de plus en plus étendues sur l'adoption de frigorigènes naturels. Dans le contexte africain, la réussite de la transition vers les frigorigènes naturels nécessitera des interventions proactives de la part des acteurs gouvernementaux et industriels, des utilisateurs finaux et des partenaires de développement.

et les exigences de sécurité, ainsi que les questions d'efficacité énergétique.

Développer la formation continue. Des formations adaptées doivent être proposées aux techniciens déjà en activité dans le secteur, leur permettant ainsi d'acquérir les compétences nécessaires pour travailler avec les frigorigènes naturels de manière efficace et sécurisée.

Sensibiliser tous les acteurs du froid aux enjeux environnementaux. Il est important d'intégrer une dimension environnementale dans tous les cursus de formation afin de sensibiliser les futurs professionnels aux enjeux liés au changement climatique.

5.1. Mettre en place ou refondre des programmes de formation

L'adoption réussie des frigorigènes naturels requiert que l'ensemble des parties prenantes aient reçu une formation adaptée, non seulement les techniciens d'entretien et de maintenance, mais aussi les ingénieurs concepteurs, le personnel des chaînes de montage et des usines fabriquant les systèmes frigorifiques, ainsi que les équipes commerciales et marketing. Si cette exigence vaut pour tous les types de frigorigènes, elle est d'autant plus cruciale pour ceux qui sont inflammables, fortement toxiques ou utilisés à haute pression.

Afin de relever les défis actuels de la formation, les actions suivantes sont recommandées :

Renforcer le plateau technique des centres de formation en les équipant des outils et technologies nécessaires. Très peu d'institutions disposent des équipements requis pour former les futurs techniciens aux frigorigènes naturels.

Soutenir les associations nationales du froid et du conditionnement d'air afin de développer les capacités de formation en mobilisant des mécanismes de financement internationaux tels que le Fonds multilatéral pour l'application du protocole de Montréal.

Former les formateurs et les techniciens. Il est essentiel de mettre à niveau les connaissances des professionnels de la formation et des techniciens sur les nouvelles technologies et les normes de sécurité liées aux frigorigènes naturels.

Adapter les programmes de formation. Les programmes de formation doivent être revus pour intégrer les dernières avancées technologiques, les normes environnementales

Technicien lisant les niveaux de pression sur des jauges de collecteur © Shutterstock



Encadré 2 : Exemples d'initiatives de formation en Afrique

Formation d'environ 300 techniciens africains dans le cadre du projet « REAL Alternatives for LIFE »

Lancé en 2017, «REAL Alternatives for LIFE» est un projet financé par l'Union européenne qui propose des sessions de formation destinées aux formateurs sur les frigorigènes à faible PRP (hydrocarbures, CO₂, ammoniac, HFO) afin de garantir que leur utilisation soit sûre, efficace, fiable et rentable. En partenariat avec l'IIF et U-3ARC, en 2024, REAL Alternatives avait délivré plus de 1 800 certificats, formant environ 300 techniciens frigoristes issus de plusieurs pays africains (Bénin, Burkina Faso, Cap-Vert, Égypte, Madagascar, Nigéria, Soudan, Togo et Tunisie).

Les sessions de formation de REAL Alternatives couvrent les thèmes fondamentaux suivants:

- Contexte des réglementations existantes et à venir sur les HFC et les frigorigènes alternatifs à long terme, mettant en lumière l'importance des frigorigènes naturels
- Principales propriétés thermophysiques des frigorigènes
- Inflammabilité et autres risques pour la sécurité
- Travailler en toute sécurité avec des frigorigènes naturels et réduire les risques de fuite.
- Conception des systèmes. Pour le CO₂, cela comprend une explication du fonctionnement transcritique, ainsi que des systèmes en cascade et à surpression.
- Procédures d'installation, de mise en service, d'entretien et de réparation

Formation de techniciens du Burkina Faso, du Cameroun, du Mali et du Sénégal dans le cadre du projet ROCA de GIZ

Entre 2021 et 2024, GIZ Proklima a piloté le projet ROCA (« Refroidissement respectueux de l'ozone et du climat en Afrique de l'Ouest et centrale »), cofinancé par l'Union européenne et le ministère fédéral allemand de la Coopération économique et du Développement (BMZ). Ce projet visait à promouvoir les frigorigènes naturels et à accélérer la mise en conformité avec les obligations de l'amendement de Kigali dans quatre pays africains francophones : le Burkina Faso, le Cameroun, le Mali et le Sénégal. Des ateliers régionaux ont été organisés pour former les techniciens à la manipulation sécurisée de frigorigènes naturels dans les climatiseurs individuels. 100 techniciens ont par exemple été initiés à l'utilisation de frigorigènes naturels tels que le propane (R-290) lors d'une formation qui s'est déroulée du 29 janvier au 1^{er} mars 2024 au lycée technique et professionnel François Xavier Ndione à Thiès, au Sénégal ^[40].

Formation technique et d'ingénierie aux technologies SophiA

Dans le cadre du projet SophiA (« Solutions durables hors réseau pour les pharmacies et les hôpitaux en Afrique »), financé par l'UE, l'Institut 2iE a organisé des sessions de renforcement des capacités à destination des techniciens et ingénieurs locaux, au Burkina Faso en juin 2024, au Cameroun en janvier 2025 et en Ouganda en juin 2025. Ces formations ont permis aux participants d'acquérir une connaissance approfondie des techniques de dimensionnement des systèmes de refroidissement solaire utilisant des frigorigènes naturels, ainsi que des compétences en entretien et maintenance des systèmes de traitement de l'eau à base de filtres et des procédés de chauffage solaire. Une nouvelle session de formation est prévue au Malawi.

5.2. Sensibiliser et accompagner

Comme dans toutes les autres régions, l'introduction de frigorigènes inflammables reste un sujet controversé en Afrique, où les techniciens s'inquiètent du manque de formation et d'outils adéquats. En l'absence de connaissances et de formation suffisantes et d'outils et équipements appropriés, les techniciens ne disposeront pas des compétences nécessaires pour faire face aux risques liés à la manipulation des frigorigènes.

Les efforts de sensibilisation doivent mettre en lumière les avantages environnementaux, énergétiques, techniques et économiques des frigorigènes naturels, y compris en termes de coût du cycle de vie, afin d'inciter les décideurs et les acteurs du secteur à adopter ces solutions dans le cadre de stratégies plus larges de lutte contre le changement climatique. Ces actions peuvent prendre la forme d'ateliers ou de campagnes de communication ciblant les différentes parties prenantes à l'aide de messages adaptés. Des visites sur site peuvent en outre être organisées pour présenter des équipements fonctionnant aux frigorigènes naturels en cours de développement ou déjà commercialisés en Afrique et dans d'autres régions. Cela contribuera à familiariser les acteurs avec ces technologies et à renforcer leur confiance dans leur utilisation.

Un accompagnement interprofessionnel de qualité doit être mis en place en appui aux activités de formation et de sensibilisation. Les guides élaborés à cette fin devraient aborder des thématiques clés, notamment la législation nationale, les procédures de manipulation sécurisée ou encore des recommandations de conversion à l'intention des fabricants. À l'instar des initiatives de formation et de sensibilisation, les outils d'accompagnement doivent être adaptés aux besoins spécifiques de chaque groupe d'acteurs.

5.3. Présenter les technologies développées

Depuis le début des années 2010, lorsqu'ont été mises en place les premières lignes de production des réfrigérateurs domestiques utilisant des hydrocarbures en Afrique du Sud ^[8] et en Eswatini (anciennement Swaziland) ^[41,42], l'adoption des frigorigènes naturels n'a cessé de progresser dans la région, en particulier dans le secteur du froid commercial. Plus de 4 000 installations d'entreposage frigorifique industriel de grande ampleur fonctionnant à l'ammoniac (R-717) sont aujourd'hui en activité en Afrique du Sud, principalement utilisées pour la conservation de poisson, de viande, de légumes, de volaille et d'aliments transformés congelés ^[43]. Dans ce même pays, plus de 220 unités au CO₂ (R-744) transcritique étaient en service en 2020, soit deux fois plus qu'en 2018 ^[44].

La figure 2 présente des exemples de systèmes fonctionnant aux frigorigènes naturels actuellement en service en Afrique.



Encadré 3 : Systèmes fonctionnant avec des frigorigènes naturels en service en Afrique

Tunisie

- Installation de refroidisseurs à l'ammoniac
- « prêts à brancher » pour le conditionnement d'air dans les usines Nestlé dans les années 2010
- Installation d'entrepasage frigorifique au R-744 dans les années 2020

Nigéria

L'entreprise ColdHubs Ltd. conçoit, installe, met en service et exploite des chambres froides solaires de type walk-in depuis 2016. Les 58 chambres froides actuellement exploitées par ColdHubs utilisent du propane (R-290) associé à un système de stockage d'énergie thermique latente.

Afrique du Sud

- Depuis 2017, tous les réfrigérateurs et congélateurs domestiques fabriqués en Afrique du Sud utilisent du R-600a.
- Plus de 4 000 installations d'entrepasage frigorifique pour la conservation de poisson, de viande, de légumes, de volaille et d'aliments transformés à l'état congelé
- À Cape Town, Everflo, partenaire de SophiA, fabrique des systèmes de production de coulis de glace fonctionnant à l'ammoniac pour le refroidissement du poisson par contact direct. Ces systèmes frigorifiques sont installés dans plusieurs pays africains.

Systèmes de refroidissement solaires conteneurisés SophiA

Burkina Faso

Système frigorifique conteneurisé à énergie solaire

Cameroun

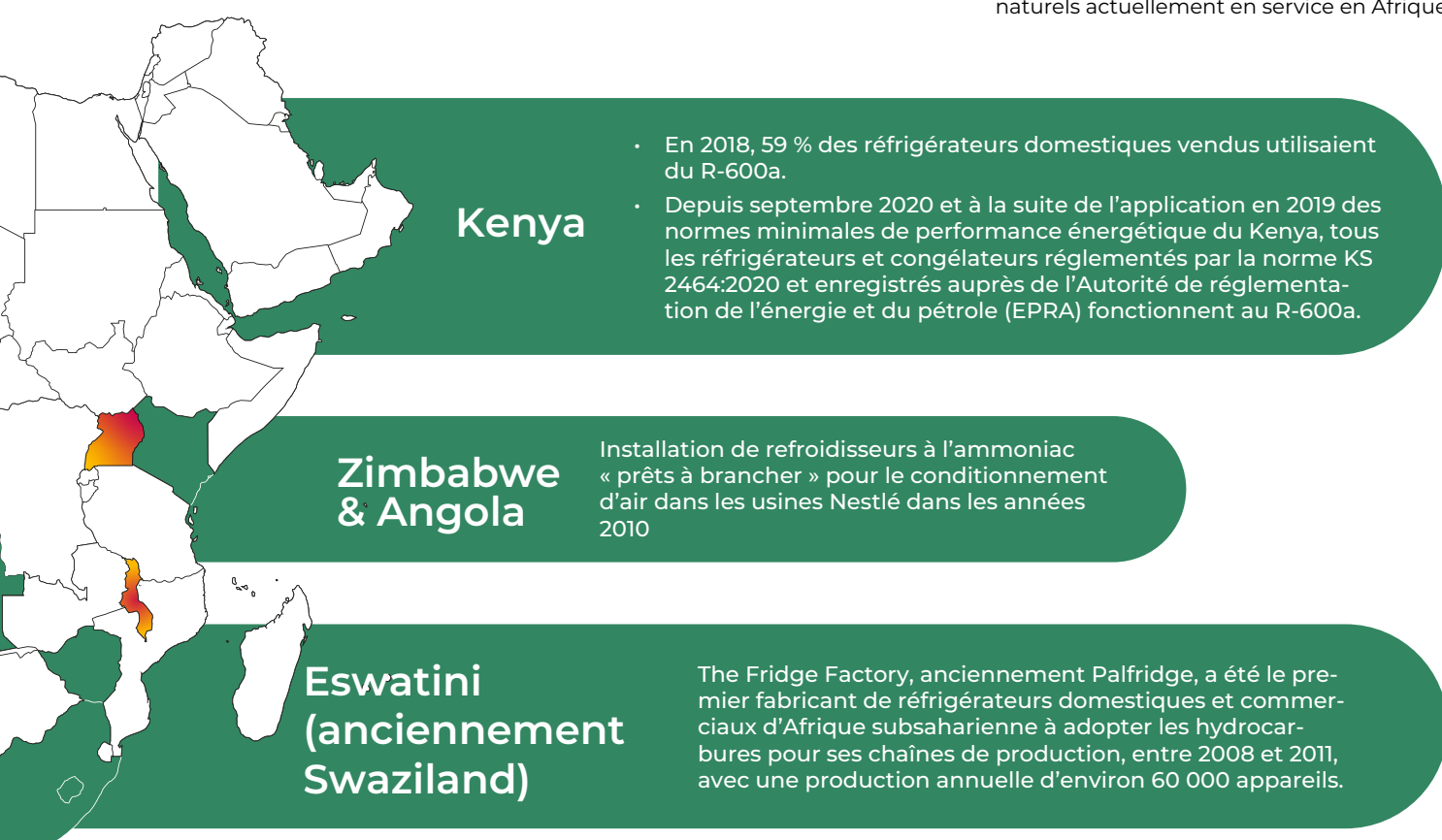
Systèmes frigorifiques autonomes à énergie solaire et utilisant du propane

Ouganda et Malawi

Conteneurs alimentés à l'énergie solaire combinant des systèmes de refroidissement et de traitement de l'eau

Figure 2

Exemples de systèmes fonctionnant aux frigorigènes naturels actuellement en service en Afrique



Poursuivre les activités de recherche et développement en Afrique est essentiel pour faciliter l'adoption des frigorigènes naturels. Des études expérimentales et pilotes doivent être menées afin de démontrer la faisabilité de ces technologies dans le contexte spécifique africain et d'identifier les possibilités d'amélioration des systèmes en termes de performances, de sécurité et de fiabilité opérationnelle.

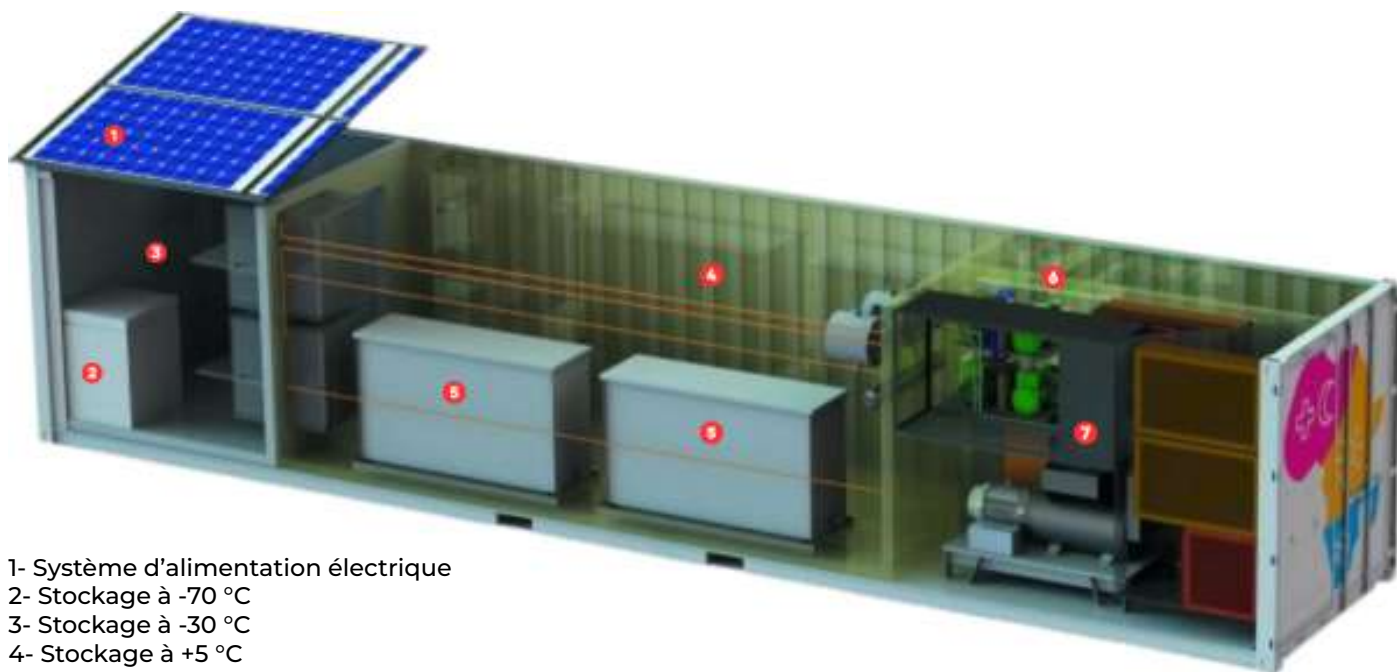
Dans le cadre du [projet SophiA \(« Solutions durables hors réseau pour les pharmacies et les hôpitaux en Afrique »\)](#), financé par l'UE, un système frigorifique conteneurisé alimenté par énergie solaire a par exemple été installé à la clinique Dr Sedogo de Léo, au Burkina Faso. Ce conteneur fournit à l'établissement des équipements d'entreposage frigorifique à +5 °C et -30 °C, destinés respectivement aux pommades et au plasma sanguin. Un congélateur à vaccins séparé, fonctionnant à -70 °C et utilisant de l'éthane comme fluide frigorigène, a également été mis en place.

Le système frigorifique conteneurisé de SophiA comprend un étage supérieur fonctionnant au propane dans une configuration en cascade, associé à un étage inférieur fonctionnant au R-744 (CO₂) (cf. figure 3). Pour minimiser la taille des batteries nécessaires au stockage de l'énergie électrique, un système de stockage thermique par bac à glace est intégré à la chambre à +5 °C. La surface froide du bac assure en même temps le refroidissement du compartiment, rendant inutile l'emploi d'un évaporateur à tubes à ailettes.

Après l'installation du démonstrateur SophiA au Burkina Faso, des conteneurs solaires de deuxième génération combinant un système de refroidissement et un système de traitement de l'eau ont été déployés en Ouganda et au Malawi. Au Cameroun, des systèmes frigorifiques solaires autonomes utilisant du propane ont été mis en service à l'hôpital Ad Lucem d'Édéa en 2025.

Figure 3

Conteneur frigorifique solaire SophiA installé au Burkina Faso



- 1- Système d'alimentation électrique
- 2- Stockage à -70 °C
- 3- Stockage à -30 °C
- 4- Stockage à +5 °C
- 5- Stockages d'énergie thermique
- 6- Salle des machines
- 7- Batteries lithium de secours



Inauguration des conteneurs SophiA à la clinique Dr Sedogo de Léo, au Burkina Faso

5.4. Développer le marché des frigorigènes naturels en Afrique

Faire progresser la demande commerciale et l'accessibilité des frigorigènes naturels, ainsi que des composants et équipements associés, nécessite de les promouvoir auprès des autorités politiques afin qu'elles mettent en œuvre des politiques douanières facilitant l'importation de systèmes frigorifiques écoénergétiques et respectueux du climat. Dans le même temps, ces politiques doivent restreindre l'importation de systèmes conventionnels utilisant des frigorigènes à PRP élevé. En outre, des accords bilatéraux entre pays importateurs et exportateurs pourraient jouer un rôle essentiel dans la réglementation des différents types de frigorigènes et dans l'établissement de normes minimales d'efficacité énergétique conformes aux engagements internationaux.

Pour combler le fossé entre fournisseurs et acheteurs de frigorigènes naturels et de technologies connexes, les parties prenantes doivent chercher activement à se mettre en relation au moyen de bases de données ou d'annuaires régionaux ou internationaux ^[7]. La formation de groupements d'acheteurs en vue d'agréger la demande peut renforcer l'attractivité du marché africain en permettant des volumes de commande plus importants et un pouvoir d'achat plus fort ^[38].

Le développement et la fabrication au niveau local de systèmes et d'équipements utilisant des frigorigènes naturels doivent être encouragés. En s'inspirant de l'exemple de l'usine pilote de production d'hydrocarbures au Nigéria, les pays africains devraient examiner la possibilité de s'approvisionner localement en hydrocarbures, en CO₂ ou en ammoniac, sous-produits de processus agricoles, d'usines pétrochimique ou de l'extraction de méthane, afin de produire des frigorigènes de haute pureté sur le territoire national ^[38].

5.5. Débloquent l'accès aux financements

Les incitations financières jouent un rôle essentiel dans la levée des divers obstacles à l'adoption des frigorigènes naturels. Le mécanisme financier du refroidissement en tant que service, ou « Cooling as a Service » (CaaS), porté par la fondation suisse BASE (Basel Agency for Sustainable Energy), a ainsi permis de financer des projets axés sur les frigorigènes naturels dans des pays comme le Nigéria et l'Afrique du Sud sans avoir à surmonter l'obstacle que représente un investissement initial ^[45]. Au Nigéria, l'entreprise ColdHubs Ltd. utilise depuis 2016 le modèle du CaaS pour concevoir, installer, mettre en service et exploiter des chambres froides solaires de type plain-pied (« walk-in ») fonctionnant au propane ^[46].

Au niveau national, les incitations financières peuvent prendre la forme de subventions ou d'ajustements fiscaux. Les gouvernements pourraient accorder des subventions pour l'achat de frigorigènes naturels et de technologies connexes. Ils peuvent également appliquer des ajustements fiscaux sur le frigorigène lui-même ou sur les systèmes frigorifiques. Ceux-ci pourraient concerner les droits d'importation, les taxes de vente, les remises ou d'autres leviers fiscaux.



ColdHubs, le refroidissement en tant que service au Nigéria : une chambre froide modulaire alimentée à l'énergie solaire et fonctionnant au R-290 pour l'entreposage de produits agricoles frais © ColdHubs

5.6. Développer l'infrastructure réglementaire en faveur des frigorigènes naturels en Afrique

Le concept d'infrastructure réglementaire désigne l'ensemble des règles encadrant la sécurité et la qualité et couvre à la fois la législation et les normes (ces dernières n'étant pas toujours contraignantes).

Dans l'industrie du froid, les normes de sécurité jouent un rôle fondamental pour garantir le respect des bonnes pratiques ^[47,48]. Au-delà des textes réglementaires de type décret ou arrêté, qui visent l'adoption par le marché, développer, produire, exploiter et entretenir des systèmes utilisant des frigorigènes naturels nécessite l'application de normes de sécurité.

L'absence de normes et de réglementations spécifiques aux frigorigènes naturels en Afrique constitue un frein majeur à l'adoption généralisée de ces solutions et expose les utilisateurs à des risques considérables. La mise en place d'un cadre réglementaire adapté faciliterait une expansion maîtrisée des frigorigènes naturels et appuierait la structuration formelle des métiers du secteur

concernés. Ce cadre permettrait également d'instaurer des systèmes de certification et d'enregistrement rigoureux pour les techniciens, renforçant ainsi l'expertise des professionnels du froid et du conditionnement d'air et la confiance des utilisateurs finaux.

Les pays africains doivent établir des réglementations et des normes régissant le stockage, la distribution et la manipulation des frigorigènes naturels, en tenant compte des spécificités du contexte africain. Lors de l'adoption de normes internationales ou nationales, leur adaptation aux conditions locales peut s'avérer nécessaire. Il est essentiel d'impliquer activement les autorités et les acteurs des sous-secteurs industriels concernés par ces normes et directives afin de veiller à ce que les différents intérêts et expertises soient bien représentés et que les réglementations qui en résultent contribuent réellement à une utilisation sûre et pratique des frigorigènes naturels.



Personne travaillant sur un ordinateur portable avec des icônes juridiques en style holographique © Shutterstock
<https://www.shutterstock.com/fr/image-photo/legal-advice-business-labor-law-concept-2493567119>

06. Références

- [1] Colbourne, D. (13 juin 2022). Hydrocarbon refrigerants through the ages. 15e Conférence IIF-Gustav Lorentzen sur les frigorigènes naturels (GL2022). Compte-rendu. Trondheim, Norvège, 13-15 juin 2022. <http://dx.doi.org/10.18462/iir.gl2022.0250>
- [2] Hafner, A. (7 décembre 2020). Development of CO₂ refrigeration technology between 1995 and 2020. 14e Conférence IIF-Gustav Lorentzen sur les frigorigènes naturels (GL2020). Compte-rendu. Kyoto, Japon, 7-9 décembre 2020. <http://dx.doi.org/10.18462/iir.gl.2020.1133>
- [3] Palm, B. (18 juin 2018). Past and future of natural refrigerants. <https://iifir.org/en/fridoc/past-and-future-of-natural-refrigerants-33836>
- [4] Reif-Acherman, S. (2012). The early ice making systems in the nineteenth century. International Journal of Refrigeration, 35(5), 1224–1252. <https://doi.org/10.1016/j.jrefrig.2012.03.003>
- [5] Ghana National Cooling Plan. (2021). <https://www.undp.org/ghana/publications/ghana-national-cooling-plan-report>
- [6] Programme des Nations unies pour le développement (PNUD), & Climate and Clean Air Coalition (CCAC). (2015). Ghana HFC Inventory. <https://www.ccacoalition.org/resources/ghana-hfc-inventory>
- [7] Colbourne, D. (21 août 2011). Barriers to the uptake of low-GWP alternatives to HCFC refrigerants in developing countries. Compte-rendu du 23e Congrès international du froid de l'IIF : Prague, République tchèque, 21-26 août 2011. Overarching Theme: Refrigeration for Sustainable Development. <https://iifir.org/en/fridoc/barriers-to-the-uptake-of-low-gwp-alternatives-to-hcfc-refrigerants-in-28092>
- [8] ONUDI, & Shecco. (2013). Natural solutions for developing countries. ONUDI (Organisation des Nations unies pour le développement industriel). <https://iifir.org/en/fridoc/natural-solutions-for-developing-countries-4541>
- [9] Organisation météorologique mondiale (OMM). (22 août 2024). State of the Climate in Africa 2023. OMM. <https://wmo.int/publication-series/state-of-climate-africa-2023>
- [10] PNUD. (1er septembre 2023). Ozone layer recovery is on track, helping avoid global warming by 0.5 °C. <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/ozone-layer-recovery-track-helping-avoid-global-warming-05degc>
- [11] Organisation météorologique mondiale (OMM). (2022). Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022 (Report No. 278). OMM. <https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2022/>
- [12] CLASP. (2020). Environmentally Harmful Dumping of Inefficient and Obsolete Air Conditioners in Africa. <https://www.clasp.ngo/research/all/environmentally-harmful-dumping-of-inefficient-and-obsolete-air-conditioners-in-africa/>
- [13] United Nations Treaty Collection. (3 octobre 2024). Amendment to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg_no=XXVII-2-f&chapter=27&clang=en
- [14] Commission européenne. (n.d.). Guidance on the EU's F-gas Regulation and its legal framework. Accès le 28 octobre 2024, URL : https://climate.ec.europa.eu/eu-action/fluorinated-greenhouse-gases/eu-rules_en
- [15] McGillen, M. R., Fried, Z. T. P., Khan, M. A. H., Kuwata, K. T., Martin, C. M., O'Doherty, S., Pecere, F., Shallcross, D. E., Stanley, K. M., & Zhang, K. (2023). Ozonolysis can produce long-lived greenhouse gases from commercial refrigerants. Proceedings of the National Academy of Sciences, 120(51), e2312714120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2312714120>
- [16] Garavagno, M. de los A., Holland, R., Khan, M. A. H., Orr-Ewing, A. J., & Shallcross, D. E. (2024). Trifluoroacetic Acid: Toxicity, Sources, Sinks and Future Prospects. Sustainability, 16(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/su16062382>
- [17] Fleet, D., Hanlon, J., Osborne, K., La Vedrine, M., & Ashford, A. (2018). Study on environmental and health effects of HFO refrigerants. 1st IIR International Conference on the Application of HFO Refrigerants, Birmingham, 2-5 September 2018. <https://doi.org/10.18462/iir.hfo.2018.1187>
- [18] David, L. M., Barth, M., Höglund-Isaksson, L., Purohit, P., Velders, G. J. M., Glaser, S., & Ravishankara, A. R. (2021). Trifluoroacetic acid deposition from emissions of HFO-1234yf in India, China, and the Middle East. Atmospheric Chemistry and Physics, 21(19), 14833–14849. <https://doi.org/10.5194/acp-21-14833-2021>
- [19] Holland, R., Khan, M. A. H., Driscoll, I., Chhantyal-Pun, R., Derwent, R. G., Taatjes, C. A., Orr-Ewing, A. J., Percival, C. J., & Shallcross, D. E. (2021). Investigation of the Production of Trifluoroacetic Acid from Two Halocarbons, HFC-134a and HFO-1234yf and Its Fates Using a Global Three-Dimensional Chemical Transport Model. ACS Earth and Space Chemistry, 5(4), 849–857. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.0c00355>
- [20] Durand, A., Nwala, G. I., Rúa, C. de la, & Agyarko, K. A. (2024). Environmental assessment of used refrigerating appliances: Why does an import ban make sense and what could other countries learn from Ghana? Journal of Cleaner Production, 463, 142596. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142596>
- [21] PNUD. (2022). Documents de séance. Projet de décision visant à mettre fin au déversement préjudiciable

d'appareils de réfrigération et de climatisation inefficaces, neufs et usagés, utilisant des réfrigérants obsolètes tels que des substances appauvrissant la couche d'ozone et des hydrofluorocarbones : Proposition du Ghana, au nom des États africains parties au Protocole de Montréal (contenant des informations générales actualisées). <https://ozone.unep.org/meetings/thirty-fourth-meeting-parties/session-documents#meeting-section-13151>

[22] Décision XXXV/13 : Importation et exportation d'équipements de réfrigération interdits. (n.d.). Accès le 30 octobre 2024, URL : <https://ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol/meetings/thirty-fifth-meeting-parties/decisions/decision-xxxv13-import-and-export-prohibited-cooling-equipment>

[23] US EPA. (2024). Protecting Our Climate by Reducing Use of HFCs [Other Policies and Guidance]. <https://www.epa.gov/climate-hfcs-reduction>

[24] United Nations Secretary-General's Call to Action on Extreme Heat. (2024). United Nations. <https://www.un.org/en/climatechange/extreme-heat>

[25] Kauffeld, M., & Dudita, M. (11 juin 2021). Environmental impact of HFO refrigerants & alternatives for the future. Open Access Government. <https://www.openaccessgovernment.org/hfo-refrigerants/112698/>

[26] ZeroSottoZero. (13 juin 2022). Refrigeranti idrocarburi, uno sguardo dalla culla alla tomba—Un'intervista. <https://www.zerosottozero.it/2022/06/13/refrigeranti-idrocarburi-uno-sguardo-dalla-culla-alla-tomba-unintervista/>

[27] IIF-IIR, & Kauffeld, M. (2016). Frigorigènes alternatifs : les options actuelles sur le long terme et leurs applications, 31e Note d'information sur les technologies du froid. Institut international du froid. <https://iifiir.org/fr/fridoc/frigorigenes-alternatifs-les-options-actuelles-sur-le-long-terme-et-139189>

[28] Arrêté interministériel réglementant la consommation des substances appauvrissant la couche d'ozone. (2000). <https://www.fao.org/faolex/results/details/fr/c/LEX-FAOC060663/>

[29] Arrêté interministériel n° 031160 du 23 septembre 2021 réglementant l'importation, la distribution et la consommation des substances appauvrissant l'ozone et les hydrofluorocarbures (2021).

[30] Ministère kényan de l'Environnement, du Changement climatique et des Forêts, Papst, I., Carreno, A. M., & Schloemann, R. (2023). National Cooling Action Plan for Kenya. <https://iifiir.org/fr/fridoc/plan-d-action-national-pour-le-refroidissement-au-kenya-147208>

[31] PNUE. (2023). Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee (RTOC) 2022 Assessment Report (Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer.). <https://ozone.unep.org/system/files/documents/RTOC-assessment%20-report-2022.pdf>

[32] Gaye, A. (2019). Entre éducation non formelle et informelle, l'apprentissage professionnel « traditionnel »

au Sénégal : Analyse des pratiques des maîtres d'apprentissage et de leurs impacts sur les apprentis [Thèse de doctorat, Université de Lille]. <https://theses.hal.science/tel-02533715>

[33] Walther, R. (2006). La formation en secteur informel – Note de problématique. Agence française de développement. <https://www.afd.fr/fr/ressources/la-formation-en-secteur-informel-note-de-problematique>

[34] Green Cooling Initiative. (16 octobre 2023). Training refrigeration technicians in the informal sector to promote Green Cooling. <https://www.green-cooling-initiative.org/news-media/news/news-detail/2023/10/16/training-refrigeration-technicians-in-the-informal-sector-to-promote-green-cooling>

[35] U-3ARC. (2025). Importation Equipements : Aberrants taux de taxation de droit de douane. U-3ARC. <https://www.u-3arc.org/fr/actualites-et-publications/importation-equipements-aberrants-taux-de-taxation-de-droit-de-douane>

[36] Égypte. HCFC phase-out management plan (stage II, fourth tranche). (n.d.). PNUD. Accès le 24 mars 2025, URL : <https://downloads.unido.org/ot/34/80/34804054/4.%20Egypt%20-%20HPMP%20Stage%20II,%20fourth%20tranche%20-%20project%20document.pdf>

[37] PNUE. (10 mai 2024). Technical and Financial Report for the Group Project for Transformation of Commercial Air Conditioning Companies (HCFC Phase-out Management Plan (HPMP) Egypt (Stage II)), UNIDO ID:140400. https://downloads.unido.org/ot/32/26/32264856/Project%20IEC_Final%20Report_27March2023-P1-combined-compressed.pdf

[38] ONUDI. (2017). Africa and the Kigali Amendment. <https://www.ccacoalition.org/resources/africa-and-kigali-amendment>

[39] Carvajal, A. R. (2020). Reporte Final de la Consultoría para evaluación del mercado actual y potencial de los refrigerantes hidrocarburos (HC) en Costa Rica. Green Cooling Initiative. <https://www.green-cooling-initiative.org/es/sobre-nosotros/nuestros-proyectos/sustainable-and-climate-friendly-phase-out-of-ozone-depleting-substances-spods/costa-rica>

[40] Green Cooling Initiative. (30 avril 2024). Senegal: Trainings in Green Cooling. <https://www.green-cooling-initiative.org/news-media/news/news-detail/2024/04/30/senegal-trainings-in-green-cooling>

[41] GIZ Proklima. (2010). Converting the Production of Refrigeration Equipment to Natural Refrigerants. <https://www.ctc-n.org/resources/converting-production-refrigeration-equipment-natural-refrigerants>

[42] Green Cooling Initiative. (n.d.). Success story: The Fridge Factory conversion project. Accès le 28 janvier 2025, URL : <https://www.green-cooling-initiative.org/fr/reseau-refroidissement-vert/best-practices-detail/success-story-the-fridge-factory-conversion-project>

- [43] Organisation des Nations unies pour le développement industriel (ONUDI). (2018). South Africa HFC Inventory. <https://www.ccacoalition.org/en/resources/south-africa-hfc-inventory>
- [44] ATMOsphere. (2022). Heat Pumps Report 2022. ATMOsphere. <https://atmosphere.cool/heat-pumps-report-2022/>
- [45] ATMOsphere. (2023). Natural Refrigerants: State of the Industry. <https://atmosphere.cool/product/natural-refrigerants-state-of-the-industry-free/>
- [46] ColdHubs. (31 janvier 2025). Our 2024 Social Impact. Solar-Powered Cold Storage for Developing Countries. <https://www.coldhubs.com/coldhubnews/2025/1/31/our-2024-social-impact>
- [47] GIZ. (2023). International Safety Standards in Air Conditioning, Refrigeration and Heat Pump. <https://www.green-cooling-initiative.org/news-media/publications/publication-detail/2023/06/21/international-safety-standards-in-air-conditioning-refrigeration-amp-heat-pump>
- [48] IIF-IIR, Coulomb, D., Colombo, I., & Sagna, B. (2015). Qualification et certification des techniciens du froid, 28e Note d'information sur les technologies du froid. Institut international du froid. <https://iifiir.org/fr/fridoc/qualification-et-certification-des-techniciens-du-froid-138666>



SOPHIA