U-3ARC WEBINAIRE DE FORMATION N°41

La Réfrigération Mobile

26 avril 2025

Le Transport Frigorifique : Du Passé à l'Innovation?

- Pourquoi le transport frigorifique est-il essentiel ?
- Historique
- Techniques et Technologies
- Classification
- Principe de fonctionnement
- Normes et Réglementations
- Maintenance et Entretien

Pourquoi le transport frigorifique est-il essentiel ?

1. Conservation des denrées périssables

- **Aliments** :
  - Les produits frais (viandes, poissons, fruits, légumes, produits laitiers) nécessitent une température contrôlée pour éviter la prolifération bactérienne et les réactions enzymatiques.
  - Exemple : La viande doit être maintenue entre **0°C et 4°C**, les surgelés à **-18°C**.
- **Médicaments et vaccins** :
  - Certains médicaments (insuline, anticorps) et vaccins (ex : Pfizer/BioNTech contre le COVID-19, stocké à **-70°C**) perdent leur efficacité sans une chaîne du froid stricte.
  - Une rupture de température peut rendre un lot entier inutilisable, menaçant des vies et entraînant des pertes financières.

Pourquoi le transport frigorifique est-il essentiel ?

2. Réduction du gaspillage alimentaire

Chiffres clés :

Selon la FAO, 30% de la nourriture mondiale est gaspillée, en partie à cause d'une logistique défaillante.

Le transport frigorifique permet d'allonger la durée de conservation des produits (ex : le lait passe de 6h à 7 jours à 4°C).

Impact économique :

Réduire le gaspillage signifie optimiser les coûts de production et de distribution.

Exemple : Les pays en développement perdent jusqu'à 50% de leurs récoltes faute de chaîne du froid.

Pourquoi le transport frigorifique est-il essentiel ?

3. Enjeux sanitaires et économiques

Santé publique :

Une température inadaptée favorise les intoxications alimentaires (ex : Salmonella, Listeria).

Pour les vaccins, une rupture de la chaîne du froid peut compromettre des campagnes de vaccination entières.

Économie globale :

Le marché mondial du transport frigorifique pèse 20 milliards de dollars (2023) et permet des échanges transcontinentaux (ex : exportation de mangues du Kenya vers l'Europe).

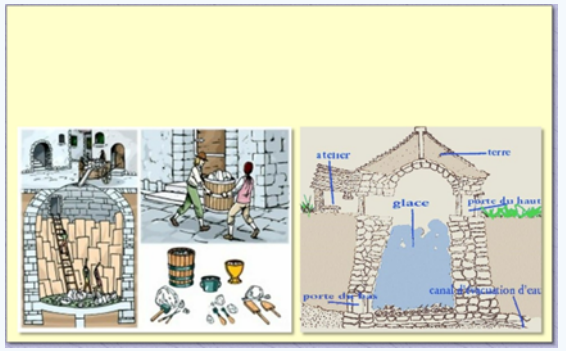
Les secteurs pharmaceutiques et agroalimentaires dépendent intégralement de cette technologie.

Historique

Origines et développements clés

1. *Précurseurs (avant le XIXe siècle)*

- **Méthodes naturelles** : Utilisation de glace naturelle transportée (ex. : blocs de glace pour le transport maritime), refroidissement par évaporation ou solutions salines.
- **Limitations** : Dépendance aux conditions climatiques, distances courtes, coûts élevés.



2. *Révolution industrielle (XIXe siècle)*

- **1820–1870** : Premiers systèmes mécaniques avec éther, ammoniac ou CO_2 (William Cullen, Charles Tellier).
- **1877** : Carl von Linde invente le réfrigérateur industriel, permettant un froid continu sans glace.
- **Transport ferroviaire** : Wagons frigorifiques pour la bière (1873) et la viande (1903), avec isolation en liège et glace.

3. *XXe siècle : Essor du transport routier et maritime*

- **1938** : Invention des unités frigorifiques mobiles par Thermo King (camions).
- **Années 1950–60** : Conteneurs maritimes réfrigérés ("reefers") avec systèmes intégrés, révolutionnant le commerce mondial.
- **Réglementation** : Accord ATP (1954) pour standardiser les engins frigorifiques internationaux.

Historique

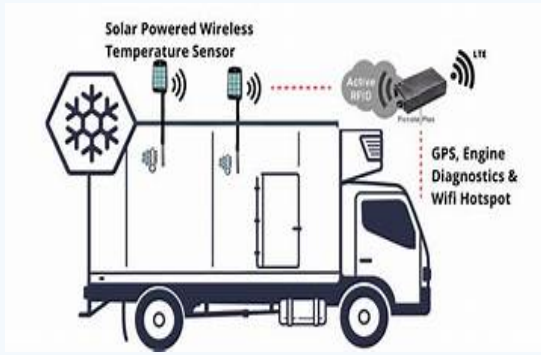
Innovations modernes et enjeux

1. Technologies clés

- **Contrôle intelligent** : Capteurs IoT pour surveiller température, humidité et traçabilité en temps réel.
- **Systèmes hybrides** : Réfrigération à énergie solaire ou hydrogène pour réduire l'empreinte carbone.
- **Réfrigérants écologiques** : Transition vers le propane (R290) ou le CO_2 pour remplacer les gaz à fort GWP.

2. Défis et solutions

- **Chaîne du froid intégrée** : Optimisation des entrepôts frigorifiques, transport intermodal (mer/rail/route).
- **Formation** : Programmes spécialisés pour les logisticiens et techniciens (ex. : cours OTTC en Afrique du Sud).
- **Durabilité** : Projets pilotes pour camions électriques et normes d'isolation renforcées (ex. : test chamber en Afrique du Sud).



3. Perspectives futures

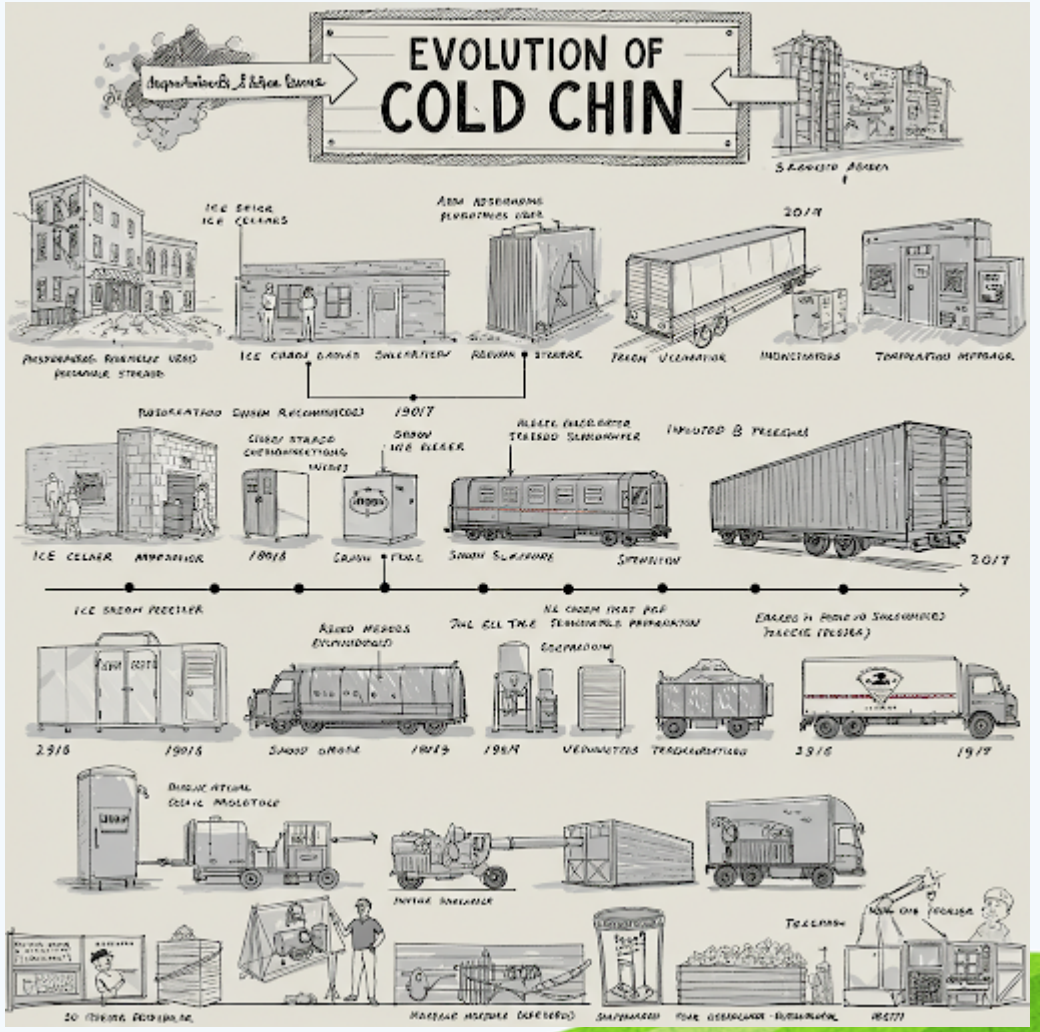
- **Conteneurs autonomes** : Systèmes auto-alimentés avec IA pour ajuster les paramètres durant le trajet.
- **Objectif zéro émission** : Adoption de carburants alternatifs et amélioration de l'efficacité énergétique globale

Historique

Synthèse historique (Optionnelle)
Évolution clé en un coup d'œil

Timeline :

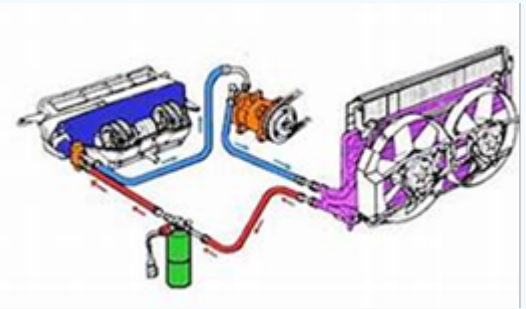
Avant 1800 : Glace naturelle et salage.
1834 : Machine de Perkins.
1870 : Wagons frigorifiques.
1940 : Réfrigération mobile.
1960 : Conteneurs maritimes.
2020s : IoT et durabilité.



Une histoire marquée par l'innovation technique et l'adaptation aux besoins mondiaux.

Techniques et Technologies

Types de systèmes de réfrigération
Les technologies au cœur du froid



1. Système mécanique (compression de vapeur) :
Principe : Cycle fermé avec compresseur, condenseur, détendeur et évaporateur.
Fluides : Frigorigènes (ex : R-452A pour réduire l'impact environnemental).
Avantages : Efficace pour le froid continu (ex : camions longue distance).

2. Système cryogénique :
Gaz liquéfiés : Azote liquide (-196°C) ou CO_2 (-78°C).
Usage : Refroidissement rapide (ex : transport de produits surgelés).
Avantages : Silencieux, zéro émission directe.

3. Système eutectique :
Principe : Accumulation de froid via des plaques contenant un mélange eau-sel (phase changeante).
Usage : Livraisons courtes (ex : livraisons urbaines de produits frais).

Techniques et Technologies

Matériels utilisés

Des équipements adaptés à chaque besoin

Types de véhicules :
Camions frigorifiques : Capacité de 2 à 20 tonnes, températures de -30°C à +12°C.
Conteneurs maritimes : Standards ISO (20' / 40'), autonomes en énergie (ex : Maersk).
Remorques multimodales : Compatibles rail-route pour réduire l'empreinte carbone.

Isolation :
Mousse polyuréthane : Épaisseur 60-100 mm, conductivité thermique ≤ 0.025 W/m·K.
Panneaux VIP (Vacuum Insulated Panels) : Isolation 5x supérieure à la mousse, utilisés pour les vaccins (-70°C).

Techniques et Technologies

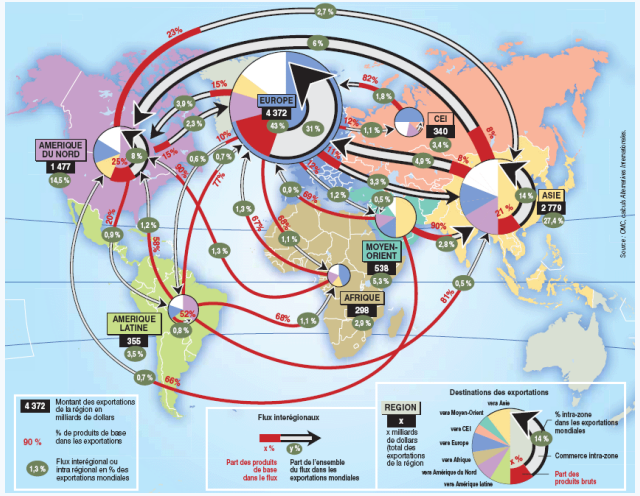
Contrôle de température
Précision et innovation technologique

Capteurs IoT :
Surveillance en temps réel via réseaux LTE ou satellite (ex : Monnit, Controlant).
Alertes en cas de dépassement de seuils (SMS, e-mail).
Blockchain : Traçabilité immuable (ex : suivi des vaccins Pfizer).

Automatisation :
Systèmes autorégulateurs (ex : Danfoss ADAP-KOOL).
Ajustement dynamique selon la température extérieure (ex : +35°C → renforcement du froid).

Techniques et Technologies

Cas d'usage
Du champ à l'assiette, du labo au patient



Alimentation :
Viande : Chaîne à 0-4°C (évite la croissance de E. coli).
Produits laitiers : Transport à 4°C pour préserver les probiotiques.
Fruits exotiques : Contrôle de l'éthylène (ex : bananes à 13°C).

Pharmacie :
Vaccins : Logistique à -70°C (Pfizer) ou 2-8°C (AstraZeneca).
Médicaments biologiques : Transport sous azote liquide (ex : thérapies géniques).

Innovations clés (Optionnelle)
Vers un froid durable et intelligent
Réfrigérants naturels : CO_2 transcritique (réduit l'empreinte carbone de 30%).
Énergies renouvelables : Camions électriques équipés de batteries lithium-ion (ex : Tesla Semi).
IA prédictive : Anticipe les pannes (ex : analyse des vibrations du compresseur).

Classification

Par système de contrôle de température

Camion isotherme :

Pas de groupe frigorifique.
Parois isolantes pour limiter les échanges thermiques.
Idéal pour des trajets courts (<80 km) ou le maintien temporaire de la température (ex. : fruits et légumes).

Camion frigorifique :

Équipé d'un groupe frigorifique mécanique pour générer du froid.
Températures ajustables (ex. : entre -20°C et +12°C).
Utilisé pour les longues distances ou les produits surgelés.

Camion réfrigérant :

Système de froid non mécanique (ex. : glace carbonique).
Permet de baisser la température sans moteur.

Camion calorifique :

Maintient une température élevée (jusqu'à +20°C).
Utilisé pour des produits sensibles à la chaleur (ex. : médicaments).

Classification

Par capacité et taille

Utilitaires légers :
Poids Total en Charge (PTC) ≤3,5 tonnes.
Volume : 1,5 à 9 m³.
Ex. : fourgonnettes pour PME ou livraisons locales.

Camions frigorifiques :
PTC ≤7 tonnes.
Volume : 8 à 17 m³.
Adapté aux transports régionaux (ex. : produits laitiers).

Poids lourds :
PTC ≤26 tonnes.
Volume : 26 à 50 m³.
Utilisés pour le transport de gros volumes sur longues distances.

Semi-remorques :
PTC ≤38 tonnes.
Volume jusqu'à 85 m³.
Idéal pour le fret international ou les livraisons massives (ex. : surgelés).

Classification

Par configuration de la caisse

Mono-température :
Une seule zone de température dans la caisse.
Ex. : transport de glaces (-18°C).

Multi-températures :
Cloisons pour créer plusieurs compartiments à températures distinctes (ex. : +4°C pour la viande et -18°C pour les surgelés).
Représente 30% des ventes en France

Spécialisées :
Porte-viandes : équipées de penderies pour suspendre les quartiers.
Spéciale fleurs : étagères ventilées pour préserver les fleurs.
Caisses pharmaceutiques : contrôle strict de l'hygrométrie.

Classification

Classes de température (ATP)

Les véhicules sont homologués selon l'Accord sur le Transport des denrées Périssables (ATP) :

Classe A : 0°C à +12°C (produits frais).

Classe B : -10°C à +12°C (mixte).

Classe C : -20°C à +12°C (surgelés).

Classes D, E, F : températures inférieures à 0°C, -10°C ou -20°C.

- Crèmes glacées - 20 °C
- Poissons, mollusques et crustacés congelés ou surgelés - 18 °C
- Produits surgelés - 18 °C
- Beurre congelé - 10 °C
- Autres produits congelés -12 °C
- Abats rouges +3 °C
- Beurre +6 °C
- Gibier +4 °C
- Lait en citerne +4 °C
- Lait industriel +6 °C
- Produits laitiers réfrigérés +4 °C
- Viande et produits carnés (sauf abats rouges) +7 °C
- Volailles et lapins +4 °C

Classification

Autres spécificités

Systèmes d'énergie :

Groupes frigorifiques alimentés par moteur diesel, batterie, ou secteur
Innovations : CO_2 liquide ou piles à combustible pour réduire l'impact environnemental .

Réglementation :

Contrôles ATP obligatoires à 6, 9 et 12 ans
Marquage bleu "FRCX" indiquant la classe et la validité

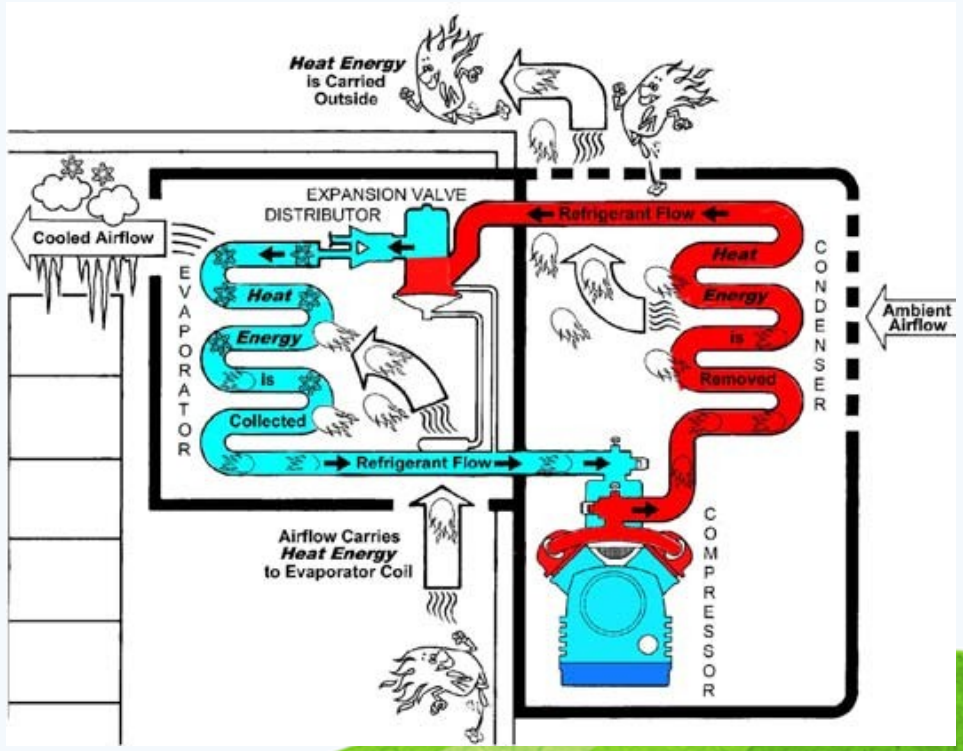
Principe de fonctionnement

Système à compression mécanique (le plus courant)

Principe : Cycle thermodynamique basé sur la compression et la détente d'un fluide frigorigène

Composants clés :

- ❑ **Compresseur** : Alimenté par le moteur diesel ou une batterie.
- ❑ **Condenseur** : Dissipe la chaleur vers l'extérieur.
- ❑ **Évaporateur** : Absorbe la chaleur à l'intérieur de la caisse.
- ❑ **Fluide frigorigène** : R-452A (écologique) ou ammoniac (efficace mais toxique).



Fonctionnement :

- ❑ **Le fluide est comprimé (gaz chaud).**
- ❑ **Il passe dans le condenseur pour devenir liquide.**
- ❑ **Détente via un détendeur → refroidissement brutal.**
- ❑ **L'évaporateur capte la chaleur résiduelle de la caisse.**

Avantages :

- ❑ **Températures précises (-30°C à +20°C).**
- ❑ **Autonomie élevée (fonctionne même moteur éteint)**.

Inconvénients :

- ❑ **Coût énergétique élevé.**

Principe de fonctionnement

Système cryogénique (azote ou CO_2 liquide)

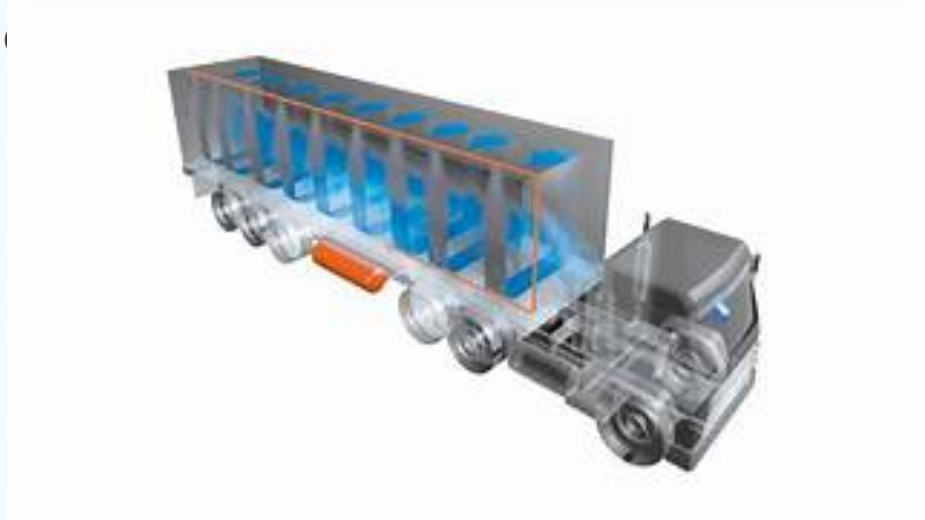
Principe : Utilisation de gaz liquéfiés à très basse température pour générer du froid.

Composants clés :

- ❑ Réservoir isolé (azote liquide à -196°C ou CO_2 à -78°C).
- ❑ Système de vaporisation contrôlée.

Fonctionnement :

- ❑ Le gaz est vaporisé dans la caisse.
- ❑ La phase liquide → gaz absorbe la chaleur (refroidissement instantan



Avantages :

- ❑ Silencieux (pas de compresseur).
- ❑ Écologique (aucune émission directe).

Inconvénients :

- ❑ Autonomie limitée (dépend du réservoir).
- ❑ Coût de recharge élevé.

Principe de fonctionnement

Système à plaques eutectiques

Principe : Stockage de froid via des plaques contenant un mélange eutectique (eau + sels).

Composants :

- ❑ Plaques remplies de solution eutectique (phase changeante à -20°C).
- ❑ Groupe frigorifique pour recharger les plaques (la nuit, par exemple).

Fonctionnement :

- ❑ Les plaques sont "chargées" en froid via un groupe externe.
- ❑ Pendant le transport, elles restituent le froid par fusion lente.

Avantages :

- ❑ Aucune consommation d'énergie pendant le transport.
- ❑ Idéal pour les zones sensibles au bruit (livraisons nocturnes).

Inconvénients :

- ❑ Autonomie limitée à 12-24 heures.
- ❑ Poids supplémentaire.

Principe de fonctionnement

Système électrique à batterie

Principe : Groupe frigorifique alimenté par des batteries lithium-ion.

Composants *:*

- ❑ Moteur électrique.
- ❑ Batterie haute capacité (100-200 kWh).
- ❑ Système de recharge rapide.

Fonctionnement *:*

- ❑ Le compresseur est entraîné par un moteur électrique (pas de diesel).
- ❑ Batterie rechargeable sur secteur ou via le freinage régénératif.

Avantages *:*

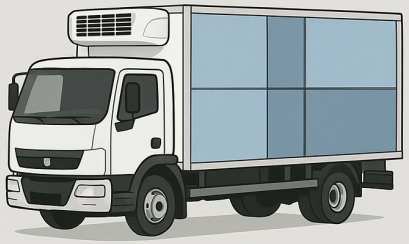
- ❑ Zéro émission (idéal pour les centres-villes).
- ❑ Coûts d'entretien réduits.

Inconvénients *:*

- ❑ Autonomie limitée (8-10 heures en continu).
- ❑ Investissement initial élevé.

Caisse mono température

Caisse à différents compartiments de températures



Principe de fonctionnement

Système hybride (diesel + électrique)

Principe : Combinaison d'un groupe frigorifique diesel et d'une batterie.
Fonctionnement *:*

- ❑ Mode électrique pour les arrêts (moteur coupé).
- ❑ Mode diesel pendant la conduite.

Avantages *:*

- ❑ Réduction de 30% de la consommation de carburant.
- ❑ Conforme aux normes antipollution (ex. : zones ZFE).

Principe de fonctionnement

Système à absorption (énergie thermique)

Principe *:* Utilisation de chaleur (gaz ou eau chaude) pour générer du froid.

Composants *:*

- ❑ Solution ammoniac/eau.
- ❑ Générateur de chaleur (ex. : pot d'échappement).

Fonctionnement *:*

- ❑ La chaleur sépare l'ammoniac (gaz) de l'eau.
- ❑ L'ammoniac se condense, puis se détend pour produire du froid.

Avantages *:*

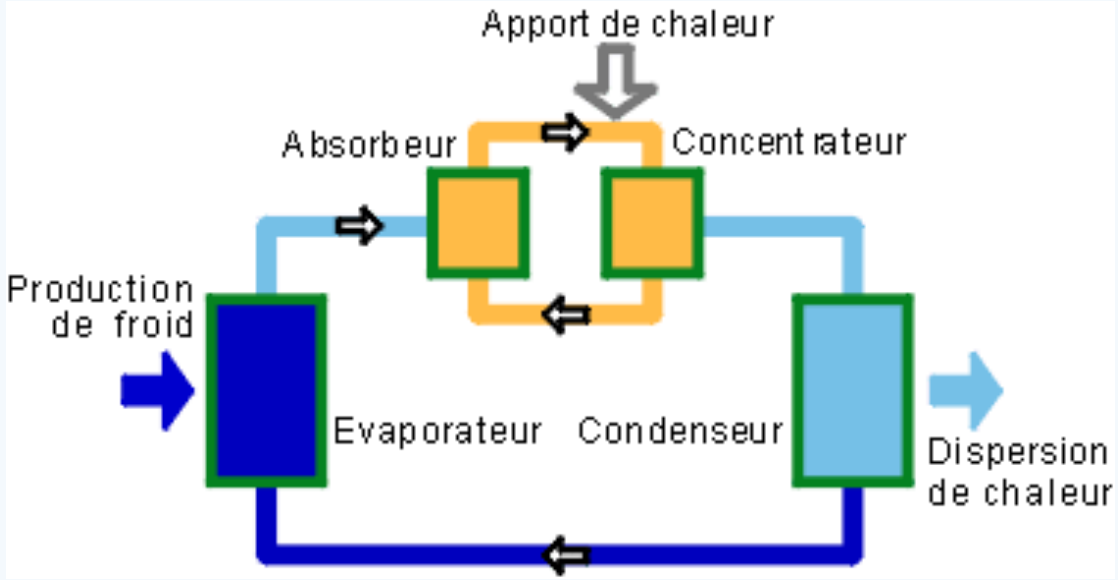
- ❑ Faible consommation électrique.
- ❑ Adapté aux longs trajets.

Inconvénients *:*

- ❑ Rendement inférieur aux systèmes à compression.
- ❑ Encombrement important.

Applications *:*

- ❑ Camions-citernes pour produits chimiques sensibles.



Principe de fonctionnement

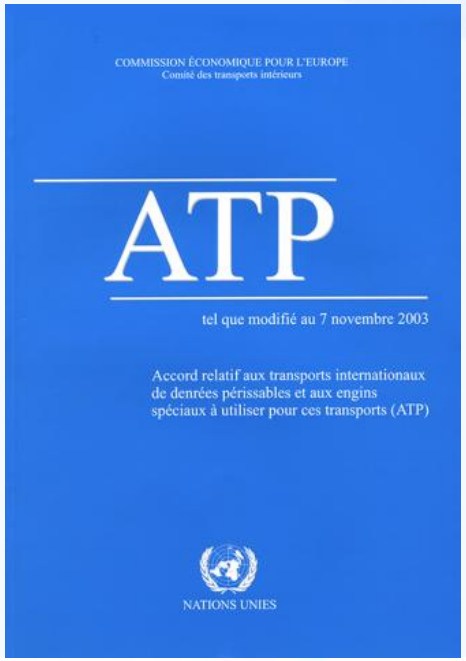
Comparatif des systèmes

Type	Température Min.	Autonomie	Coût	Durabilité
Compression	-30°C	Illimitée	Élevé	Moyenne
Cryogénique	-60°C	8-12h	Très élevé	Haute
Plaques eutectiques	-25°C	12-24h	Modéré	Moyenne
Électrique	-20°C	8-10h	Très élevé	Haute

Normes et Réglementations

Normes internationales
Des cadres globaux pour garantir la sécurité

Accord ATP (Transport des Denrées Périssables) :
Entré en vigueur en 1970, révisé régulièrement (dernière version : 2023).
Définit les normes techniques des véhicules (isolation, équipements).
Classes de température : A (-20°C à +12°C), B (≤ -10°C), etc.



HACCP (Analyse des Dangers et Maîtrise des Points Critiques) :
Méthode préventive pour identifier les risques (ex : rupture de froid).
Obligatoire dans l'UE et aux États-Unis pour les denrées périssables.

Exemple : Contrôle des températures toutes les 15 minutes (HACCP) + certification ATP pour les camions.

Normes et Réglementations

Règles régionales
Adaptations locales, exigences universelles

Union Européenne :

Règlement (CE) n°852/2004 : Intègre HACCP et impose des traçabilités renforcées (ex : journal de bord numérique).
Directive 2021/382 : Contrôle des allergènes et gestion des températures.

États-Unis (FDA) :

FSMA (Food Safety Modernization Act) : Principe « prévenir plutôt que guérir ».
Guidelines for Pharma : Vaccins stockés à 2-8°C (ex : Moderna), avec tolérance de ±3°C pendant 24h.

Normes et Réglementations

Certifications
S'engager pour l'excellence

ISO 22000 :

Norme internationale pour les systèmes de management de la sécurité alimentaire.
Exige une approche « de la ferme à la fourchette ».
Adoptée par 35% des logisticiens frigorifiques mondiaux (source : ISO Survey 2022).

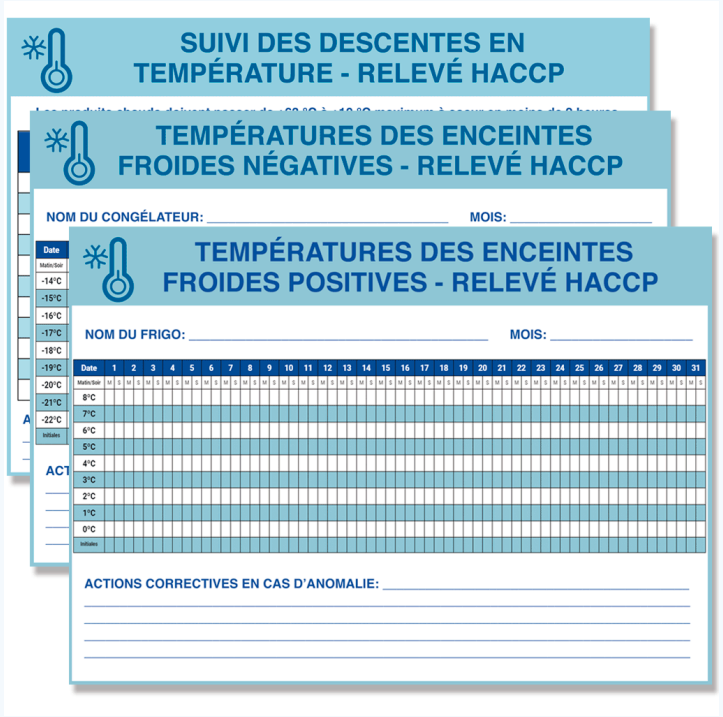
Bonnes Pratiques de Distribution (BPD) :

Garantit l'intégrité des produits pharmaceutiques (ex : pas de rupture de froid).
Audit annuel obligatoire (ex : contrôles aléatoires en entrepôt).

Normes et Réglementations

Contrôles et sanctions
Vigilance et conséquences

Inspections douanières :
Vérification des certificats ATP, relevés de température, étalonnage des capteurs.
Exemple : 10% des camions contrôlés à l'importation dans l'UE (rapport 2023).
Sanctions :
Amendes jusqu'à 500 000 € (UE) ou 1 million $ (FDA) pour non-conformité.
Suspension de licence (ex : entreprise pharmaceutique en Inde en 2022).



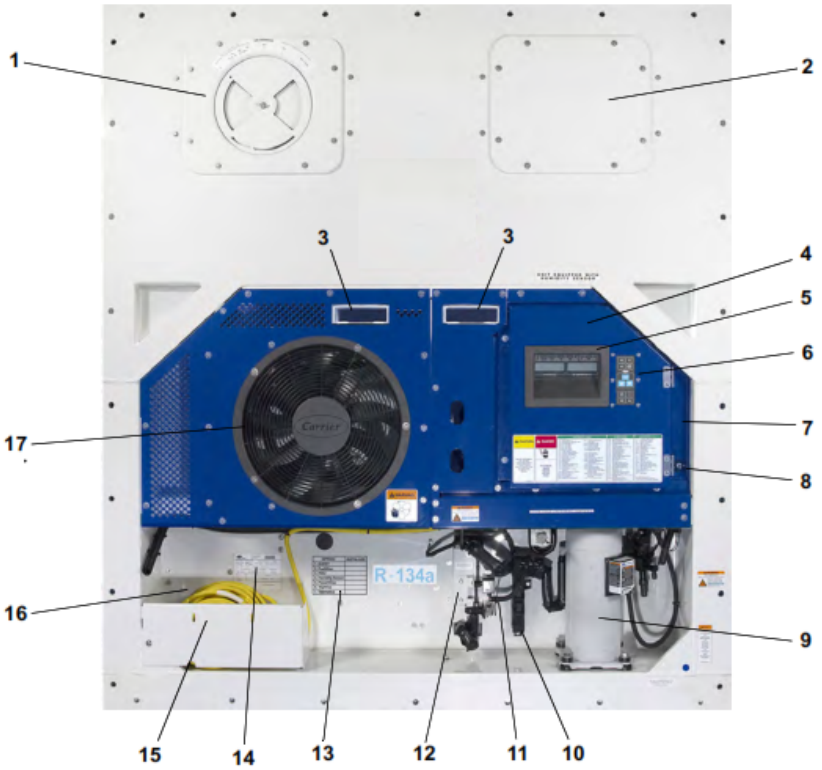
Étude de cas (Optionnelle)
Scandale de la viande avariée (Brésil, 2017)

Faits : Transport sans ATP → viande contaminée exportée vers l'UE et la Chine.
Conséquences :
Perte de 1,5 milliard $ pour le secteur brésilien.
Renforcement des contrôles ATP dans les ports européens.

Maintenance et Entretien

1. Systèmes mécaniques à compression (le plus courant)

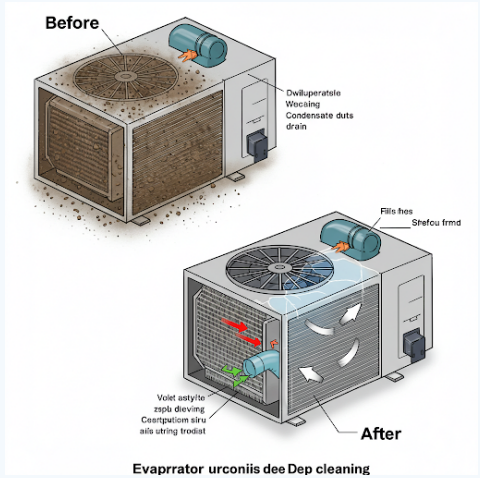
- **Compresseur :**
  - Vérifier régulièrement le niveau d'huile et la tension des courroies.
  - Nettoyer les filtres à air et contrôler les vibrations anormales.
- **Condenseur :**
  - Dépoussiérer les ailettes (nettoyage à l'air comprimé ou au jet d'eau douce).
  - Vérifier l'absence de fuites de réfrigérant.
- **Évaporateur :**
  - Déglacer régulièrement en cas de givrage excessif.
  - Inspecter les drains pour éviter les obstructions.
- **Réfrigérant :**
  - Contrôler le niveau et la pression (recharger si nécessaire avec un gaz conforme aux normes environnementales, ex. R-452A, R-744).
  - Rechercher les fuites avec un détecteur d'halogène ou UV.
- **Thermostat et capteurs :**
  - Calibrer pour garantir une température stable (vérifier les écarts avec un thermomètre externe).
  - Remplacer les piles des systèmes sans fil.



1) Panneau supérieur de ventilation pour le renouvellement d'air frais. À l'intérieur se trouvent : Ventilateur d'évaporateur n ° 2, capteur de température de dégivrage (DTS)
2) Panneau d'accès. À l'intérieur se trouvent : Ventilateur d'évaporateur n°1, vanne de détente électronique (EEV), thermostat de terminaison de la chaleur (HTT)
3) Prises pour élévateurs à fourche
4) Panneau de commande
5) Écran de l'appareil
6) Clavier
7) Réceptacle de surveillance à distance (si équipé)
8) Interrupteur marche-arrêt (ST)
9) Compresseur
10) Panneau d'accès pour capteur de température de soufflage (STS) / capteur d'enregistrement de soufflage (SRS)
11) Sonde de température ambiante (AMBS)
12) Échangeur de chaleur de l'économiseur
13) Étiquette d'options
14) Plaque signalétique de l'unité
15) Câbles et prises électriques
16) Emplacement de l'autotransformateur (si équipé)
17) Hélice condenseur

Maintenance et Entretien

2. Systèmes cryogéniques (CO_2 ou azote liquide)



Evaprrator urconiis dee Dep cleaning

- **Réservoirs cryogéniques :**

Inspecter les parois pour corrosion ou microfissures.
Tester les vannes de sécurité et les joints d'étanchéité.

- **Sécurité :**

Former les opérateurs aux risques de brûlures et d'asphyxie.
Vérifier les détecteurs de fuite de gaz dans la zone de chargement.

- **Recharge :**

Utiliser des fournisseurs certifiés pour le remplissage des fluides cryogéniques.
Stocker les réservoirs dans des zones ventilées et à l'abri de la chaleur.

Maintenance et Entretien

3. Systèmes eutectiques (plaques à accumulation de froid)

❑ **Plaques eutectiques :**

- Vérifier l'intégrité des plaques (absence de fissures ou corrosion).
- Contrôler la concentration de la solution eutectique (ajuster si nécessaire).

❑ **Recharge :**

- Brancher le système sur secteur pendant 8 à 12 heures pour une congélation complète.
- S'assurer que les résistances électriques fonctionnent correctement.

❑ **Isolation :**

- Inspecter les joints entre les plaques et la structure du camion.

Maintenance et Entretien

4. Systèmes électriques (batteries ou hybrides)

❑ **Batteries :**

- Vérifier l'autonomie et les cycles de charge/décharge.
- Nettoyer les bornes pour éviter l'oxydation.

❑ **Groupe électrogène :**

- Changer l'huile et les filtres selon les intervalles recommandés.
- Tester le démarrage en conditions réelles.

❑ **Câblage :**

- Inspecter l'isolation des câbles haute tension pour éviter les courts-circuits.

Maintenance et Entretien

Pratiques Générales d'Entretien

- **Inspection quotidienne :**
Contrôler les températures avant et après chargement.
Vérifier l'étanchéité des portes (test du « joint de porte » avec une feuille de papier).

- **Nettoyage :**
Désinfecter l'intérieur du camion avec des produits non corrosifs.
Éviter l'accumulation de glace ou d'eau stagnante.

- **Documentation :**
Tenir un carnet d'entretien avec dates de révisions, niveaux de fluide, et interventions.
Enregistrer les températures pour traçabilité (exigences HACCP/ISO).

Tendances clés et innovations technologiques

Durabilité
Des véhicules verts pour un froid responsable

Automatisation des entrepôts :
Robots autonomes pour le chargement (ex : AutoStore).
Gains : +25% de productivité, -15% de gaspillage (McKinsey).

Blockchain et traçabilité
Transparence et confiance numérique

Fonctionnement :
Chaque étape (production, transport, livraison) est enregistrée dans un registre infalsifiable.
Exemple : Walmart trace les mangues en 2 secondes vs 7 jours auparavant.

Applications :
Pharma : Garantir l'intégrité des vaccins (ex : Moderna avec SAP).
Alimentation : Identifier les sources de contamination en temps réel..

« Le froid de demain sera intelligent, ou ne sera pas. »

شكرا

Merci

Thanks

Gracias

Obrigado