



Machines Frigorifiques & Systèmes de Climatisation



Principes thermodynamiques, cycles de réfrigération et systèmes de climatisation

Cours destiné aux étudiants en 2^e année d'école d'ingénieur



Darrell MOROU
Chercheur



Alexander PALANGA
Chercheur

Date du cours : 01 décembre 2025

Classification des Machines Thermiques



Théorie de la Classification



Machines Motrices

Production d'énergie mécanique sur base d'autres formes d'énergie



Machines Réceptrices (Réfrigérantes)

Absorption de chaleur du milieu froid pour échanger avec le chaud, consommant travail mécanique



Machine Réfrigérante

Séparation directe entre milieu froid et chauffant

Les machines frigorifiques (réfrigérantes) sont un sous-ensemble des machines réceptrices, qui extraient du travail mécanique et se comportent comme des pompes à chaleur réseau.

Applications Typiques



Turbines à Vapor
Extraction d'énergie thermique



Radiateurs
Récepteurs thermiques



Frigos & Climats
Extraction de chaleur



Éléments chauffants
Compression énergétique thermique

Machine à Chaleur (Carnot)

La machine idéale nécessitant l'injection de chaleur à haute température pour produire un travail mécanique considérant la machine réfrigérante comme un processus réversible.

Fondements Thermodynamiques



Premier Principe : Conservation de l'Énergie

Pour tout système fermé, il existe une fonction d'état, appelée énergie interne dont les variations sont égales à la somme du travail et de la chaleur échangés avec le milieu extérieur.

$$\Delta U = W + Q$$

- ΔU : variation de l'énergie interne
- W : travail échangé
- Q : chaleur échangée

Fonctions d'État

Grandeurs qui dépendent seulement de l'état du système.

- **Enthalpie (H)** : Énergie totale incluant l'énergie interne et le produit pression-volume
- **Entropie (S)** : Mesure le désordre ou la dispersion de l'énergie
- **Exergie (E_x)** : Énergie qui peut être convertie en travail utile



Deuxième Principe : Irréversibilité et Entropie

Les processus réels sont irréversibles et l'entropie d'un système augmente.

$$\Delta S \geq 0$$

Pour un cycle, la variation d'entropie est nulle, mais l'entropie créée par les irréversibilités est toujours positive.

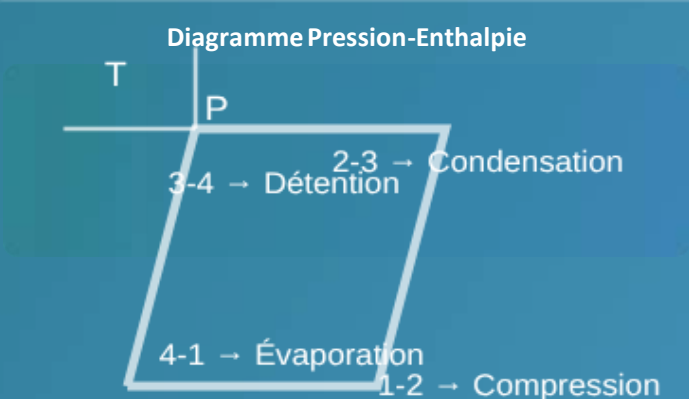
Rendement de Carnot pour Machine Réceptrice

Limite théorique d'efficacité pour une machine fonctionnant entre deux sources de chaleur.

$$\text{COP}_{\text{Carnot}} = T_f / (T_c - T_f)$$

- T_f : température de la source froide (en Kelvin)
- T_c : température de la source chaude (en Kelvin)

Ce rendement est une référence pour évaluer la performance des systèmes réels.



Cycle des Quatre Processus

1 Compression
adiabatique

État gazeux →
Pression/Temp.

2 Condensation
isobare

Vapeur → Liquide
chaud

3 Détente
isenthalpique

Liquide → Mélange →
Froid

4 Évaporation
isobare

Liquide → Vapeur →
Froid

Processus Cycliques

- Compression 1-2
- Condensation 2-3
- Détente 3-4
- Évaporation 4-1



Concepts Clés

Première Loi

Rappel thermique entre énergie, travail et transfert thermique

Condenseur

Transfert de chaleur vers milieu ambiant, refroidissement

Deuxième Loi

Amélioration directe de rendement thermodynamique

Rendement

Rapport de la puissance utile utilisable au Wooot

° Évaporation
Phase frigorifique, milieu à refroidir, phase isotherme

🔥 Détente
Réduction pression-isenthalpique, expansion liquide-vapeur

➡ Compression
Transforme vapeur basse pression en vapeur haute pression

Basse

Liquide

Haute



1. Compresseur



Fonction: Aspire et compresse fluide vapeur basse pression



2. Condenseur



Fonction: Vapeur haute température → liquide condensé



3. Détendeur/Détendeur



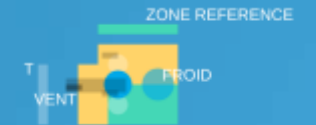
Fonction: Réduction pression liquide → mélange liquide-vapeur



4. Évaporateur



Fonction: Liquide volatil absorbe chaleur ambiante



Coefficients de Performance (COP)



COP Frigorifique (COP_f)

Mesure l'efficacité d'une machine frigorifique.

$$\text{COP}_f = Q_f / W$$

- Q_f : chaleur extraite de la source froide
- W : travail mécanique fourni



COP Pompe à Chaleur (COP_{pompe})

Mesure l'efficacité d'une pompe à chaleur.

$$\text{COP}_{\text{pompe}} = -Q_c / W$$

- Q_c : chaleur fournie à la source chaude
- W : travail mécanique fourni

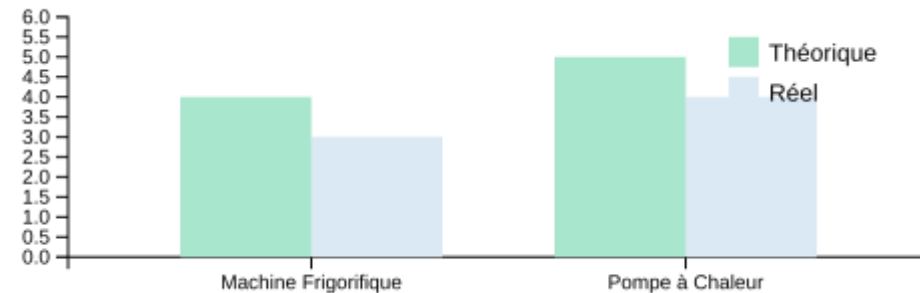
Comparaison avec le COP de Carnot

$$\text{COP}_{\text{Carnot}} = T_f / (T_c - T_f)$$

Pour une machine frigorifique

$$\text{COP}_{\text{Carnot, PAC}} = T_c / (T_c - T_f)$$

Pour une pompe à chaleur



i Le COP réel est toujours inférieur au COP de Carnot en raison des irréversibilités.

Fluides Frigorigènes

Évolution Historique

CFC (Chlorofluorocarbones)

R11, R12

☁️ ODP: Élevé 🔥 PRG: Élevé

Interdits en raison de leur impact sur la couche d'ozone

HCFC (Hydrochlorofluorocarbones)

R22

☁️ ODP: Moyen 🔥 PRG: Moyen

Interdits depuis 2015 (sauf dérogation)

HFC (Hydrofluorocarbones)

R134a, R410A, R407C

☁️ ODP: Nul 🔥 PRG: Élevé

Disparition progressive (contribuent à l'effet de serre)

HFO et Fluides Naturels

R1234yf, R1234ze, CO₂, NH₃

☁️ ODP: Nul 🔥 PRG: Très faible

Alternatives à faible impact environnemental

Impact Environnemental



PRG (Potentiel de Réchauffement Global)

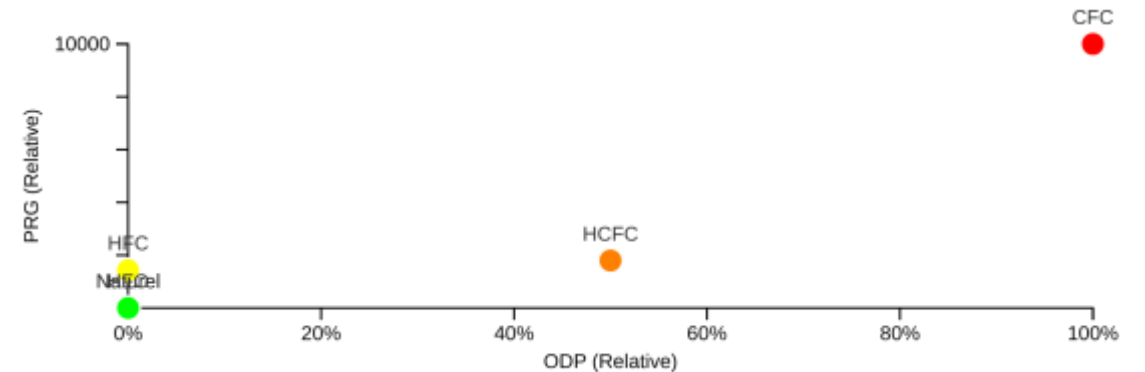
Mesure de l'impact sur le réchauffement climatique. Les HFC ont un PRG élevé, les HFO et fluides naturels un PRG très faible.



ODP (Ozone Depletion Potential)

Mesure de la capacité à détruire la couche d'ozone. Les CFC et HCFC ont un ODP élevé, les HFC, HFO et fluides naturels un ODP nul.

Comparaison des PRG et ODP



Cycles Réels vs Théoriques

Irréversibilités dans les cycles réels

Pertes de charge



Frottements dans les tuyauteries et composants causant des chutes de pression



Surchauffe à l'évaporateur

Le fluide est surchauffé pour protéger le compresseur des "coups de liquide"



Sous-refroidissement au condenseur

Le fluide est sous-refroidi pour garantir qu'il est entièrement liquide avant la détente



Échanges de chaleur non idéaux

Transferts thermiques non parfaitement isothermes ou adiabatiques



Détente irréversible

La détente isenthalpique ne produit pas de travail utile, contrairement à une détente isentropique

Rendement isentropique du compresseur



Cycle théorique
Compression isentropique
Transformations réversibles



≠



Cycle réel
Compression non-isentropique
Transformations irréversibles

Formule du rendement isentropique

$$\eta_s = (h_{2s} - h_1) / (h_2 - h_1)$$

h_1 : enthalpie à l'entrée du compresseur

h_2 : enthalpie à la sortie du compresseur réel

h_{2s} : enthalpie à la sortie d'un compresseur isentropique idéal

Impact sur les performances

Les irréversibilités entraînent une diminution du COP réel par rapport au COP théorique de Carnot, augmentant la consommation d'énergie pour un même effet frigorifique.

Systemes de Climatisation Intérieure

Les systèmes de climatisation intérieure visent à contrôler la température, l'humidité, la pureté et la distribution de l'air dans un espace clos.

❄️ Climatiseurs Split

Les systèmes les plus courants pour les applications résidentielles et petit tertiaire.

🏠 Unité intérieure

Évaporateur + ventilateur. Absorbe la chaleur de l'air ambiant.

🏢 Unité extérieure

Compresseur + condenseur. Rejette la chaleur vers l'environnement.



Évaporateur et filtres d'un climatiseur intérieur

🏢 Systèmes Centralisés

Utilisés pour les grands bâtiments (bureaux, centres commerciaux, hôpitaux).

🌀 Unité de traitement d'air (CTA)

Conditionne l'air (filtration, chauffage, refroidissement, humidification/déshumidification).

🏗️ Réseau de gaines

Distribution de l'air traité dans les différentes zones du bâtiment.

🔧 Régulation par zone

Thermostats et registres motorisés pour contrôler la température et le débit d'air.

Les systèmes de climatisation intérieure peuvent fonctionner en mode chauffage ou en mode refroidissement.

Systemes de Climatisation Extérieure



Tours de Refroidissement

- Évaporation partielle de l'eau pour refroidissement
- Rejet de chaleur latente
- Applications industrielles et commerciales



Dry Coolers

- Échangeur air/fluide sans évaporation
- Fonctionnement plus stable en fonction de l'humidité ambiante
- Moins de consommation d'eau



GroupeS Frigorifiques Industriels

- Froid positif et négatif pour applications industrielles
- Systèmes robustes pour des conditions ambiantes extrêmes
- Haute puissance de refroidissement



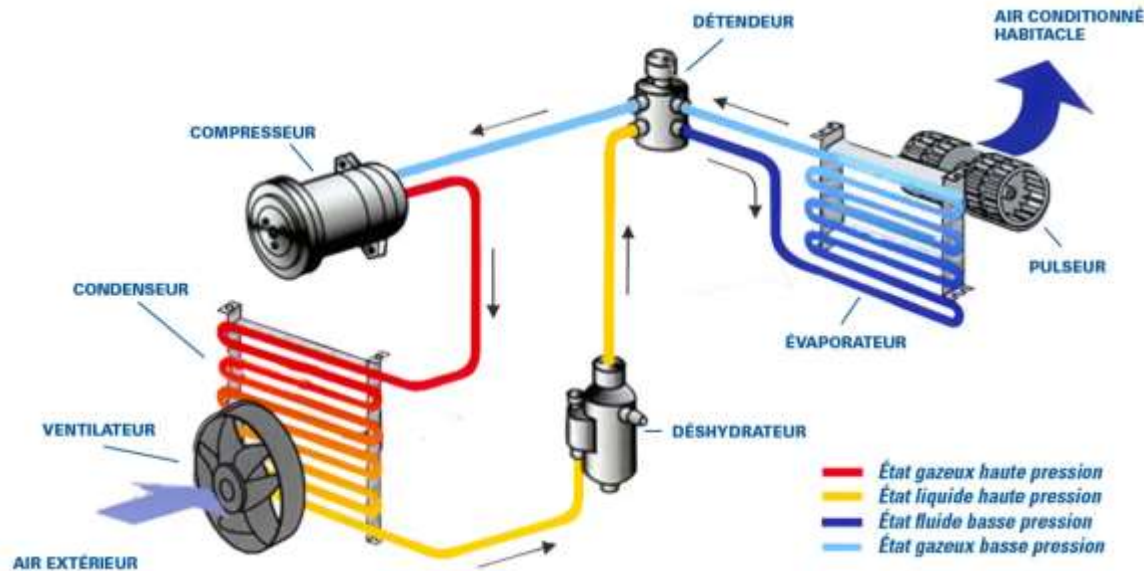
Échangeurs de chaleur industriels (dry coolers)

Avantages des Systèmes Extérieurs

- ✓ Capacité de refroidissement élevée
- ✓ Stabilité thermique indépendante de l'intérieur
- ✓ Moins d'odeurs et de vibrations à l'intérieur
- ✓ Facilité d'entretien et de maintenance

Climatiseurs Automobiles - Principe de Fonctionnement

Le principe de fonctionnement du climatiseur automobile repose sur le cycle frigorifique à compression de vapeur, adapté aux contraintes spécifiques d'une même d'automobile avec une puissance faible, des dimensions réduites et l'intégration avec le moteur.



Principe de cycle frigorifique dans un véhicule:

1. Compression 2. Condensation 3. Détente 4. Évaporation

⚡ Système d'alimentation éolomécanique

Le compresseur est actionné par le moteur via une courroie entraîneuse ou un support hybride

↔ Régulation par retour carbogène

La pression d'entrée dépend de la température et du taux d'humidité du gaz échangeant de chaleur

⚙️ Contrôle intégré

Acquisition du rendement et de la température par intercontinental de divers composants et pointes critiques

i Principe universel du cycle frigorifique

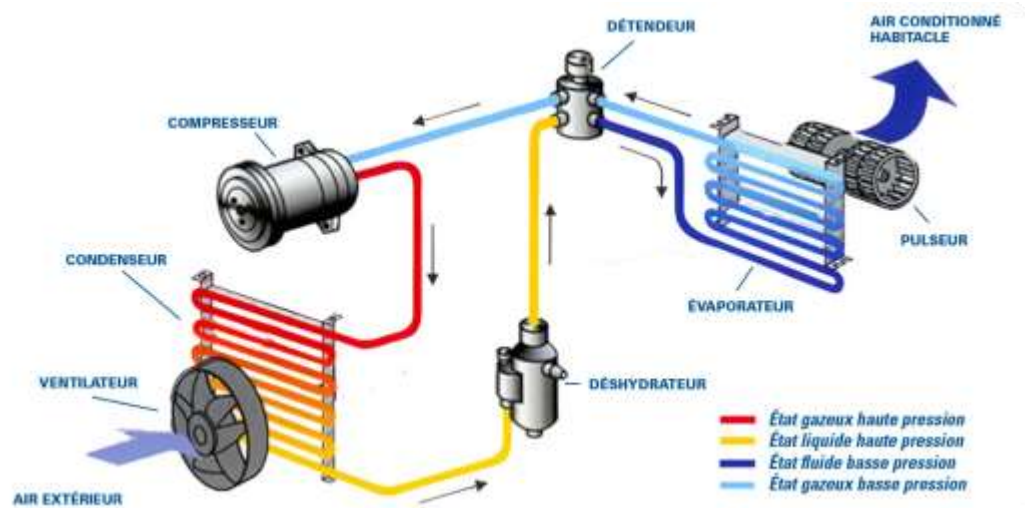
- ✓ La vapeur basse pression est aspirée et compressée dans le compresseur
- ✓ La vapeur haute pression se condense en cédant de la chaleur à l'extérieur
- ✓ Le liquide haute pression traverse un détendeur où il détend partiellement
- ✓ Le mélange liquide-vapeur absorbe la chaleur de l'air à renouveler et se désorbe

Composants des Climatiseurs Automobiles

Les composants principaux d'un système de climatisation automobile sont adaptés aux contraintes mécaniques, à l'intégration avec le moteur, et utilisent des fluides spécifiques par rapport aux systèmes domestiques.

⚙️ Clés de l'application automobile

- ✓ Puissance plus faible (1-2 CV), économie énergétique
- ✓ Intégration compacte avec moteur et système refroidissement
- ✓ Compresseurs compacts et échangeurs optimisés



Composants principaux

1 Compresseur

Absorbe la vapeur basse pression et la compresse pour maintenir l'efficacité du cycle frigorifique au sein du véhicule.

2 Condenseur

Rayonne la chaleur avec air extérieur et transforme le réfrigérant haute pression en liquide haute température.

3 Détendeur / VAG (Valve d'adaptation)

Contrôle le débit de réfrigérant passant de haute à basse pression pour optimiser son apport thermique.

Échangeur géothermique

4

Échange la chaleur entre l'air à traiter et le réfrigérant dans des configurations compactes filtrantes.

Climatiseurs Automobiles : Innovations et Particularités

Particularités techniques des véhicules



Systèmes d'AC électriques

Énergisés par l'énergie électrique au lieu de chaleur mécanique, notamment dans les véhicules électriques hybrides et autonomes.



Changement des fluides

Passage des fluides à **R134a**, **R744** et autres alternatives à faible facteur GWP pour réglementation.



Intégration moto-réfrigérant

Coopération avec le moteur pour optimiser l'énergie, découpler le système d'accompagnement aux variations de température.



Ventilateurs durables

Deux ventilateurs complémentaires : pour le chauffage/répartition et pour le refroidissement moteur pour éviter la surchauffe.

Innovations récentes et tendances

Technologie VLT (Ventilation autonome)

Nouvelle génération

Système qui peut fonctionner sans alimentation électrique principale, permettant de maintenir la température dans le véhicule même en cas de batterie vide.

Innovation disponible dans les véhicules électriques de construction récente

Cycle thermodynamique modulé

Optimisée

Adaptation du cycle aux exigences de chaque situation de conduite et consommation énergétique réduite.

R718

R290

R365mfc

Systèmes d'évacuation puissant

Réfléchir

Intégration adaptée fluidique permettant de gérer la variabilité des entrées au maintien thermique optimal.

■ Implémentation partielle dans GM et Tesla (2024)

■ RFC prévue : fin 2025

Système de récupération énergétique

Écoconçu

Intégration du récupérateur de chaleur dans le captage de composants extérieurs pour maintenir un confort optimal.

Prototype testé avec succès dans 8 arrêts commerciaux Leiden de 2024

Régulation et Optimisation

Les stratégies de régulation et d'optimisation permettent d'adapter le fonctionnement des systèmes aux besoins réels, réduisant la consommation énergétique et améliorant le confort.



Thermostats et Sondes

- ✓ Mesure continue de la température et de l'humidité ambiantes
- ✓ Contrôle des composants (compresseur, ventilateurs, vannes)
- ✓ Transmission des informations à un contrôleur central



Variation de Vitesse des Compresseurs (Inverter)

- ✓ Ajustement de la vitesse de rotation plutôt que mode "tout ou rien"
- ✓ Modulation de la puissance frigorifique selon la charge réelle
- ✓ Évite les cycles marche/arrêt fréquents, améliore le COP



Gestion Intelligente

- ✓ Intégration d'Internet des Objets (IoT) et d'Intelligence Artificielle (IA)
- ✓ Prédiction météo pour anticiper les besoins en chauffage/refroidissement
- ✓ Détection d'occupation pour ajuster la température selon la présence



Récupération de Chaleur

- ✓ Récupération de la chaleur rejetée par le condenseur
- ✓ Utilisation pour la production d'eau chaude sanitaire
- ✓ Amélioration de l'efficacité énergétique globale de l'installation

Impact Environnemental et Réglementation

Réglementation F-Gas

Règlement (UE) 2024/573 remplaçant le règlement (UE) n°517/2014 visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre fluorés.

- Réduction de 79% de la consommation de HFC entre 2015 et 2030
- Interdiction des fluides vierges avec PRG ≥ 2500 dans la réfrigération (2025)
- Interdiction dans les systèmes de climatisation (2026)

Éco-conception

Amélioration des Coefficients de Performance (COP) pour réduire la consommation énergétique et les émissions indirectes de gaz à effet de serre.

Labels et Normes

Labels Énergétiques

Energy Star pour les équipements à haute efficacité énergétique

Normes Construction

RE2020 pour les bâtiments en France

Recyclage et Récupération

Obligations strictes de confinement, de récupération et de destruction des fluides frigorigènes en fin de vie.

- Entreprises manipulant ces fluides doivent être certifiées
- Déclaration des quantités manipulées à l'ADEME



Étude de Cas : Climatiseur Inverter

💡 Principe de Fonctionnement

- ✓ Ajuste continuellement la vitesse du compresseur plutôt que de fonctionner en mode "tout ou rien"
- ✓ Module la puissance pour correspondre aux besoins de refroidissement
- ✓ Utilise un variateur de fréquence pour contrôler l'alimentation électrique



★ Avantages

📈 Meilleur COP
Plus élevé à charge partielle

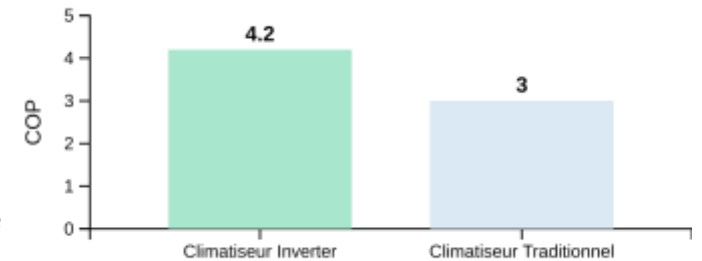
🌡️ Température Stable
Précision thermique supérieure

⚡ Consommation Réduite
Optimisation du fonctionnement

📊 Exemple Numérique

COP réel d'un climatiseur Inverter moderne : 4,2

Pour 1 unité d'énergie électrique consommée, le système transfère 4,2 unités de chaleur.



Innovations et Tendances



Froid Magnétique

- ✔ Utilise l'effet magnétocalorique
- ✔ Matériaux : terres rares, cobalt, manganèse
- ✔ Réduction potentielle de 15% de consommation



Froid Solaire

- ✔ Systèmes couplés à des panneaux photovoltaïques
- ✔ Cycles à absorption/adsorption thermiques
- ✔ Réduction de la dépendance aux énergies fossiles



IA et Internet des Objets

- ✔ Gestion intelligente des systèmes
- ✔ Prévion météo et détection d'occupation
- ✔ Maintenance prédictive en temps réel



Fluides Naturels

- ✔ CO₂ (R744) : pressions élevées
- ✔ Ammoniac (R717) : toxicité requiert précautions
- ✔ Hydrocarbures : inflammabilité limitée



En savoir plus : Ces technologies représentent l'avenir de l'industrie frigorifique, avec des avantages en termes d'efficacité énergétique, de réduction des émissions et de durabilité environnementale.

Références

Ouvrages Techniques

 **Goncalvès & Thibault** , *Cycles Thermodynamiques des Machines Thermiques* , 2008

 **ASHRAE Handbook** , *Handbook of Refrigeration and Air Conditioning*

Normes

 **Normes NF EN 378, ISO 5149** , *Protocole de Montréal*

 **RE2020** , *Réglementation Thermique pour les Bâtiments* (France)

Organismes de Référence

Sites Internet

 **ADEME** , Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

 **ATEE** , Association Technique de l'Équipement Électrique

 **Energy Star** , Programme de labélisation énergétique

Réglementation F-Gas

Règlement (UE) 2024/573 remplaçant le règlement (UE) n°517/2014 visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre fluorés.