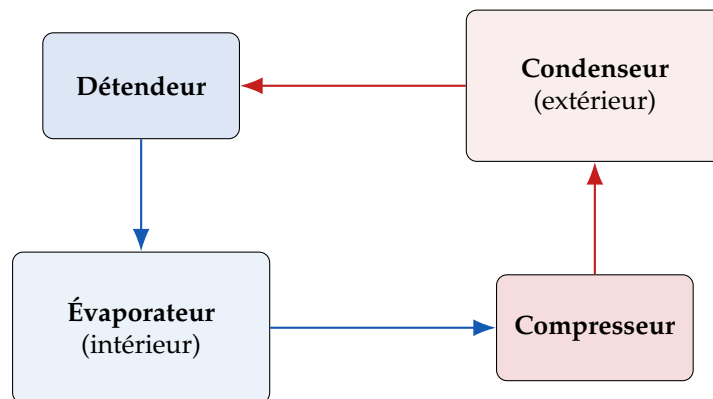


La climatisation réversible

Pompe à chaleur air-air

Principes physiques, thermodynamique, technologie et performance



Document pédagogique

Niveau : Terminale scientifique – Mathématiques Physique Supérieures (MPSI)

Juin 2026

Table des matières

1	Introduction	3
1.1	Qu'est-ce qu'une climatisation réversible ?	3
1.2	Un appareil de plus en plus présent	3
1.3	Plan du document	3
2	Rappels de thermodynamique indispensables	4
2.1	Système thermodynamique, énergie interne et enthalpie	4
2.2	Premier principe pour un système ouvert en régime permanent	4
2.3	Changement d'état et chaleur latente	5
2.4	Sens spontané des transferts thermiques	5
2.5	Une même machine, deux usages : pompe à chaleur ou machine frigorifique	6
2.6	Le cycle de Carnot et la borne théorique de performance	6
3	Le cycle frigorifique à compression de vapeur	7
3.1	Vue d'ensemble : les quatre organes	7
3.2	Le fluide frigorigène	8
3.2.1	Propriétés recherchées	8
3.2.2	Évolution historique des fluides	9
3.3	Le diagramme enthalpique (diagramme de Mollier)	9
3.4	Description détaillée du cycle réel, point par point	10
3.4.1	Étape 1 → 2 : la compression	10
3.4.2	Étape 2 → 3 : la condensation	11
3.4.3	Étape 3 → 4 : la détente	11
3.4.4	Étape 4 → 1 : l'évaporation	11
4	Étude détaillée des composants	12
4.1	Le compresseur	12
4.1.1	Principales technologies	12
4.1.2	Le moteur du compresseur et la technologie « Inverter »	13
4.2	Le condenseur et l'évaporateur : les échangeurs thermiques	13
4.3	Le détendeur	14
4.4	La vanne d'inversion 4 voies	15
5	La réversibilité : passer du froid au chaud	16
5.1	Synthèse des deux modes	16
5.2	Pourquoi l'air extérieur froid contient-il encore de l'énergie exploitable ?	16
6	Bilan énergétique et indicateurs de performance	17
6.1	Les puissances en jeu	17
6.2	Coefficients de performance : COP et EER	17
6.3	Comparaison avec la borne de Carnot : le rendement exergétique	18
6.4	Exemple de calcul complet à partir du diagramme enthalpique	18
6.5	Indices saisonniers : SEER et SCOP	19
7	La technologie Inverter : électronique et régulation	20
7.1	Pourquoi moduler la puissance plutôt que fonctionner en tout-ou-rien ?	20
7.2	Le variateur de fréquence	20
7.3	Le moteur synchrone à aimants permanents et le contrôle vectoriel	20
7.4	Les capteurs	21
7.5	La boucle de régulation	21

8	Le dégivrage : un défi spécifique au mode chauffage	22
8.1	Pourquoi du givre apparaît-il sur l'unité extérieure en hiver ?	22
8.2	Détection du givrage	22
8.3	Le cycle de dégivrage	23
9	Dimensionnement d'une installation	23
9.1	Le bilan thermique d'un local	23
10	Études de cas : appareils du commerce	24
10.1	Panorama des gammes résidentielles	24
10.2	Lire une fiche technique	25
11	Synthèse générale	25
12	Lexique des termes techniques	26
	Annexe – Tableau récapitulatif des quatre transformations du cycle	27

1 Introduction

1.1 Qu'est-ce qu'une climatisation réversible ?

Un climatiseur réversible, aussi appelé **pompe à chaleur air-air**, est un appareil capable, avec la même machine, de **refroidir** un local en été et de le **chauffer** en hiver. Cette double fonction surprend souvent au premier abord : comment un même dispositif peut-il aussi bien extraire de la chaleur d'une pièce que lui en apporter ?

La réponse tient en une phrase, que ce document va justifier en détail : **l'appareil ne « fabrique » jamais directement de la chaleur ou du froid, il déplace de l'énergie thermique d'un endroit vers un autre**, en consommant pour cela une quantité d'électricité bien plus faible que l'énergie thermique réellement transférée. C'est précisément ce qui distingue une pompe à chaleur d'un simple convecteur électrique : un convecteur *convertit* de l'électricité en chaleur (avec un rendement proche de 1), alors qu'une pompe à chaleur *déplace* de la chaleur en utilisant l'électricité comme énergie motrice (avec, comme on le verra, un rendement apparent qui peut largement dépasser 1).

DÉFINITION – Pompe à chaleur

Une **pompe à chaleur** (PAC) est une machine thermodynamique qui prélève de la chaleur dans un milieu froid (la *source froide*) pour la restituer, à un niveau de température plus élevé, dans un milieu chaud (la *source chaude*), en consommant un travail extérieur (ici, de l'électricité). Le terme « air-air » signifie que la source froide et la source chaude sont toutes deux constituées d'air : l'air extérieur et l'air intérieur du logement.

En mode **climatisation** (été), l'air intérieur, trop chaud, joue le rôle de source froide : l'appareil y prélève de la chaleur et la rejette vers l'air extérieur, plus chaud. En mode **chauffage** (hiver), les rôles s'inversent : l'appareil prélève de la chaleur dans l'air extérieur, pourtant froid, et la restitue à l'air intérieur. Ce dernier point sera détaillé au chapitre 2 : même un air à 0 °C, voire à -10 °C, contient une énergie thermique considérable, qu'il est physiquement possible d'extraire.

1.2 Un appareil de plus en plus présent

Le climatiseur réversible mural (en « split », c'est-à-dire en deux unités reliées par des tuyauteries) est devenu l'un des équipements de chauffage et de rafraîchissement les plus vendus en France et en Europe. Les fabricants généralistes du secteur (Daikin, Mitsubishi Electric, Panasonic, Toshiba, LG, Hitachi, Atlantic, Fujitsu, parmi d'autres) proposent tous des gammes résidentielles fonctionnant selon les mêmes principes physiques que ceux décrits dans ce document, avec des variations de technologie (compresseur, fluide frigorigène, électronique de régulation) qui expliquent les différences de performance et de prix.

Ce document a pour ambition de comprendre, en profondeur, *ce qui se passe réellement à l'intérieur* de ces appareils : quels phénomènes physiques sont mis en jeu, comment ils sont exploités par les ingénieurs, quelles contraintes technologiques en résultent, et comment on évalue leur performance.

1.3 Plan du document

Le document est organisé en partant des bases physiques indispensables (thermodynamique des systèmes ouverts, changements d'état) pour aller vers le détail technologique des composants réels, puis vers les indicateurs de performance utilisés dans le commerce, et enfin vers des éléments de dimensionnement et des exemples de produits réels. Chaque notion technique est définie avant d'être utilisée ; des encadrés DÉFINITION, EXEMPLE CONCRET, ATTENTION et POUR ALLER PLUS LOIN accompagnent le texte.

2 Rappels de thermodynamique indispensables

Avant d'étudier le cycle frigorifique proprement dit, il est nécessaire de poser quelques bases de thermodynamique. Cette section reprend des notions normalement abordées en terminale spécialité physique-chimie et en première année de classe préparatoire scientifique (notamment en filière MPSI/PCSI dans la partie « thermodynamique »).

2.1 Système thermodynamique, énergie interne et enthalpie

DÉFINITION – Système thermodynamique

Un **système thermodynamique** est la portion de matière que l'on choisit d'étudier (ici, par exemple, le fluide frigorigène contenu dans le circuit). Tout ce qui n'appartient pas au système constitue le **milieu extérieur**. Le système peut échanger de l'énergie avec l'extérieur sous deux formes : le **travail** W (énergie mécanique, par exemple celle fournie par le compresseur) et la **chaleur** Q (énergie thermique, transférée du fait d'une différence de température).

DÉFINITION – Énergie interne et enthalpie

L'**énergie interne** U d'un système est l'énergie microscopique totale contenue dans la matière (agitation thermique des molécules, énergie de liaison, etc.), à l'exclusion de l'énergie cinétique et potentielle macroscopiques. On définit l'**enthalpie** H par :

$$H = U + PV$$

où P est la pression et V le volume du système. L'enthalpie massique, notée $h = H/m$ (en kJ/kg), est la grandeur la plus utilisée en pratique pour décrire l'état d'un fluide frigorigène, car elle se prête particulièrement bien à l'étude des écoulements en régime permanent (voir ci-dessous).

Pourquoi privilégier l'enthalpie plutôt que l'énergie interne seule ? Parce que dans un circuit frigorifique, le fluide *circule* : il entre et sort en permanence de chaque composant (compresseur, condenseur, détendeur, évaporateur) en traversant une frontière, en emportant avec lui à la fois de l'énergie interne et un travail de transvasement PV nécessaire pour le faire entrer ou sortir du volume considéré. L'enthalpie regroupe naturellement ces deux contributions.

2.2 Premier principe pour un système ouvert en régime permanent

DÉFINITION – Régime permanent (ou stationnaire)

On dit qu'un écoulement est en **régime permanent** lorsque, en chaque point du circuit, les grandeurs physiques (pression, température, débit massique, etc.) ne dépendent pas du temps. C'est une excellente approximation pour un climatiseur qui fonctionne depuis quelques minutes à un régime de marche stable.

Pour un système ouvert traversé par un débit massique \dot{m} (en kg/s) en régime permanent, et en négligeant les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle de pesanteur (ce qui est tout à fait justifié dans un circuit frigorifique, les vitesses de circulation du fluide restant modérées), le premier principe de la thermodynamique s'écrit, par unité de masse traversant le composant considéré :

$$h_{\text{sortie}} - h_{\text{entrée}} = q_{\text{reçu}} + w_{\text{reçu}}$$

où $q_{\text{reçu}}$ est la chaleur reçue par le fluide (par unité de masse, en kJ/kg) et $w_{\text{reçu}}$ le travail reçu par le fluide (idem). Cette relation, parfois appelée **équation de l'énergie en écoulement permanent**, est l'outil de calcul central de toute l'étude du cycle frigorifique : elle permet de calculer l'énergie échangée dans chaque organe simplement à partir de la variation d'enthalpie du fluide qui le traverse.

POUR ALLER PLUS LOIN – Origine de cette équation

Cette relation s'obtient en appliquant le premier principe à un système fermé fictif constitué de la masse de fluide contenue dans le composant à un instant t , puis en faisant le bilan avec la même masse de fluide ayant progressé à l'instant $t + dt$. Le travail des forces de pression nécessaires pour faire entrer et sortir la matière (« travail de transvasement », égal à $P_e V_e$ en entrée et $P_s V_s$ en sortie) se combine alors naturellement avec la variation d'énergie interne pour reconstituer une variation d'enthalpie. C'est un résultat classique du programme de thermodynamique des écoulements en CPGE.

2.3 Changement d'état et chaleur latente

Le fonctionnement d'un climatiseur repose entièrement sur l'exploitation des **changements d'état** (évaporation et condensation) d'un fluide.

DÉFINITION – Chaleur latente de vaporisation

La **chaleur latente de vaporisation** L_v (en kJ/kg) est l'énergie qu'il faut fournir à 1 kg de liquide, à pression constante et à sa température d'ébullition, pour le transformer intégralement en vapeur, sans aucune variation de température. Le phénomène inverse, la condensation, restitue exactement cette même énergie.

EXEMPLE CONCRET – Pourquoi utiliser un changement d'état plutôt qu'un simple échauffement ?

Pour l'eau, faire passer 1 kg de liquide de 20 °C à 99 °C demande environ $4,18 \times 79 \approx 330$ kJ (chaleur sensible). Mais faire ensuite *bouillir* ce même kilogramme d'eau à 100 °C en vapeur consomme environ 2260 kJ : presque sept fois plus d'énergie, sans que la température ne change ! C'est cette énorme quantité d'énergie « cachée » dans le changement d'état que les fluides frigorigènes exploitent pour transporter beaucoup de chaleur avec peu de matière en circulation.

À pression atmosphérique, l'eau bout à 100 °C : il faudrait donc atteindre cette température pour la faire s'évaporer, ce qui est incompatible avec un usage de climatisation. La clé de la climatisation réside dans l'utilisation d'un fluide dont la **température d'ébullition dépend fortement de la pression**, et que l'on peut choisir suffisamment basse (souvent négative, en degrés Celsius) pour s'évaporer à température ambiante, pourvu qu'on ajuste convenablement sa pression. C'est tout l'objet du **fluide frigorigène**, étudié en détail au chapitre suivant.

2.4 Sens spontané des transferts thermiques

DÉFINITION – Second principe (énoncé qualitatif)

Spontanément, c'est-à-dire sans apport extérieur d'énergie, la chaleur ne se transmet jamais d'un corps froid vers un corps chaud : elle va toujours du corps chaud vers le corps froid. Ce constat expérimental, formalisé par le **second principe de la thermodynamique**, n'interdit cependant pas de faire l'inverse : il indique seulement qu'un *travail extérieur* est

nécessaire pour y parvenir.

C'est exactement le rôle de la pompe à chaleur : elle consomme du travail électrique pour *forcer* un transfert de chaleur dans le sens normalement interdit spontanément (du froid vers le chaud), exactement comme une pompe hydraulique consomme de l'énergie pour faire remonter de l'eau vers le haut, contrairement à son écoulement naturel vers le bas.

2.5 Une même machine, deux usages : pompe à chaleur ou machine frigorifique

DÉFINITION – Machine frigorifique vs pompe à chaleur

Une **machine frigorifique** et une **pompe à chaleur** sont, au sens thermodynamique strict, exactement *la même machine*, fonctionnant suivant le même cycle. La seule différence est l'usage qu'on en fait :

- dans un usage **frigorifique** (climatisation, réfrigérateur), on s'intéresse à la chaleur *prélevée* à la source froide (le but est de refroidir) ;
- dans un usage **pompe à chaleur** (chauffage), on s'intéresse à la chaleur *rejetée* à la source chaude (le but est de chauffer).

Un climatiseur réversible est ainsi, littéralement, une machine frigorifique en été et une pompe à chaleur en hiver, sans qu'aucune pièce mécanique majeure ne soit changée : seul le *sens de circulation* du fluide est inversé, comme nous le détaillerons au chapitre 5 avec la vanne 4 voies.

2.6 Le cycle de Carnot et la borne théorique de performance

Pour évaluer la performance d'une pompe à chaleur réelle, il est indispensable de disposer d'une référence théorique idéale. C'est le rôle du **cycle de Carnot**.

DÉFINITION – Cycle de Carnot

Le **cycle de Carnot** est un cycle thermodynamique idéal, entièrement réversible, fonctionnant entre une source froide à température T_f et une source chaude à température T_c (températures exprimées en kelvins). Étant réversible, il n'est le siège d'aucune perte : aucun frottement, aucune différence de température finie lors des échanges thermiques, aucune turbulence. C'est un idéal théorique, jamais atteint en pratique, mais qui fournit une borne supérieure incontournable pour la performance de toute machine réelle fonctionnant entre les deux mêmes températures.

Pour une machine réversible fonctionnant en cycle entre T_f et T_c , le second principe (à travers l'égalité de Clausius, $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = 0$ pour un cycle réversible) permet de montrer que le **coefficient de performance en chauffage** (noté COP) de la machine de Carnot s'écrit :

$$\text{COP}_{\text{Carnot, chauffage}} = \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

et, en usage frigorifique (climatisation), le coefficient correspondant – souvent noté EER pour *Energy Efficiency Ratio* – vaut :

$$\text{EER}_{\text{Carnot}} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

POUR ALLER PLUS LOIN – Démonstration rapide

Pour un cycle réversible, l'égalité de Clausius donne $\frac{Q_c}{T_c} = \frac{Q_f}{T_f}$ en valeurs absolues (la chaleur cédée à la source chaude divisée par sa température égale la chaleur prélevée à la source froide divisée par sa température). Le travail fourni au cycle vaut, par conservation de l'énergie sur un cycle, $W = Q_c - Q_f$ (en valeur absolue, le travail consommé est la différence entre la chaleur rejetée et la chaleur prélevée). On a alors :

$$\text{COP}_{\text{chauffage}} = \frac{Q_c}{W} = \frac{Q_c}{Q_c - Q_f} = \frac{1}{1 - \frac{Q_f}{Q_c}} = \frac{1}{1 - \frac{T_f}{T_c}} = \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

EXEMPLE CONCRET – Calcul de la borne de Carnot pour une pompe à chaleur air-air typique

Considérons une pompe à chaleur dont le fluide s'évapore à 7 °C (soit $T_f = 280$ K) et se condense à 45 °C (soit $T_c = 318$ K) – des valeurs réalistes que l'on retrouvera au chapitre 3. On obtient :

$$\text{COP}_{\text{Carnot}} = \frac{318}{318 - 280} = \frac{318}{38} \approx 8,4$$

Autrement dit, une machine parfaite ne consommant aucune énergie inutilement pourrait, dans ces conditions de température, fournir environ 8,4 kW de chauffage pour seulement 1 kW électrique consommé ! Les machines réelles, on le verra au chapitre 6, atteignent en pratique un COP de l'ordre de 3 à 5 dans des conditions comparables : l'écart avec la valeur de Carnot mesure l'ensemble des irréversibilités (frottements, pertes de charge, échanges thermiques imparfaits) inévitables dans une machine réelle.

ATTENTION – Erreur fréquente

On entend parfois dire qu'une pompe à chaleur « produit plus d'énergie qu'elle n'en consomme », ce qui violerait le premier principe. C'est faux : la pompe à chaleur ne *crée* aucune énergie. Elle *déplace* de l'énergie thermique prélevée gratuitement dans l'air extérieur, en utilisant l'électricité uniquement comme énergie motrice pour ce déplacement. Le bilan énergétique global (chaleur restituée = chaleur prélevée + travail électrique consommé) est parfaitement conservatif et respecte rigoureusement le premier principe.

3 Le cycle frigorifique à compression de vapeur

3.1 Vue d'ensemble : les quatre organes

La quasi-totalité des climatiseurs et pompes à chaleur domestiques fonctionnent selon un même schéma, appelé **cycle à compression de vapeur**, organisé autour de quatre organes principaux traversés successivement par un fluide frigorigène qui circule en circuit fermé :

1. le **compresseur**, qui aspire le fluide à basse pression sous forme de vapeur et le refoule à haute pression ;
2. le **condenseur**, un échangeur thermique dans lequel le fluide à haute pression se refroidit et se condense (passe de vapeur à liquide) en cédant de la chaleur au milieu environnant ;
3. le **détendeur**, un organe qui fait chuter brutalement la pression du fluide liquide ;

4. l'**évaporateur**, un second échangeur thermique dans lequel le fluide à basse pression s'évapore (passe de liquide à vapeur) en prélevant de la chaleur au milieu environnant.

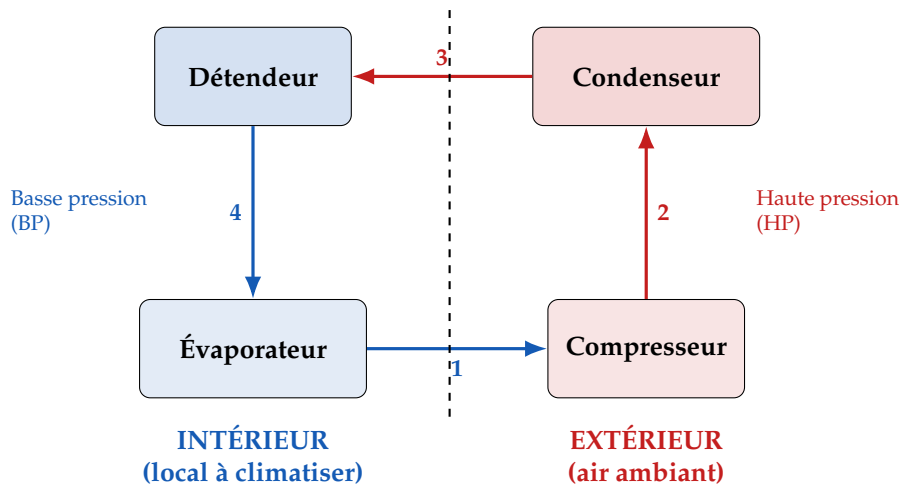


Figure 1: Schéma de principe du cycle frigorifique en mode climatisation (été). Les flèches rouges représentent le trajet du fluide à haute pression (HP), les flèches bleues le trajet à basse pression (BP). Les chiffres 1 à 4 repèrent les points caractéristiques du cycle, utilisés tout au long de ce document.

Sur la figure 1, l'évaporateur, installé en intérieur, capte la chaleur de l'air de la pièce (qui se refroidit) ; le condenseur, installé en extérieur, rejette cette chaleur (majorée du travail de compression) vers l'air ambiant extérieur (qui s'échauffe localement, d'où l'air chaud que l'on sent en passant près de l'unité extérieure d'un climatiseur en fonctionnement). Le compresseur et le détendeur assurent, respectivement, la montée et la descente en pression nécessaires pour que les changements d'état aient lieu aux bonnes températures dans chacun des deux échangeurs.

3.2 Le fluide frigorigène

DÉFINITION – Fluide frigorigène

Un **fluide frigorigène** (ou réfrigérant) est le fluide qui circule en circuit fermé dans la machine et subit successivement les changements d'état (évaporation, condensation) permettant le transport de chaleur. Ce n'est ni de l'air, ni de l'eau : c'est un fluide choisi spécifiquement pour ses propriétés thermodynamiques.

3.2.1 Propriétés recherchées

Un bon fluide frigorigène doit réunir plusieurs qualités :

- une **température d'ébullition basse** sous une pression raisonnable (de l'ordre de quelques bars à quelques dizaines de bars), pour permettre l'évaporation à des températures proches de 0 °C à 10 °C (utiles en climatisation) tout en restant dans une plage de pression gérable mécaniquement ;
- une **chaleur latente de vaporisation élevée**, pour transporter beaucoup de chaleur avec un faible débit massique, donc un compresseur plus compact ;
- une **bonne stabilité chimique** (ne pas se décomposer dans la plage de température et de pression de fonctionnement, ne pas attaquer les métaux et les huiles de lubrification du compresseur) ;

- une **toxicité et une inflammabilité maîtrisées**, en cohérence avec les normes de sécurité (classification ASHRAE, par exemple A1 = non toxique et non inflammable, A2L = légèrement inflammable, A3 = inflammable) ;
- un **impact environnemental limité**, mesuré notamment par le **PRG** (pouvoir de réchauffement global), grandeur sans dimension comparant l'effet de serre d'un kilogramme du gaz à celui d'un kilogramme de CO₂ sur 100 ans.

3.2.2 Évolution historique des fluides

Les premiers fluides frigorigènes industriels (années 1930-1980) étaient des **CFC** (chlorofluorocarbures, comme le R12) puis des **HCFC** (comme le R22), très stables et peu coûteux, mais responsables de la destruction de la couche d'ozone stratosphérique : leur usage a été interdit par le protocole de Montréal (1987). Ils ont été remplacés par des **HFC** (hydrofluorocarbures, comme le R410A puis le R32), qui ne contiennent pas de chlore et ne détruisent donc pas l'ozone, mais dont certains présentent un PRG encore élevé. La tendance actuelle, portée par la réglementation européenne F-Gas, est l'adoption de fluides à très faible PRG : **HFO** (hydrofluoro-oléfinés) ou fluides naturels comme le **R290** (propane).

Tableau 1: Comparaison de trois fluides frigorigènes couramment rencontrés dans les climatiseurs résidentiels (valeurs indicatives, ordres de grandeur).

	R410A	R32	R290 (propane)
Nature	Mélange de HFC (R32/R125, 50/50)	HFC pur	Hydrocarbure naturel
PRG (pouvoir de réchauffement global)	≈ 2090	≈ 675	≈ 3
Classification de sécurité (ASHRAE)	A1 (inflammable)	A2L (légèrement inflammable)	A3 (inflammable)
Pressions de fonctionnement	Élevées	Un peu plus élevées que le R410A	Modérées, proches du R22
Statut actuel	En retrait progressif (PRG trop élevé)	Très largement utilisé depuis ~2015-2018	En développement, charges limitées par sécurité

LIEN AVEC LE MATÉRIEL RÉEL – Le fluide dans les climatiseurs vendus aujourd'hui

La quasi-totalité des climatiseurs réversibles muraux vendus en France depuis la fin des années 2010 (gamme Daikin Perfera/Sensira, Mitsubishi Electric MSZ, Panasonic Etherea, Toshiba Shorai/Haori, par exemple) fonctionnent au **R32**, qui offre un bon compromis entre performance thermodynamique, impact environnemental réduit par rapport au R410A, et risque d'inflammabilité maîtrisé par la limitation de la charge embarquée (quelques centaines de grammes à 2-3 kg selon la puissance de l'appareil). Le R290 (propane) commence à apparaître sur des modèles compacts, notamment certains climatiseurs monoblocs, où la faible charge de fluide nécessaire limite le risque.

3.3 Le diagramme enthalpique (diagramme de Mollier)

L'outil de représentation graphique central pour étudier le cycle frigorifique est le **diagramme enthalpique**, aussi appelé **diagramme de Mollier** ou diagramme (h, P) (lire « pression en fonction de l'enthalpie », bien que par convention l'enthalpie soit en abscisse et la pression en ordonnée).

DÉFINITION – Diagramme enthalpique (h, P)

Le diagramme enthalpique représente, pour un fluide donné, la pression P (en ordonnée, en pratique presque toujours en échelle logarithmique pour les diagrammes professionnels) en fonction de l'enthalpie massique h (en abscisse, en kJ/kg). Il fait apparaître une courbe en forme de « cloche », appelée **courbe de saturation**, qui délimite trois zones :

- à gauche de la cloche : le fluide est entièrement **liquide** ;
- à l'intérieur de la cloche : le fluide est un **mélange liquide-vapeur** (on parle de *mélange biphasique*) ; c'est dans cette zone que se produisent les changements d'état à température constante (pour une pression fixée) ;
- à droite de la cloche : le fluide est une **vapeur surchauffée**, c'est-à-dire une vapeur dont la température est supérieure à la température de saturation à cette pression.

Le sommet de la cloche est le **point critique**, au-delà duquel la distinction entre liquide et vapeur n'a plus de sens.

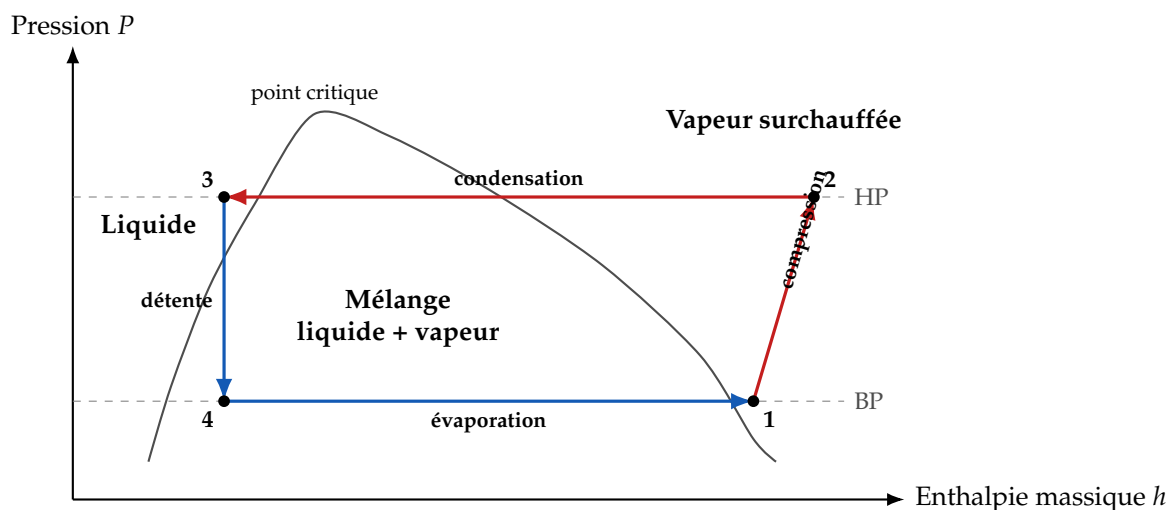


Figure 2: Représentation qualitative du cycle frigorifique sur un diagramme enthalpique (h, P). Les échelles ne sont pas respectées (en pratique, l'axe des pressions est logarithmique) ; seule la forme du cycle et la position des points par rapport à la courbe de saturation sont représentatives de la réalité physique.

3.4 Description détaillée du cycle réel, point par point

Reportons-nous à la figure 2, en suivant le fluide depuis sa sortie de l'évaporateur (point 1).

3.4.1 Étape 1 → 2 : la compression

Le fluide entre dans le compresseur sous forme de **vapeur basse pression**, légèrement surchauffée (point 1, juste à droite de la courbe de saturation). Le compresseur fournit un travail mécanique qui élève à la fois la pression et la température du fluide, le faisant ressortir sous forme de **vapeur haute pression fortement surchauffée** (point 2). D'après le premier principe pour un système ouvert (section 2.2), comme la compression est quasiment adiabatique ($q \approx 0$, le temps de passage dans le compresseur étant trop court pour des échanges thermiques significatifs) :

$$w_{\text{compresseur}} = h_2 - h_1 > 0$$

Cette quantité $w_{\text{compresseur}}$ est précisément le travail spécifique (par kilogramme de fluide) que le moteur électrique du compresseur doit fournir.

3.4.2 Étape 2 → 3 : la condensation

Le fluide, toujours à haute pression, traverse le condenseur. Il y cède de la chaleur à l'air extérieur (en mode climatisation) en trois étapes successives, bien visibles sur la figure 2 le long du segment horizontal à pression HP constante :

1. **désurchauffe** : la vapeur, encore surchauffée en sortie du compresseur, se refroidit jusqu'à atteindre la température de saturation (segment hors cloche, à droite) ;
2. **condensation proprement dite** : le changement d'état liquide-vapeur a lieu à température constante (segment à l'intérieur de la cloche) ;
3. **sous-refroidissement** : une fois entièrement condensé, le liquide continue de se refroidir légèrement en dessous de sa température de saturation (segment hors cloche, à gauche).

Le sous-refroidissement, de quelques kelvins seulement, garantit qu'aucune bulle de vapeur ne subsiste à l'entrée du détendeur, ce qui est nécessaire à son bon fonctionnement (voir section 4.3). Comme il n'y a pas de travail échangé dans un échangeur thermique ($w = 0$), la chaleur cédée par le fluide (donc reçue par l'air extérieur) vaut, en valeur absolue :

$$|q_{\text{condenseur}}| = h_2 - h_3$$

3.4.3 Étape 3 → 4 : la détente

Le fluide liquide haute pression traverse le détendeur, qui lui fait subir une chute de pression brutale, sans aucun échange de travail mécanique organisé (il n'y a pas d'arbre tournant ni de piston, juste un rétrécissement de la section de passage) et sans le temps d'échanger de la chaleur avec l'extérieur. On a donc, par le premier principe ($q \approx 0, w = 0$) :

$$h_4 = h_3$$

On parle de **détente isenthalpique**. Le fluide sort sous forme d'un mélange liquide-vapeur à basse pression et basse température : une partie du liquide s'est immédiatement vaporisée (on parle de *flash*), en prélevant l'énergie nécessaire à cette vaporisation directement sur le reste du liquide, ce qui explique la chute de température.

3.4.4 Étape 4 → 1 : l'évaporation

Le mélange liquide-vapeur basse pression traverse l'évaporateur, où il prélève de la chaleur à l'air intérieur du local (en mode climatisation) pour achever sa vaporisation, puis se surchauffe légèrement avant de quitter l'échangeur. Le segment 4-1 sur la figure 2, horizontal à pression BP constante, illustre ce processus. La chaleur prélevée vaut :

$$q_{\text{évaporateur}} = h_1 - h_4$$

C'est cette chaleur, prélevée à l'air de la pièce, qui correspond à l'**effet utile de refroidissement** en mode climatisation.

DÉFINITION – Surchauffe et sous-refroidissement

La **surchauffe** est l'écart de température, à l'évaporateur, entre la vapeur réellement présente et la température de saturation à la même pression (typiquement 5 K à 8 K). Elle garantit qu'aucune goutte de liquide n'entre dans le compresseur (un compresseur

n'est pas conçu pour comprimer un liquide, quasi incompressible : on parle de risque de « coup de liquide », potentiellement destructeur). Le **sous-refroidissement** est l'écart symétrique au condenseur, qui garantit l'absence de vapeur à l'entrée du détendeur.

4 Étude détaillée des composants

4.1 Le compresseur

DÉFINITION – Compresseur

Le **compresseur** est le cœur mécanique de la pompe à chaleur : c'est le seul organe du circuit qui consomme directement du travail (sous forme d'énergie électrique fournie à un moteur). Il aspire le fluide à l'état de vapeur basse pression et le refoule à l'état de vapeur haute pression.

4.1.1 Principales technologies

Plusieurs technologies de compresseur coexistent, chacune avec ses avantages :

- Le **compresseur alternatif (à piston)** : un piston, entraîné par un vilebrequin relié au moteur, comprime le gaz dans un cylindre, exactement comme dans un moteur thermique mais en sens inverse (c'est le piston qui comprime le gaz, et non le gaz qui pousse le piston). Technologie ancienne, robuste, mais aujourd'hui peu utilisée en climatisation résidentielle de petite puissance, en raison de vibrations et d'un rendement inférieur aux technologies rotatives modernes.
- Le **compresseur rotatif à palettes** : un rotor excentré tourne dans un cylindre, des palettes coulissantes emprisonnant et compressant le gaz par réduction progressive du volume disponible. Compact, mais des fuites internes limitent le rendement aux forts taux de compression.
- Le **compresseur à spirales (« scroll »)** : technologie aujourd'hui dominante dans les climatiseurs résidentiels et tertiaires de petite et moyenne puissance. Deux spirales imbriquées, l'une fixe, l'autre animée d'un mouvement orbital (et non rotatif) par un excentrique, emprisonnent des poches de gaz entre leurs flancs. Le mouvement orbital de la spirale mobile réduit progressivement le volume de chaque poche au fur et à mesure qu'elle se déplace de la périphérie vers le centre, où le gaz comprimé est évacué.

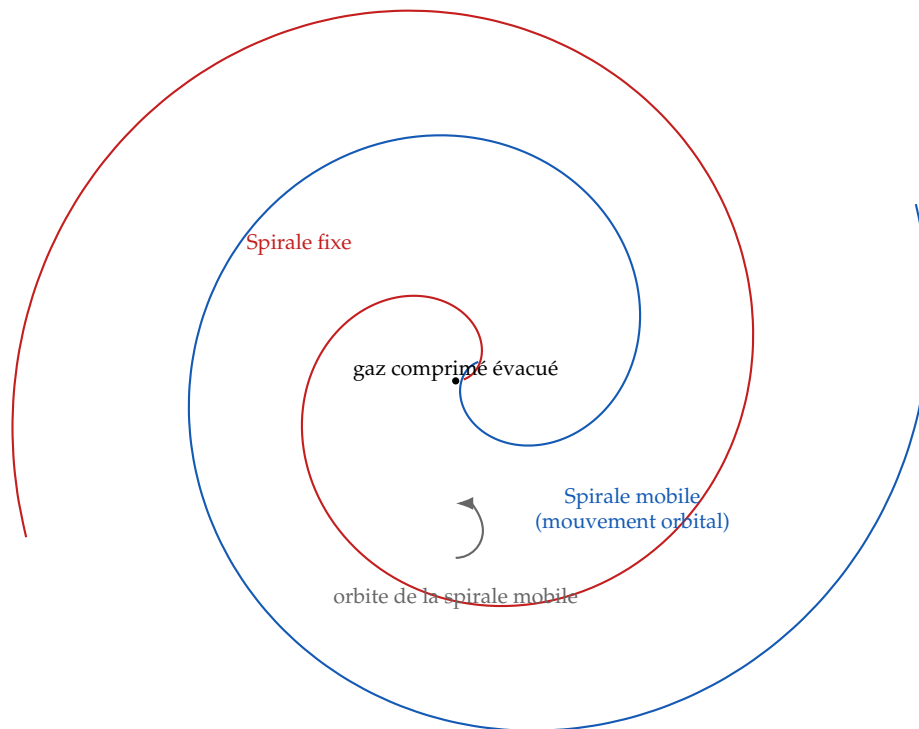


Figure 3: Principe du compresseur à spirales (« scroll ») : la spirale mobile, animée d'un mouvement orbital (et non d'une rotation sur elle-même) par un excentrique relié au moteur, emprisonne des poches de gaz entre les deux spirales et réduit progressivement leur volume en les déplaçant vers le centre, où le gaz comprimé est évacué.

4.1.2 Le moteur du compresseur et la technologie « Inverter »

Le compresseur est entraîné par un moteur électrique. Deux grandes familles existent :

- le **moteur asynchrone**, alimenté directement par le réseau, dont la vitesse de rotation est imposée par la fréquence du réseau électrique (50 Hz en Europe) : il ne peut fonctionner qu'à vitesse fixe, donc à puissance fixe (fonctionnement « tout ou rien », on parle de climatiseur « on/off ») ;
- le **moteur synchrone à aimants permanents**, alimenté via un **variateur de fréquence électronique**, dont la vitesse de rotation peut être ajustée en continu en faisant varier la fréquence du courant qui l'alimente. C'est cette seconde famille qui équipe les climatiseurs dits **Inverter**, aujourd'hui très largement majoritaires sur le marché résidentiel.

Cette distinction est essentielle et sera développée en détail au chapitre 7 : la possibilité de moduler la vitesse du compresseur, donc le débit de fluide frigorigène et la puissance thermique délivrée, est l'une des avancées technologiques les plus importantes de ces vingt dernières années dans le domaine du froid et du chauffage, en termes de confort comme d'efficacité énergétique.

4.2 Le condenseur et l'évaporateur : les échangeurs thermiques

DÉFINITION – Échangeur thermique

Un **échangeur thermique** est un dispositif permettant de transférer de la chaleur d'un fluide à un autre sans qu'ils se mélangent, les deux fluides étant séparés par une paroi solide conductrice de la chaleur (ici, des tubes en cuivre ou en aluminium).

Dans un climatiseur air-air, le condenseur et l'évaporateur sont tous deux des **échangeurs à tubes ailetés** (en anglais *fin-and-tube*) : le fluide frigorigène circule à l'intérieur de tubes métalliques repliés en serpentin, sur lesquels sont fixées de nombreuses ailettes fines en aluminium, perpendiculaires aux tubes. Ces ailettes démultiplient la surface de contact avec l'air, qui est mis en mouvement forcé par un ventilateur (ventilateur tangentiel pour l'unité intérieure, ventilateur hélicoïde pour l'unité extérieure), afin de maximiser l'échange thermique malgré la faible capacité de l'air à transporter la chaleur comparée à un liquide.

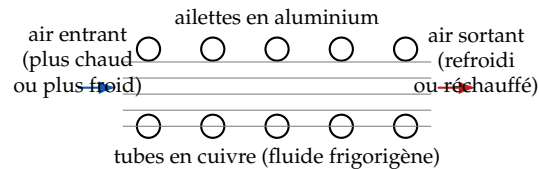


Figure 4: Coupe schématique d'un échangeur à tubes ailetés. L'air traverse perpendiculairement les ailettes, qui démultiplient la surface d'échange avec les tubes parcourus par le fluide frigorigène.

DÉFINITION – Pincement thermique

Le **pincement** (ou écart minimal d'approche) est l'écart de température minimal entre les deux fluides en un point de l'échangeur. Plus le pincement est faible, plus l'échange est efficace, mais plus il faut une grande surface d'échange (donc un échangeur volumineux et coûteux) pour un même transfert de chaleur. Le dimensionnement d'un échangeur résulte toujours d'un compromis entre performance thermique et coût/encombrement.

EXEMPLE CONCRET – Pourquoi l'unité extérieure souffle-t-elle de l'air chaud en été ?

En mode climatisation, le condenseur (situé dans l'unité extérieure) doit rejeter à l'air ambiant la chaleur prélevée dans la pièce *plus* le travail de compression. Si l'air extérieur est à 32 °C, le fluide frigorigène doit se condenser à une température plus élevée (typiquement 45 °C à 50 °C) pour que la chaleur puisse effectivement s'écouler du fluide vers l'air (rappel : la chaleur va du chaud vers le froid). L'air qui ressort de l'unité extérieure, après avoir traversé l'échangeur, est donc plus chaud que l'air ambiant : c'est attendu, et c'est même la preuve que l'appareil fonctionne correctement.

4.3 Le détendeur

DÉFINITION – Détendeur

Le **détendeur** est l'organe qui provoque la chute de pression du fluide entre le condenseur et l'évaporateur, tout en régulant le débit de fluide qui entre dans l'évaporateur, afin d'y maintenir la surchauffe souhaitée (voir section 3.4.5).

Trois technologies principales sont rencontrées :

- Le **tube capillaire** : un simple tube de très faible diamètre intérieur (quelques dixièmes de millimètre) et de plusieurs mètres de long, dont la résistance hydraulique fixe provoque la chute de pression. Solution simple, peu coûteuse, sans pièce mobile, mais dont la section de passage est fixée à la fabrication : elle ne s'ajuste donc pas automatiquement à des conditions de fonctionnement variables. On la trouve dans les climatiseurs d'entrée de gamme, à puissance fixe (non-Inverter), ou en complément d'autres systèmes.

- Le **détendeur thermostatique** (TXV, *Thermostatic eXpansion Valve*) : un pointeau mobile, dont la position est asservie à la température (donc à la surchauffe) du fluide en sortie d'évaporateur, mesurée par un **bulbe** rempli d'un fluide sensible, relié à la vanne par un tube capillaire et exerçant une pression sur une membrane qui pilote l'ouverture du pointeau. Ce système purement mécanique permet une régulation automatique de la surchauffe sans aucune électronique.
- Le **détendeur électronique** (EEV ou EXV, *Electronic Expansion Valve*) : un pointeau entraîné par un **moteur pas à pas**, piloté par la carte électronique de l'appareil à partir des mesures de température et de pression fournies par des capteurs. C'est la solution équipant la quasi-totalité des climatiseurs Inverter modernes, car elle permet un ajustement fin et rapide, en cohérence avec la modulation de vitesse du compresseur.

POUR ALLER PLUS LOIN – Pourquoi la régulation de la surchauffe est-elle si importante ?

Si le détendeur laisse passer trop de fluide, l'évaporateur ne dispose pas d'assez de longueur pour terminer l'évaporation : du liquide risque d'atteindre le compresseur (coup de liquide, voir section 3.4.5). S'il en laisse passer trop peu, l'évaporateur est sous-utilisé (sa partie aval ne sert qu'à surchauffer une vapeur déjà formée, sans utilité), ce qui réduit la puissance frigorifique disponible et dégrade la performance globale. Une régulation fine et réactive de la surchauffe, en particulier lors des variations de charge thermique, est donc un facteur clé de performance – ce qui explique l'intérêt des détendeurs électroniques pilotés en temps réel.

4.4 La vanne d'inversion 4 voies

C'est cet organe, et lui seul, qui permet la **réversibilité** de l'appareil, c'est-à-dire le passage du mode climatisation au mode chauffage.

DÉFINITION – Vanne 4 voies

La **vanne d'inversion à 4 voies** est une électrovanne comportant quatre raccords : la sortie du compresseur (toujours en haute pression), l'entrée du compresseur (toujours en basse pression, généralement via un accumulateur protégeant contre les coups de liquide), et les deux échangeurs (intérieur et extérieur). Selon la position d'un tiroir interne, commandée électriquement, elle connecte la sortie du compresseur à l'un ou l'autre échangeur (qui devient alors le condenseur), et l'entrée du compresseur à l'échangeur restant (qui devient alors l'évaporateur).



Mode climatisation (été) :

l'échangeur extérieur est condenseur, l'échangeur intérieur est évaporateur.

Mode chauffage (hiver) :

l'échangeur intérieur devient condenseur, l'échangeur extérieur devient évaporateur.

Figure 5: Principe de la vanne d'inversion 4 voies : en changeant simplement la position interne du tiroir de la vanne, le même fluide à haute pression issu du compresseur est dirigé soit vers l'échangeur extérieur (mode climatisation), soit vers l'échangeur intérieur (mode chauffage), inversant ainsi les rôles de condenseur et d'évaporateur entre les deux échangeurs.

5 La réversibilité : passer du froid au chaud

5.1 Synthèse des deux modes

Grâce à la vanne 4 voies décrite ci-dessus, l'unique circuit frigorifique de l'appareil peut fonctionner selon deux configurations strictement symétriques :

Tableau 2: Rôle de chaque échangeur selon le mode de fonctionnement.

	Mode climatisation (été)	Mode chauffage (hiver)
Échangeur intérieur	Évaporateur (prélève la chaleur de la pièce)	Condenseur (cède la chaleur à la pièce)
Échangeur extérieur	Condenseur (rejette la chaleur dans l'air extérieur)	Évaporateur (prélève la chaleur de l'air extérieur)
Effet ressenti dans la pièce	Air rafraîchi et asséché (deshumidification)	Air réchauffé

Le compresseur, le détendeur (dans les modèles modernes, un détendeur électronique bidirectionnel ou deux détendeurs montés en parallèle avec clapets anti-retour) et les ventilateurs continuent de fonctionner de façon analogue ; seul le sens de circulation du fluide change, imposé par la position de la vanne 4 voies.

5.2 Pourquoi l'air extérieur froid contient-il encore de l'énergie exploitable ?

Cette question, légitime, mérite d'être traitée avec rigueur car elle est souvent source de confusion.

EXEMPLE CONCRET – Énergie thermique contenue dans l'air à 0 °C

La température de 0 °C correspond à 273 K, c'est-à-dire 273 K au-dessus du zéro absolu (0 K = -273,15 °C), température à laquelle, seulement, l'agitation thermique microscopique de la matière cesserait totalement. Tant que la température n'est pas nulle en kelvins, le milieu contient de l'énergie interne, exploitable en théorie pour autant qu'on dispose d'un puits encore plus froid pour y prélever de la chaleur. Un évaporateur dont le fluide frigorigène circule à -15 °C (258 K) peut très bien prélever de la chaleur à de l'air extérieur à 0 °C (273 K), exactement comme un évaporateur à 7 °C prélève de la chaleur à de l'air intérieur à 20 °C : ce qui compte est l'écart de température, pas le niveau absolu de température.

C'est la raison pour laquelle les pompes à chaleur air-air restent globalement efficaces même par temps froid, à condition d'abaisser suffisamment la pression (donc la température de saturation) côté évaporateur extérieur. Cela a toutefois un coût en performance, étudié au chapitre 6 : plus l'écart de température entre les deux sources est grand, plus le COP théorique (et réel) diminue, comme l'indique directement la formule de Carnot $COP = T_c / (T_c - T_f)$.

ATTENTION – Limite par grand froid

Lorsque la température extérieure devient très basse (typiquement en dessous de -10 °C à -15 °C selon les modèles), deux phénomènes limitent l'usage d'une pompe à chaleur air-air comme chauffage principal exclusif : d'une part le COP diminue fortement (l'écart de température à franchir augmente) ; d'autre part la puissance thermique maximale disponible diminue également, car le fluide circule à plus faible pression et le compresseur, à cylindrée fixe, déplace alors une masse de fluide moindre par tour. C'est pourquoi de nombreux logements chauffés par climatisation réversible conservent un appoint (radiateurs électriques,

chaudière) pour les périodes les plus froides, ou choisissent des modèles spécifiquement conçus pour le grand froid (gamme « hiver » de certains fabricants, comme les séries Zubadan de Mitsubishi Electric ou les modèles « Cold Climate » de divers fabricants, qui intègrent un compresseur surdimensionné et parfois une injection de vapeur intermédiaire pour maintenir la puissance par grand froid).

6 Bilan énergétique et indicateurs de performance

6.1 Les puissances en jeu

Pour caractériser le fonctionnement d'un climatiseur réversible, on distingue trois puissances, reliées par la conservation de l'énergie :

- la **puissance thermique utile** P_{th} : puissance frigorifique en mode climatisation (chaleur prélevée à l'intérieur par seconde) ou puissance calorifique en mode chauffage (chaleur cédée à l'intérieur par seconde), exprimée en kilowatts ;
- la **puissance électrique absorbée** P_{elec} : puissance électrique totale consommée par l'appareil (compresseur, ventilateurs, électronique de régulation), exprimée en kilowatts ;
- la **puissance échangée à la source extérieure** P_{ext} : par conservation de l'énergie (premier principe appliqué à l'ensemble du cycle sur une durée donnée), on a en mode chauffage $P_{th} = P_{ext} + P_{elec}$ (la chaleur cédée à l'intérieur est la somme de la chaleur prélevée à l'extérieur et du travail électrique consommé), et en mode climatisation $P_{ext} = P_{th} + P_{elec}$ (la chaleur rejetée à l'extérieur est la somme de la chaleur prélevée à l'intérieur et du travail électrique consommé).

6.2 Coefficients de performance : COP et EER

DÉFINITION – COP (Coefficient de Performance)

En mode chauffage, le **COP** est défini comme le rapport de la puissance calorifique utile à la puissance électrique absorbée :

$$\text{COP} = \frac{P_{th, \text{chauffage}}}{P_{elec}}$$

Un COP de 4, par exemple, signifie que pour 1 kW électrique consommé, l'appareil restitue 4 kW de chaleur dans le local.

DÉFINITION – EER (Energy Efficiency Ratio)

En mode climatisation, l'indicateur équivalent est l'**EER**, rapport de la puissance frigorifique utile à la puissance électrique absorbée :

$$\text{EER} = \frac{P_{th, \text{froid}}}{P_{elec}}$$

Ces deux coefficients sont mesurés dans des **conditions normalisées** précises (températures intérieure et extérieure fixées par une norme, par exemple la norme européenne EN 14511, typiquement 35 °C extérieur / 27 °C intérieur en froid nominal, et 7 °C extérieur / 20 °C intérieur en chaud nominal), ce qui permet de comparer équitablement différents appareils entre eux – mais qui ne reflète qu'un seul point de fonctionnement parmi tous ceux rencontrés au cours d'une année réelle d'utilisation (d'où l'introduction des indices saisonniers, voir section 6.4).

6.3 Comparaison avec la borne de Carnot : le rendement exergetique

EXEMPLE CONCRET – Du COP de Carnot au COP réel

Reprenons l'exemple du chapitre 2 : évaporation à 7 °C (280 K), condensation à 45 °C (318 K), soit $\text{COP}_{\text{Carnot}} \approx 8,4$. Un climatiseur réversible Inverter de bonne qualité, dans des conditions de température proches, affiche en pratique un COP réel de l'ordre de 3,5 à 4,5. Le rapport entre COP réel et COP de Carnot, appelé **rendement exergetique** (ou facteur de qualité, parfois noté η_{ex}), vaut alors typiquement :

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{\text{COP}_{\text{réel}}}{\text{COP}_{\text{Carnot}}} \approx \frac{4}{8,4} \approx 0,48$$

Autrement dit, la machine réelle n'atteint qu'environ 48 % de la performance théorique maximale permise par les températures de fonctionnement. L'écart restant correspond aux irréversibilités réelles : compression non isentropique (frottements internes, échauffement du gaz au-delà du strict nécessaire), pertes de charge dans les tuyauteries et les échangeurs, écarts de température finis nécessaires aux échanges thermiques (le fluide doit se condenser à une température supérieure à celle de l'air extérieur, et s'évaporer à une température inférieure à celle de l'air intérieur, ce qui dégrade légèrement le « T_c/T_f effectif » vu par le cycle réel par rapport aux températures des sources elles-mêmes), pertes électriques dans le moteur et l'électronique de puissance.

6.4 Exemple de calcul complet à partir du diagramme enthalpique

EXEMPLE CONCRET – Calcul numérique pédagogique d'un cycle (valeurs approchées)

Considérons, à titre pédagogique, un cycle dont les points caractéristiques (numérotés comme sur la figure 2) présentent les enthalpies massiques approchées suivantes – ces valeurs, inspirées d'ordres de grandeur réels mais arrondies pour la clarté de l'exemple, ne doivent pas être utilisées pour un dimensionnement réel :

Point	Description	Enthalpie h (kJ/kg)	Pression (relative)
1	Sortie évaporateur (vapeur BP surchauffée)	420	BP
2	Sortie compresseur (vapeur HP surchauffée)	460	HP
3	Sortie condenseur (liquide HP sous-refroidi)	270	HP
4	Sortie détendeur (mélange BP)	270	BP

On en déduit, par kilogramme de fluide circulant :

$$w_{\text{compresseur}} = h_2 - h_1 = 460 - 420 = 40 \text{ kJ/kg} \quad (\text{travail reçu par le fluide})$$

$$q_{\text{évaporateur}} = h_1 - h_4 = 420 - 270 = 150 \text{ kJ/kg} \quad (\text{chaleur prélevée à l'intérieur})$$

$$|q_{\text{condenseur}}| = h_2 - h_3 = 460 - 270 = 190 \text{ kJ/kg} \quad (\text{chaleur rejetée à l'extérieur})$$

On vérifie la cohérence avec le premier principe sur le cycle complet : $|q_{\text{condenseur}}| = q_{\text{évaporateur}} + w_{\text{compresseur}}$, soit $190 = 150 + 40$. ✓

Le COP en mode climatisation (EER) s'obtient alors comme :

$$\text{EER} = \frac{q_{\text{évaporateur}}}{w_{\text{compresseur}}} = \frac{150}{40} = 3,75$$

et le COP en mode chauffage correspondant :

$$\text{COP} = \frac{|q_{\text{condenseur}}|}{w_{\text{compresseur}}} = \frac{190}{40} = 4,75$$

On note au passage une propriété générale, conséquence directe du premier principe : pour un même cycle (mêmes points 1 à 4), le COP en chauffage est toujours supérieur à l'EER en froid de *exactement* 1 unité, puisque $\text{COP} - \text{EER} = \frac{|q_{\text{cond}}| - q_{\text{evap}}}{w} = \frac{w}{w} = 1$. Ici, $4,75 - 3,75 = 1$. ✓

POUR ALLER PLUS LOIN – Pour aller plus loin : ce calcul ne tient pas compte du rendement du compresseur

Le calcul ci-dessus traite le travail $w_{\text{compresseur}} = h_2 - h_1$ comme s'il s'agissait exactement du travail électrique consommé. En réalité, le moteur électrique du compresseur a lui-même un rendement (pertes Joule, pertes par frottements mécaniques, pertes dans l'électronique de puissance), de l'ordre de 85 à 95 % pour un compresseur Inverter moderne à moteur synchrone à aimants permanents. La puissance électrique réellement consommée est donc légèrement supérieure à $\dot{m} \times w_{\text{compresseur}}$, ce qui réduit d'autant le COP réel par rapport au COP « thermodynamique » calculé uniquement à partir du diagramme enthalpique.

6.5 Indices saisonniers : SEER et SCOP

Le COP et l'EER mesurés en conditions normalisées (un seul point de fonctionnement) ne reflètent pas fidèlement la consommation réelle sur une année, durant laquelle la température extérieure varie continuellement, modifiant à chaque instant le COP instantané de l'appareil (rappel : plus l'écart de température entre intérieur et extérieur est grand, plus le COP diminue).

DÉFINITION – SEER et SCOP

Le **SEER** (*Seasonal Energy Efficiency Ratio*, indice saisonnier d'efficacité en froid) et le **SCOP** (*Seasonal Coefficient Of Performance*, indice saisonnier de performance en chaud) sont des indices calculés selon une méthode normalisée (norme européenne EN 14825), qui pondère le COP/EER mesuré à plusieurs températures extérieures représentatives (par exemple, en chaud : -7°C , 2°C , 7°C , 12°C) par la fréquence statistique de chacune de ces températures sur une saison de climat européen de référence. Ils donnent ainsi une image beaucoup plus représentative de la performance réelle sur une année complète qu'une mesure à un seul point.

Ces indices déterminent la **classe énergétique** affichée sur l'étiquette énergie européenne obligatoire, qui s'échelonne de **A+++** (la plus performante) à des classes inférieures :

Tableau 3: Correspondance indicative entre la valeur du SEER (mode froid) et la classe énergétique européenne.

Classe énergétique	SEER
A+++	supérieur à 8,5
A++	de 6,1 à 8,5
A+	de 5,6 à 6,1
A	de 5,1 à 5,6
B	de 4,6 à 5,1

Pour le mode chauffage, un **SCOP** de 5, par exemple, signifie que sur l'ensemble d'une saison de chauffe, l'appareil produit en moyenne 5 kWh de chaleur pour chaque 1 kWh électrique consommé. En France, certains dispositifs d'aide à la rénovation énergétique (comme

MaPrimeRénov') exigent un SCOP minimal (de l'ordre de 3,9) pour qu'un climatiseur réversible soit éligible en tant que système de chauffage principal.

7 La technologie Inverter : électronique et régulation

7.1 Pourquoi moduler la puissance plutôt que fonctionner en tout-ou-rien ?

Un climatiseur **non-Inverter** (dit « on/off ») ne connaît que deux états : compresseur à pleine puissance, ou compresseur arrêté. La température de consigne est maintenue en alternant des cycles de marche et d'arrêt, ce qui engendre plusieurs inconvénients : des oscillations de température ressenties dans la pièce, une usure mécanique accrue (chaque démarrage d'un moteur électrique provoque un appel de courant et des contraintes mécaniques bien supérieures au régime établi), et un rendement moyen dégradé (le régime transitoire de démarrage est toujours moins efficace que le régime permanent).

DÉFINITION – Climatiseur Inverter

Un climatiseur **Inverter** utilise un compresseur dont la vitesse de rotation – donc le débit de fluide frigorigène déplacé, donc la puissance thermique délivrée – peut être ajustée en continu, en fonction de l'écart entre la température mesurée et la température de consigne. L'appareil module ainsi sa puissance pour la maintenir au plus près du besoin réel instantané, au lieu d'alterner brutalement entre pleine puissance et arrêt complet.

7.2 Le variateur de fréquence

DÉFINITION – Variateur de fréquence (onduleur de puissance)

Le **variateur de fréquence**, ou **onduleur**, est un convertisseur électronique de puissance qui transforme le courant alternatif du réseau électrique (fréquence fixe de 50 Hz) en un courant alternatif de fréquence *réglable*, permettant de piloter en continu la vitesse de rotation du moteur synchrone du compresseur.

Le principe de fonctionnement comporte deux étapes :

1. un **redresseur** (pont de diodes ou de transistors) convertit le courant alternatif du réseau en un courant continu (en pratique une tension continue stockée temporairement sur un condensateur, le « bus continu ») ;
2. un **onduleur** reconvertit ce courant continu en courant alternatif, mais à une fréquence et une amplitude choisies électroniquement, grâce à des transistors de puissance (typiquement des IGBT, *Insulated Gate Bipolar Transistor*) commandés selon une technique appelée **modulation de largeur d'impulsion** (MLI, ou PWM en anglais pour *Pulse Width Modulation*).

DÉFINITION – Modulation de largeur d'impulsion (MLI / PWM)

La **MLI** consiste à découper très rapidement (plusieurs milliers de fois par seconde) la tension continue disponible en une succession d'impulsions rectangulaires de largeur variable, dont la moyenne temporelle reconstitue, une fois filtrée par l'inductance du moteur, une tension d'allure quasi sinusoïdale, à la fréquence et à l'amplitude souhaitées.

7.3 Le moteur synchrone à aimants permanents et le contrôle vectoriel

Le moteur du compresseur Inverter est généralement un **moteur synchrone à aimants permanents** (souvent désigné par l'acronyme BLDC, *BrushLess Direct Current*, bien qu'il soit en

réalité alimenté en courant alternatif via l'onduleur, le terme « DC » renvoyant historiquement à l'absence de balais et de collecteur mécanique, remplacés par une commutation purement électronique). Sa vitesse de rotation est rigoureusement proportionnelle à la fréquence du courant qui l'alimente (d'où le nom « synchrone ») : en ajustant cette fréquence, l'électronique ajuste directement la vitesse du compresseur, typiquement entre 1 000 et plus de 9 000 tours par minute selon le besoin de puissance instantané.

Les variateurs modernes emploient une technique appelée **contrôle vectoriel** (ou *Field-Oriented Control*, FOC), qui consiste à piloter séparément, par le calcul en temps réel effectué par un microcontrôleur dédié, les deux composantes du courant utiles à la production du couple moteur, permettant un fonctionnement très efficace et silencieux même à très basse vitesse – ce qui explique la capacité des climatiseurs Inverter modernes à moduler leur puissance sur une plage très étendue, parfois de 20 % à 110 % de leur puissance nominale.

7.4 Les capteurs

Le bon fonctionnement de la régulation repose sur un ensemble de capteurs disséminés dans le circuit :

- des **sondes de température à thermistance CTN** (coefficient de température négatif : la résistance électrique diminue quand la température augmente), placées sur les tuyauteries d'entrée et de sortie de chaque échangeur, ainsi que dans l'air ambiant intérieur et extérieur ;
- des **capteurs de pression** (souvent à jauge de contrainte ou piézorésistifs), placés côté haute pression et basse pression, permettant de connaître la pression de saturation, donc (via les tables thermodynamiques du fluide frigorigène mémorisées dans l'électronique) la température de saturation correspondante, indispensable au calcul de la surchauffe et du sous-refroidissement.

7.5 La boucle de régulation

DÉFINITION – Boucle de régulation en boucle fermée

Une **boucle de régulation en boucle fermée** (ou *asservissement*) est un dispositif dans lequel la grandeur de sortie (ici, la température de la pièce) est mesurée en continu et comparée à une valeur de consigne ; l'écart (*l'erreur*) entre les deux pilote alors une action correctrice (ici, la vitesse du compresseur), dans le but de réduire cet écart.

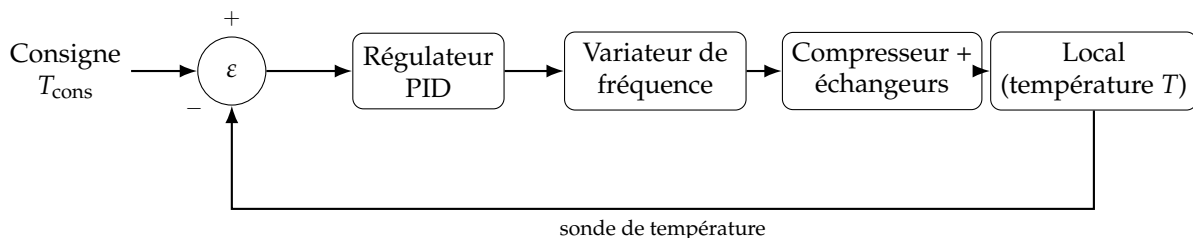


Figure 6: Boucle de régulation simplifiée d'un climatiseur Inverter. L'écart $\varepsilon = T_{\text{cons}} - T_{\text{mesurée}}$ pilote, via un régulateur PID implémenté dans le microcontrôleur de l'appareil, la fréquence d'alimentation du compresseur, donc sa vitesse de rotation, donc finalement la puissance thermique délivrée.

DÉFINITION – Régulateur PID

Un **régulateur PID** (Proportionnel - Intégral - Dérivé) calcule la commande à appliquer (ici, la fréquence d'alimentation du compresseur) comme une combinaison de trois termes :

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + K_d \frac{d\varepsilon}{dt}$$

où $\varepsilon(t)$ est l'écart entre consigne et mesure à l'instant t . Le terme **proportionnel** réagit à l'écart instantané ; le terme **intégral** élimine l'erreur résiduelle en régime permanent (un terme proportionnel seul laisserait toujours un petit écart constant) ; le terme **dérivé** anticipe l'évolution de l'écart pour limiter les dépassements (*overshoot*) et accélérer la stabilisation.

Ce calcul est exécuté en continu par un **microcontrôleur** embarqué dans la carte électronique de l'unité extérieure (et dialoguant avec une carte similaire dans l'unité intérieure), qui gère également la sécurité de l'appareil (surveillance des pressions et températures limites, gestion des défauts, protection du moteur contre les surintensités), ainsi que la communication avec la télécommande (généralement par infrarouge) ou, sur les modèles connectés, avec une application smartphone via Wi-Fi.

8 Le dégivrage : un défi spécifique au mode chauffage

8.1 Pourquoi du givre apparaît-il sur l'unité extérieure en hiver ?

En mode chauffage, l'échangeur extérieur fonctionne comme évaporateur : le fluide frigorigène y circule à une température souvent négative (par exemple -5°C à -10°C), nécessairement inférieure à la température de l'air extérieur pour permettre le transfert de chaleur de l'air vers le fluide.

EXEMPLE CONCRET – Formation du givre

Si la température extérieure se situe, par exemple, autour de 2°C à 5°C , avec une humidité relative significative (ce qui est fréquent en hiver), l'air en contact avec les tubes et ailettes de l'échangeur extérieur, refroidi localement bien en dessous de 0°C par le fluide frigorigène, dépose son humidité directement sous forme de **givre** (passage direct de la vapeur d'eau à l'état solide, par **condensation solide** ou **sublimation inverse**). Ce phénomène est exactement analogue au givre qui se forme sur les parois d'un congélateur.

Ce givre, en s'accumulant, obstrue progressivement le passage de l'air entre les ailettes, réduisant l'efficacité de l'échange thermique, jusqu'à rendre l'évaporateur extérieur quasiment inopérant s'il n'est pas éliminé régulièrement.

8.2 Détection du givrage

L'électronique de l'appareil détecte un givrage excessif par plusieurs méthodes combinées :

- suivi de la **température de l'échangeur extérieur** (mesurée par sonde), qui, en présence de givre, a tendance à diminuer anormalement pour un même point de fonctionnement (car le passage d'air restreint perturbe l'équilibre thermique) ;
- suivi de la **durée de fonctionnement** en mode chauffage depuis le dernier dégivrage, combinée aux conditions de température et d'humidité extérieures ;
- sur certains modèles, mesure directe de la perte de charge aéraulique (différence de pression de part et d'autre de l'échangeur, révélatrice d'une obstruction).

8.3 Le cycle de dégivrage

Lorsque le givrage est détecté comme significatif, l'appareil engage un **cycle de dégivrage**, qui consiste, le plus souvent, à **inverser temporairement la vanne 4 voies** (l'appareil bascule quelques minutes en mode « climatisation »), tout en arrêtant le ventilateur extérieur. L'échangeur extérieur reçoit alors brièvement du fluide chaud à haute pression (provenant du compresseur), ce qui fait fondre rapidement le givre accumulé. Durant cette brève période (généralement quelques minutes), l'unité intérieure ne produit temporairement plus de chauffage utile (et peut même légèrement refroidir l'air, ce qui explique que certains utilisateurs perçoivent un bref souffle d'air frais ou l'arrêt du ventilateur intérieur pendant un dégivrage), avant que l'appareil ne reprenne son fonctionnement normal en mode chauffage.

POUR ALLER PLUS LOIN – Un compromis énergétique inévitable

Le dégivrage consomme de l'énergie sans produire d'effet utile de chauffage pendant sa durée (et même en « empruntant » de la chaleur précédemment stockée dans l'appareil ou l'air intérieur) : il dégrade donc légèrement le SCOP réel de l'appareil dans les conditions climatiques favorisant le givrage (température extérieure légèrement positive et forte humidité). C'est l'une des raisons pour lesquelles le SCOP normalisé (section 6.4) intègre des conditions de test représentatives incluant ce phénomène, et pour lesquelles les fabricants travaillent à optimiser la fréquence et la durée des cycles de dégivrage.

9 Dimensionnement d'une installation

9.1 Le bilan thermique d'un local

Choisir la puissance d'un climatiseur réversible ne se fait pas au hasard : il faut au préalable estimer les **déperditions thermiques** du local en hiver (pour le chauffage) et ses **apports thermiques** en été (pour le rafraîchissement).

DÉFINITION – Déperditions thermiques

Les **déperditions thermiques** d'un local sont la puissance thermique qu'il perd en permanence vers l'extérieur, du fait de la conduction à travers les parois (murs, vitrages, toiture), des infiltrations d'air, et du renouvellement d'air hygiénique. Elles sont proportionnelles, en première approximation, à l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur :

$$P_{\text{déperditions}} = U_{\text{global}} \times S \times (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$$

où U_{global} (en $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$) est un coefficient global de déperdition (dépendant de l'isolation des parois) et S la surface déperditrice totale.

En été, ce sont plutôt les **apports thermiques** (rayonnement solaire à travers les vitrages, apports internes des occupants et des appareils électriques, apports par les parois échauffées) qui doivent être compensés par la puissance frigorifique de l'appareil.

EXEMPLE CONCRET – Estimation simplifiée pour une chambre de référence

Considérons une chambre de 15 m^2 (environ 38 m^3 sous $2,5 \text{ m}$ de hauteur sous plafond), moyennement isolée (logement des années 1980-1990, sans rénovation énergétique lourde), pour laquelle on retient un ordre de grandeur usuel de $60 \text{ W}/\text{m}^2$ de besoin de chauffage pour un écart de température de 25 K (intérieur $20 \text{ }^\circ\text{C}$, extérieur de référence $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ pour la

région considérée). Le besoin de chauffage de pointe est alors de l'ordre de :

$$P_{\text{chauffage}} \approx 60 \times 15 = 900 \text{ W} \approx 1 \text{ kW}$$

On choisirait alors un climatiseur réversible mural de la gamme « 2,5 kW » ou « 3,5 kW » (puissances nominales commerciales), qui dispose ainsi d'une marge confortable par rapport au besoin de pointe calculé, marge nécessaire car la puissance nominale commerciale est en général donnée dans des conditions plus favorables (7 °C extérieur) que la pointe de froid réelle de l'hiver (-5 °C ou moins selon la région).

ATTENTION – Pièges classiques du sous-dimensionnement et du surdimensionnement

Un appareil **sous-dimensionné** ne pourra pas maintenir la température de consigne lors des pointes de froid ou de chaud, et fonctionnera en permanence à pleine puissance (perte du bénéfice de la modulation Inverter). Un appareil **surdimensionné**, à l'inverse, fonctionnera la plupart du temps à très faible charge partielle, ce qui peut, paradoxalement, dégrader légèrement son rendement réel (un compresseur Inverter a généralement un rendement optimal dans une plage de charge intermédiaire, pas à charge minimale), en plus d'un surcoût à l'achat injustifié. Un dimensionnement réalisé par un professionnel, à partir d'un calcul de déperditions/apports complet (et non d'une simple règle empirique au m²), reste la méthode la plus fiable.

10 Études de cas : appareils du commerce

10.1 Panorama des gammes résidentielles

Les principaux fabricants de climatisation réversible mono-split ou multi-split résidentielle (une unité extérieure pouvant alimenter plusieurs unités intérieures) proposent des gammes structurées par niveau de performance et de confort (niveau sonore, design, fonctionnalités connectées). Le tableau ci-dessous présente, à titre indicatif et à des fins purement pédagogiques, les ordres de grandeur typiquement rencontrés sur le segment résidentiel mural ; les valeurs précises doivent toujours être vérifiées sur la fiche technique officielle du fabricant pour un modèle et une version donnés, ces caractéristiques évoluant régulièrement.

Tableau 4: Ordres de grandeur typiques pour des climatiseurs muraux réversibles Inverter résidentiels (segment milieu/haut de gamme). Valeurs indicatives à vérifier sur la fiche technique du modèle précis envisagé.

Caractéristique	Petite puissance	Puissance moyenne	Forte puissance
Puissance froid nominale	~2,0 kW–2,5 kW	~3,5 kW	~5 kW–7,1 kW
Surface indicative	~10 m ² –15 m ²	~20 m ² –25 m ²	~35 m ² et plus
Fluide frigorigène	R32 (très majoritaire)	R32	R32
SEER (classe)	jusqu'à A+++ (> 8,5) sur le haut de gamme	jusqu'à A+++	souvent A++
SCOP (classe)	jusqu'à A+++ (> 5,1 environ) sur le haut de gamme	4,0–5,0 typique	3,8–4,5 typique
Niveau sonore intérieur	~19–22 dB(A) (haut de gamme) à 24–28 dB(A)	~22–28 dB(A)	~25–32 dB(A)

LIEN AVEC LE MATÉRIEL RÉEL – Quelques gammes représentatives du marché

- **Daikin** : gammes Sensira (entrée de gamme), Perfera et Stylish (milieu/haut de gamme, très silencieuses), Emura (haut de gamme design) – compresseur scroll Inverter, fluide R32.
- **Mitsubishi Electric** : gammes MSZ-AY, MSZ-LN (haut de gamme, fonction « hybride » de filtration), et la gamme Zubadan pour les pompes à chaleur air-air « grand froid » conservant une puissance élevée jusqu'à des températures extérieures très basses.
- **Panasonic** : gammes Compact, Etherea (haut de gamme avec capteur de présence intégré), TZ.
- **Toshiba** : gammes Shorai et Haori (haut de gamme, design textile en façade).
- **Atlantic, Fujitsu, LG, Hitachi** proposent des gammes comparables, avec des positionnements similaires (entrée, milieu, haut de gamme) sur les mêmes principes technologiques.

Toutes ces gammes récentes partagent les mêmes briques technologiques décrites dans ce document : compresseur Inverter à moteur synchrone (très souvent de technologie scroll), détendeur électronique, fluide R32, vanne 4 voies pour la réversibilité, et régulation par microcontrôleur avec boucle PID.

10.2 Lire une fiche technique

Une fiche technique de climatiseur réversible mentionne typiquement : la puissance froid et la puissance chaud nominales (en kW, parfois données pour plusieurs plages, par exemple « 1,7–5,0 kW » pour indiquer la plage de modulation Inverter), l'EER et le COP nominaux, le SEER et le SCOP saisonniers (et la classe énergétique correspondante), le niveau de puissance acoustique (en dB(A), à distinguer entre unité intérieure et extérieure), le type et la charge de fluide frigorigène (en kg), les dimensions et le poids de chaque unité, ainsi que la plage de température extérieure de fonctionnement garantie (par exemple « de -15°C à 46°C » en mode climatisation, « de -20°C à 24°C » en mode chauffage, ces plages variant notablement entre gammes standards et gammes « grand froid »).

11 Synthèse générale

Le fonctionnement d'une climatisation réversible repose sur un nombre restreint de principes physiques, combinés avec une grande finesse technologique :

1. Le **second principe de la thermodynamique** interdit le transfert spontané de chaleur du froid vers le chaud, mais autorise ce transfert si un travail extérieur est fourni : c'est exactement ce que réalise la pompe à chaleur, en consommant de l'électricité.
2. Le **cycle à compression de vapeur**, organisé autour de quatre organes (compresseur, condenseur, détendeur, évaporateur), exploite les changements d'état d'un fluide frigorigène pour réaliser ce transfert de chaleur avec une excellente efficacité, bien supérieure à un simple chauffage par effet Joule.
3. La **vanne 4 voies** permet d'inverser le sens du cycle, donnant à l'appareil sa capacité à chauffer aussi bien qu'à climatiser, avec un unique circuit frigorifique.

4. La **technologie Inverter**, fondée sur l'électronique de puissance (variateur de fréquence, MLI) et le contrôle moteur, permet de moduler finement la puissance délivrée, améliorant à la fois le confort et l'efficacité énergétique par rapport aux climatiseurs à puissance fixe.
5. La performance réelle d'un appareil (COP, EER, SEER, SCOP) reste toujours inférieure à la limite théorique fixée par le cycle de Carnot, l'écart mesurant l'ensemble des irréversibilités inévitables dans une machine réelle.

Cette compréhension détaillée permet d'aborder avec un regard critique et informé les fiches techniques des appareils commerciaux, ainsi que les choix de dimensionnement et d'installation propres à chaque logement.

12 Lexique des termes techniques

Bulbe	Capteur de température rempli d'un fluide sensible, utilisé pour piloter mécaniquement un détendeur thermostatique.
Chaleur latente	Énergie échangée lors d'un changement d'état à température constante.
COP	Coefficient de performance, rapport puissance thermique utile / puissance électrique absorbée, en mode chauffage.
Détendeur	Organe provoquant la chute de pression isenthalpique du fluide entre condenseur et évaporateur.
EER	Energy Efficiency Ratio, équivalent du COP en mode climatisation.
Enthalpie	Grandeur thermodynamique $H = U + PV$, outil central de l'étude des écoulements en régime permanent.
Évaporateur	Échangeur dans lequel le fluide frigorigène s'évapore en prélevant de la chaleur.
Fluide frigorigène	Fluide circulant en circuit fermé et subissant les changements d'état permettant le transport de chaleur.
Inverter	Technologie de compresseur à vitesse variable, pilotée par un variateur de fréquence électronique.
MLI / PWM	Modulation de largeur d'impulsion, technique de commande électronique des transistors de puissance d'un onduleur.
PID	Régulateur Proportionnel-Intégral-Dérivé, algorithme d'asservissement en boucle fermée.
PRG	Pouvoir de réchauffement global, indicateur d'impact climatique d'un gaz à effet de serre relativement au CO ₂ .
Régime permanent	Régime d'écoulement où les grandeurs physiques ne dépendent pas du temps en un point donné.
SCOP	Coefficient de performance saisonnier, en mode chauffage, intégrant la variabilité climatique sur une année.
SEER	Indice d'efficacité énergétique saisonnière, en mode climatisation.
Surchauffe	Écart de température entre la vapeur réelle en sortie d'évaporateur et la température de saturation à la même pression.

Sous-refroidissement Écart symétrique, en sortie de condenseur, côté liquide.

Vanne 4 voies Électrovanne permettant d'inverser le sens de circulation du fluide, donc le mode de fonctionnement (froid/chaud).

Annexe – Tableau récapitulatif des quatre transformations du cycle

Transformation	Organe	Évolution du fluide	Énergie échangée	Premier principe
1 → 2	Compresseur	Vapeur BP → vapeur HP sur- chauffée	Travail reçu $w = h_2 - h_1 > 0$	$q \approx 0$ (adiabatique)
2 → 3	Condenseur	Vapeur HP → liquide HP sous- refroidi	Chaleur cédée $ q = h_2 - h_3$	$w = 0$
3 → 4	Détendeur	Liquide HP → mélange BP	Aucune (isenthalpique, $h_3 = h_4$)	$q \approx 0, w = 0$
4 → 1	Évaporateur	Mélange BP → vapeur BP sur- chauffée	Chaleur reçue $q = h_1 - h_4$	$w = 0$

Fin du document.