

Hydraulique

REVUE PÉRIODIQUE D'INFORMATIONS TECHNIQUES DES THERMICIENS

10

Septembre 2023

Les installations
avec pompe à
chaleur air/eau



CALEFFI XF EXTRA FILTRATION



IDÉAL POUR
POMPES
À CHALEUR

CALEFFI XF série 577 est un pot de décantation magnétique avec filtre de niveau extra. Les mailles du filtre ont une surface extra grande et sont extra fines pour un nettoyage incomparable de l'installation. Le nouveau barreau magnétique amovible retient les impuretés ferreuses jusqu'aux plus petites tailles. CALEFFI XF est autonettoyant : son mécanisme à brosses permet d'éliminer et de vidanger toutes les impuretés sans démonter le filtre.



ÉDITORIAL

UN AVENIR DURABLE

20-20-20 était le nom attribué à l'ensemble des mesures élaborées par l'UE à appliquer suite au Protocole de Kyoto de 1997. Le Pack Climat – faisant partie de la directive 2009/29/CE et entré en vigueur en juin 2009 – prévoyait de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 20 % par rapport aux valeurs de 1990, d'augmenter de 20 % la part des énergies renouvelables et de réaliser 20 % d'économie d'énergie par rapport à la tendance en cours.



Puis l'année 2020 est arrivée et tout le monde a pu constater que les mesures mises en acte jusque-là ne s'étaient pas avérées suffisantes.

Durant le G20 et la COP26, nous avons assisté à des tentatives visant à trouver une synthèse entre nécessités impérieuses et réalité. Mettre d'accord tous les pays, industrialisés et en voie de développement, sur la question des émissions et de l'environnement durable n'est pas chose facile. À l'heure actuelle, les cibles fixées (ou souhaitées) sont plus ambitieuses que par le passé : 30 % de réduction des gaz à effet de serre avant 2030, plus de 50 % avant 2050. Une farandole de chiffres qui risque de créer des confusions et qui cache une question fondamentale : comment pourrions-nous y arriver ?

Les premiers secteurs à être particulièrement visés sont les transports ainsi que le chauffage domestique. Les transports, avec l'interdiction du bon vieux moteur à combustion avant 2035 qui arrive à grands pas, le chauffage domestique par l'effet de lois et de primes d'état cherchant à supplanter les chaudières à combustibles fossiles pour laisser place aux pompes à chaleur.

Les appareils en mesure de prélever l'énergie thermique d'un environnement à basse température pour la céder à un autre environnement dont la température est supérieure sont déjà proposés dans notre pays pour presque tous les immeubles en construction. Le remplacement du grands nombres de chaudières déjà installées dans notre parc immobilier par des pompes à chaleur a déjà commencé.

Caleffi croit en cette révolution sur le moyen terme et investit en recherche et développement ainsi qu'en process afin de réaliser des composants spécifiques pour ce type d'installations, dans le but de simplifier le travail des concepteurs et des installateurs durant la phase de transition qui ne s'avère pas si simple mais est certainement stimulante.

Dans ce numéro d'Hydraulique, nous avons cherché à présenter une vision globale des installations avec pompe à chaleur actuellement réalisables, du cadre normatif jusqu'au choix de chaque composant. C'est notre façon de tendre la main à tous ceux qui recherchent une confrontation, un éclaircissement, une aide pour relever ce nouveau défi. Comme toujours, Caleffi est à vos côtés.



Domenico Mazzetti

*Product Marketing HVAC and
Post Sales Manager*

Directeur de publication
Mattia Tomasoni

Rédacteur en chef
Fabrizio Guidetti

Ont collaboré
à ce numéro :
Alessia Soldarini
Claudio Ardizzoia
Dennis Boetto
Domenico Mazzetti
Jérôme Carlier
Mattia Tomasoni
Pierre-Louis Taranto
Renzo Planca

Hydraulique est une publication
éditée par Caleffi France

Dépôt légal : juin 2023

ISSN 1769-0609

Éditeur
La Terra Promessa Onlus -
Novara

Imprimé par :
Grafiche Vecchi
Borgomanero (NO) Italie

CALEFFI S.P.A.
S.R. 229, n.25
28010 Fontaneto d'Agogna (NO)
Tél. +39 0322 8491
Fax +39 0322 863723
info@caleffi.com
www.caleffi.com

CALEFFI FRANCE
45 Avenue Gambetta
26 000 Valence
Tel. +33 (0)4 75 59 95 86
infos.france@caleffi.com
www.caleffi.fr

Copyright Hydraulique Caleffi. Tous droits réservés. Il est strictement interdit de publier, reproduire ou diffuser une quelconque partie de la revue sans l'accord écrit de Caleffi France.

SOMMAIRE

5 LES INSTALLATIONS AVEC POMPE À CHALEUR AIR/EAU

6 LE BOOM DES POMPES À CHALEUR

- Le cadre normatif
- Le parc immobilier
- Le marché des chaudières
- Le marché des pompes à chaleur

10 LES TYPES DE POMPES À CHALEUR

- Principe de fonctionnement
- Classification des pompes à chaleur en fonction du type de compression
- Classification des pompes à chaleur en fonction du type de source énergétique

14 LES POMPES À CHALEUR AIR/EAU

17 APPROFONDISSEMENT : LE CONTRÔLE DU NIVEAU DE BRUIT DES POMPES À CHALEUR

18 EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET RENTABILITÉ

- Rendement d'un générateur
- L'économie d'énergie
- Faire des économies
- Comparaison entre économie d'énergie et rentabilité
- Influence de la régulation sur le COP moyen effectif

27 APPROFONDISSEMENT : POMPES À CHALEUR ET CLIMAT FRANCAIS

28 APPROFONDISSEMENT : LES GAZ RÉFRIGÉRANTS

30 LES INSTALLATIONS AVEC POMPE À CHALEUR AIR/EAU

- Dimensionnement
- Paramètres de fonctionnement
- Cycle de dégivrage

38 LA PRODUCTION D'EAU CHAUDE SANITAIRE

40 APPROFONDISSEMENT : LA PROTECTION ANTI-LÉGIONELLES DANS LES INSTALLATIONS AVEC POMPE À CHALEUR

41 COMPOSANTS D'UNE INSTALLATION AVEC POMPE À CHALEUR

- Terminaux émetteurs
- Séparateur hydraulique
- Ballon tampon
- Traitement de l'eau
- Vanne de zones 3 voies
- Dispositifs pour le maintien de la circulation
- Vase d'expansion
- Protection antigel

46 POT DE DÉCANTATION MAGNÉTIQUE CALEFFI AVEC FILTRE XF

48 APPROFONDISSEMENT : CIRCUIT MONOPHASÉ OU TRIPHASÉ ?

53 SOUPE ANTI GEL TRADITIONNELLE ET AVEC CAPTEUR AIR

LES INSTALLATIONS AVEC POMPE À CHALEUR AIR/EAU

Un des objectifs principaux de la période historique que nous vivons est l'efficacité énergétique. La stratégie de la « Renovation wave » mise sur le renouvellement énergétique radical de 35 millions de bâtiments avant 2030 en Europe.

Cette opération implique tous les secteurs, de la production à l'utilisation, à partir des matières premières, en passant par les méthodes de fabrication, le transport et la vente, jusqu'à l'emploi et même le recyclage et l'élimination des déchets.

Bien sûr, cette tendance à l'efficacité énergétique concerne également le secteur du chauffage et de la climatisation pour lequel les pompes à chaleur (nommées par la suite PAC) aident sensiblement à atteindre les nouveaux objectifs de l'UE en matière de décarbonation : leur technologie représente l'une des solutions clés pour un système énergétique renouvelable et intelligent.

Remplacer un ancien générateur

par une pompe à chaleur est, aujourd'hui, l'une des interventions les plus fréquemment réalisées et qui s'avère souvent particulièrement avantageuse grâce aux primes que l'état met à disposition.

L'objectif de ce numéro d'Hydraulique est justement de faire la lumière sur l'univers des pompes à chaleur.

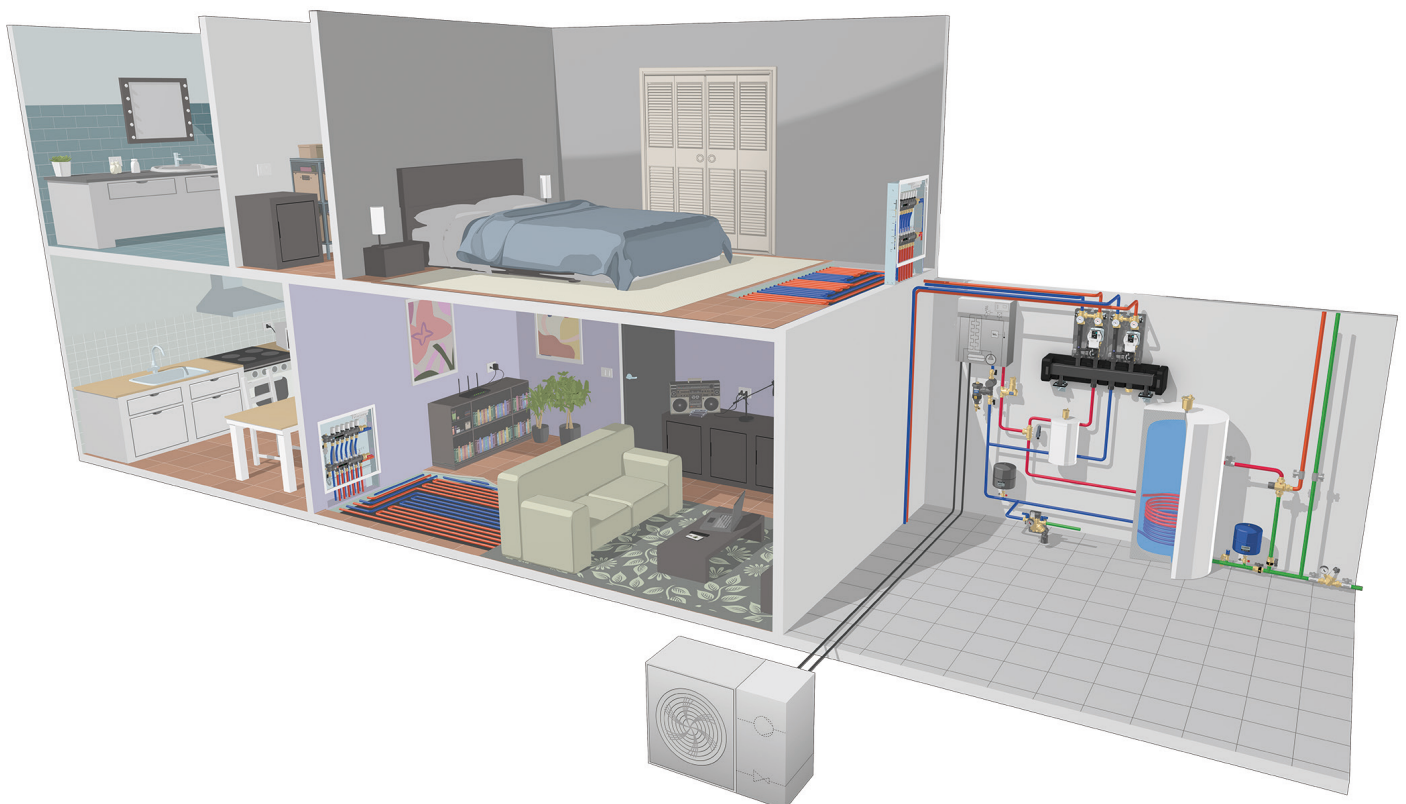
Dans la première partie, nous analyserons les différentes catégories présentes sur le marché afin de souligner les avantages et les inconvénients de chacune et de mieux comprendre quel système répond le mieux aux différents types d'installation de chauffage et de climatisation. Nous passerons ensuite à l'analyse proprement dite des pompes à chaleur air/eau qui sont actuellement les plus utilisées dans les installations.

Dans la deuxième partie, nous nous occuperons d'efficacité énergétique et d'avantages économiques, pour chercher à répondre à la question qui

revient le plus souvent : « Quand la pompe à chaleur devient-elle vraiment avantageuse ? ». Il arrive souvent, en effet, de ne pas comprendre immédiatement si ce choix permet réellement d'économiser. Pour identifier les situations les plus favorables, il faut tenir compte de la distribution des logements par zone climatique, du type de bâtiment où elles sont installées (maison particulière ou logement collectif) et du système de chauffage/climatisation (centralisé ou individuel).

La dernière partie est consacrée aux installations avec pompe à chaleur, à leur dimensionnement et au choix des paramètres de fonctionnement. En théorie, leurs avantages semblent inégalés. Pour les obtenir réellement, l'appareil doit pouvoir fonctionner dans des conditions optimales.

C'est pour cela que le dimensionnement des composants s'avère fondamental afin d'assurer le fonctionnement correct de l'installation.



LE BOOM DES POMPES À CHALEUR

Ingénieurs Claudio Ardizzoia et Alessia Soldarini

Le rôle des pompes à chaleur est en train de devenir de plus en plus déterminant dans la transition écologique en matière de chauffage et de climatisation. Leur contribution vers la consommation d'énergies renouvelables est destinée à croître, grâce également aux stratégies nationales et communautaires adoptées par un grand nombre de pays. Nous présentons ici un résumé du cadre normatif qui contribuera à préférer les pompes à chaleur ces prochaines années en France et en Europe.

LE CADRE NORMATIF

Le protocole de Kyoto, entré en vigueur en 2005, représente le premier accord international entre plusieurs pays, dans le but de combattre le réchauffement global. L'Union Européenne, en appliquant les recommandations du protocole de Kyoto, a promulgué des mesures pour la protection du climat et de l'environnement : la directive Energy Related Products (ErP) et la directive

Energy Labelling (ELD). L'objectif final est d'améliorer les performances générales des installations de chauffage et de climatisation des pays membres par une nouvelle modalité permettant d'évaluer les prestations des produits et des systèmes de ces installations.

Le premier objectif du protocole de Kyoto, la fameuse règle « 20-20-20 », devait être réalisé avant **2020** et représentait le « Climate and Energy Package ». Les

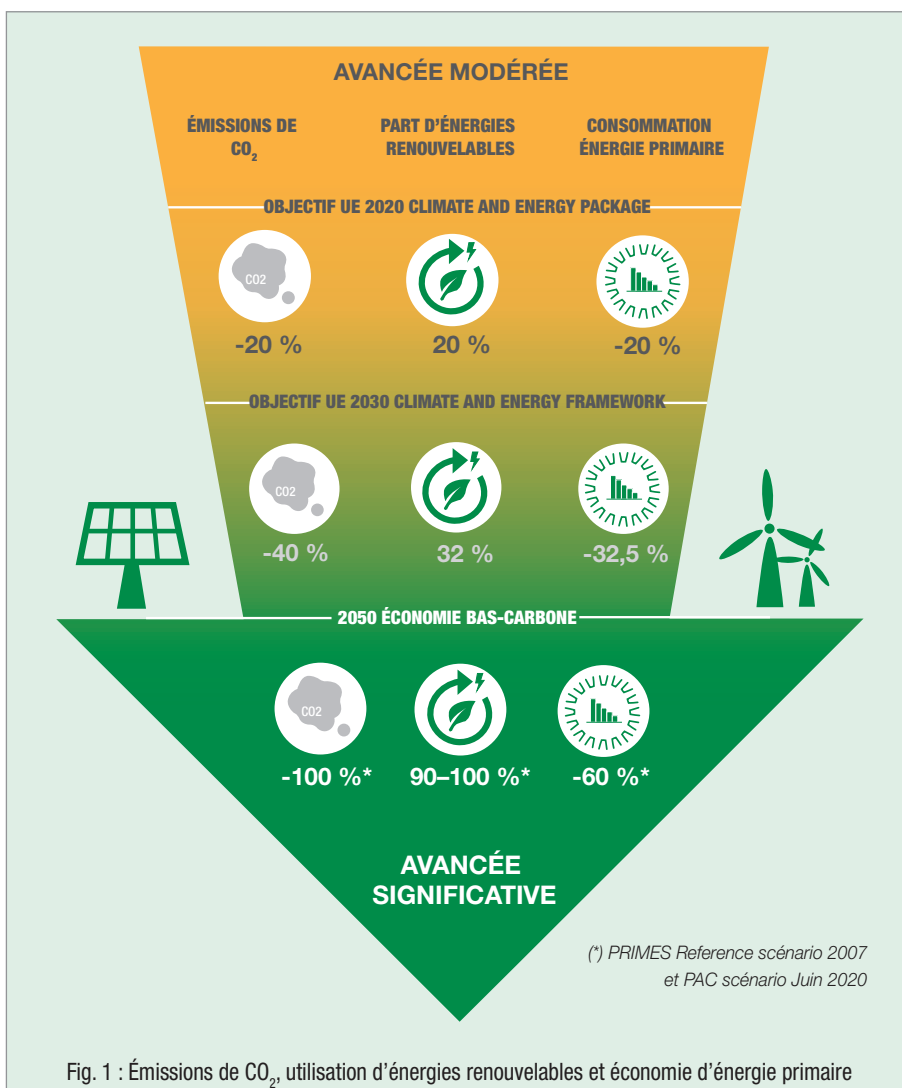
objectifs clé pour l'année **2030** sont présentés dans le document « Climate and Energy Framework » et concernent la réduction des gaz à effet de serre et la réglementation sur l'utilisation du sol. La vision stratégique à long terme de la Commission Européenne pointe l'année **2050** pour une économie climatiquement neutre, avec l'objectif de ne pas dépasser les 2 °C d'augmentation de la température mondiale, mais surtout de réduire cette limite à une valeur inférieure, si possible à 1,5 °C.

Des objectifs possibles, à condition de définir et de mettre sur pied une stratégie de requalification énergétique des bâtiments existants à l'horizon 2050 (Renovation Wave), qui consistera à améliorer l'efficacité énergétique et à employer les énergies renouvelables : le rôle des pompes à chaleur sera fondamental dans ce contexte.

LA DIRECTIVE ERP POUR LES POMPES À CHALEUR

En 2015, la directive ErP introduit l'obligation des prestations minimales pour tous les dispositifs de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire. Tous les appareils doivent présenter une étiquette énergétique qui informe l'utilisateur avec précision et simplicité afin de lui permettre de les comparer. Parmi les données mentionnées sur l'étiquette des pompes à chaleur, doivent figurer la puissance thermique délivrée et le niveau de bruit, ainsi que la classe d'efficacité énergétique (de A+++ à G).

Les classes d'efficacité inférieure (de E à G) ont été supprimées depuis septembre 2019 et les pompes à chaleur les plus performantes ont été mises en valeur en introduisant la classe A+++.



LA DIRECTIVE ECOLABEL

Si les critères de performances des générateurs de chaleur et des ballons sont homologués par la directive Erp, la directive Ecolabel, quant à elle, met l'accent sur la façon dont l'information arrive aux consommateurs au sujet de ces produits, sachant que seule une information claire et compréhensible peut déterminer le choix de produits moins énergivores.

Depuis 2015, les générateurs de chaleur et les ballons d'eau chaude sanitaire doivent eux aussi porter une étiquette d'efficacité énergétique. L'étiquette concernant le produit (ou le système en cas de combinaison de plusieurs produits) doit inclure la classe énergétique effective, qui va de A+++ à D.

LA DIRECTIVE DPEB

Le secteur du bâtiment est fondamental pour atteindre les objectifs énergétiques et environnementaux dictés par l'Union européenne. À ce sujet, la commission du vieux continent a institué un cadre législatif qui inclut la directive sur la performance énergétique des bâtiments, la DPEB (Directive sur la Performance Énergétique des Bâti-ments). La directive met en œuvre une politique soutenant les gouvernements de chaque pays de l'UE à améliorer les performances énergétiques du patrimoine immobilier existant avant 2050. Les principales mesures de support soutenues par la DPEB comprennent : la nécessité de fixer des conditions minimales de performance énergétique

pour remplacer ou rénover les systèmes de chauffage et de rafraîchissement, l'adoption de technologies intelligentes comme les dispositifs d'automatisation et de contrôle qui règlent la température ambiante de chaque pièce, et l'utilisation des systèmes favorisant la salubrité de l'air, comme la ventilation mécanique. La DPEB, en accord avec d'autres initiatives, permettra de libérer le potentiel de l'efficacité énergétique du parc immobilier existant et futur : des logements moins énergivores permettent de faire des économies d'énergie et de réduire la pollution, améliorant le cadre de vie.

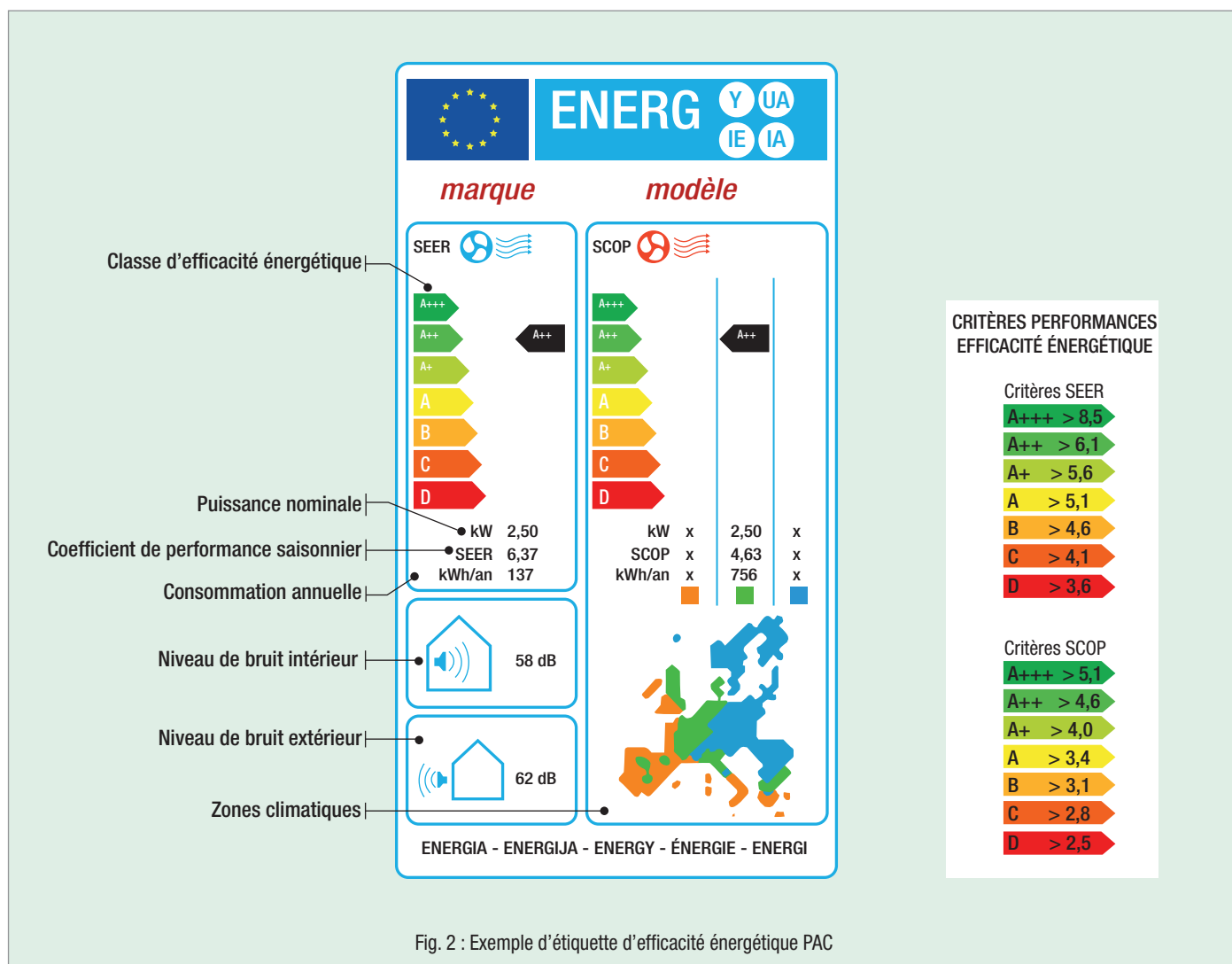


Fig. 2 : Exemple d'étiquette d'efficacité énergétique PAC

LE PARC IMMOBILIER

Dans le bilan annuel sur l'efficacité énergétique 2020 rédigé par l'ENEA, il est dit que le patrimoine immobilier de l'Union européenne est l'un des principaux responsables des émissions de gaz à effet de serre du fait qu'il représente le premier consommateur européen d'énergie.

Des progrès ont été faits ces dernières années, en grande partie grâce aux dispositions de la directive DPEB visant à réduire la consommation du secteur.



40 % de la consommation d'énergie provient des bâtiments



36 % des émissions de CO2 émanent des bâtiments



75 % des bâtiments sont inefficaces d'un point de vue énergétique

Toutefois, le scénario représenté sur les graphiques sectoriels dénote, aujourd'hui encore, une forte inadéquation du parc immobilier et souligne, pour les bâtiments les plus anciens, une consommation annuelle qui oscille entre un minimum de 160 kWh/m²/an et un maximum de 220 kWh/m²/an. Il est bon de savoir qu'un logement appartenant à la classe énergétique D et se trouvant dans une zone climatique H1 (zone à laquelle appartient plus de la moitié des communes françaises) consomme entre 151 et 230 kWh/m² par an.

Une consommation aussi élevée est justifiée par le fait que la plupart des systèmes de génération thermique actuels utilisent des combustibles fossiles.

Les analyses de marché ci-après concernant les chaudières et les pompes à chaleur dans l'Union Européenne dans son ensemble viennent confirmer ces données.

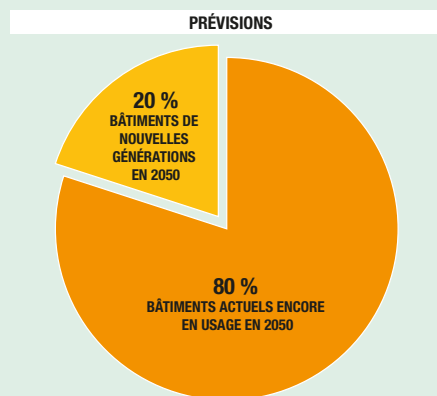
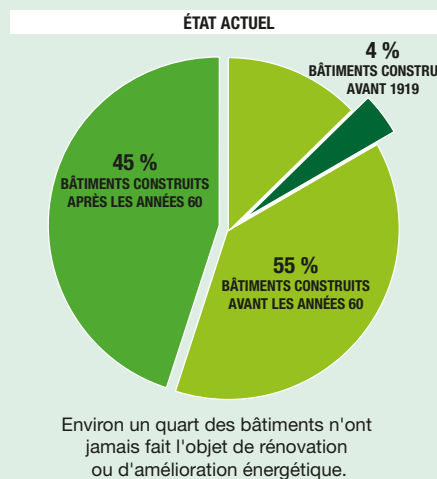


Fig. 3 : Parc immobilier européen - Source : ENEA

LE MARCHÉ DES CHAUDIÈRES

Le parc chaudières installé en France compte plus de 15 millions d'unités, entre systèmes autonomes et centralisés, regroupant dans la plupart des cas des appareils obsolètes au rendement faible vis-à-vis de consommations et d'émissions élevées.

On estime même que plus de 4 millions de chaudières ont été installées avant l'entrée en vigueur de la directive 90/396/CE sur les appareils à gaz, ce qui revient à dire qu'elles ont plus de 20 ans.

D'après une étude du BSRIA.

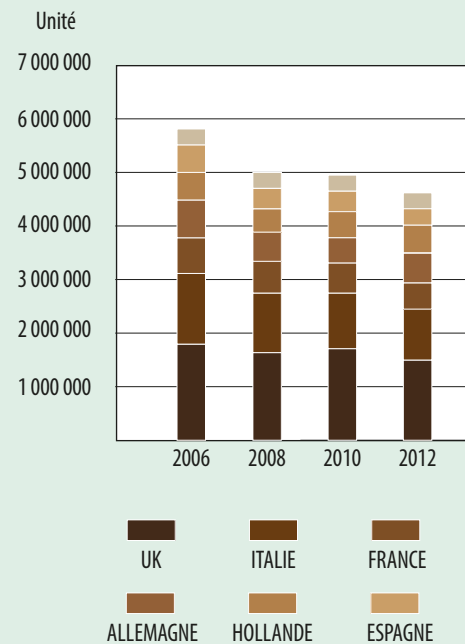
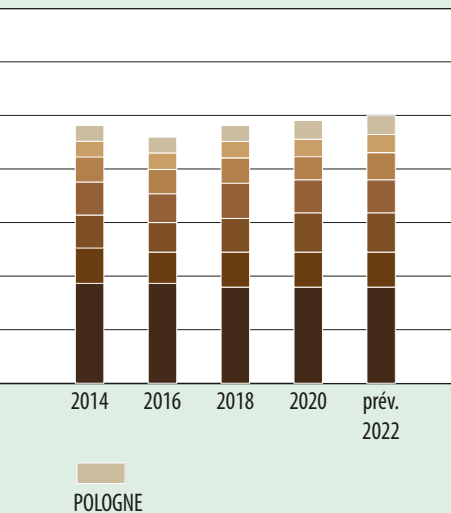


Fig. 4 : Marché européen des

5 millions de chaudières ont été vendues chaque année dans les sept plus grands pays européens à partir de 2006. Plus précisément, ces dernières années, environ 550000 chaudières ont été vendues et installées en France chaque année.

En premier lieu, depuis une dizaine d'années, les chaudières à condensation ont remplacé progressivement les chaudières traditionnelles moins performantes. Mais depuis cinq ans, la transition vers les pompes à chaleur est de plus en plus importante.



chaudières - Source : BSRIA

LE MARCHÉ DES POMPES À CHALEUR

L'analyse de marché de la BSRIA montre qu'à partir de 2017, le nombre de pompes à chaleurs hydroniques installées en Europe a augmenté progressivement de 10% environ chaque année.

La tendance est confirmée pour l'année 2022, avec une prévision d'environ un million d'unités installées chaque année. La part du lion des nouvelles installations appartient aux pompes à chaleur air/eau dans la version split ou monobloc, dédiées à la fois au chauffage et à la production d'ECS, ou exclusivement à l'ECS.

Les pompes à chaleur eau/eau, à savoir celles qui utilisent comme source froide l'eau des nappes phréatiques,

la chaleur souterraine (géothermique) et l'air renouvelé, fournissent une aide marginale mais stable en valeur numérique (voir « La classification des pompes à chaleur » page 12).

Malgré le développement significatif des pompes à chaleur, fortement soutenu par les primes et les réglementations nationales, le rapport entre les PAC et les chaudières installées chaque année en Europe reste fortement déséquilibré. Si l'on tient compte du taux de croissance actuel de ce marché (fig.5), en supposant que la quantité de chaudières vendues diminue chaque année d'une valeur équivalente à l'augmentation des pompes à chaleur (fig.4), il faudra encore attendre 12 à 15 ans pour que les deux marchés se rapprochent au niveau du nombre.



Fig. 5 : Marché européen des pompes à chaleur - Source : BSRIA

LES TYPOLOGIES DE POMPES À CHALEUR

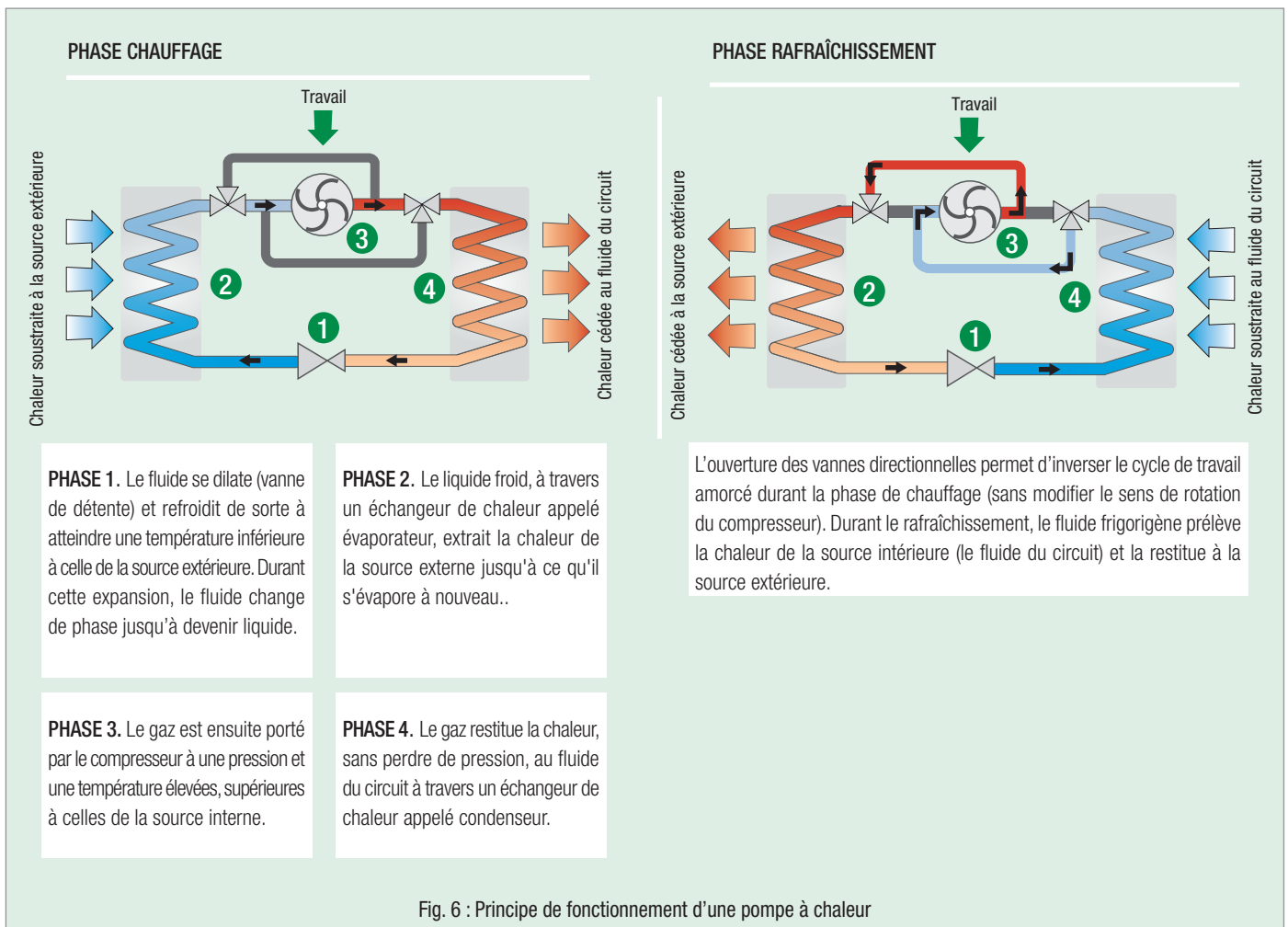
Ingénieurs Mattia Tomasoni et Alessia Soldarini

Les pompes à chaleur transfèrent la chaleur provenant d'une source de température inférieure à une température supérieure, source extérieure et intérieure. La pompe à chaleur utilise environ 75 % d'énergie sous forme gratuite, provenant du soleil et accumulée par l'air, l'eau et la terre, et 25 % d'énergie électrique pour garantir un confort optimal en été comme en hiver.

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La pompe à chaleur fonctionne plus ou moins comme un réfrigérateur : elle se base sur le cycle thermodynamique d'un fluide, appelé gaz refroidisseur ou fluide frigorigène, qui peut se présenter sous forme liquide ou gazeuse, en fonction de la température et de la pression au moment de l'utilisation.

L'appareil est défini pompe à chaleur ou machine frigorifique en fonction de l'effet utile que l'on souhaite obtenir, à savoir chauffer ou rafraîchir le logement. Les appareils pouvant diriger le fluide chaud soit vers la source intérieure, soit vers la source extérieure, par des vannes spécifiques, ont la capacité de fonctionner soit comme pompe à chaleur soit comme machine frigorifique, en fonction du type de source chaude ou froide. Ces appareils sont dits « réversibles ».



CLASSIFICATION DES POMPES À CHALEUR EN FONCTION DU TYPE DE COMPRESSION

La phase durant laquelle la pression et la température du fluide frigorigène augmentent (phase 3, figure 6) peut se dérouler de plusieurs façons; elles prévoient toutes l'apport d'énergie au fluide. La méthode actuellement la plus répandue est celle des compresseurs actionnés par des moteurs électriques, mais il en existe d'autres qui, même si elles sont plutôt destinées à des marchés de niche, présentent des caractéristiques exploitables et avantageuses.

POMPES À CHALEUR À COMPRESSION AVEC MOTEUR ÉLECTRIQUE

Ce sont les pompes à chaleur les plus courantes en raison de la polyvalence et du rendement des moteurs électriques et de la possibilité d'utiliser l'électricité comme vecteur énergétique. Il existe des compresseurs de différents types, mais les plus utilisés sont les modèles scroll, swing, à vis ou à lévitation magnétique.

Côté avantages, ils sont économiques, faciles à entretenir et ne nécessitent aucun système auxiliaire (car ils sont généralement auto-refroidissants). Cependant, les températures de départ sont limitées et la consommation électrique pourrait se retrouver élevée en raison des courants d'appel élevés (partiellement atténués par l'électronique de puissance).

POMPES À CHALEUR À COMPRESSION AVEC MOTEUR ENDOTHERMIQUE

Le compresseur de ces pompes à chaleur est actionné par un moteur endothermique, généralement alimenté au gaz et dérivant du secteur automobile. Ces machines, appelées également GHP (Gas Heat Pump) ou GEHP (Gas Engine Heat Pump), offrent l'avantage de pouvoir augmenter la température de départ en exploitant la chaleur que disperse le moteur à travers les gaz d'échappement et le circuit de refroidissement. Elles représentent ainsi une alternative intéressante dans les opérations de requalification qui prévoient de remplacer les chaudières gaz, surtout celles de grosses puissances.

La consommation misant principalement sur le gaz et la production d'eau à haute température représentent ses avantages. Les frais d'investissement et d'entretien sont élevés mais ce système reste utile dans les contextes où l'alimentation électrique est limitée.

POMPES À CHALEUR À ABSORPTION

La différence la plus marquante entre les pompes à chaleur à absorption et les modèles électriques (ou au gaz) vient de l'absence de la phase de compression, entièrement remplacée par deux phases distinctes : la génération et l'absorption.

Dans l'absorbeur, le fluide frigorigène qui provient de l'évaporateur à l'état gazeux, est absorbé par un fluide (dit absorbeur) et retourne à l'état liquide. Le fluide qui en résulte (frigorigène plus absorbeur) est ensuite pompé dans le générateur où, grâce à un apport de chaleur extérieure (provenant par exemple de co-générateurs, réseaux de chaleur ou processus industriels), délivre à nouveau le fluide frigorigène à une pression et à une température élevées.

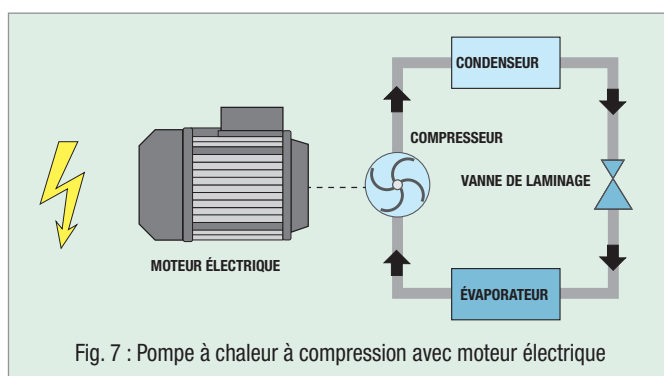


Fig. 7 : Pompe à chaleur à compression avec moteur électrique

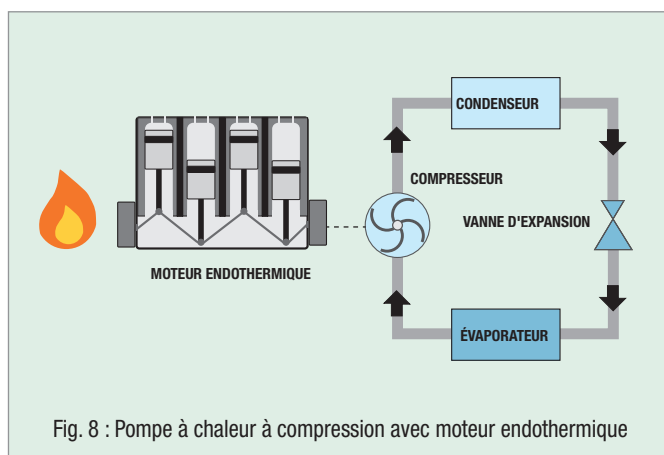


Fig. 8 : Pompe à chaleur à compression avec moteur endothermique

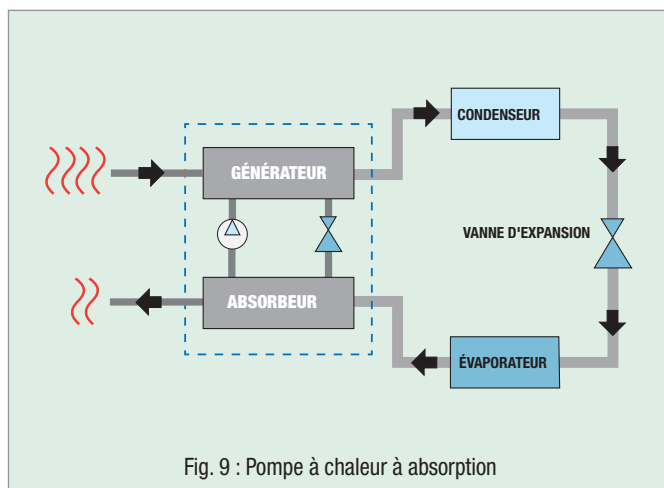
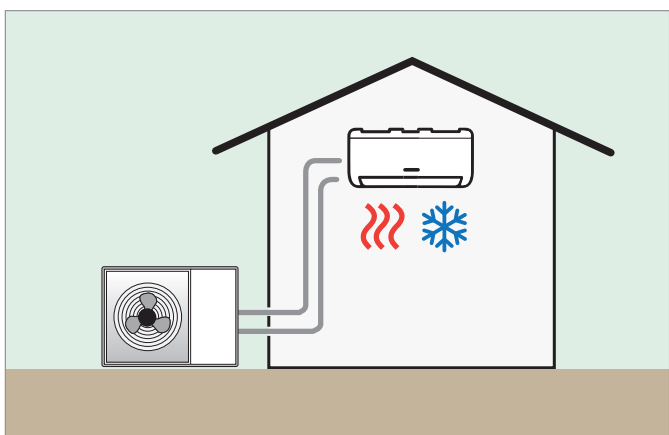


Fig. 9 : Pompe à chaleur à absorption

CLASSIFICATION DES POMPES À CHALEUR EN FONCTION DU TYPE DE SOURCE THERMIQUE

Les **sources froides** (ou sources extérieures) peuvent être les suivantes : l'**air**, extérieur ou dans certains cas de recyclage (issu des conduits de ventilation ou des circuits de refroidissement industriels), l'**eau**, qui peut être puisée en surface, dans des nappes ou provenir de circuits dédiés comme les boucles de condensation, ou la **terre**, où la chaleur est absorbée à travers des échangeurs spécifiques appelés sondes géothermiques. Les **sources chaudes** (c'est-à-dire le fluide de l'installation ou des sources intérieures) peuvent être les suivantes : l'**air**, lorsque la pompe à chaleur réchauffe directement l'air des pièces, ou l'**eau**, lorsque la pompe à chaleur réchauffe l'eau utilisée comme fluide caloporteur dans les circuits de chauffage.

POMPE À CHALEUR AIR/AIR



Ces pompes à chaleur sont équipées d'échangeurs air/gaz réfrigérant. La température de la source froide est variable et étant de l'air extérieur elle est toujours disponible. Exposées à des températures extérieures particulièrement basses, elles doivent régulièrement être dégivrées (voir « Le cycle de dégivrage » page 35).

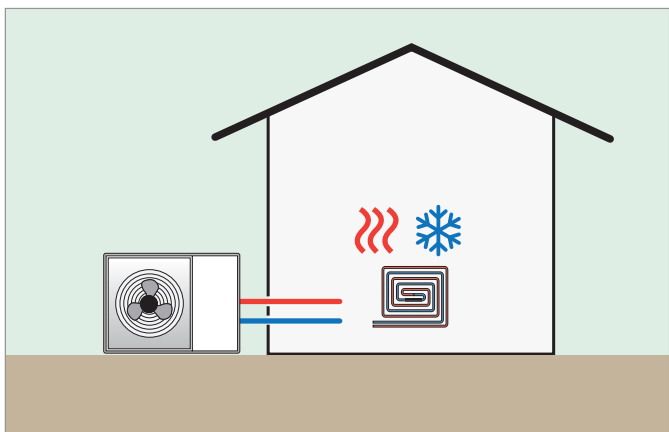
Elles sont disponibles en deux versions :

- **SPLIT.** L'échangeur vers la source froide et les autres composants du circuit frigorifique se trouvent à l'extérieur, alors que l'échangeur vers la source chaude se trouve à l'intérieur des pièces à chauffer. Les échangeurs sont reliés par des tuyauteries contenant le gaz réfrigérant.
- **ROOFTOP.** Tout le circuit frigorifique est rassemblé en un seul appareil et l'air est dirigé à l'intérieur des logements à travers des canalisations.

Généralement, la version split est destinée aux installations air/air des immeubles ou des espaces commerciaux de petites dimensions du fait que ce type de circuit frigorifique s'avère à la fois peu coûteux et peu volumineux.

Les systèmes rooftop sont plutôt utilisés dans les centres commerciaux, les théâtres et les sites de production offrant l'espace suffisant pour réaliser les canalisations nécessaires.

POMPE À CHALEUR AIR/EAU

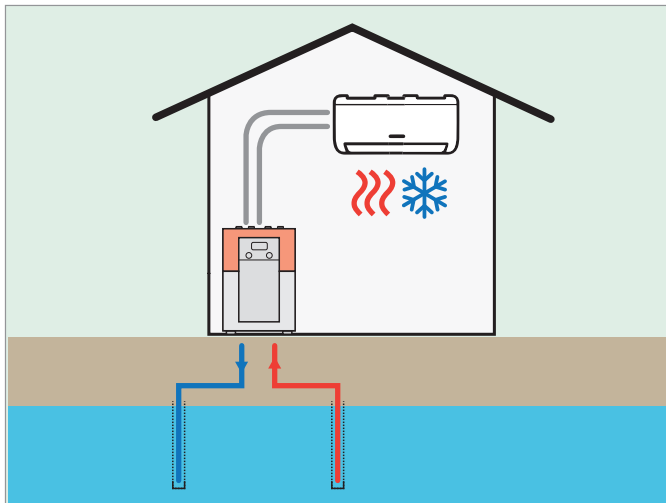


La pompe à chaleur air/eau permet d'extraire l'énergie gratuite présente dans l'air et de la transférer à l'eau sous forme de chaleur. A la différence des pompes à chaleur air/air, la production d'eau technique au service d'un circuit hydraulique offre beaucoup de possibilités en termes d'installation. Il est donc possible d'utiliser les pompes à chaleur air/eau dans le secteur résidentiel (avec des radiateurs, des ventilo-convecteurs, des planchers chauffants, etc.) et dans le secteur tertiaire et industriel (avec des batteries hydrauliques au service des unités de traitement de l'air).

L'adaptabilité en termes d'installation permet de conserver le système de distribution existant (et parfois même le système d'émission existant) sur les circuits équipés à l'origine de générateurs gaz, sans devoir changer toute l'installation.

Les limitations sont liées à la variabilité de la puissance et du rendement et, surtout, aux températures de départ.

POMPE À CHALEUR EAU/AIR

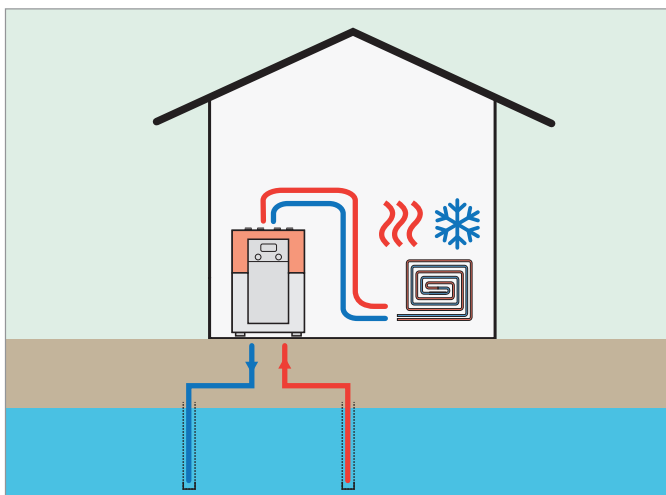


Ce modèle utilise l'eau souterraine comme source froide, prélevée à travers des puits, et des circuits hydrauliques spécifiques comme source chaude, telles que les boucles de condensation.

Il est souvent installé sur le toit (rooftop) mais, dans certains cas et pour des raisons d'espace ou esthétiques, on peut l'installer à l'intérieur, associé à des splits.

Ces pompes à chaleur sont peu utilisées car elles exigent la réalisation de puits pour capter l'eau de la source froide, impliquant des analyses géologiques et des permis de captage.

POMPE À CHALEUR EAU/EAU

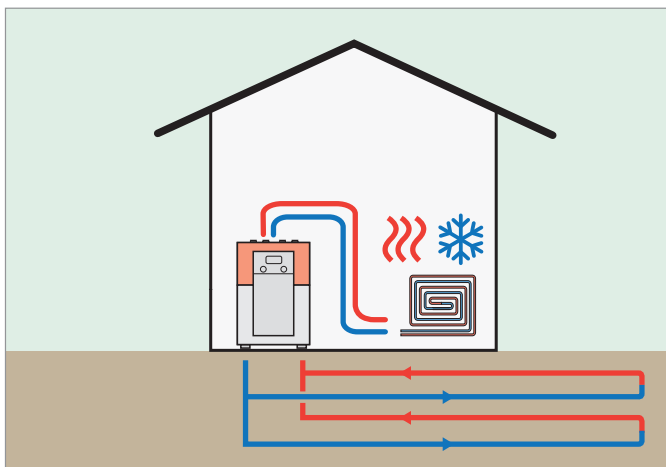


Ce modèle réalise les deux échanges de chaleur des sources froide et chaude à partir de l'eau.

La partie froide puise l'énergie de l'eau qui provient généralement des nappes souterraines (dans ce cas, on parle de PAC géothermiques sur nappe) ou de l'eau des lacs, des fleuves ou de la mer. La partie chaude est utilisée comme générateur de chaleur sur les circuits traditionnels à l'eau. Ces machines ont pour avantages d'avoir un fonctionnement stable et un rendement optimal. De plus, elles peuvent également fournir une puissance élevée dans un espace relativement réduit.

Ses limites dépendent de la présence ou de l'absence d'eau exploitable en termes thermiques, et des autorisations à obtenir. Il existe également des applications limitées où ces machines sont utilisées pour récupérer la chaleur, par exemple des circuits de refroidissement des processus industriels.

POMPE À CHALEUR SOL/EAU



Il s'agit d'une PAC eau/eau, appelée également pompe à chaleur géothermique, où l'eau de la source froide est utilisée comme fluide intermédiaire pour échanger la chaleur avec le sol. Les échangeurs sont constitués par un ensemble de tuyaux en plastique enfouis dans le sol, appelés « sondes géothermiques » : ils se déploient en profondeur (forage vertical) ou exploitent la surface (réseau de captage horizontal).

Les PAC géothermiques, telles que les versions eau/eau, fonctionnent lorsque l'échange thermique avec la source froide est stable, évitant ainsi les cycles de dégivrage (voir « Le cycle de dégivrage » page 35).

Elles ne nécessitent pas de sources d'eau, contrairement aux versions eau/eau.

Le coût d'installation des sondes est très élevé.

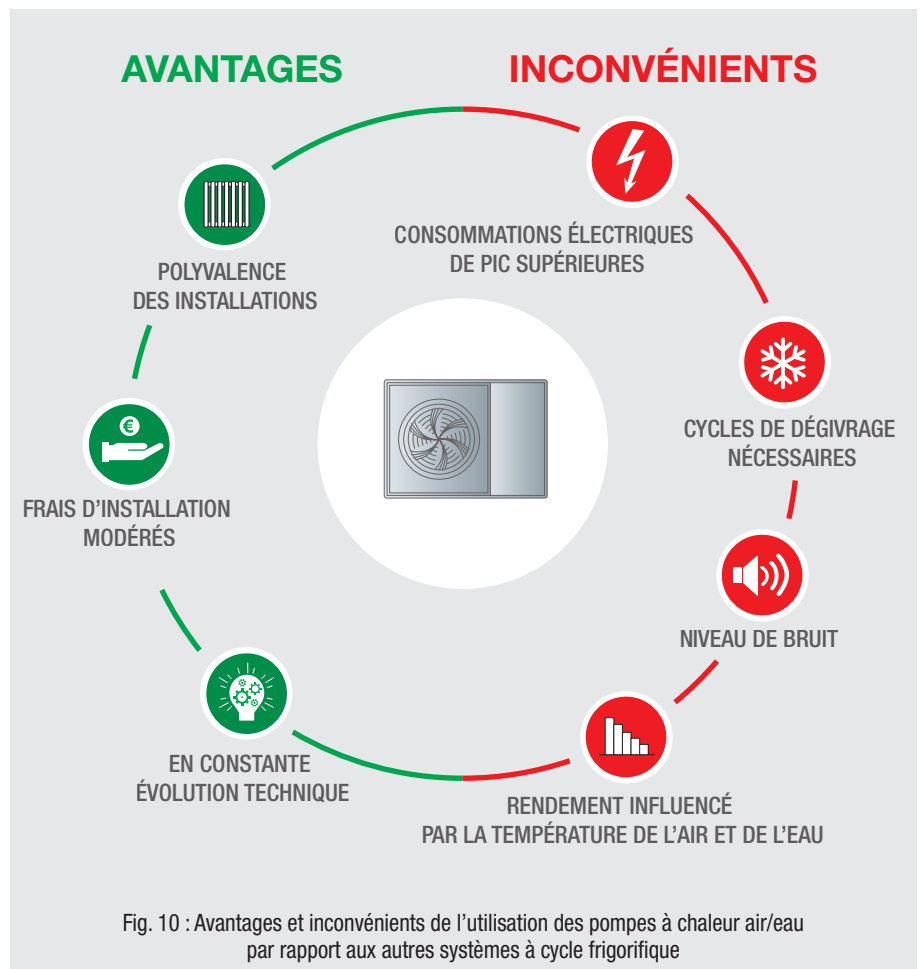
LES POMPES À CHALEUR AIR/EAU

Les pompes à chaleur air/eau sont les plus utilisées pour le chauffage domestique. Leur large diffusion par rapport aux autres systèmes à cycle frigorigène est due principalement aux raisons suivantes :

- **Polyvalence.** Elles peuvent être raccordées à des systèmes traditionnels de distribution hydraulique, aussi bien neufs qu'existants. L'exploitation de l'air comme source froide permet de les utiliser dans toutes les situations acceptant l'installation d'une unité extérieure ou la réalisation de canalisations d'air spécifiques.
- **Dépenses maîtrisées.** Par rapport aux autres types de PAC, leur coût d'installation est inférieur car elles ne nécessitent aucun circuit auxiliaire complexe, comme les ouvrages de puisage et de restitution d'eau, les puits ou les sondes géothermiques.
- **Évolution technique constante.** Ces dernières années, elles ont fait l'objet des plus importantes innovations techniques : gestion de la puissance délivrée optimisée pour un meilleur rendement, augmentation de la température maximale disponible et fiabilité accrue.

Cependant ces machines présentent certaines limites :

- **Absorption électrique de pic élevée.** Le dimensionnement est normalement lié aux conditions les plus défavorables (température de l'air extérieur) qui implique un surdimensionnement et surtout une consommation électrique de pic supérieure aux autres types de pompes à chaleur. C'est pour cela qu'elles exigent une puissance électrique supérieure par rapport aux pompes à chaleur équivalentes qui utilisent d'autres technologies (consulter le chapitre « Circuit monophasé ou triphasé ? » page 48).
- **Cycles de dégivrage indispensables.** Dans certaines conditions, l'humidité présente dans l'air extérieur gèle sur l'échangeur de la machine, compromettant l'échange thermique et le bon fonctionnement. Pour rétablir le fonctionnement normal, il faut effectuer une inversion de cycle pour chauffer l'échangeur et faire fondre la couche de givre qui s'y est déposée. Ces cycles consomment énormément d'énergie, au détriment du rendement et des frais (consulter le chapitre « Le cycle de dégivrage » page 35).
- **Rendement influencé par la température de l'air et de l'eau.** Le rendement et les frais de gestion des pompes à chaleur air/eau dépendent de la température à laquelle est produite l'eau chaude de départ et de la température de l'air extérieur. Un projet ne tenant pas compte des installations associées à ces machines ou un mauvais réglage peuvent augmenter la consommation (consulter le chapitre « Efficacité énergétique et rentabilité » page 18).
- **Niveau de bruit.** Les unités extérieures doivent être installées dans un espace approprié garantissant un échange d'air optimal. Il convient également d'étudier attentivement le niveau de bruit de ces unités et de prévoir, dans certains cas, des protections sonores (consulter le chapitre « Le contrôle du niveau de bruit des pompes à chaleur » page 17).



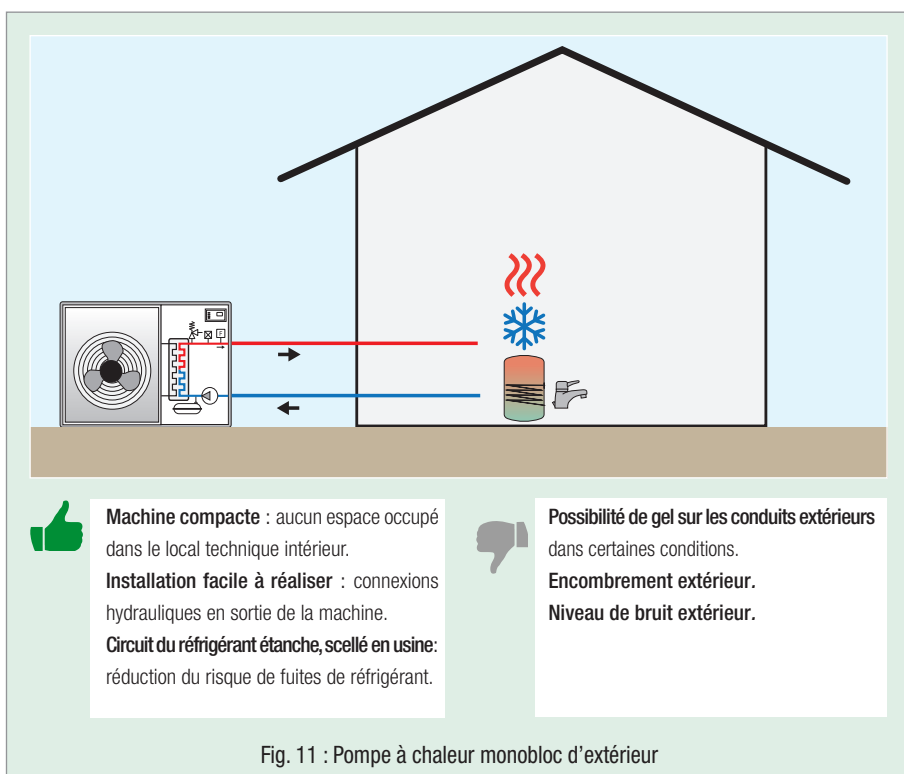
PAC MONOBLOC D'EXTÉRIEUR

La pompe à chaleur monobloc regroupe dans un seul appareil tous les éléments du circuit frigorifique : l'échangeur à plaques eau/réfrigérant, le compresseur, la vanne d'expansion et le ventilateur qui permet l'échange thermique air/réfrigérant dans l'évaporateur.

Certains éléments du circuit hydraulique peuvent être incorporés à la machine, tel que le circulateur, le flussostat, le vase d'expansion, le purgeur d'air et la soupape de sécurité.

L'unité, installée à l'extérieur, est raccordée directement à l'installation à travers les conduits qui transportent l'eau technique de la machine au bâtiment.

La machine monobloc reste avantageuse dans toutes les situations où il est préférable ne pas occuper trop de place à l'intérieur d'un bâtiment.

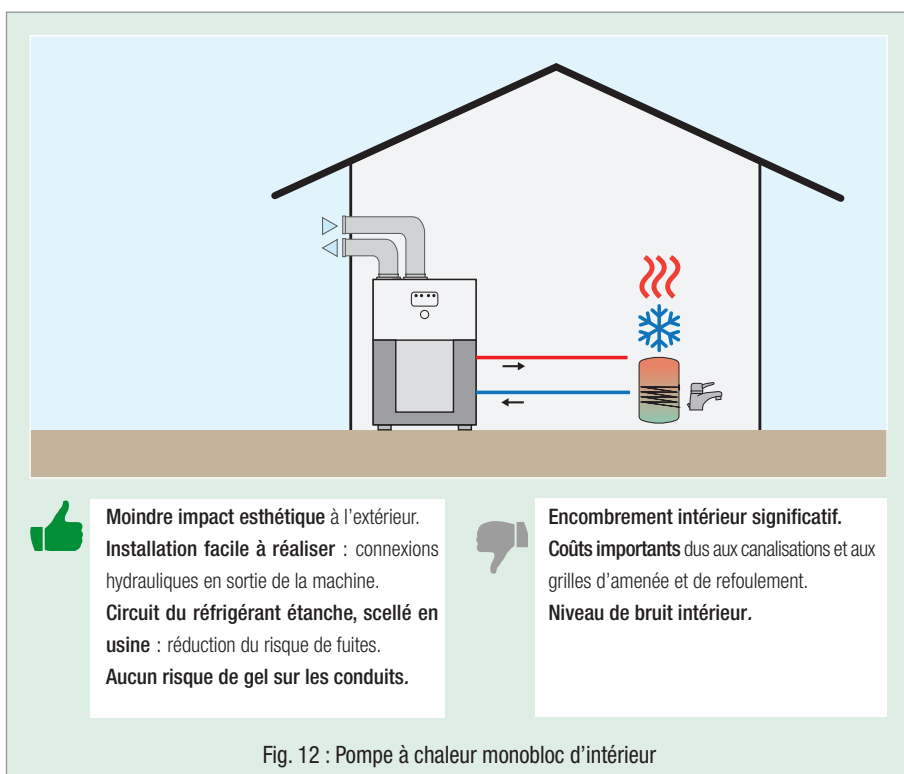


PAC MONOBLOC D'INTÉRIEUR

Il s'agit d'une pompe à chaleur monobloc dotée de ventilateurs (sur l'échangeur d'air) suffisamment puissant lui permettant d'être canalisée.

Certains modèles peuvent être canalisés soit sur le refoulement soit sur le départ ; sur d'autres, il n'est possible de canaliser que l'expulsion, en récupérant l'air ambiant où ils sont installés. Ces espaces doivent disposer d'ouvertures adéquates pour assurer le bon apport d'air servant à renouveler celui qu'utilise la machine.

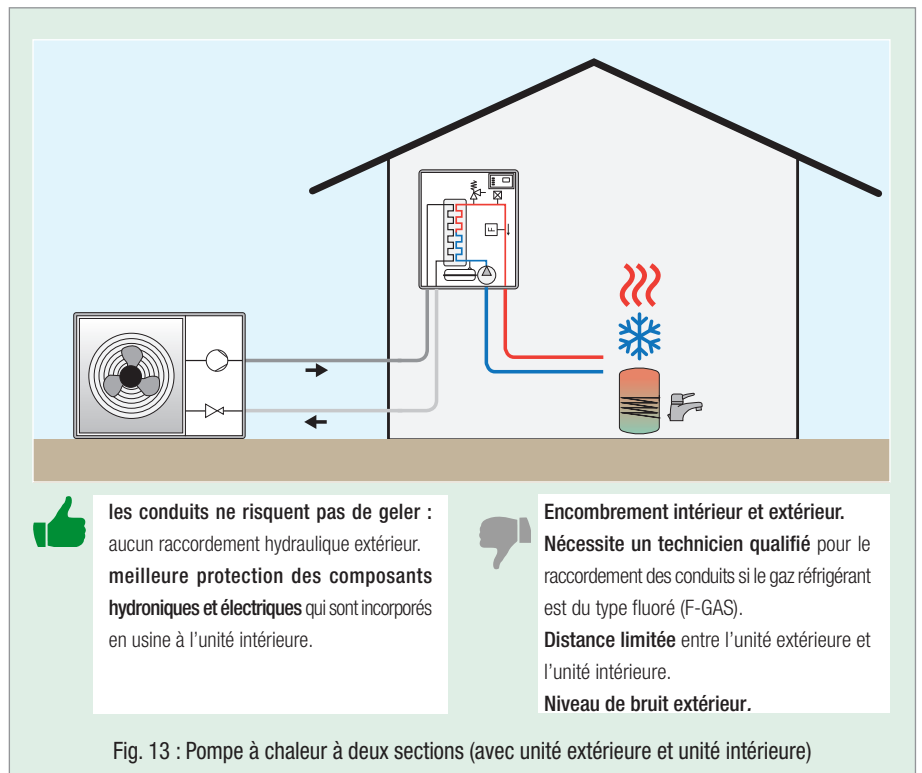
Ces modèles sont généralement utilisés lorsqu'il n'est pas possible d'installer les unités extérieures pour des raisons esthétiques.



POMPES À CHALEUR À DEUX SECTIONS

La pompe à chaleur split (de l'anglais « dédoublée ») comprend, contrairement à la version monobloc, un module hydraulique installé dans le bâtiment et une unité extérieure qui échange la chaleur avec l'air. Les composants principaux qui caractérisent l'unité interne sont les suivants : l'échangeur à plaques eau/refrigérant, le circulateur pour le circuit primaire, le flussostat, le vase d'expansion, le purgeur d'air et la soupape de sécurité. L'unité extérieure renferme quant à elle le compresseur, la vanne d'expansion et le ventilateur qui échange la chaleur avec le fluide frigorigène par l'air extérieur.

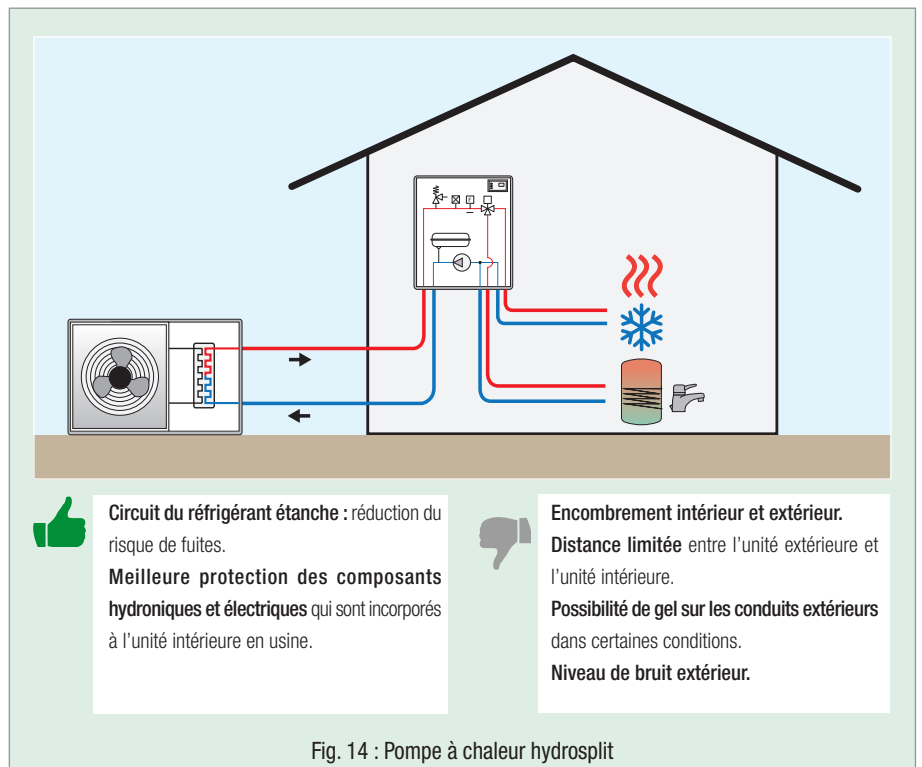
Le raccordement thermique entre les deux unités est réalisé à partir des conduits du réfrigérant à haute pression.



POMPES À CHALEUR HYDROPLIT

La pompe à chaleur Hydrosplit ressemble pratiquement à une PAC monobloc associée à un module interne renfermant tous les composants hydrauliques et électroniques de la machine réunis en un seul lieu pour y accéder plus facilement lors des entretiens. Ces composants s'avèrent mieux protégés par rapport à une position extérieure.

Le raccordement entre les deux unités est réalisé des conduites hydrauliques.



LE CONTRÔLE DU NIVEAU DE BRUIT DES POMPES À CHALEUR

Les unités extérieures des PAC à air peuvent présenter des problèmes de bruit et de vibrations, tant pour les habitations auxquelles elles sont destinées que pour le voisinage. Il faudra donc étudier attentivement leur installation et leur emplacement.

Le bruit peut être transmis :

- par voie solide : c'est le bruit dû aux vibrations des machines et qui se propage à travers les structures ;
- par voie aérienne : c'est le bruit qui provient de la source sonore et se répand dans l'air.

Pour limiter le bruit transmis par voie solide, il faut :

- installer des plots antivibratoires sous la machine, surtout si elle est installée sur un balcon ou un toit au-dessus de logements occupés ;
- installer la machine sur une base séparée du bâtiment, par exemple dans un jardin.

Pour limiter le bruit transmis par voie aérienne, il faut :

- installer la machine dans un lieu «hors vue» des récepteurs tels que les portes et les fenêtres, et de toute façon le plus loin possible de ces derniers ;
- évaluer attentivement la réflexion du bruit ;
- installer une barrière sonore ou un coffrage. La barrière sonore doit également être antibruit au cas où pourraient se produire des phénomènes de réflexion de l'onde sonore. Le coffrage doit garantir un passage d'air pour permettre à la machine de fonctionner correctement.

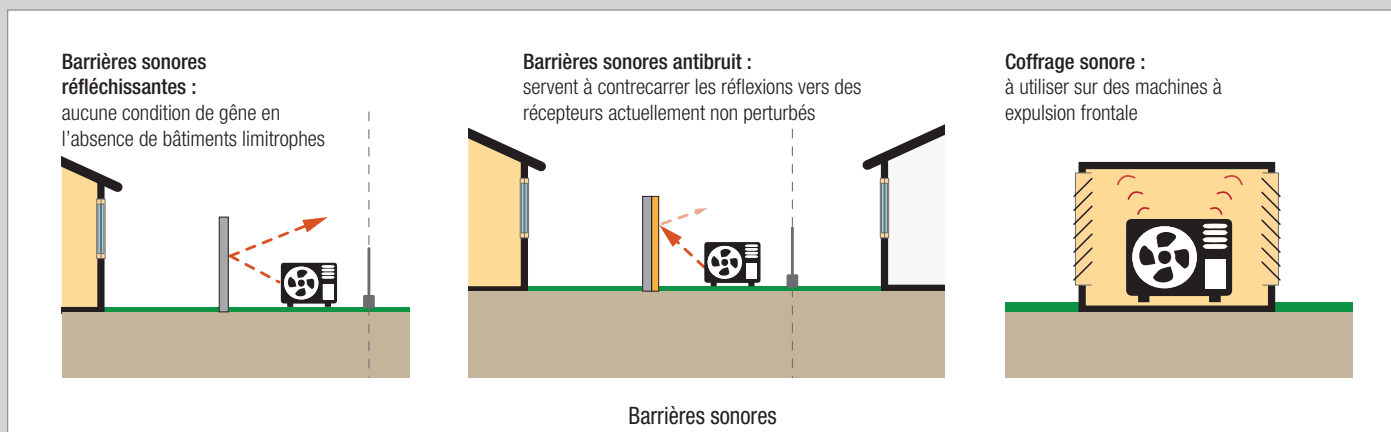
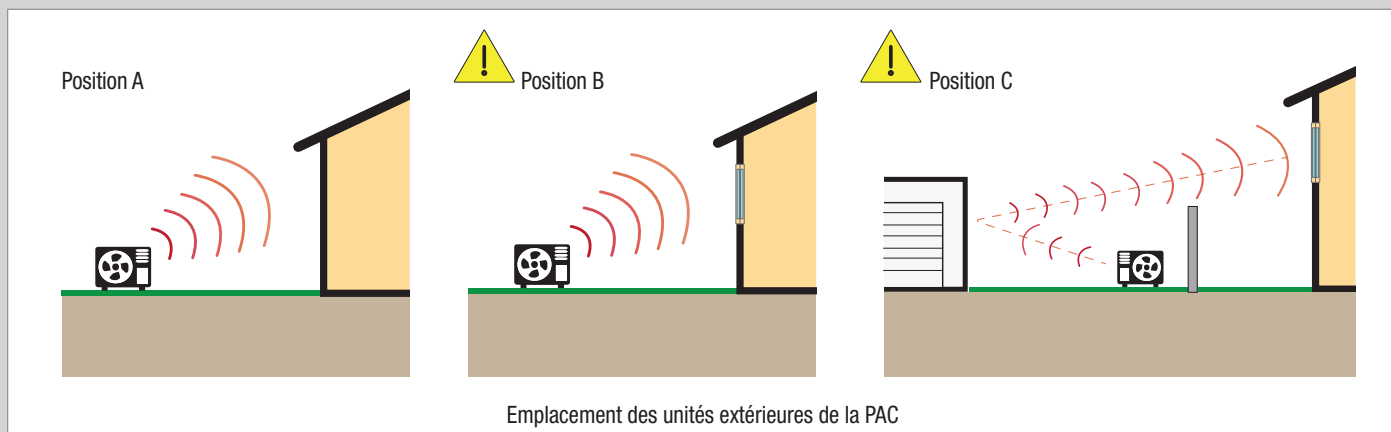
LIMITES LÉGALES

Les nuisances sonores sont réglementées par la loi et les critères de vérification prévoient :

1. **Test absolu** : impose une limite sur la valeur d'émission (mesurée à

proximité de la source du bruit) et sur la valeur d'immission (mesurée à proximité du point à vérifier). Ces valeurs limites diffèrent selon les zones - zones résidentielles et industrielles - ou l'heure - jour ou nuit. La limite d'émission de nuit dans les zones résidentielles est fixée à 40 dB et celle d'immission à 45 dB.

2. **Test différentiel** : il limite la différence entre le bruit produit (mesuré à proximité du point à vérifier) lorsque la source du bruit est allumée et lorsqu'elle est éteinte. Cette différence ne doit pas dépasser les 3 dB durant la nuit.



EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET RENTABILITÉ

Ingénieurs Mattia Tomasoni et Alessia Soldarini, ingénieurs

Le marché des pompes à chaleur ont fait un bond en avant ces dernières années. Un succès lié à plusieurs facteurs : les nouvelles constructions s'avèrent plus performantes (le besoin de puissance thermique a diminué et permet d'exploiter les modèles commercialement les plus répandues) et l'adoption de systèmes d'émission fonctionnant à basse température sont désormais compatibles avec les performances des pompes à chaleur.

Le facteur déterminant reste l'économie d'énergie que ces machines garantissent par rapport aux systèmes traditionnels comme les chaudières au gaz. Le cadre législatif évolue lui aussi rapidement vis-à-vis de l'impact environnemental et impose désormais d'adopter ces systèmes sur les nouvelles constructions et aussi sur les rénovations.

En général, l'économie d'énergie permet de faire des économies financières car, pour la même puissance fournie, ces machines plus performantes s'avèrent moins énergivores. Mais en comparant mieux un système traditionnel, comme une chaudière gaz, à une pompe à chaleur, l'économie d'énergie réalisée n'est pas identique à l'économie financière.

RENDEMENT D'UN GÉNÉRATEUR

Pour confronter la consommation d'énergie des différents types de générateurs, il convient de prendre la consommation d'énergie primaire comme référence. En d'autres termes, on compare combien d'énergie présente dans la nature consomme le générateur pour produire l'énergie thermique. Le rapport entre énergie primaire consommée et énergie thermique produite est également appelée rendement du générateur (ou de génération), comme l'indique la formule 1.

$$\eta_{\text{GÉN}} = \frac{E_{\text{THERMIQUE}}}{E_{\text{PRIMAIRE}}}$$

Formule 1

LE RENDEMENT D'UNE CHAUDIÈRE TRADITIONNELLE ET À CONDENSATION

Une chaudière transforme l'énergie contenue dans le combustible en énergie thermique. Pour simplifier, nous fixons notre attention sur les chaudières alimentées au gaz naturel, car ce sont entre autres les plus répandues, sachant qu'il est possible d'élargir le discours aux autres chaudières à combustible solide ou liquide.

L'énergie thermique contenue dans le combustible correspond au pouvoir calorifique. Celui-ci est exprimé par deux valeurs : une valeur supérieure (PCS - Pouvoir calorifique supérieur) et une valeur inférieure (PCI - Pouvoir calorifique inférieur) selon que l'on considère ou pas comme énergie utile (exploitable par la combustion) la chaleur nécessaire pour faire évaporer la part d'eau que produit la combustion.

Les chaudières qui peuvent exploiter l'énergie contenue dans la vapeur de combustion sont dites à condensation. Auparavant, la technologie exploitant la condensation n'était pas disponible à grande échelle. Par conséquent, le contenu énergétique des combustibles a toujours été identifié avec le pouvoir calorifique inférieur et, par analogie, le rendement des générateurs a toujours été exprimé par le pouvoir calorifique inférieur (PCI).

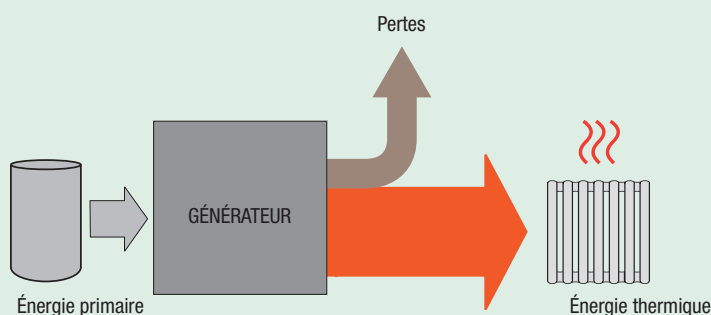
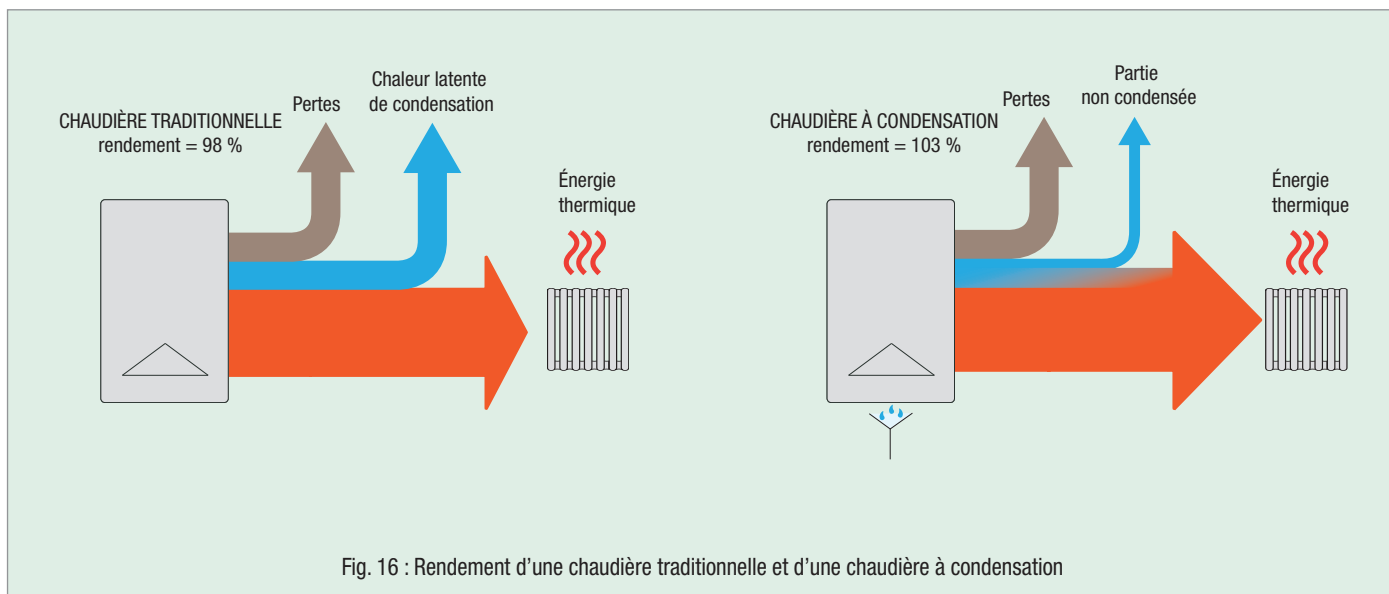


Fig. 15 : Rendement du générateur

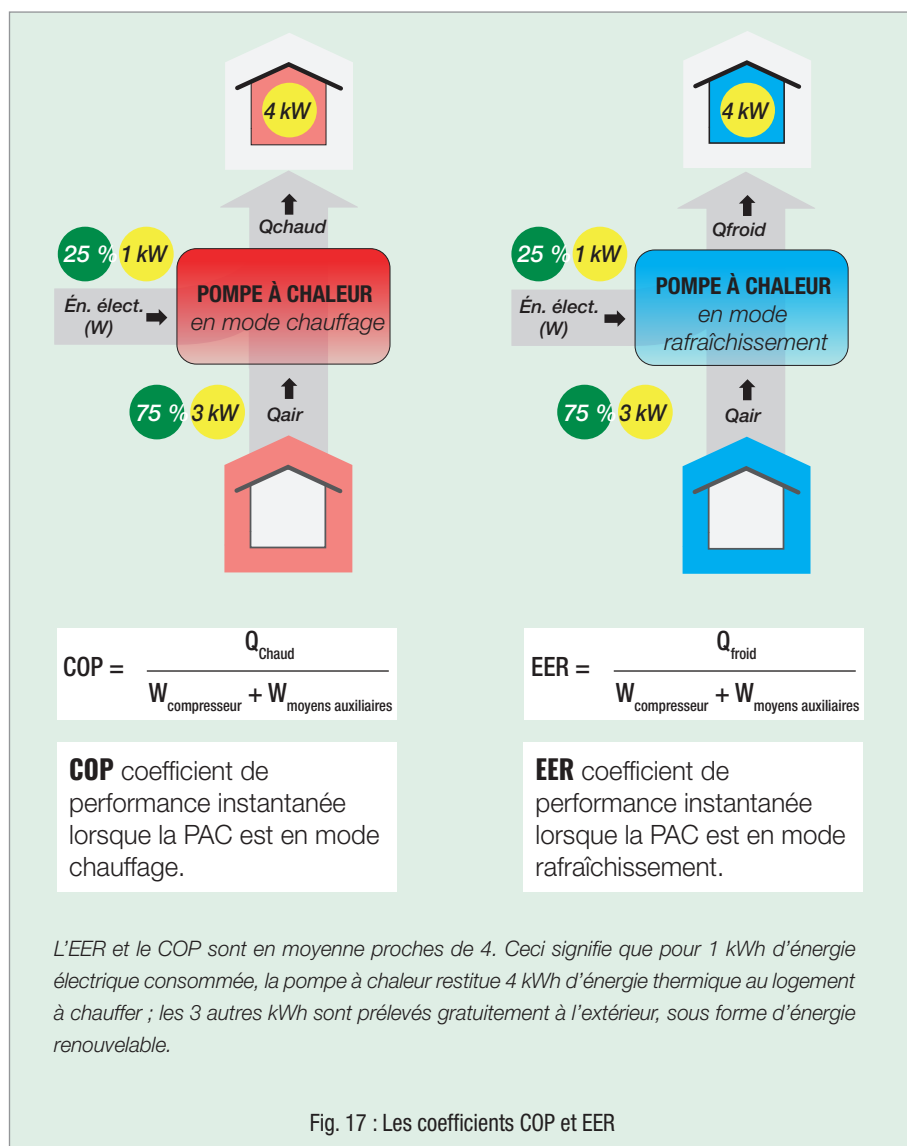


LE RENDEMENT D'UNE POMPE À CHALEUR

La pompe à chaleur est une machine à cycle frigorifique qui transfère la chaleur d'une source froide à une source chaude en utilisant de l'énergie électrique.

L'efficacité avec laquelle les PAC transfèrent la chaleur est définie par le COP. Sa valeur vient du rapport entre chaleur restituée au fluide chaud (énergie thermique délivrée) et le total de l'énergie électrique absorbée (énergie nécessaire au compresseur et aux moyens auxiliaires incorporés à la pompe à chaleur : dispositifs antigels, appareils de régulation et de contrôle, circulateurs, ventilateurs) (fig. 17).

En mode rafraîchissement, le paramètre qui représente le rendement de la machine est identifié par le sigle EER. Il résulte du rapport entre l'énergie thermique soustraite au logement et le total de l'énergie électrique absorbée (comme pour le COP, l'énergie électrique absorbée est la somme de l'énergie nécessaire au compresseur et à tous les moyens auxiliaires incorporés à la pompe à chaleur) (fig. 17).



La norme EN 14511 permet au fabricant de déterminer les performances de la pompe à chaleur (COP) en fonction de :

- fonctionnement à la vitesse nominale ;
- mode chauffage ;
- température extérieure fixe ;
- température de départ fixe.

Le point de fonctionnement à la puissance nominale, selon lequel le fabricant identifie la machine sur le marché, est calculé normalement avec la température extérieure de l'air à 7 °C et la température de départ de l'eau à 35°C (A7W35). Par exemple, une PAC d'une puissance nominale déclarée de 6 kW, produit environ 6 kW thermiques à A7W35.

Cette valeur ne représente pas complètement les conditions effectives de fonctionnement des PAC sur une saison complète de chauffage. Le COP/EER n'est pas une valeur constante et, surtout pour les pompes à chaleur air/eau, il peut varier énormément en fonction de :

- la température de l'air extérieur ;
- la température de production de l'eau chaude ou froide ;
- facteur de charge de la machine ;
- incidence des cycles de dégivrage.

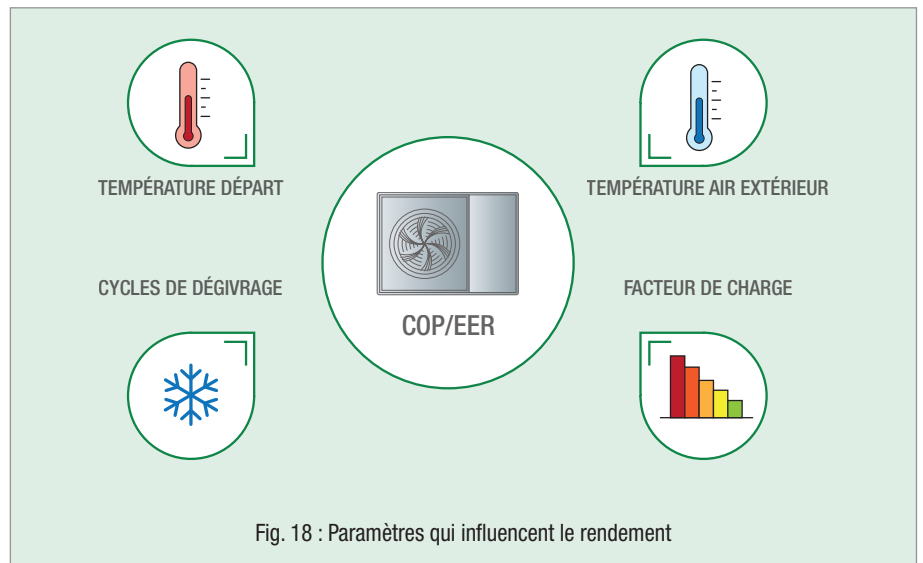


Fig. 18 : Paramètres qui influencent le rendement

Les fiches techniques signalent en effet plusieurs valeurs de COP (ou ERR) en fonction des différentes températures de l'air extérieur et de l'eau de départ. La figure 19 illustre, à titre d'exemple, l'évolution du coefficient de performance (COP) à pleine charge d'une pompe à chaleur air-eau en fonction de ces paramètres.

- diminuent en fonction de la température de départ ; plus elle est élevée, plus le COP est bas.

Dans cet exemple, une réduction de la température de départ de 55 à 35 °C (pour des températures extérieures supérieures à 7 °C) permet d'améliorer le COP de plus d'un point.

Comme on peut le voir, les performances :

- se dégradent en fonction de la température extérieure ; plus elle est basse, plus le COP est bas.

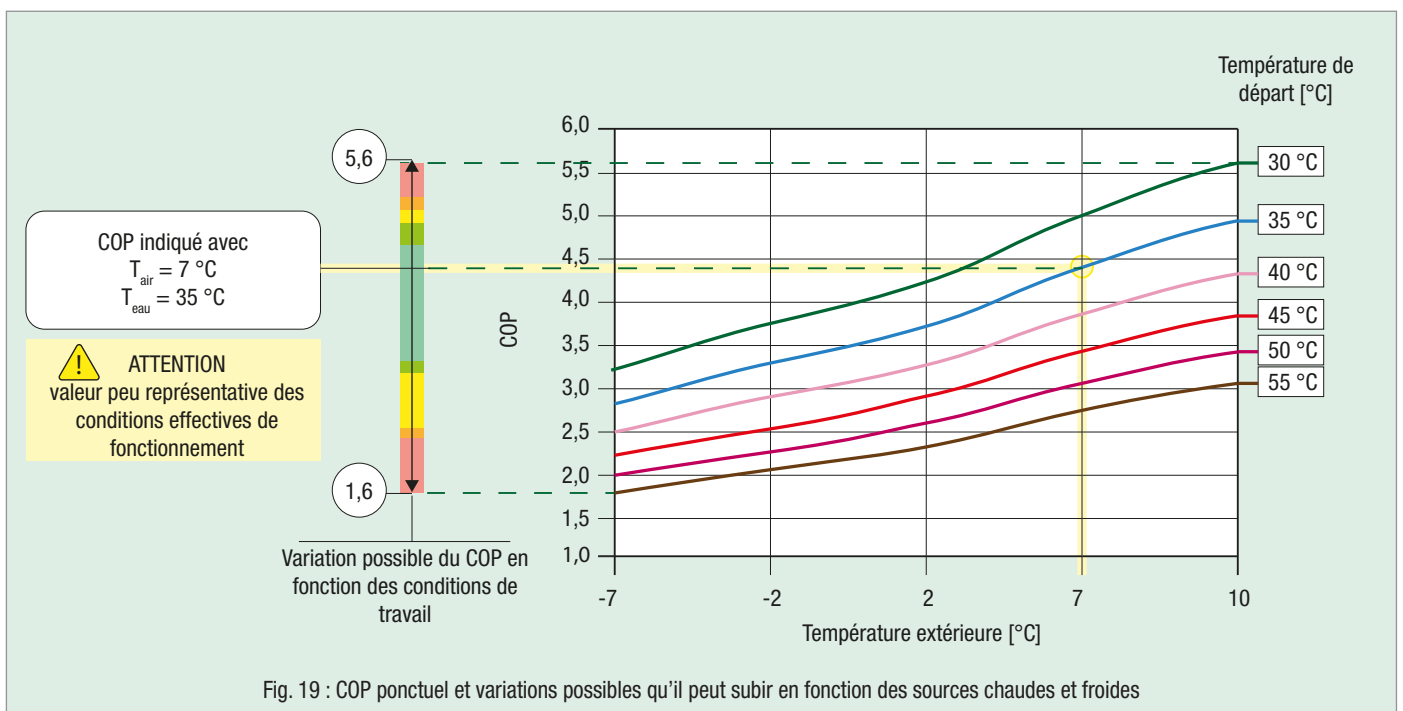


Fig. 19 : COP ponctuel et variations possibles qu'il peut subir en fonction des sources chaudes et froides

COP AU RÉGIME DE CHARGE PARTIELLE

Les courbes de tendance du COP représentées sur les fiches techniques (fig. 19) se réfèrent au fonctionnement à pleine charge de la pompe à chaleur, à savoir lorsque la machine fournit la puissance maximale utile (par exemple, lorsque la température extérieure est la plus froide ou lors de la mise en marche des installations) : un fonctionnement peu représentatif des réelles conditions de travail. **Durant le fonctionnement normal, la puissance disponible de la pompe à chaleur est souvent supérieure à la puissance nécessaire au bâtiment.** Les machines travaillent donc à charge partielle.

Le **COP_{PX} à charge partielle** représente mieux le rendement réel de la machine. On l'obtient en multipliant le COP_{max} à pleine charge par un facteur de correction (f_{CORR}) qui dépend uniquement du facteur de charge de la machine (FC) et non des conditions de fonctionnement. Le facteur de charge de la machine est le rapport entre la puissance instantanée nécessaire et la puissance maximale disponible dans les mêmes conditions (Formule 2). Les graphiques (fig. 20) représentent un exemple d'évolution

COP à charge partielle :

$$COP_{PX} = COP_{max} \times f_{CORR}$$

f_{CORR} dépend du facteur de charge FC

$$FC = \frac{\text{Puissance inst. requise}}{\text{Puissance maxi disponible}}$$

Formule 2

du facteur de correction (f_{CORR}) lorsque le facteur de charge de la machine (FC) varie, dans le cas des machines ON-OFF ou modulantes.

Les **modèles les plus anciens** de pompes à chaleur, dites ON-OFF, modulaient la puissance à travers des cycles d'allumage et d'extinction. Ces cycles dégradent la performance énergétique de la machine : chaque démarrage entraîne des pertes dues aux courants d'appel des moteurs électriques et au démarrage du cycle frigorifique. C'est pour cette raison que le facteur de correction du COP des machines ON-OFF est toujours inférieur à 1 (fig. 20), quel que soit le facteur de charge de la machine. Le COP à charge partielle est toujours inférieur au COP_{max}.

Les **machines plus récentes**, au contraire, font varier le régime du compresseur et du

ventilateur de l'échangeur externe pour s'adapter aux charges réduites. Normalement, cette modulation peut réduire la charge des machines jusqu'à environ 25-30 % par rapport à la valeur maximale. Au-dessous de cette valeur, la pompe à chaleur n'arrive plus à moduler et règle la puissance comme les machines ON-OFF. Pour les pompes à chaleur modulantes, le facteur de correction du COP peut être supérieur à 1, sur une plage de modulation comprise entre 15 et 100 %. La pompe à chaleur est influencée uniquement par les températures d'évaporation et de condensation qui déterminent des variations au niveau de la pression du fluide frigorigène qui traverse le compresseur, et elle ne dépend pas de la température extérieure ou de celle de retour de l'installation. Lorsque l'écart thermique entre le liquide frigorigène et la température extérieure diminue (quelles que soient les conditions de fonctionnement à charge partielle), la différence de pression entre amont et aval du compresseur diminue, tout comme la consommation électrique. Dans cette situation, la machine tourne à charge partielle : la puissance thermique délivrée diminue et la consommation électrique se réduit encore plus. Raison pour laquelle le COP augmente.

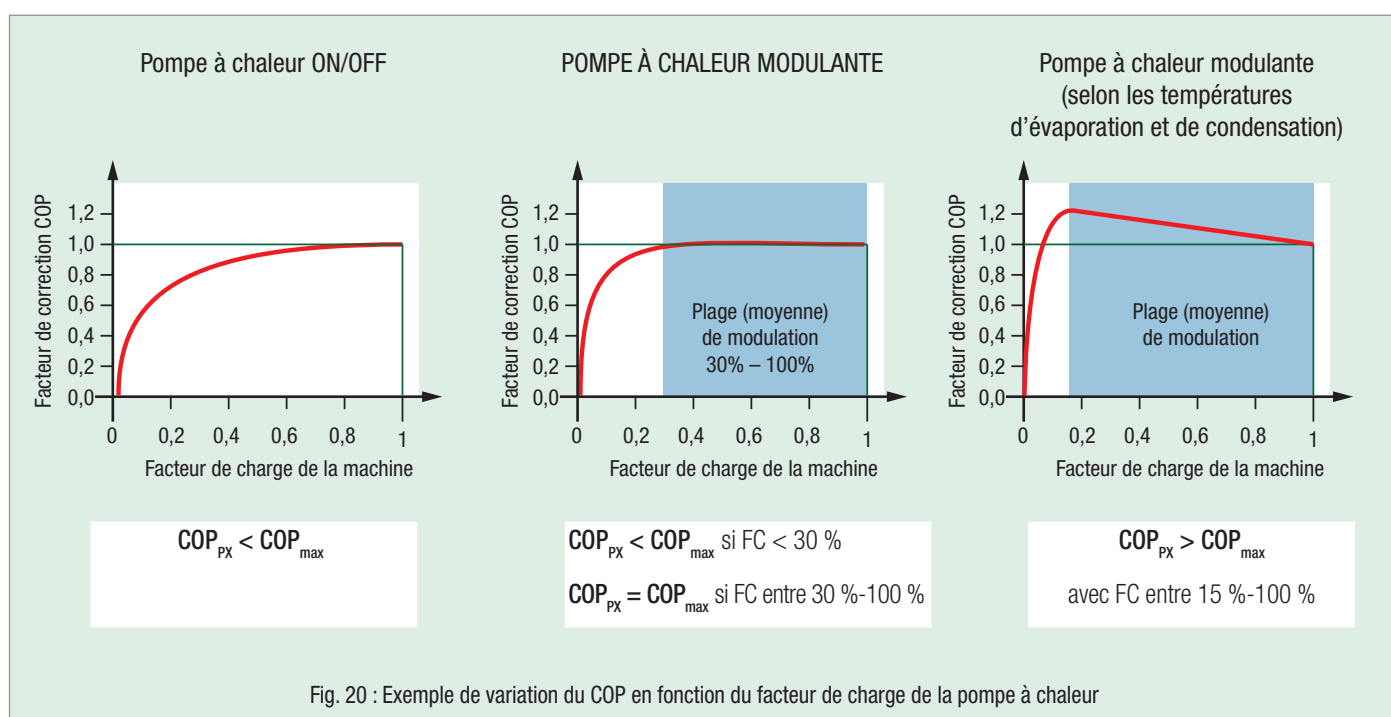


Fig. 20 : Exemple de variation du COP en fonction du facteur de charge de la pompe à chaleur

LE COEFFICIENT DE PERFORMANCE SAISONNIER POUR L'HIVER (SCOP) ET L'ÉTÉ (SEER)

La grande variabilité des paramètres d'efficacité des pompes à chaleur air/eau et l'importance que revêt désormais l'économie d'énergie ont déterminé l'introduction d'un autre indice, outre la valeur ponctuelle du COP, sur la documentation technique que doivent fournir les producteurs, à savoir le SCOP (Seasonal Coefficient of Performance), défini par la norme EN 14825. Cet indicateur est une moyenne calculée des valeurs de COP et il s'avère plus représentatif du fait qu'il prend en considération les conditions de fonctionnement d'une saison complète. Il rassemble les performances de la pompe à chaleur fonctionnant à charge partielle pour plusieurs températures extérieures, sur la base des données climatiques concernant trois zones différentes.

La valeur SCOP décrit combien d'énergie thermique produit une installation en un an, par rapport à la consommation d'énergie électrique. Elle représente donc une valeur plus significative que le COP sur l'efficacité des PAC air/eau car elle tient compte des conditions climatiques extérieures. Toutefois, la valeur SCOP ne peut pas encore être considérée comme fiable du fait que le rendement proprement dit dépend également de la température de départ, du type d'installation desservie et du type de régulation et d'utilisation de l'installation. Par exemple, pour une même PAC, une installation à panneaux radiants conçue pour fonctionner avec une température de départ basse sera plus efficace et moins énergivore qu'une installation à ventilo-convecteurs dont la température de départ est plus élevée. De même, une régulation en fonction de la température extérieure sera plus efficace qu'une régulation à point fixe. Toutes ces raisons portent à prendre également en considération un autre indicateur plus réaliste : le $COP_{MOYEN\ EFFECTIF}$.

Tout comme le SCOP représente le rapport entre l'énergie restituée et l'énergie électrique consommée en période de chauffage, l'efficacité saisonnière d'une pompe à chaleur en mode rafraîchis-

sement se mesure par l'indice «SEER» (Seasonal Energy Efficiency Ratio).

LE COP MOYEN EFFECTIF

Le rendement réel d'une pompe à chaleur, desservant une installation disposant d'une régulation, peut être calculé à travers des formules complexes ou des logiciels spécifiques et résumé par un coefficient moyen d'efficacité que nous appellerons $COP_{MOYEN\ EFFECTIF}$. Cette valeur peut s'éloigner de manière significative des COP et SCOP caractéristiques de la pompe à chaleur.

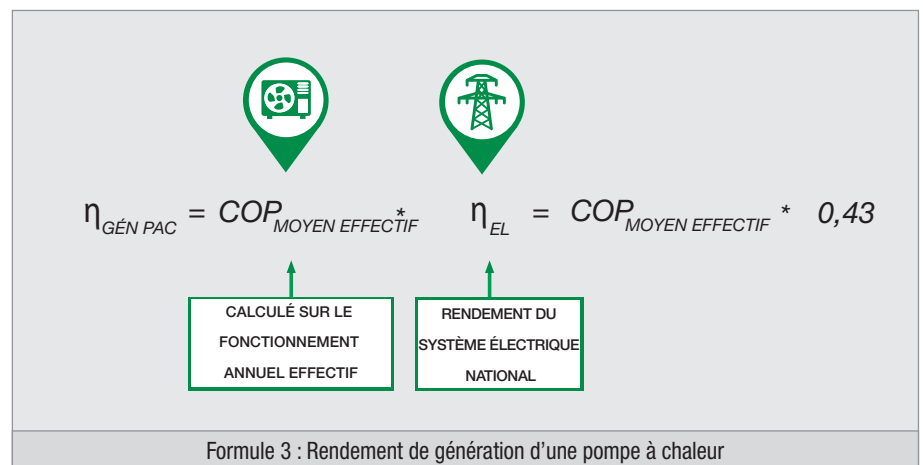
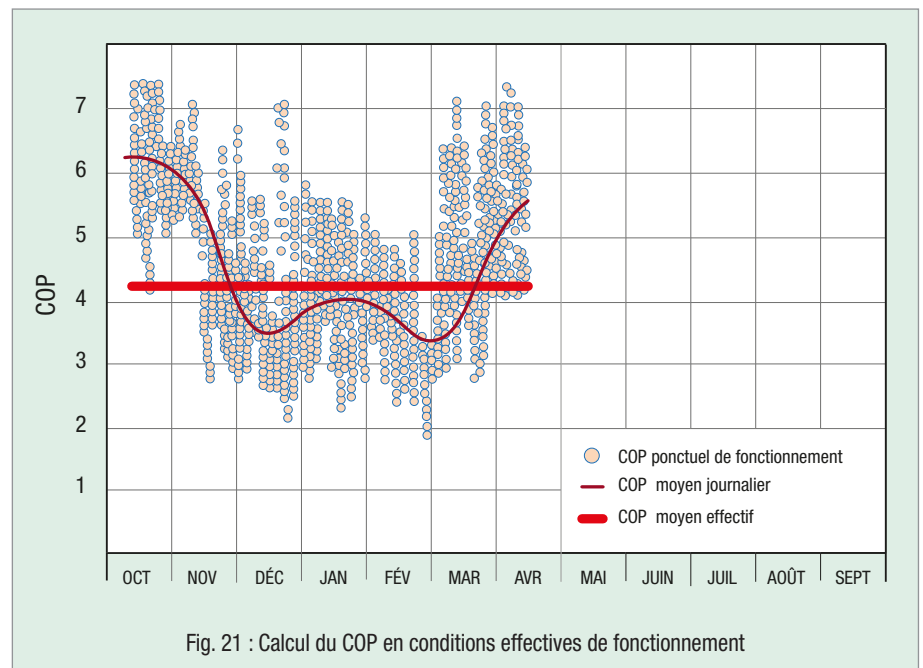
La Figure 21 représente un exemple de tendance réelle du COP d'une pompe à chaleur air/eau. La ligne rouge horizontale

représente la moyenne calculée pour chaque point de fonctionnement de la machine, à savoir, le $COP_{MOYEN\ EFFECTIF}$.

LE RENDEMENT DE GÉNÉRATION

Le rendement de génération d'une pompe à chaleur ($\eta_{GEN\ PAC}$) peut être calculé comme le produit entre le facteur de conversion de l'énergie électrique (η_{EL}) et le $COP_{MOYEN\ EFFECTIF}$ (Formule 3).

Cela revient à rapporter le $COP_{MOYEN\ EFFECTIF}$ à la quantité d'énergie primaire consommée à travers le facteur moyen de conversion de l'énergie électrique. Actuellement, ce facteur correspond à 0,43 en France avec la RE2020 (source : conseils-



COP MOYEN EFFECTIF	Rendement de génération
1,50	65 %
1,75	75 %
2,00	86 %
2,25	97 %
2,50	108 %
2,75	118 %
3,00	129 %
3,25	140 %
3,50	151 %
3,75	161 %
4,00	172 %
4,25	183 %
4,50	194 %
4,75	204 %
5,00	215 %

Tableau 1 : Rendement de génération d'une pompe à chaleur en fonction des variations du COP_{MOYEN EFFECTIF}

thermiques.org) et il tient compte de tous les générateurs électriques branchés au réseau (tels que, par exemple, les centrales thermo-électriques et le parc éolien) et de l'efficacité du réseau de distribution. Le Tableau 1 illustre les rendements de génération d'une pompe à chaleur générique lorsque le COP_{MOYEN EFFECTIF} varie.

L'ÉCONOMIE D'ÉNERGIE

L'économie d'énergie, c'est-à-dire l'économie d'énergie vis-à-vis des sources primaires présentes dans la nature, entre l'utilisation d'une installation de chauffage traditionnelle, alimentée par une chaudière gaz, et l'utilisation d'une installation avec pompe à chaleur air/eau, peut être calculée en comparant les rendements de génération correspondants. Si le rendement de génération d'une chaudière (traditionnelle ou à condensation) est facile à calculer, celui d'une pompe à chaleur dépend surtout de ses conditions de fonctionnement. Nous pouvons résumer les rendements de génération de la pompe à chaleur à partir des valeurs de COP_{MOYEN EFFECTIF} de fonctionnement - Tableau 1

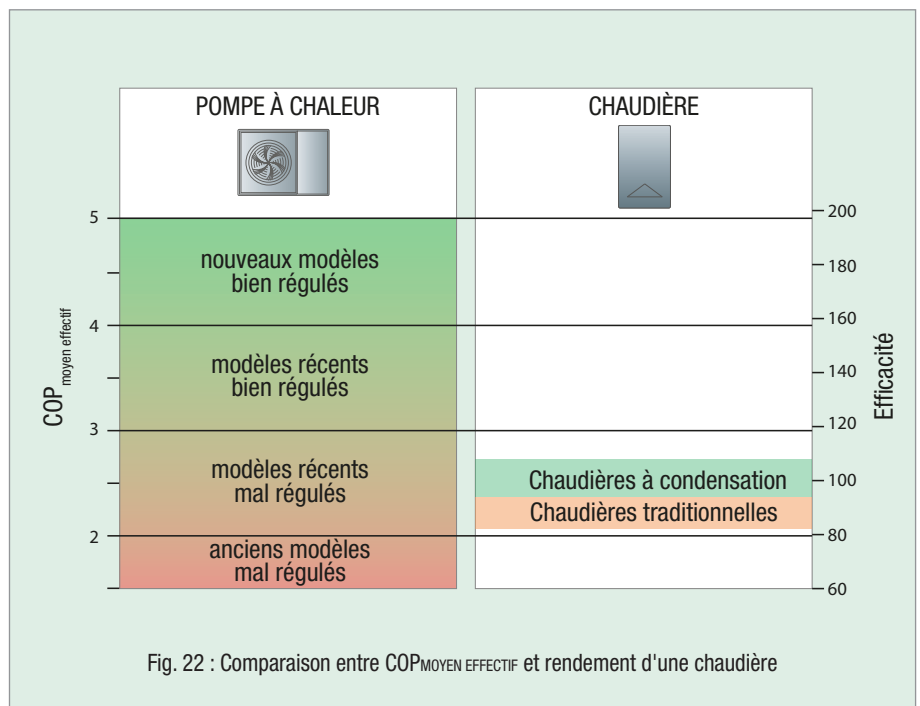


Fig. 22 : Comparaison entre COP_{MOYEN EFFECTIF} et rendement d'une chaudière

Le rendement de génération d'une pompe à chaleur est toujours élevé si on le compare à celui d'une chaudière gaz, qui s'arrête toujours, par exemple, à 106 %. Une pompe à chaleur offre un rendement supérieur dès que le COP dépasse 2,5 : une valeur que la plupart des pompes à chaleur disponibles dans le commerce atteignent et dépassent, même si elles ne sont pas utilisées dans des conditions optimales. Si l'on choisit un modèle récent avec une bonne régulation de l'installation, les valeurs d'efficacité arrivent à 130 % voire 170 %. Enfin, avec un modèle tout récent de pompe à chaleur et si l'installation est gérée avec une bonne régulation, l'efficacité peut atteindre 200 %.

L'ÉCONOMIE FINANCIÈRE

La comparaison économique entre une installation traditionnelle alimentée par une chaudière gaz et une alimentée par une pompe à chaleur peut se faire en calculant le coût nécessaire pour produire l'énergie thermique sur les deux systèmes de production.

Le coût d'un kWh_{THERMIQUE} produit avec une chaudière gaz se calcule à l'aide de la formule 4. Partant d'une valeur moyenne du PCI du gaz de 9,7 kWh/sm³, nous pouvons récapituler le coût du kWh_{THERMIQUE} dans

le Tableau 2. À l'instar du calcul pour les installations desservies par une chaudière gaz, il est possible de calculer le coût du kWh_{THERMIQUE} que produit une pompe à chaleur à l'aide de la Formule 5. Avec ce type de générateurs, le coût de production de l'énergie thermique (Tableau 3) est influencé par le coût d'achat de l'énergie électrique et par le COP_{MOYEN EFFECTIF} qui, comme nous l'avons vu plus haut, dépend de plusieurs facteurs.

Les tableaux 2 et 3 présentent, à titre d'exemple, les valeurs typiques de rendement du générateur et les coûts des vecteurs énergétiques pour une installation domestique.

$$\text{Coût kWh}_{\text{CHAUDIÈRE}} = \frac{\text{Coût SM}^3_{\text{GAZ}}}{\text{PCI}_{\text{GAZ}} \cdot \eta_{\text{CHAUDIÈRE}}}$$

où :

- Coût SM³_{GAZ} = coût du mètre cube standard du gaz
- PCI_{GAZ} = pouvoir calorifique inférieur gaz
- η_{CHAUDIÈRE} = rendement chaudière

Formule 4

$$\text{Coût kWh}_{\text{PAC}} = \frac{\text{Coût kWh}_{\text{ÉLECTRIQUE}}}{\text{COP}_{\text{MOYEN EFFECTIF}}}$$

Formule 5

Par exemple, pour une installation avec une chaudière traditionnelle gaz à son plus haut rendement estimé (0.98), si l'on considère les valeurs signalées dans le tableau 2, le coût du kWh_{THERMIQUE} correspond à 11.57 c€/kWh.

Pour une installation avec PAC ayant les données suivantes :

- COP_{MOYEN EFFECTIF} = 3,5

- coût de l'énergie élec. = 0,18 €/kWh_{el}
le coût du kWh_{THERMIQUE} correspond à environ 5,14 c€/kWh (tableau 3).

En comparant les coûts du kWh_{THERMIQUE} on observe une baisse de 56 % sur la facture en utilisant la pompe à chaleur à la place d'une chaudière gaz.

De la même façon, si l'on prend en considération une pompe à chaleur avec un COP_{MOYEN EFFECTIF} correspondant à 1,6 qui est un COP très bas, il faudrait une très forte hausse du prix de l'électricité pour que la pompe à chaleur ne soit plus rentable.

Vu les nombreuses variables qui influencent ces calculs, à commencer par le coût de l'énergie, il est possible d'élaborer des graphiques (fig. 23) ou des tableaux permettant d'obtenir le **COP MINIMUM DE RENTABILITÉ** en fonction des coûts respectifs du mètre cube standard (sm³) de gaz et du kWh_{ELECTRIQUE}.

Cette valeur indique le COP minimum qui permet à une installation équipée d'une pompe à chaleur de produire l'énergie thermique à un coût inférieur par rapport à une chaudière gaz. En fonction du coût du gaz (1,10 €/sm³) et du kWh_{ELECTRIQUE} (0,18 €/kWh_{el}) (janvier 2023) pour le marché français, une PAC est **économiquement plus rentable** qu'une chaudière gaz (c'est-à-dire qu'elle produit de la chaleur à un coût inférieur) dans tous les cas de figure. Il faudrait une très forte augmentation du prix de l'électricité pour que cela change.

COMPARAISON ENTRE ÉCONOMIES D'ÉNERGIE ET FINANCIÈRES

Si l'on compare les valeurs obtenues, on remarque facilement qu'à parité de COP_{MOYEN EFFECTIF} l'économie d'énergie est significative.

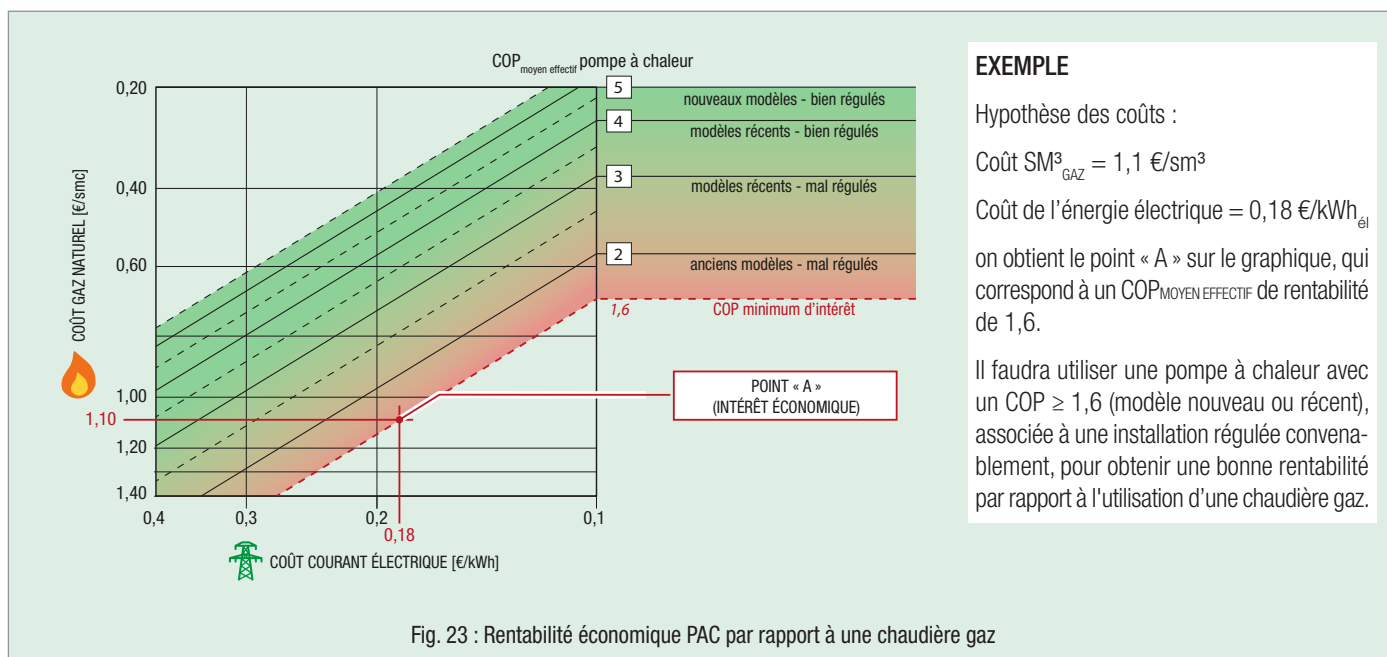
Par exemple, le rendement de génération d'une PAC avec COP_{MOYEN EFFECTIF} correspondant à 3,50 est de 151 %, contrairement aux 98 % d'une chaudière gaz traditionnelle. Cette installation permet donc de réaliser **54 % d'économie d'énergie**.

La même installation équipée d'une PAC aura un coût du kWh_{THERMIQUE} de 5.14 c€/kWh par rapport aux 11.57 c€/kWh de la chaudière gaz traditionnelle, comme on l'a vu aux paragraphes précédents. Du point de vue financier, cette installation est plus **économique de 56 %**.

De la même façon, si l'on considère un COP_{MOYEN EFFECTIF} de 1,6, on obtient encore une économie d'énergie.

En d'autres termes, **il est assez simple de faire fonctionner les installations avec une pompe à chaleur d'une efficacité énergétique supérieure à celle des chaudières gaz**, en consommant moins de combustibles fossiles et en réduisant les émissions de CO₂. **Par contre, si l'on observe les lignes suivantes du tableau 3, on constate que dans le cas où le prix de l'électricité dépasserait les 0,40 €/kWh_{el} même une pompe à chaleur avec COP 3,5 serait peu rentable face à une installation au gaz.**

Pour réduire les frais de gestion des installations équipées d'une PAC, il faut d'abord faire une étude attentive qui prévoie que la température de service des terminaux soit la plus basse possible et que l'installation soit dotée d'une bonne régulation, de sorte à optimiser le COP de fonctionnement.





COÛT DU GAZ [€/sm ³]	RENDEMENT CHAUDIÈRE										
	0,86	0,88	0,9	0,92	0,94	0,96	0,98	1	1,02	1,04	1,06
0,20	2,40	2,34	2,29	2,24	2,19	2,15	2,10	2,06	2,02	1,98	1,95
0,25	3,00	2,93	2,86	2,74	2,74	2,68	2,63	2,58	2,53	2,48	2,43
0,30	3,60	3,51	3,44	3,29	3,29	3,22	3,16	3,09	3,03	2,97	2,92
0,35	4,20	4,10	4,01	3,84	3,84	3,76	3,68	3,61	3,54	3,47	3,40
0,40	4,80	4,69	4,58	4,39	4,39	4,30	4,21	4,12	4,04	3,97	3,89
0,45	5,39	5,27	5,15	4,94	4,94	4,83	4,73	4,64	4,55	4,46	4,38
0,50	5,99	5,86	5,73	5,48	5,48	5,37	5,26	5,15	5,05	4,96	4,86
0,55	6,59	6,44	6,30	6,03	6,03	5,91	5,79	5,67	5,56	5,45	5,35
0,60	7,19	7,03	6,87	6,58	6,58	6,44	6,31	6,19	6,06	5,95	5,84
0,65	7,79	7,61	7,45	7,13	7,13	6,98	6,84	6,70	6,57	6,44	6,32
0,70	8,39	8,20	8,02	7,68	7,68	7,52	7,36	7,22	7,07	6,94	6,81
0,75	8,99	8,79	8,59	8,23	8,23	8,05	7,89	7,73	7,58	7,43	7,29
0,80	9,59	9,37	9,16	8,77	8,77	8,59	8,42	8,25	8,09	7,93	7,78
0,85	10,19	9,96	9,74	9,32	9,32	9,13	8,94	8,76	8,59	8,43	8,27
0,90	10,79	10,54	10,31	9,87	9,87	9,66	9,47	9,28	9,10	8,92	8,75
1,00	11,99	11,72	11,45	11,21	10,97	10,74	10,52	10,31	10,11	9,91	9,73
1,10	13,19	12,89	12,60	12,33	12,06	11,81	11,57	11,34	11,12	10,90	10,70

Tableau 2 : Coût kWh thermique (kWh_t) produit par une chaudière gaz en centimes d'euro (prix janvier 2023)



COÛT kWh _{électrique} [€/kWh _{él.}]	COP _{MOYEN EFFECTIF PAC}										
	1,6	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
0,16	10,00	6,40	5,33	4,57	4,00	3,56	3,20	2,91	2,67	2,46	2,29
0,18	11,25	7,20	6,00	5,14	4,50	4,00	3,60	3,27	3,00	2,77	2,57
0,20	12,50	8,00	6,67	5,71	5,00	4,44	4,00	3,64	3,33	3,08	2,86
0,22	13,75	8,80	7,33	6,29	5,50	4,89	4,40	4,00	3,67	3,38	3,14
0,24	15,00	9,60	8,00	6,86	6,00	5,33	4,80	4,36	4,00	3,69	3,43
0,26	16,25	10,40	8,67	7,43	6,50	5,78	5,20	4,73	4,33	4,00	3,71
0,28	17,50	11,20	9,33	8,00	7,00	6,22	5,60	5,09	4,67	4,31	4,00
0,30	18,75	12,00	10,00	8,57	7,50	6,67	6,00	5,45	5,00	4,62	4,29
0,32	20,00	12,80	10,67	9,14	8,00	7,11	6,40	5,82	5,33	4,92	4,57
0,34	21,25	13,60	11,33	9,71	8,50	7,56	6,80	6,18	5,67	5,23	4,86
0,36	22,50	14,40	12,00	10,29	9,00	8,00	7,20	6,55	6,00	5,54	5,14
0,38	23,75	15,20	12,67	10,86	9,50	8,44	7,60	6,91	6,33	5,85	5,43
0,40	25,00	16,00	13,33	11,43	10,00	8,89	8,00	7,27	6,67	6,15	5,71
0,42	26,25	16,80	14,00	12,00	10,50	9,33	8,40	7,64	7,00	6,46	6,00
0,44	27,50	17,60	14,67	12,57	11,00	9,78	8,80	8,00	7,33	6,77	6,29

Tableau 3 : Coût kWh thermique (kWh_t) produit par une pompe à chaleur en centimes d'euro (c€/kWh), en janvier 2023

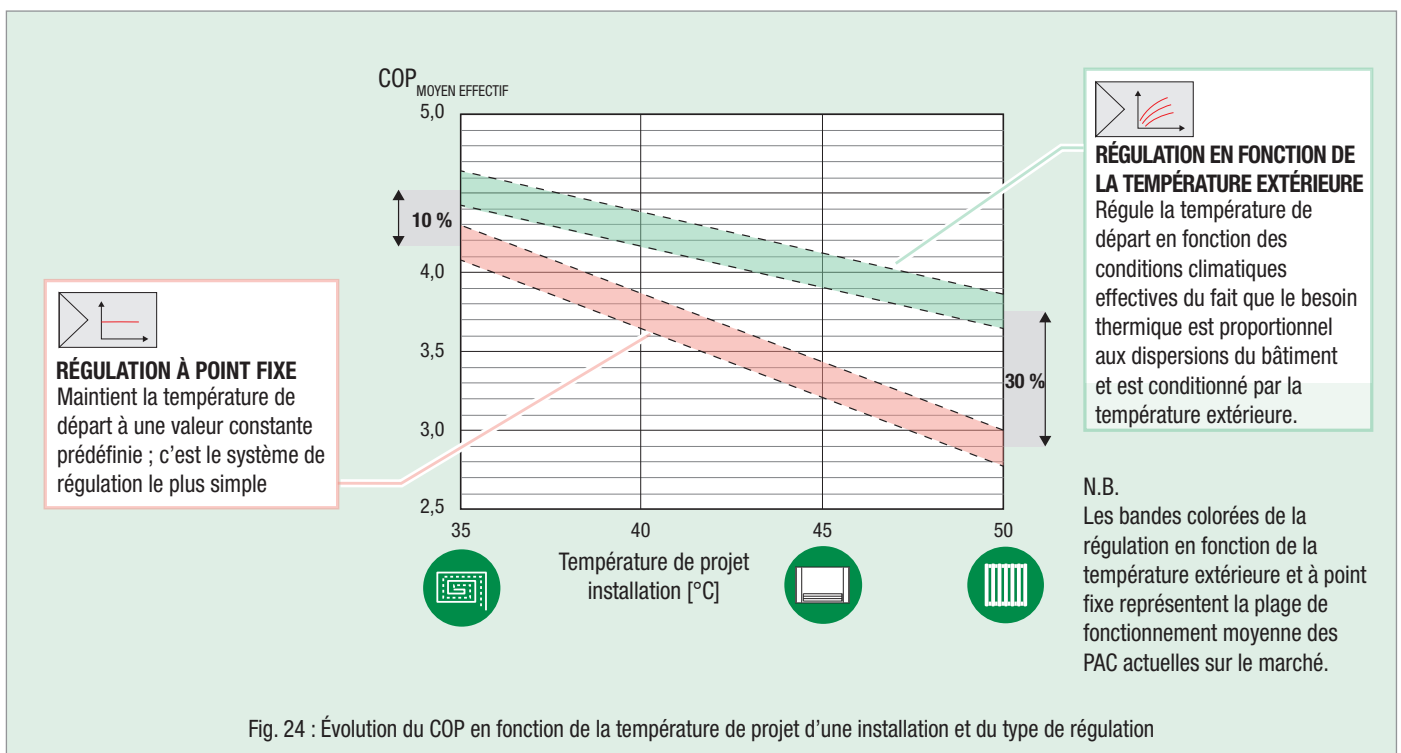
INFLUENCE DE LA RÉGULATION SUR LE COP MOYEN EFFECTIF

Le COP de fonctionnement d'une pompe à chaleur dépend fortement de la température de la source interne, c'est-à-dire de la température de départ vers le circuit de chauffage. Il est donc fondamental de concevoir des installations en mesure de fonctionner avec une température de départ basse, associées à des systèmes de régulation en mesure de la conserver la plus basse possible en fonction des conditions de charge effective de l'installation. Il convient donc de réguler la température de départ des pompes à chaleur en fonction des courbes de chauffe.

Cela permet de faire de réelles économies par rapport à un réglage traditionnel. La figure 24 illustre les valeurs de $COP_{MOYEN\ EFFECTIF}$ résultant d'une simulation numérique, pour une installation équipée d'une pompe à chaleur air/eau, lorsque la température de départ de projet et le type de régulation varient. Les valeurs se réfèrent à une situation climatique typique de la région Lyonnaise et il s'agit d'un exemple.

Comme le montre le graphique, les avantages de la régulation en fonction de la température extérieure par rapport à une régulation à point fixe sont d'autant plus grands que la température de départ vers les terminaux est élevée, dans les conditions de conception du projet.

Par exemple, dans les applications comportant des pompes à chaleur avec des radiateurs à température moyenne (environ 50 °C), il est possible d'économiser jusqu'à 30 % ; le plus souvent sans investissement, car la plupart des pompes à chaleur vendues dans le commerce peuvent être régulées en fonction des courbes de chauffe, sans besoin d'acheter d'autres composants supplémentaires.



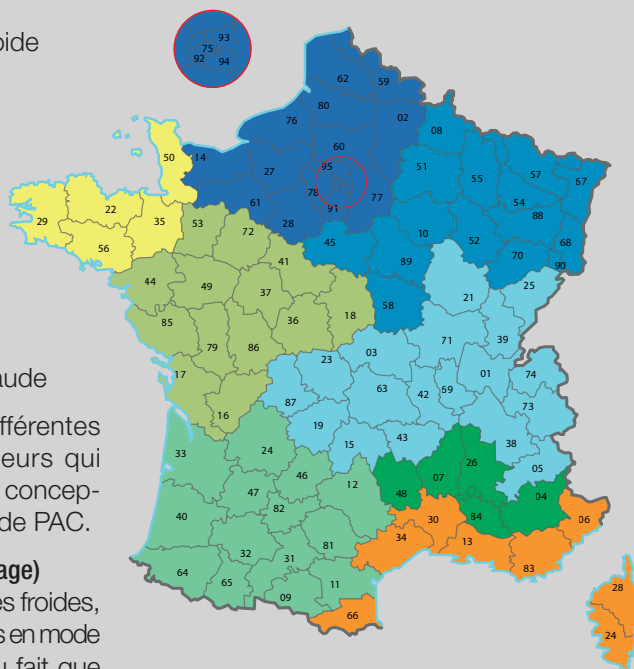
POMPES À CHALEUR ET CLIMAT EN FRANCE

Les pompes à chaleur air/eau sont des machines aux performances variables : le lieu où elles sont installées conditionne le besoin thermique et frigorifique et influence positivement ou négativement leur efficacité.

Le climat a aussi une incidence sur la quantité d'énergie consommée : les climats plus froids avec des saisons hivernales plus longues entraînent une consommation plus élevée pour le chauffage. Au contraire, les régions plus chaudes entraînent une augmentation de la consommation de climatisation.

Le territoire français est très diversifié du nord au sud et on peut y compter huit zones climatiques différentes :

- H1a : zone extrêmement froide
- H1b : zone très froide
- H1c : zone froide
- H2a : zone tempérée
- H2b : zone assez chaude
- H2c : zone chaude
- H2d : zone très chaude
- H3 : zone extrêmement chaude



Des conditions climatiques différentes influencent une série de facteurs qui s'avèrent déterminants dans la conception des installations équipées de PAC.



COP moyen effectif (chauffage)

Dans les zones climatiques froides, les performances moyennes en mode chauffage sont faibles du fait que les températures extérieures de base sont très basses - proches de -15°C dans la zone climatique H1a. Ces mêmes machines assureront de meilleures performances dans le sud de la France avec -2°C de température extérieure de base.



EER moyen effectif (rafraîchissement)

Contrairement au COP, l'efficacité des machines en mode rafraîchissement est influencée négativement dans les localités les plus chaudes comme celles du sud de la France.



Économie d'énergie en mode chauffage

Dans les zones froides, la puissance électrique absorbée fait grimper la consommation d'énergie du fait que les machines restent allumées de nombreuses heures en mode chauffage sur plusieurs mois. Plus les systèmes dotés de pompes à chaleur air/eau restent allumés, plus l'économie d'énergie sera renforcée par rapport aux systèmes traditionnels équipés de chaudières.



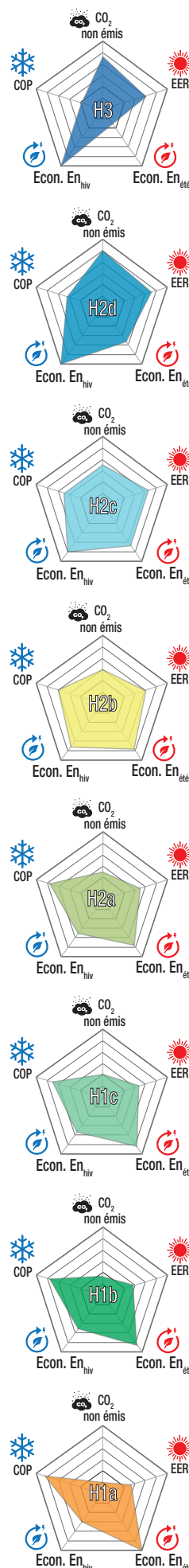
Économie d'énergie en mode rafraîchissement

De même, l'utilisation d'un système avec PAC air/eau par rapport à un système obsolète (le bon vieux climatiseur domestique) permet d'obtenir une importante économie d'énergie, surtout dans les zones chaudes où elles doivent fonctionner tout l'été.



CO₂ non libéré dans l'environnement

La quantité de dioxyde de carbone libéré dans l'environnement est directement liée à l'utilisation de l'installation (temps d'activité) et à son efficacité. La plus forte concentration de polluants, comme le CO₂, se vérifie en hiver lorsque les appareils de chauffage tournent à plein régime : une installation équipée d'une PAC air/eau assurant un rendement supérieur par rapport aux systèmes équipés d'une chaudière permettra de réduire sensiblement les émissions.



Graphiques radar (ci-contre) : performances moyennes des PAC air/eau selon les différentes zones climatiques

LES GAZ RÉFRIGÉRANTS

L'évolution du secteur de la climatisation a subi une forte accélération ces dernières années après l'entrée en vigueur des conditions minimum sur l'efficacité et l'impact environnemental des pompes à chaleur. De nouveaux règlements ont été rédigés afin de pousser les fabricants à prendre en considération des fluides frigorigènes plus durables et offrant des performances supérieures par rapport à ceux qui ont été utilisés jusque-là. Pour le cadre domestique, les fluides frigorigènes traditionnellement utilisés - le R410A et le R134a - devront être remplacés par des fluides à faible impact environnemental comme le gaz R32 (famille des fluorés) ou le gaz d'origine naturelle R290 (propane).

Actuellement, aucune norme n'interdit l'utilisation des pompes à chaleur chargées au gaz R134a ou R410A. **Par contre, les climatiseurs mono split résidentiels contenant moins de 3 kg de gaz ne devront plus utiliser les fluides frigorigènes HFC avec des valeurs de Potentiel de Réchauffement Global (PRG) > 750 à partir du 1er janvier 2025.**

IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Pour évaluer l'impact des différents gaz à effet de serre sur le réchauffement global, utiliser les valeurs du Potentiel de Réchauffement Global (PRG) (*1) et celles du Potentiel de Dégradation de l'Ozone (PDO) (*2).

Les premières machines frigorifiques utilisaient le gaz R717 (ammoniaque) comme fluide intermédiaire, qui fut ensuite abandonné pour sa toxicité et sa corrosivité, malgré son rendement élevé, son PRG nul et son prix abordable du fait qu'il était facilement disponible. Pendant de nombreuses années, le choix s'est ensuite porté sur un HCFC (hydrochlorofluorocarbène) dénommé R22, désormais interdit du fait qu'il compromet la couche d'ozone atmosphérique (PDO > 0). Actuellement, ce sont les HFC (hydrofluorocarbène) qui prédominent. Bien sûr, la recherche ne cesse d'étudier de nouveaux fluides dans le but de réduire leur impact environnemental et d'augmenter leurs performances thermodynamiques.

RÈGLEMENT EU F-GAS 517/2014

Il a pour but de protéger l'environnement en renforçant et en introduisant des dispositions spécifiques visant à réduire les émissions des gaz fluorés à effet de serre (F-Gas). Ce règlement limite l'utilisation des réfrigérants fluorés: **il interdit certains HFC** sur certains produits/applications, **introduit un système de quotas nationaux** et **impose un contrôle régulier sur les fuites de gaz**.

Les quotas nationaux représentent la quantité de CO₂ équivalente (calculée

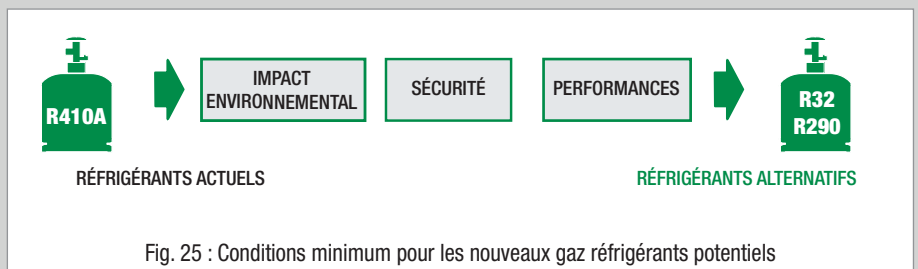


Fig. 25 : Conditions minimum pour les nouveaux gaz réfrigérants potentiels

GAZ RÉFRIGÉRANT	DENSITÉ (kg/m ³ à 25 °C)	TYPLOGIE	POTENTIEL DE RÉCHAUFFEMENT GLOBAL (*1)	POTENTIEL DE DÉGRADATION DE L'OZONE (*2)
R22	1191	HCFC	1810	0,05
R717	603	Naturel	0	0
R134a	1202	HFC	1430	0
R410A	1061	HFC	2088	0
R32	961	HFC	675	0
R290	493	Naturel	3	0

(*1) L'indice d'évaluation appelé Potentiel de Réchauffement Global (PRG) est une valeur adimensionnelle qui mesure l'impact sur l'effet de serre du fluide frigorigène par rapport à celui d'une substance de référence (CO₂).

(*2) Le PDO est un indicateur qui définit la mesure de l'effet néfaste sur l'ozone de la part d'une substance par rapport à une substance de référence (Gaz R11).

Tableau 4 : Caractéristiques des gaz réfrigérants pour pompes à chaleur résidentielles

comme produit entre PRG et charge de réfrigérant) et tiennent compte de l'effet de serre qu'ils peuvent provoquer. Selon le Règlement européen F-Gas, ces quotas devront diminuer progressivement.

Il est indispensable de tenir compte de :

- l'indice PRG : plus le PRG est bas, plus la quantité de fluide frigorigène utilisable dans le pays (quotas natio-

naux) est grande (fig. 26).

- la densité du gaz : moins le gaz est dense, moins il en faudra pour charger la machine (Tableau 4).

SÉCURITÉ

ISO 817:2014

Indexation des gaz réfrigérants en fonction de leur niveau de sécurité, à travers un sigle comprenant deux ou trois caractères alphanumériques (fig. 27) Le premier caractère indique la classe de toxicité :

- A : indique les réfrigérants ayant une limite d'exposition professionnelle de 400 ppm ou supérieure ;
- B : indique les réfrigérants ayant une limite d'exposition professionnelle inférieure à 400 ppm.

Le deuxième caractère indique l'inflammabilité basée sur la limite inférieure d'inflammabilité (LFL), sur la chaleur restituée durant la combustion et sur la vitesse maximale à laquelle elle a lieu.

Les réfrigérants employés pour la climatisation résidentielle s'avèrent peu toxiques. Mais de nombreux réfrigérants alternatifs sont inflammables ou faiblement inflammables, surtout le R290. Cette condition implique un investissement plus important pour sécuriser l'installation.

Autre facteur à prendre en considération, le risque de saturation de l'air dans une pièce. Le marché propose des gaz non toxiques mais fortement inertes, comme le R410A. Il est donc bon d'étudier attentivement le rapport entre le poids de la charge de fluide frigorigène de la machine et le volume d'air présent dans la pièce où celle-ci a été installée.

PERFORMANCES

Dans le choix d'un nouveau réfrigérant, après avoir évalué les facteurs impactant sur l'environnement et sur la sécurité, consulter les paramètres performanciers afin de savoir comment ils peuvent influencer le rendement de la machine.

Les paramètres utilisés pour comparer deux types de gaz sont certainement le COP et l'EER, expliqués page 19.

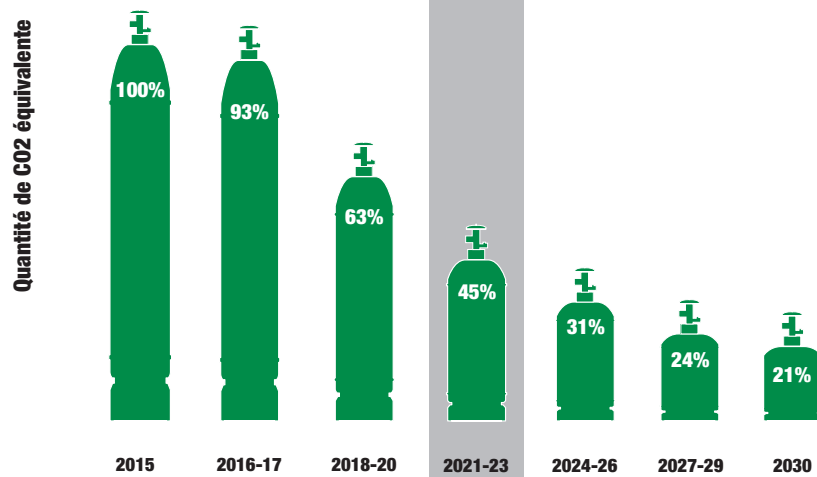


Fig. 26 : Quotas nationaux du Règlement F-Gas

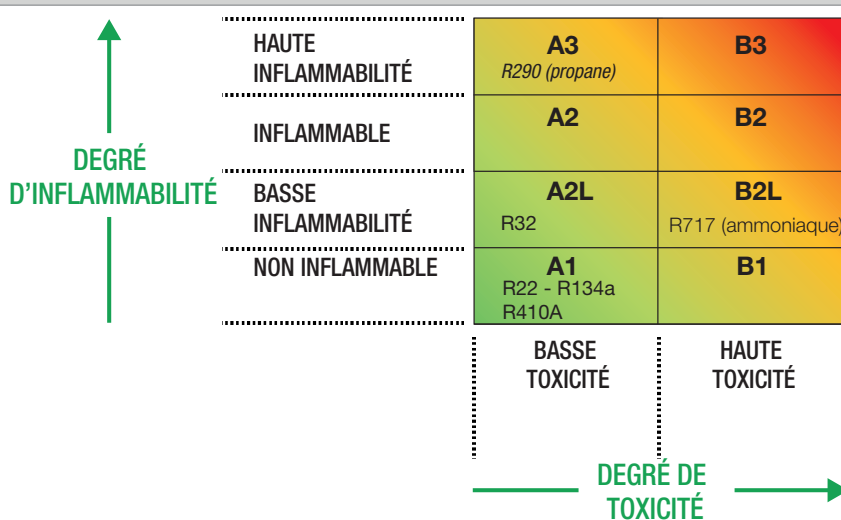


Fig. 27 : Classification de sécurité des gaz réfrigérants

R32 VS R410A

Une pompe à chaleur conventionnelle qui utilise le gaz R410A, en cas de conditions extérieures défavorables, garantit des performances semblables à la nouvelle alternative si la température de l'eau nécessaire à l'installation est inférieure à 40 °C env. (plancher chauffant). Au contraire, une PAC utilisant le gaz R32 présente un COP supérieur lorsque les terminaux nécessitent une température de service plus haute. Par conséquent, le R32 représente une excellente alternative pour les interventions de rénovation réutilisant les radiateurs déjà présents.

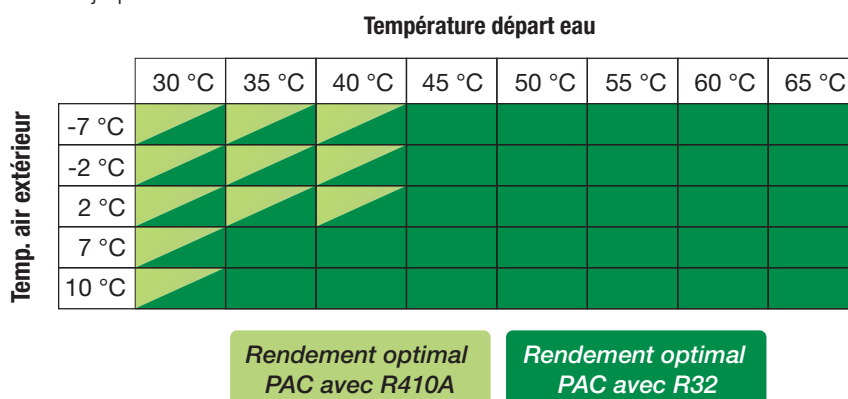


Tableau 5 : COP optimal pour gaz R410A et gaz R32

INSTALLATIONS AVEC POMPE À CHALEUR AIR/EAU

Ingénieurs Alessia Soldarini et Mattia Tomasoni, ingénieurs

DIMENSIONNEMENT

La valeur déterminante pour dimensionner correctement une pompe à chaleur est la puissance thermique délivrée. Cette puissance n'est pas constante mais elle dépend des mêmes facteurs qui influencent le COP :

- température de la source chaude (température de départ) ;
- température de la source froide (température de l'air extérieur) ;
- nombre de dégivrages ;
- facteur de charge.

Il est possible de ne pas tenir compte des deux derniers paramètres pour dimensionner les pompes à chaleur si l'on suppose les conditions suivantes :

1. toujours tenir compte de la puissance produite en cas de dégivrage, phénomène non contrôlable du fait

qu'il dépend exclusivement de la température et du taux d'humidité de l'air extérieur ;

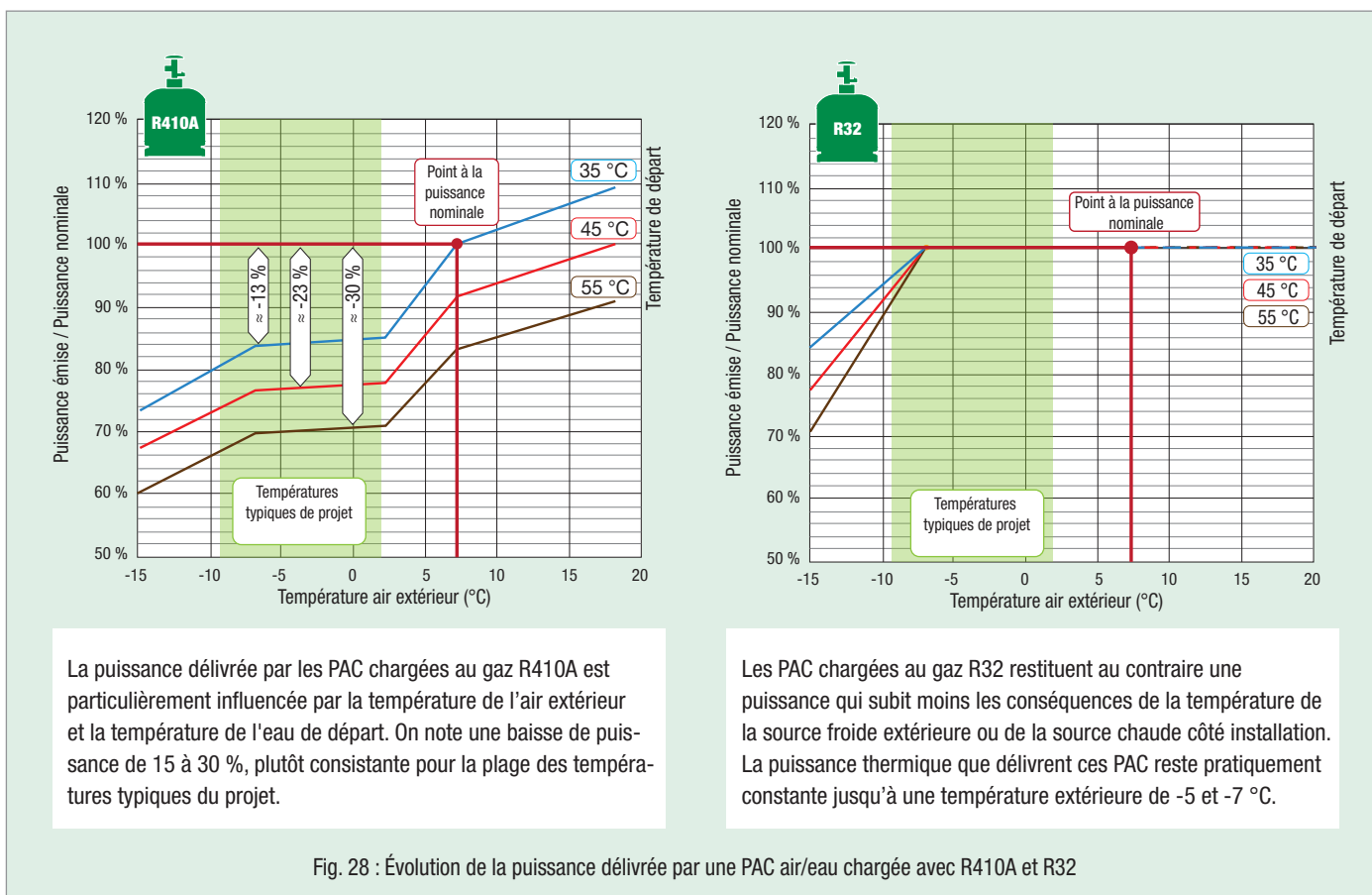
2. on fixe un facteur de charge de 100 % vu que les conditions de projet correspondent aux conditions de puissance maximale requise de la part de la pompe à chaleur.

D'une manière approximative, on peut sélectionner les PAC air en fonction de la puissance délivrée selon les variations de la température de la source chaude (départ installation) et de la source froide (l'air extérieur). Normalement, les données pour le dimensionnement sont disponibles sur les fiches techniques que fournissent les fabricants, sous forme de tableaux ou de graphiques, et elles sont spécifiques à chaque machine. Cela dit, de manière générale, nous pouvons synthétiser l'évolution de la puissance délivrée par les PAC air/

eau dans les graphiques de la fig. 28.

Le premier graphique se réfère à des PAC avec gaz R410A et le deuxième à des PAC avec gaz R32.

Les graphiques montrent clairement que **la puissance nominale indiquée dans les données techniques**, se référant généralement à une température de l'air extérieur de 7 °C et à une température de départ de l'eau de 35 °C (point de puissance nominale : A7W35), **peut être sensiblement différente de la puissance que délivre la machine dans les conditions de projet**. Les graphiques montrent également que les PAC avec gaz R410A donnent une puissance thermique bien plus influencée par la température extérieure et par la température de départ que celles chargées au gaz R32, où la puissance restituée est stable jusqu'à une température de -7 °C.



Par ailleurs, dans le choix d'une pompe à chaleur air/eau, c'est le surdimensionnement qui est plus à craindre pour éviter :

- des frais d'installation supérieurs ;
- une diminution de l'efficacité ;
- une forte consommation d'électricité.

Pour cela, analysons trois **méthodes de dimensionnement** possibles des pompes à chaleur en évaluant les avantages, les risques possibles et les stratégies pour les minimiser.

DIMENSIONNEMENT EN FONCTION DES DONNÉES DE PROJET

Il prévoit de sélectionner la pompe à chaleur en fonction de la puissance thermique nécessaire dans les conditions de projet du bâtiment. La procédure implique l'analyse des courbes de puissance de la machine (selon les tableaux ou les graphiques fournis par les fabricants) et le choix de celle qui fournit une puissance supérieure ou égale à la demande du projet.

Cette procédure de dimensionnement est la plus conservatrice et amène à sélectionner des générateurs légèrement surdimensionnés, situation aggravée par l'écart entre les tailles des machines du marché. Prenons en considération, par exemple, les courbes de puissance d'une **PAC qui utilise le R410A** (fig. 29) et les données suivantes de projet du bâtiment :

- puissance thermique nécessaire = 6,5 kW
- température extérieure = -7 °C

cela conduit à choisir une pompe à chaleur d'une **puissance nominale de 9 kW**. Le générateur d'une puissance nominale de 7 kW serait en effet légèrement sous-dimensionné.

Les mêmes données de projet associées à une **pompe à chaleur au R32** (fig. 30) permettent d'opter pour une machine d'une **puissance nominale de 7 kW**, d'une taille inférieure par rapport à celle au R410A qui aurait été choisie.

Le passage d'une puissance à l'autre, si l'on considère les pompes à chaleur de taille domestique, peut influencer sensiblement la consommation d'électricité et les frais d'installation électrique (voir

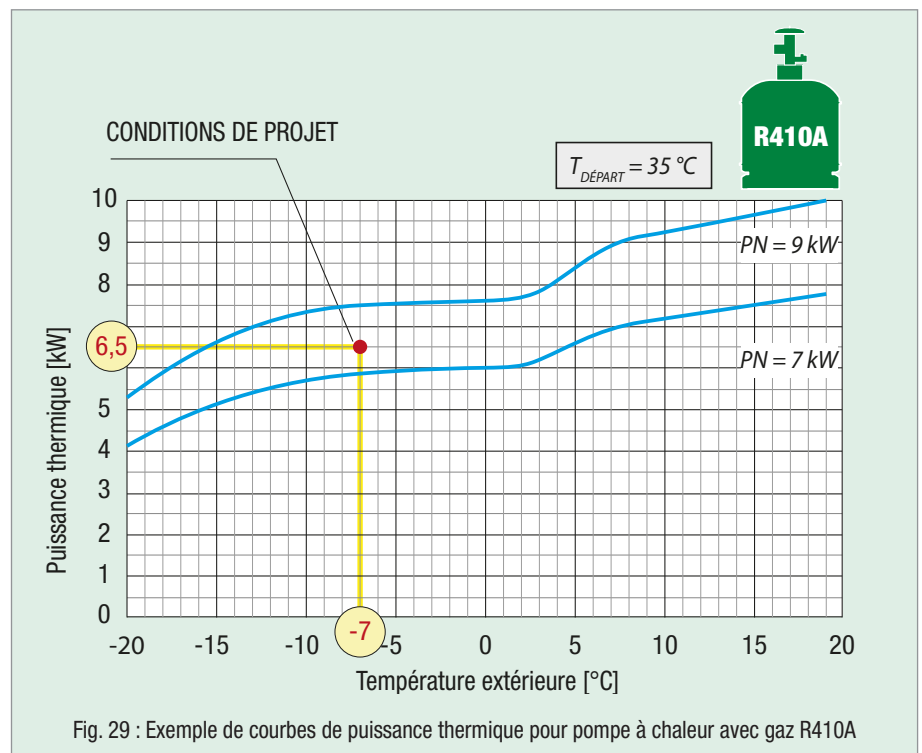


Fig. 29 : Exemple de courbes de puissance thermique pour pompe à chaleur avec gaz R410A

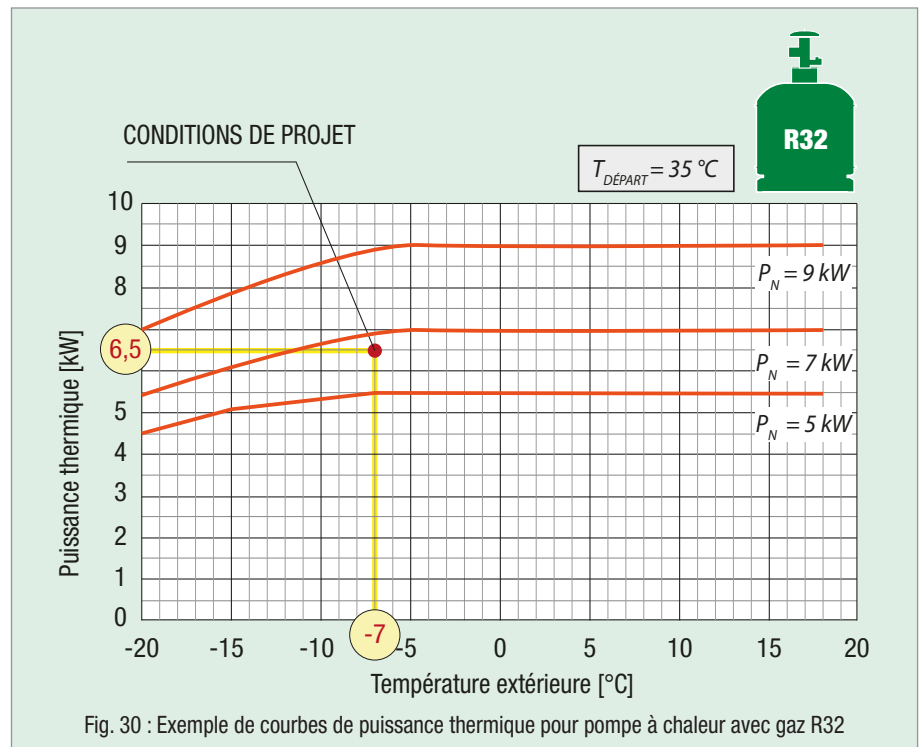


Fig. 30 : Exemple de courbes de puissance thermique pour pompe à chaleur avec gaz R32

le chapitre « Installation monophasé ou triphasé ? » page 48). Si les conditions de projet portent à devoir choisir une taille intermédiaire entre deux solutions possibles (comme le cas de la

fig. 29), il est préférable d'évaluer une autre méthode de dimensionnement qui prenne en considération la courbe réelle de puissance du bâtiment ou sa capacité thermique.

DIMENSIONNEMENT EN FONCTION DE LA COURBE RÉELLE DE PUISSANCE NÉCESSAIRE

Les consommations réelles d'une habitation comprennent une part d'énergie qui n'est pas délivrée par le circuit de chauffage mais qui provient de l'utilisation normale des appareils électroménagers et de l'éclairage des personnes qui vivent dans le logement et du rayonnement solaire. L'apport gratuit de ces charges thermiques marque la différence entre la courbe de puissance réelle et la courbe théorique nécessaire au bâtiment, selon une évolution type indiquée à la figure 31.

Dans les conditions de projet, l'apport des sources de chaleur gratuites reste plutôt limité (surtout parce que

la valeur concernant le rayonnement solaire diminue énormément) mais on peut considérer qu'il fournit entre 0,5 et 1,5 kW. Si l'on tient compte des charges gratuites, on peut dimensionner les PAC en prenant en considération la puissance thermique réelle ($P_{\text{RÉELLE}}$), c'est-à-dire celle de projet (P_{PROJET}) moins les apports gratuits présents dans ces conditions (P_{GRATUITE}).

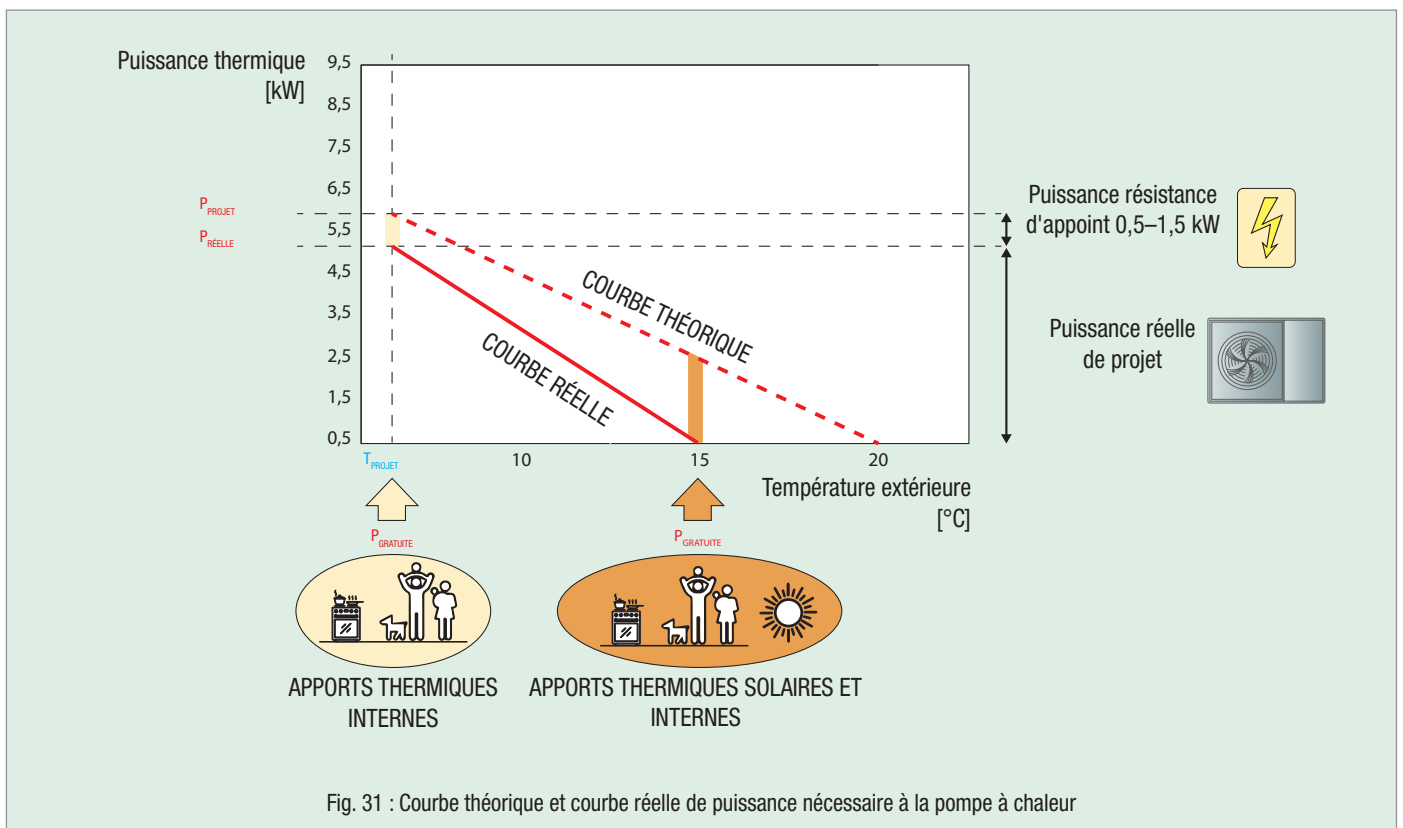
Puissance réelle de projet

$$P_{\text{RÉELLE}} = P_{\text{PROJET}} - P_{\text{GRATUITE}}$$

Formule 6

Lorsque l'on évalue le dimensionnement de cette façon, il faut prévoir un appoint électrique : dans des cas exceptionnels

où la charge gratuite est annulée (apports thermiques internes), il est possible de compléter la puissance de la pompe à chaleur avec l'utilisation de l'appoint électrique. S'il est rarement utilisé, cet appoint ne va pas surcharger l'installation électrique. Il est essentiel de ne pas surestimer l'apport des sources gratuites pour éviter le plus possible le déclenchement de l'appoint électrique d'urgence qui entraîne un coût énergétique important (COP=1) et affecte négativement le rendement global de l'installation thermique.



DIMENSIONNEMENT EN FONCTION DE LA CAPACITÉ THERMIQUE

Cette méthode est plus précise que les précédentes. Elle tient compte du fait que les logements modernes, ou récemment rénovés, présentent une forte inertie thermique, favorisée par toutes les interventions qui permettent de conserver longtemps la chaleur à l'intérieur des murs (par exemple avec l'isolation par l'extérieur).

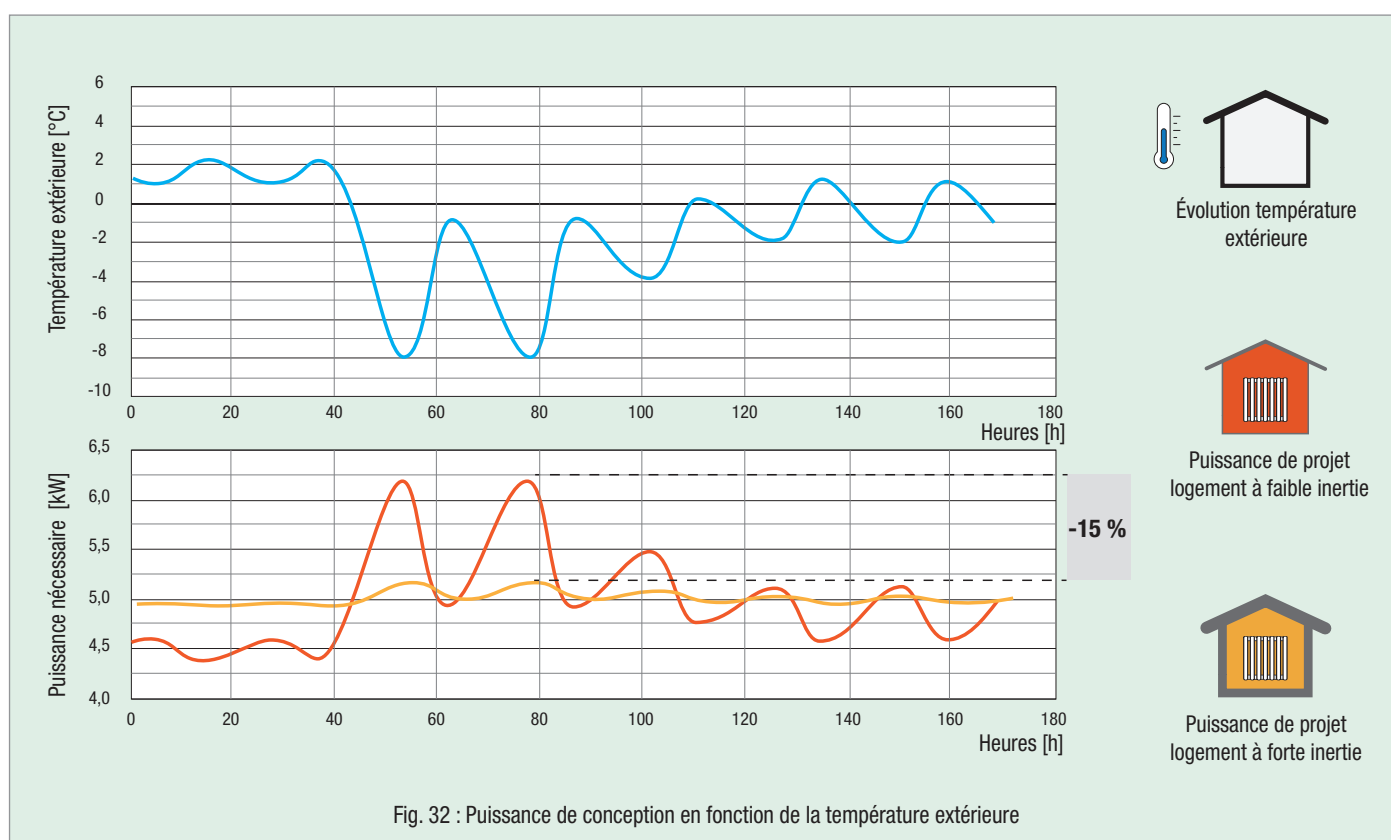
L'inertie thermique du bâtiment peut être comparée à l'effet d'une batterie : lorsqu'il fait chaud, les parois accumulent la chaleur fournie par l'installation pour la restituer lorsqu'il fait plus froid. Cela a pour effet d'atténuer les pics de puissance en diminuant la puissance maximale requise du générateur de chaleur.

Un effet typique de l'inertie est illustré à la figure 32, où est simulée l'évolution de la demande de puissance pendant une semaine avec des températures comparables à la température de conception (-7 °C). Les courbes illustrent la tendance de la puissance nécessaire pour conserver une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ à l'intérieur d'un logement, respectivement pour un logement à faible inertie et pour un logement à inertie thermique élevée. Le logement à faible inertie (qui n'utilise que 6,5 kW de puissance) présente des pics de puissance semblables à la valeur de conception ; par contre, le logement à inertie thermique élevée demande jusqu'à 15 % de puissance en moins.

Le dimensionnement qui tient compte de la capacité thermique de la structure

est de type dynamique et se calcule à partir de logiciels spécifiques qui prennent en considération le comportement de l'isolation vis-à-vis des changements de la température extérieure et de l'installation à laquelle elle est associée.

Cette méthode de dimensionnement permet surtout d'optimiser le calcul de l'installation pour des logements à hautes performances énergétiques. Elle est particulièrement intéressante dans les situations où le circuit de chauffage doit fonctionner en mode continu. En éteignant le chauffage la nuit (comme c'est le cas par exemple pour les bureaux), l'atténuation des pics de puissance due à l'inertie de l'immeuble diminue sensiblement.



PARAMÈTRES DE FONCTIONNEMENT

Sur les installations avec pompe à chaleur, il ne suffit pas de dimensionner correctement le générateur, mais il faut également penser à tous ses composants. Raison pour laquelle il est important de connaître et de tenir compte des principaux paramètres de fonctionnement, à savoir le débit d'eau et les températures de service.

DÉBIT D'EAU

Le **débit nominal** se réfère normalement à un écart thermique moyen (environ 5 °C) entre l'entrée et la sortie de l'évaporateur.

Le **débit maximum** admis est celui qui présente un écart thermique minimum (environ 3 °C), alors que le **débit minimum** est celui qui correspond à un écart thermique maximum (environ 8 °C).

Si le débit d'eau est insuffisant (inférieur au débit minimum), la température d'évaporation devient trop basse ; dans cette condition les organes de sécurité se déclenchent et le générateur est stoppé, entraînant la possibilité de formation de givre sur l'évaporateur qui pourrait compromettre le circuit frigorifique.

La circulation du débit d'eau minimum est détectée par un flussostat : lorsque le débit est inférieur à la limite indiquée par le fabricant, le dispositif déclenche une alarme afin d'arrêter la machine pour éviter tout dommage.

TEMPÉRATURES DE SERVICE

En **mode chauffage**, les pompes à chaleur fonctionnent normalement à une **température de service optimale pour l'eau technique de 35 °C** (côté installation) et elles arrivent à produire **de l'eau chaude sanitaire entre 50 et 60 °C**. Quant au rendement de la pompe à chaleur, plus la température requise sera élevée, plus son COP sera bas. Il faut donc trouver un compromis

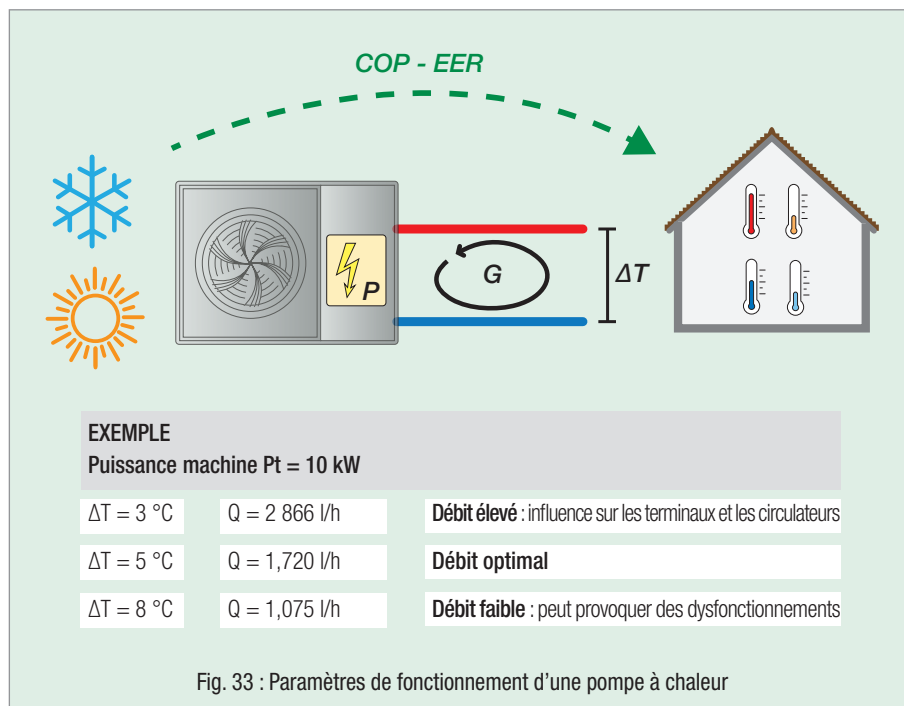


Fig. 33 : Paramètres de fonctionnement d'une pompe à chaleur

entre la température de production de l'eau chaude technique dans la PAC, qui devrait être la plus basse possible, et la température de départ nécessaire aux terminaux, qui au contraire devrait être la plus élevée possible. Il est donc parfois nécessaire de surdimensionner les systèmes d'émission pour les faire fonctionner à une température plus basse par rapport à la valeur nominale. Cette opération oblige à faire un choix entre le coût supplémentaire, le rendement généré et les limites physiques liées aux températures maximales de service.

En outre, bien qu'il soit possible de diminuer la température de production de l'eau technique, pour augmenter les performances des machines, il est en même temps nécessaire, de tenir compte de la possible perte de confort engendrée par les températures aux terminaux plus basses que celles prévues par les standards. Par exemple, dans le cas des ventilo-convecteurs, il est conseillé de les faire fonctionner avec des températures de départ supérieures à 40 °C, afin de ne pas provoquer des situations d'inconfort : sinon, les personnes percevraient une sensation d'air froid sur leur peau (la température du corps est d'environ 36 °C).

En **mode rafraîchissement**, la **température minimale** habituelle de production d'eau réfrigérée est de **7 °C**. Mais dans des situations particulières, il est également possible de produire de l'eau technique à 5 °C.

En été, plus les températures de production d'eau réfrigérée seront basses, moins la machine sera rentable (EER), à l'instar de la saison hivernale. Les machines présentent également une limite de température physiquement atteignable, imposée par le fabricant, afin d'éviter que les échangeurs des groupes frigorifiques eux-mêmes ne gèlent. Cet obstacle ne peut être surmonté qu'en mélangeant l'éthylène glycol à l'eau, modifiant ainsi les propriétés thermiques du fluide. Il est toutefois possible d'augmenter la **température maximale** de départ jusqu'à **15–18 °C** en dotant le système de rafraîchissement de déshumidificateurs, comme c'est le cas avec les systèmes à panneaux rayonnants.

CYCLE DE DÉGIVRAGE

Dans certaines conditions, le gaz frigorigène présent dans l'évaporateur des pompes à chaleur air/eau peut être entre 10 et 15 °C plus froid que l'air extérieur. Lorsque la machine fonctionne en mode chauffage, l'évaporateur récupère la chaleur dans l'air et, au moment où la température descend au-dessous du point de rosée, l'humidité de l'air en contact avec la batterie provoque la formation de condensation.

Celle-ci, à une température comprise entre -5 °C et +7 °C, se transforme en givre : ce phénomène réduit sensiblement le débit d'air qui traverse la batterie de la machine et limitent ainsi son fonctionnement. Les performances de la pompe à chaleur diminuent considérablement mais pas sa consommation électrique, car la machine continue de fonctionner. En outre, plus le taux d'humidité est élevé, plus la quantité de condensation qui risque de se transformer en givre est importante.

Pour que la pompe à chaleur puisse continuer de fonctionner correctement, il faut procéder régulièrement au dégivrage (appelé également « defrost » ou « defrosting »). Durant le dégivrage, le cycle du réfrigérant est momentanément inversé par le biais d'une vanne d'inversion à quatre voies qui force la PAC à passer du mode chauffage au mode rafraîchissement. Ceci permet de récupérer brièvement de la chaleur à l'eau du circuit pour l'apporter à l'évaporateur (batterie d'échange avec l'air extérieur). Pour cette raison, durant le dégivrage, il est nécessaire de garantir à la pompe à chaleur un débit minimum et une certaine quantité d'eau circulant dans le circuit. Ces paramètres sont toujours indiqués par le fabricant.

Pour lancer le dégivrage, la pompe à chaleur détecte automatiquement que l'état du givre de la batterie de l'unité extérieure à travers :

1. une minuterie qui inverse le cycle par intervalles fixes en fonction de la température extérieure mesurée par un capteur ;

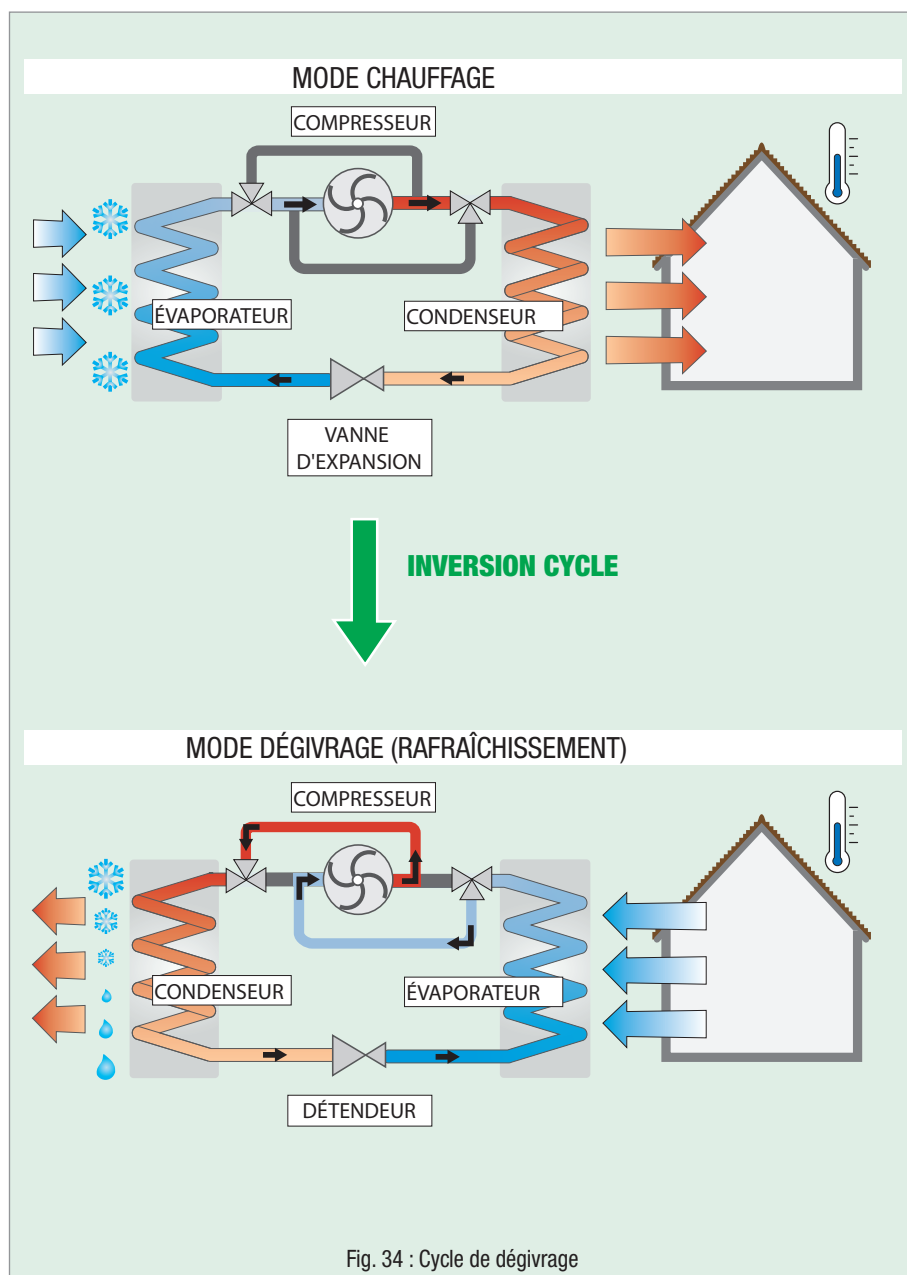


Fig. 34 : Cycle de dégivrage

2. un système de contrôle plus sophistiqué qui contrôle le flux et la température de l'air extérieur ainsi que les conditions ponctuelles de l'évaporateur (état de givrage). La deuxième méthode est la plus efficace car elle évite les dégivrages inutiles. Cependant certains fabricants préfèrent la première méthode car elle s'avère plus simple et moins coûteuse à réaliser. Durant le dégivrage, l'eau générée par la fonte du givre s'écoule à travers un drain située à la base de l'unité extérieure ; il est donc préférable d'éviter qu'elle gèle

au moyen d'un système d'évacuation et de récupération de l'eau. On peut prévoir un bac de récupération avec un câble électrique chauffant ou de diriger directement l'écoulement dans les égouts. Il est également possible d'utiliser une couche de gravier pour drainer l'eau, en assurant une distance minimale entre le terrain et la machine (fig. 35).

Le dégivrage compromet les performances des PAC du fait qu'une partie de la puissance développée par le cycle réfrigérant est utilisée pour dégivrer la batterie extérieure au lieu d'être transmise au fluide. En effet, par rapport aux performances nominales, durant le dégivrage, on assiste à :

1. une réduction du COP ;
2. une baisse de la puissance thermique délivrée.

Ces deux phénomènes sont d'autant plus évidents que les conditions qui déterminent la formation de givre sur la batterie extérieure (températures extérieures basses et humidité absolue élevée) sont fréquentes. La pire combinaison de ces deux facteurs se retrouve dans la plage de température entre -4°C et $+4^{\circ}\text{C}$.

Le phénomène du dégivrage ne peut être contrôlé car il dépend uniquement des conditions thermo-hygrométriques de l'air extérieur. Il faudra quand même en tenir compte pour le choix et le dimensionnement des pompes à chaleur, surtout lorsque la température de projet de l'air extérieur se situe dans la plage la plus touchée par ce phénomène. Dans ce but, les fabricants fournissent dans leur documentation technique des graphiques illustrant les performances des pompes à chaleur qui tiennent compte des cycles de dégivrage.

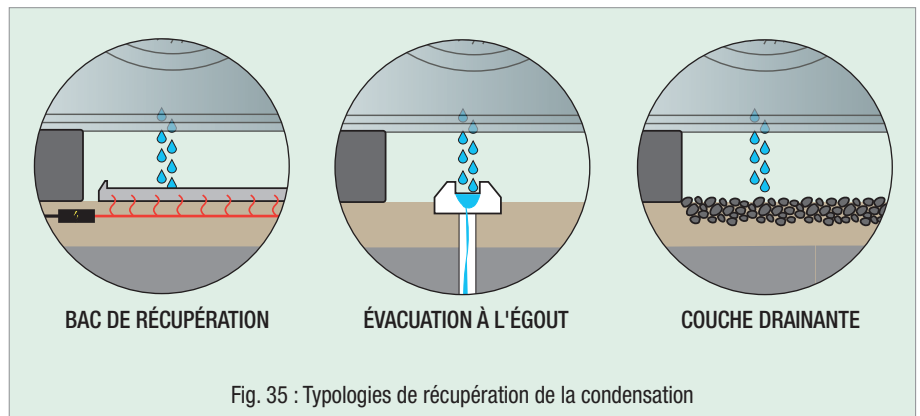


Fig. 35 : Typologies de récupération de la condensation

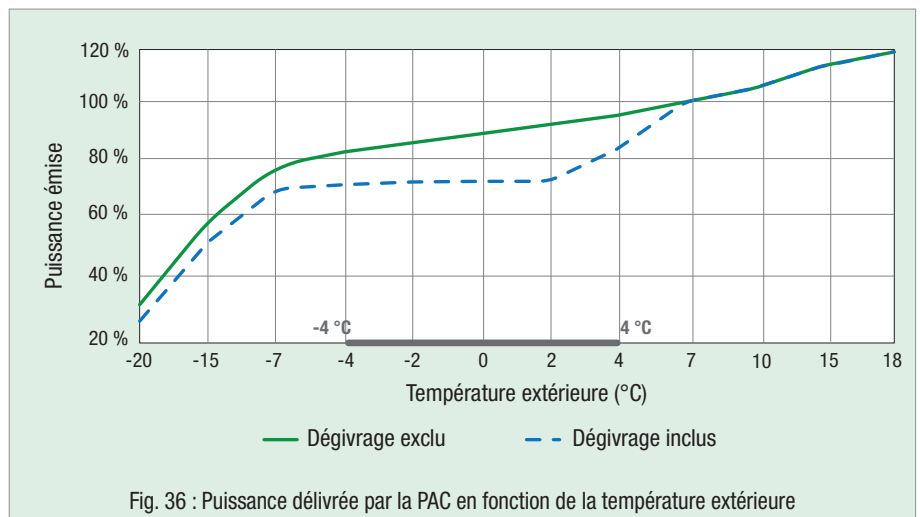


Fig. 36 : Puissance délivrée par la PAC en fonction de la température extérieure

D'OÙ PROVIENT L'ÉNERGIE THERMIQUE POUR LE CYCLE DE DÉGIVRAGE ?

Le cycle de dégivrage exige une quantité d'énergie thermique qui, en fonction de la configuration choisie pour l'installation, peut provenir du circuit de chauffage des terminaux ou d'un ballon tampon.

Installation à forte inertie

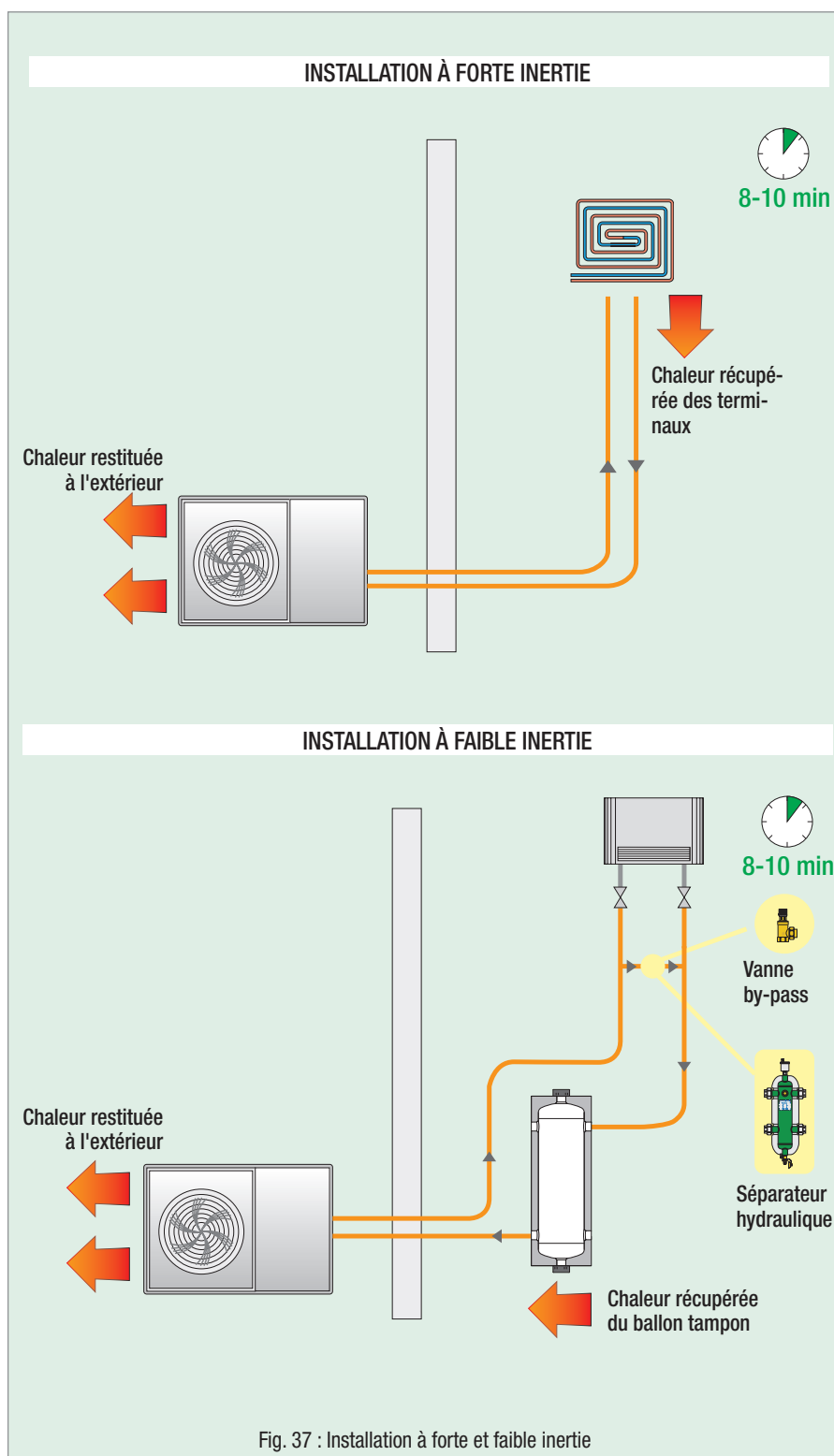
En présence d'une installation où l'inertie thermique est suffisante, il est possible de refroidir momentanément l'eau qui circule dans les tuyauteries, en maintenant le bon fonctionnement de la machine, sans perte de confort thermique (fig. 37).

Il faut prévoir qu'une partie des circuits de chauffage seront toujours en fonction. Dans le cas, par exemple, d'un petit logement T2, il est préférable de réguler l'installation en allumant et éteignant directement la pompe à chaleur, sans aucun organe d'arrêt ou de régulation entre la machine et les terminaux (comme des têtes électrothermiques sur les circuits des planchers chauffants).

Installation à faible inertie

En présence d'une installation à faible inertie thermique (équipée, par exemple, de ventilo-convecteurs) ou au cas où le débit disponible serait inférieur au débit minimum prévu par le fabricant, il faut séparer le circuit primaire (celui de la pompe à chaleur) du circuit secondaire (celui vers les terminaux) au moyen d'une vanne by-pass ou d'un séparateur hydraulique (fig. 37).

Si l'on choisit la vanne by-pass, ne pas oublier d'installer un ballon tampon sur le retour du circuit primaire. Il est également possible de raccorder le ballon tampon comme séparateur hydraulique. Cette dernière solution permet, grâce à la chaleur accumulée, de continuer à chauffer le logement même en mode dégivrage.



LA PRODUCTION D'EAU CHAUDE SANITAIRE

Les pompes à chaleur ne sont généralement pas assez puissantes pour produire instantanément l'eau chaude sanitaire. Pour cette raison, la production d'eau chaude sanitaire doit passer par des systèmes d'accumulation (ballons). Étant donné que la température de départ pendant la production d'eau chaude sanitaire ne peut pas être trop élevée, soit en raison de limitations physiques, soit pour éviter un rendement trop faible, un soin particulier doit être apporté à la conception. Un ballon d'ECS dimensionné pour une pompe à chaleur nécessite des volumes et des surfaces d'échange supérieures à ceux d'une chaudière. Il doit également être en mesure de répondre aux besoins d'eau chaude sanitaire dans la période de pointe car les temps de recharge du ballon sont assez longs à cause de la puissance disponible limitée.

Le **volume d'eau stockée** doit être **abondant** pour permettre d'accumuler l'eau à une température comprise entre 45 °C et 50 °C. Tout degré en plus demandé à la pompe à chaleur en réduit l'efficacité de 3 % environ.

L'**échangeur doit être surdimensionné** par rapport à un modèle associé à une chaudière afin de limiter la différence entre la température de l'ECS et celle de l'eau technique. De plus, les échangeurs de petites dimensions augmentent les temps de recharge du ballon, empêchant la machine d'assurer le chauffage pendant une période plus longue.

Le ballon doit disposer d'une **bonne isolation** pour réduire le plus possible les pertes thermiques et assurer une bonne rentabilité.

Généralement, le ballon est à serpentin immergé avec une grande surface d'échange. Ce système peut réchauffer le ballon d'eau chaude sanitaire jusqu'à la température de confort en ne faisant fonctionner que la machine, ou à l'aide d'un réchauffeur électrique d'appoint, pour obtenir des températures plus élevées. Le ballon peut être extérieur ou intégré dans la PAC.

Certains modèles de pompe à chaleur utilisent, pour optimiser l'échange thermique, un ballon tampon et un échangeur à plaques externe pour la production instantanée d'eau chaude sanitaire. La chaleur n'est pas stockée dans l'eau sanitaire mais dans un ballon tampon technique où la stratification des températures garantit la production d'ECS. Avec cette solution, l'eau sanitaire est réchauffée instantanément à travers un échangeur de chaleur en acier inox où elle ne risque aucune contamination.

La production d'ECS se fait en déviant l'eau de l'installation par une vanne trois voies. La commande de cette dernière est effectuée par la pompe à chaleur car, en plus d'opérer la déviation, elle doit augmenter sa température de départ et inverser le cycle au cas où elle serait en train de produire de l'eau réfrigérée. Lorsque la production d'ECS est faite par un ballon externe, la déviation peut être réalisée par une vanne 3 voies, à l'intérieur ou à l'extérieur de la machine (fig. 38). Dans tous les cas, la vanne est contrôlée par le système électronique de la pompe à chaleur qui relève la température du ballon à travers une sonde.

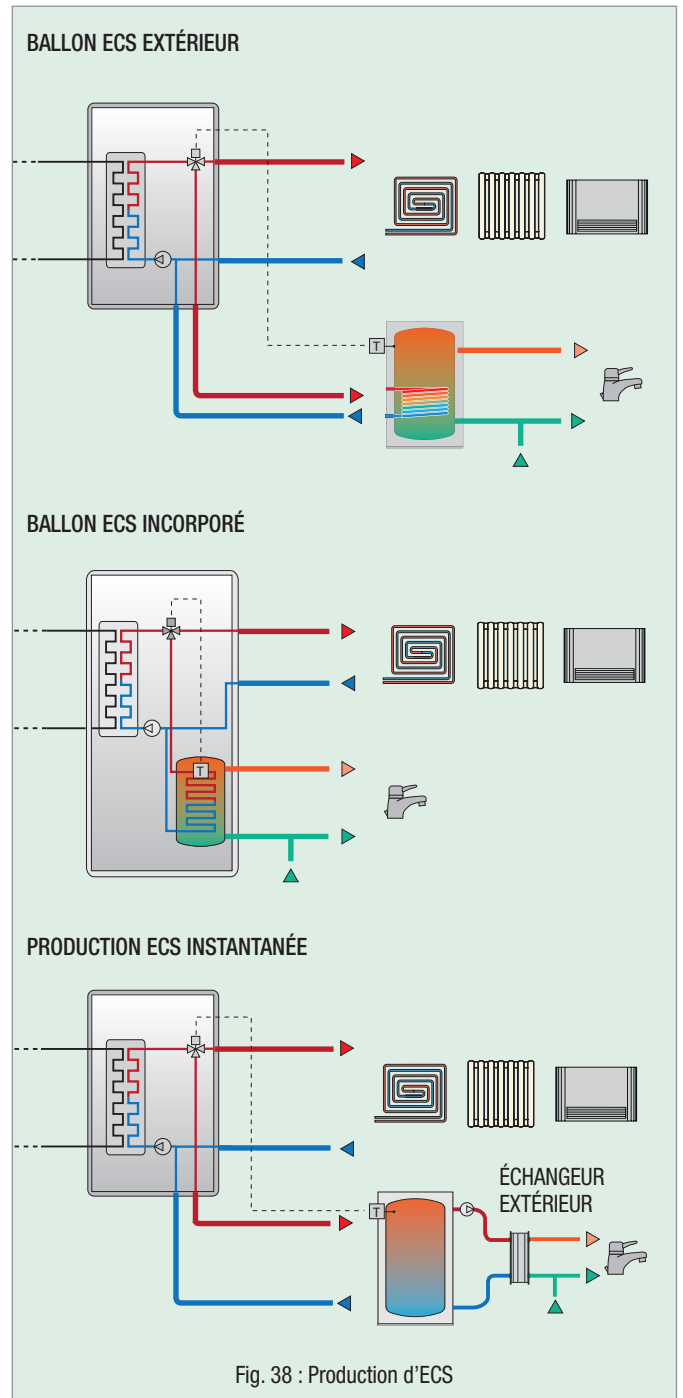
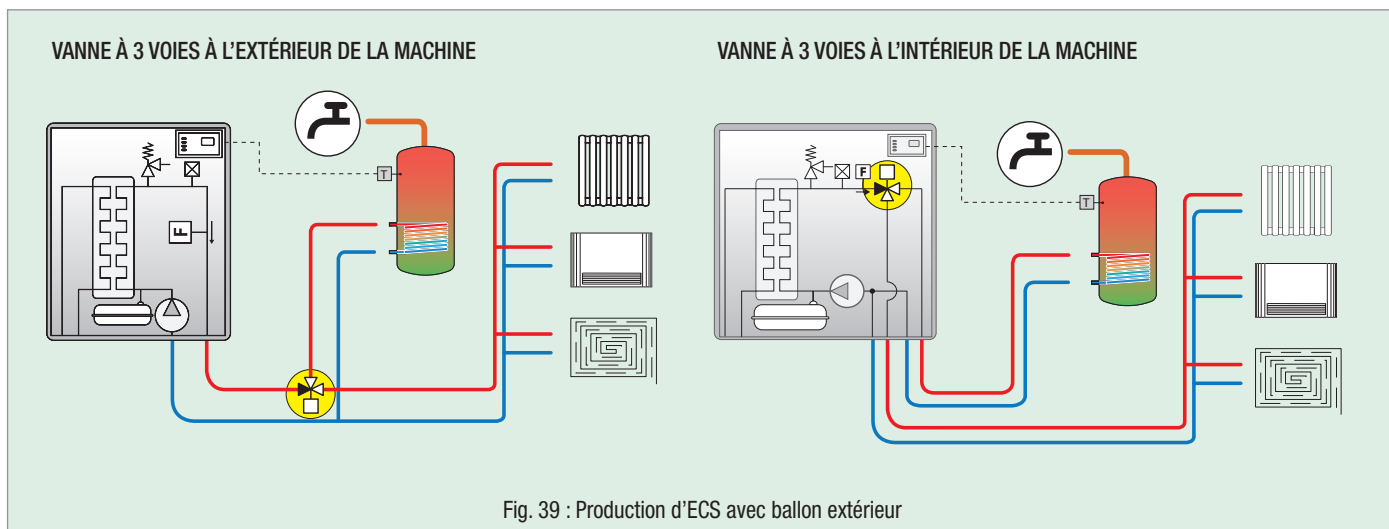


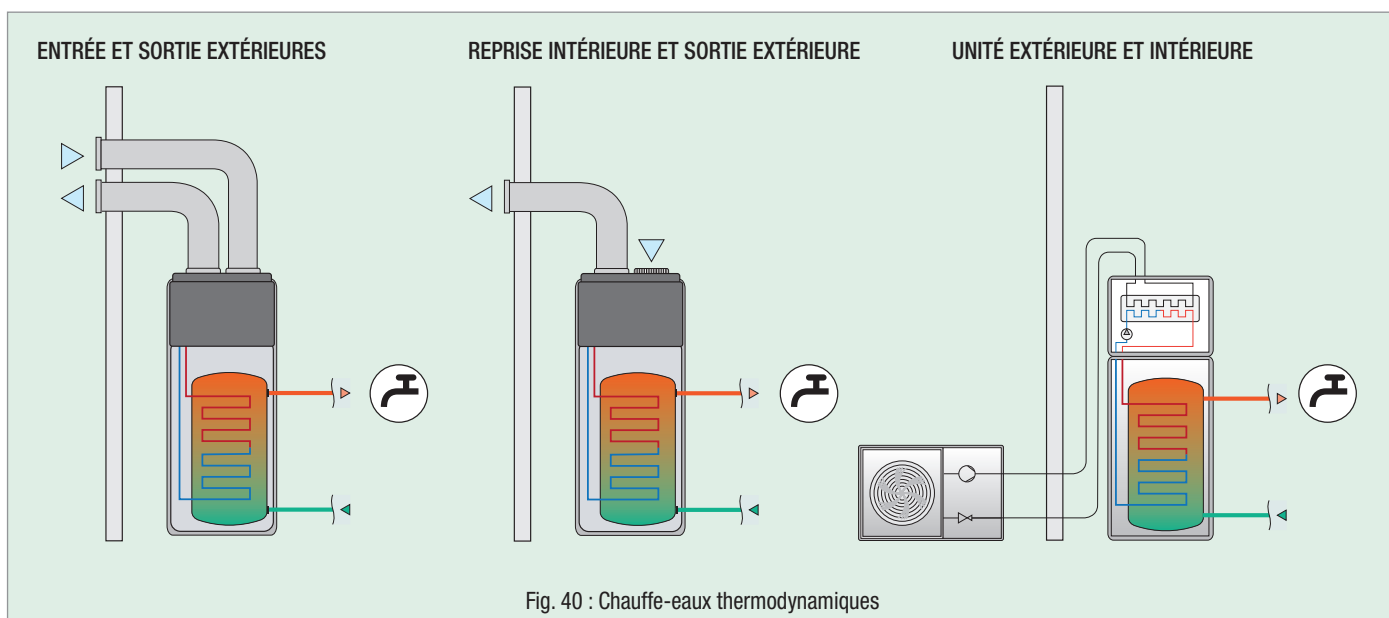
Fig. 38 : Production d'ECS

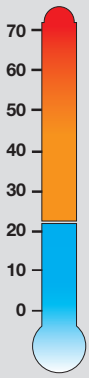


Dans certaines applications, il est préférable de séparer la production d'ECS de celle du chauffage. Cela peut être le cas : dans les rénovations (lorsqu'il y a déjà un circuit de distribution d'ECS), sur les installations centralisées avec une production autonome d'eau sanitaire ou sur des installations avec PAC (par exemple air/air) sans production d'ECS. Pour ces situations, on peut utiliser des **ballons à pompe à chaleur air/eau, dit ballons thermodynamiques**.

Ceux-ci peuvent fonctionner au moyen de deux conduits vers l'extérieur (entrée et sortie d'air) ou en exploitant l'air ambiant comme reprise pour l'évacuer ensuite par un conduit vers l'extérieur. Il existe également des modèles disposant d'une unité extérieure et intérieure (à deux sections).

Le ballon thermodynamique, bien qu'il soit plus cher à l'achat, évite la commutation froid/chaud en mode rafraîchissement, augmentant ainsi le rendement de la machine.





LA PROTECTION ANTI-LÉGIONELLES SUR LES INSTALLATIONS AVEC POMPE À CHALEUR

La bactérie *Légionelle* survit et prolifère dans l'eau entre 20 et 45 °C environ. En dessous de 20 °C, elle survit sous forme non active. Au-delà de 50 °C, la *Légionelle* ne se développe plus. Au contraire, elle sera quasiment éliminée en deux heures de temps. Au-delà de 60 °C, la bactérie meurt en deux minutes, mort qui devient instantanée à partir de 70 °C.

La pompe à chaleur, en fonctionnement standard, peut fournir de l'eau chaude jusqu'à 55 °C environ. Dans ce cas, la protection anti-légionelles peut être réalisée à l'aide d'une résistance complémentaire d'une puissance appropriée (**fig. A**). La pompe à chaleur réchauffe le ballon jusqu'à la température de consigne puis la résistance électrique intégrée entre en jeu pour atteindre la température de désinfection. Il faudra choisir attentivement la température de désinfection et le temps minimum nécessaire au point de consigne anti-légionelles pour inactiver les bactéries éventuellement présentes dans l'eau.

Seules certaines machines atteignent des températures plus élevées jusqu'à atteindre 70 °C. A ces températures on peut effectuer des cycles périodiques de désinfection thermique du ballon (**fig. B**). Dans tous les cas, le rendement dans ces conditions de travail reste très faible.

Pour la désinfection thermique non seulement du ballon mais aussi du réseau de distribution (surtout s'il est particulièrement long), un système de recyclage sanitaire est indispensable dans le système fig. A comme dans le système fig. B.

À la place des traitements thermiques, il est également possible de procéder à un traitement anti-légionelles à travers une désinfection non thermique (**fig. C**), à savoir le traitement par rayons UV, l'emploi de microfiltres et le traitement au bioxyde de chlore ou au peroxyde d'hydrogène.

La production d'ECS à travers un ballon d'eau technique et un échangeur externe (**fig. D**), combiné à une distribution sur réseau court, est le seul système ne nécessitant aucune protection anti-légionelles.

Fig. A : RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE COMPLÉMENTAIRE

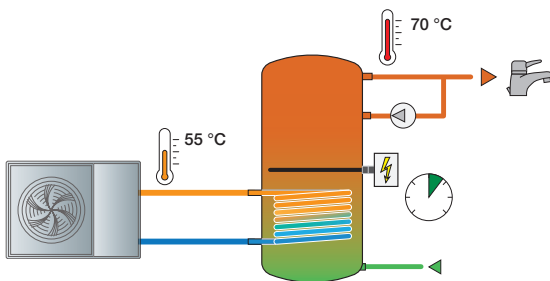


Fig. C : DÉSINFECTION NON THERMIQUE

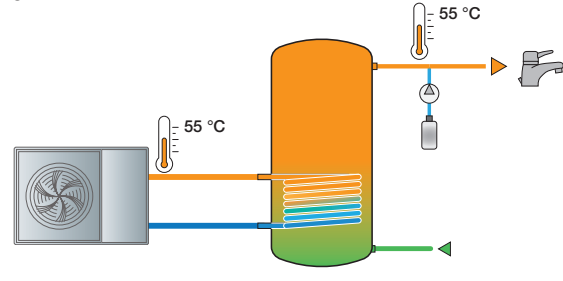


Fig. B : PAC HAUTE TEMPÉRATURE

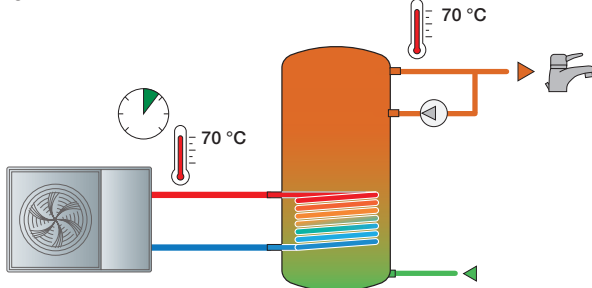
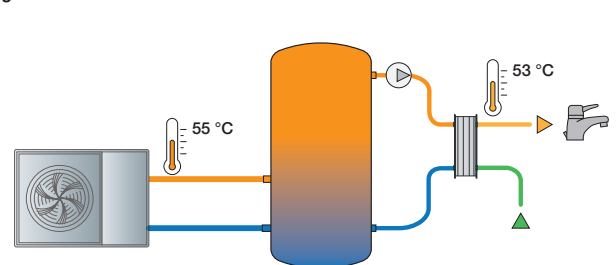


Fig. D : ÉCHANGEUR EXTERNE



Composants d'une installation avec PAC

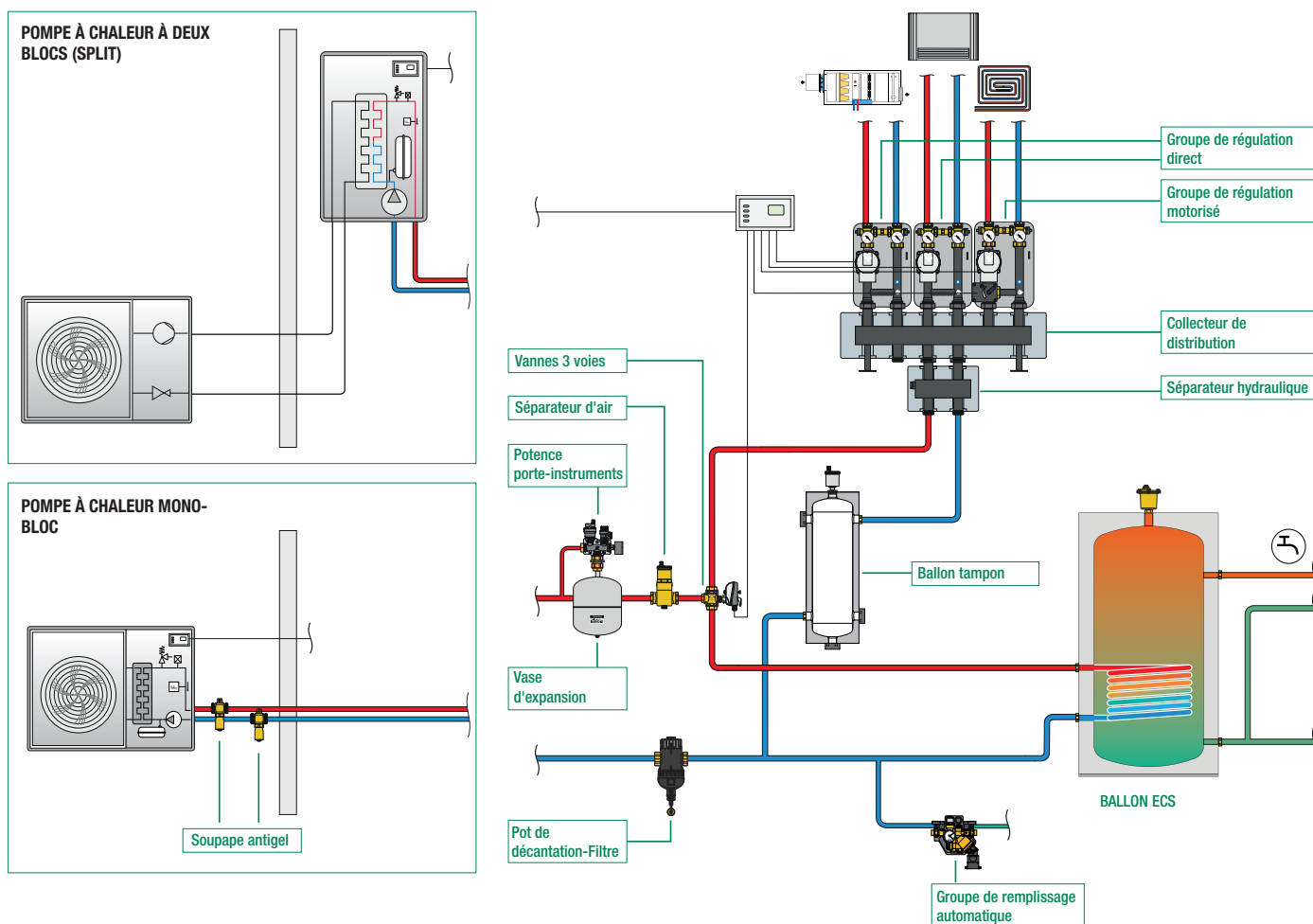


Fig. 41 : Schéma typique d'une installation avec pompe à chaleur
(Vous pouvez retrouver toute une série de schémas téléchargeables à l'adresse : <https://schemi.caleffi.com/fr/home>)

TERMINAUX

Les terminaux (corps chauffants) d'une installation avec pompe à chaleur utilisée en mode chauffage doivent être dimensionnés avec la température de départ la plus basse possible. Le choix le plus simple porte sur l'emploi de panneaux radiants, au sol ou au plafond. Les ventilo-convecteurs ne se combinent pas très bien aux pompes à chaleur car il n'est pas possible de baisser la température de départ en mi-saisons à cause de la sensation d'air froid sur la peau.

Les nouvelles normes des pompes à chaleur garantissent une température de l'eau de chauffage allant jusqu'à 60–65 °C, sans besoin de résistances électriques, même lorsque la température extérieure descend jusqu'à -20 °C. Ceci permet de réduire les coûts énergétiques et d'intégrer les radiateurs

(souvent déjà présents dans les logements) comme terminaux possibles.

Les pompes à chaleur air/eau sont également en mesure de produire de l'eau réfrigérée aux températures normalement utilisées sur les installations de rafraîchissement. Il n'y a pas de limitations particulières dans le choix de la conception des systèmes de refroidissement par eau associés à ces machines.

RADIATEURS À BASSE TEMPÉRATURE

On peut les utiliser **uniquement en mode chauffage, et uniquement s'ils ont été dimensionnés correctement**. Pour une rénovation d'installation complète (remplacement des radiateurs), le projet devra tenir compte de la température de départ afin de calculer les dimensions nécessaires des nouveaux radiateurs.

Si la rénovation concerne exclusivement

le générateur (remplacement d'une chaudière par une pompe à chaleur), il faudra vérifier la puissance que les radiateurs installés sont en mesure de fournir avec la nouvelle température de départ.

Voici un exemple à partir des valeurs suivantes :

- charge thermique de la pièce = 700 W
- température de départ = 70 °C
- puissance d'un élément de radiateur en aluminium = 150 W (selon EN 442).

Calculer le nombre d'éléments du radiateur comme rapport entre la charge thermique de la pièce et la puissance de chaque élément :
700 / 150 = 5 éléments.

En alimentant le radiateur à 40 °C, au lieu de 70 °C, on obtient un rendement inférieur (environ 85 W pour chaque élément). Le rendement total du radiateur correspondra à 428 W (85 W x 5 éléments) au lieu des 700 W nécessaires.

Pour atteindre la puissance nécessaire, deux types d'intervention sont possibles :

1. augmenter le nombre d'éléments pour atteindre la puissance voulue (s'ils ne sont pas déjà surdimensionnés) ;
2. intervenir sur la structure dispersive pour réduire les besoins.

Souvent, en effet, lors du remplacement d'un générateur, il est également prévu d'intervenir sur l'isolation de la structure dispersive par une isolation thermique extérieure, une isolation du toit et des chapes, et éventuellement le remplacement des fenêtres et des portes. Seules ces solutions permettent de conserver les radiateurs déjà présents et de les utiliser avec la pompe à chaleur.

CHAUFFAGE AU SOL

Le système à panneaux radiants, au sol comme au plafond, représente la meilleure solution pour une pompe à chaleur et assure à la fois efficacité et rentabilité. La surface étendue du système radiant assure un confort optimal bien que la température de surface (qui est celle de départ de la pompe à chaleur) soit plus basse par rapport à celle d'un radiateur.

En mode chauffage, les températures typiques de fonctionnement oscillent entre 35 et 40 °C, mais il est parfois possible d'avoir des températures encore plus basses en réduisant les pas des boucles ou en utilisant une épaisseur de chape plus faible. Il est possible d'assurer ces températures de fonctionnement uniquement si le bâtiment est bien isolé car la puissance d'émission d'un système radiant est liée à la surface sur laquelle il est installé.

En mode rafraîchissement, il permet de produire de l'eau réfrigérée à des températures s'approchant davantage des températures ambiantes. Le rafraîchissement radiant, associé à un système de déshumidification, permet de maintenir une température de départ supérieure aux boucles (13/15 °C au lieu des 7/9 °C d'un système traditionnel). Le cycle frigorifique s'avère ainsi plus rentable. Les systèmes radiants en mode rafraîchissement présentent toutefois quelques limitations dont, entre autres, une faible puissance spécifique, une forte inertie et des coûts de déshumidification importants qui pénalisent souvent leur rentabilité.

VENTILO-CONVECTEURS

Le ventilo-convecteur peut remplir la double fonction chauffage/rafraîchissement, ce qui, en apparence, pourrait le destiner à devenir le complément idéal d'une pompe à chaleur. Toutefois, **en mode chauffage**, les modèles les plus anciens alimentés à 65 °C, ne peuvent pas être associés aux pompes à chaleur et les modèles plus récents, dont la température de départ oscille entre 45 et 55 °C, sacrifient quelques points de rendement, surtout en mi-saisons.

En mode rafraîchissement, ils utilisent l'eau réfrigérée pour rafraîchir et déshumidifier en même temps. Ils disposent en effet d'un bac qui permet de récupérer la vapeur condensée durant la déshumidification. Ils fonctionnent généralement à une température de départ de 7 °C ; il est possible d'augmenter la température de l'eau jusqu'à une certaine limite (jusqu'au point de rosée) de sorte à déshumidifier correctement les locaux.

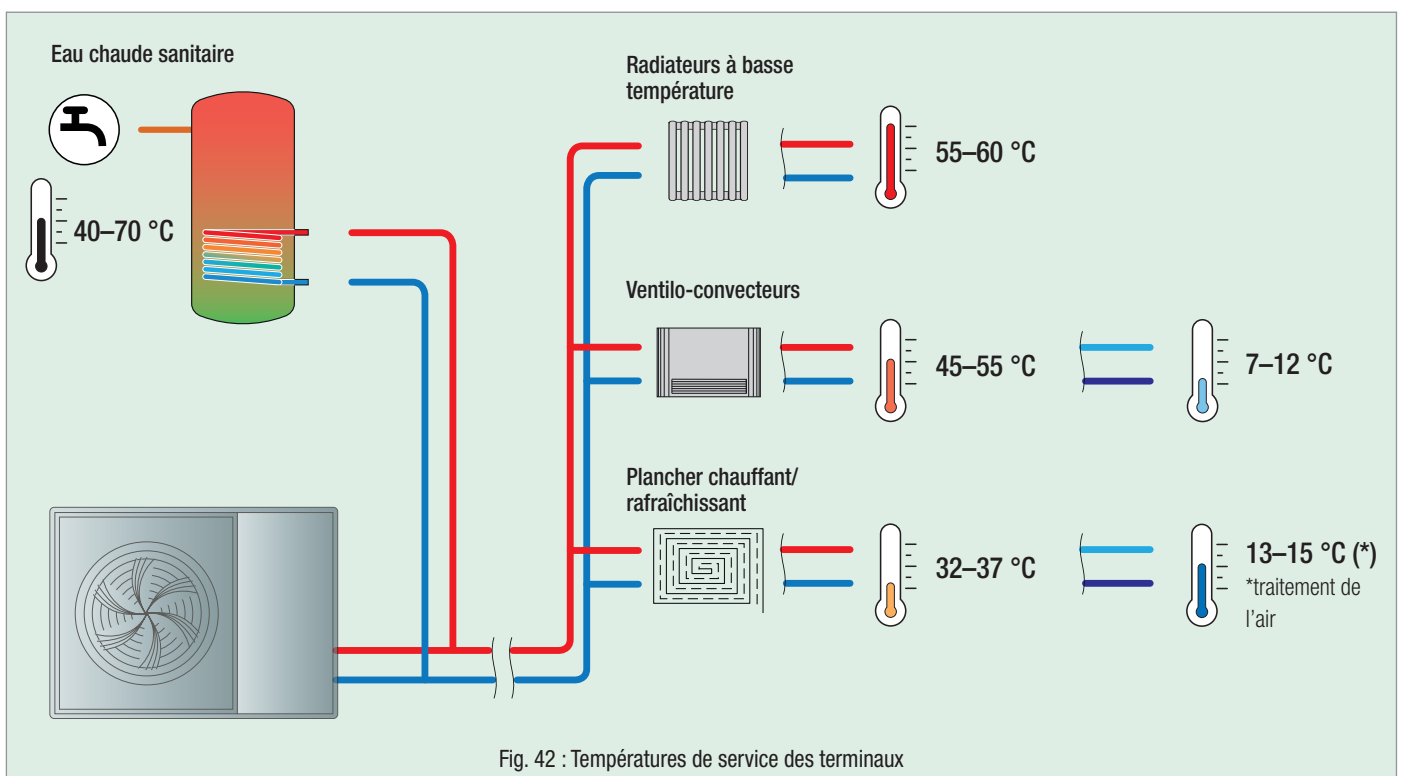


Fig. 42 : Températures de service des terminaux

SÉPARATEUR HYDRAULIQUE

Pour les installations prévoyant une pompe sur le circuit secondaire, il est conseillé de séparer le circuit primaire du circuit secondaire par un séparateur hydraulique. Celui-ci peut être représenté par un disjoncteur hydraulique proprement dit (peu volumineux) ou par un réservoir inertiel faisant office de séparateur. Les deux sont en mesure de séparer les deux circuits (primaire et secondaire) du fait qu'ils présentent une zone à perte de charge réduite. Ils servent à éviter toute interférence entre

les circuits sous l'effet des variations de débits et hauteurs manométriques des différentes pompes de circulation.

Le choix du type de séparateur dépendra principalement des valeurs de débit maximum de l'installation.

Par contre, il convient d'installer un ballon tampon à la place d'un simple compensateur hydraulique dans les cas suivants :

- pour garantir la capacité minimale d'eau (sur les installations équipées principalement de ventilo-convecteurs et de radiateurs) ;
- pour augmenter l'inertie thermique de

l'installation afin de mieux contrôler la modulation ;

- en présence d'une installation parallèle à source de chaleur alternative à la pompe à chaleur (poêle à granulés par exemple) ;
- pour optimiser le fonctionnement durant le dégivrage, en évitant de déverser de l'eau froide dans l'installation.

En présence d'un séparateur hydraulique ou d'un ballon tampon, il faut absolument équilibrer correctement les débits des deux circuits, primaire et secondaire.



DIMENSIONNEMENT DU SÉPARATEUR HYDRAULIQUE

Si $Q_{\text{PRIM}} = Q_{\text{SEC}}$, on peut considérer, d'une manière approximative, que les températures du circuit primaire et du circuit secondaire sont identiques.

Si $Q_{\text{PRIM}} < Q_{\text{SEC}}$, la température de départ du circuit secondaire est inférieure à la température de départ du circuit primaire. Dans une installation avec pompe à chaleur, on ne pourrait garantir la température correcte aux terminaux.

Si $Q_{\text{PRIM}} > Q_{\text{SEC}}$, la température de retour du circuit primaire (retour au générateur) est supérieure à celle de retour du circuit secondaire. Par contre, la température de départ au circuit secondaire (vers les terminaux) ne change pas. C'est le cas typique du fonctionnement des installations à pompe à chaleur qui nécessitent un débit constant et suffisant tout au long du fonctionnement, avec delta de température bien défini.

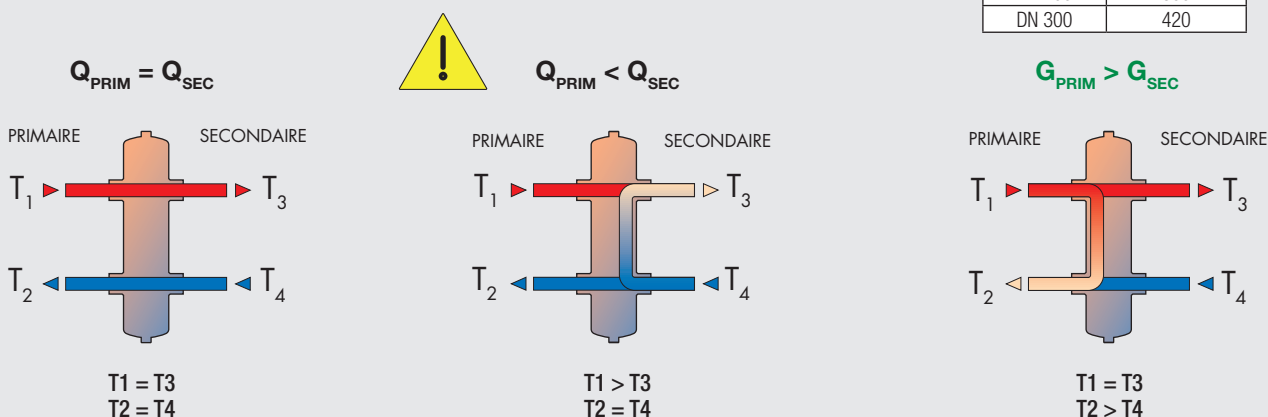
Le séparateur hydraulique *doit être dimensionné en fonction du débit maximum sur l'entrée. La valeur choisie doit être la valeur la plus élevée entre la somme des débits du circuit primaire (Q_{PRIM}) et la somme des débits du circuit secondaire (Q_{SEC}).*

La séparation hydraulique entraîne la recirculation de l'eau chaude et augmente la température de retour du circuit primaire. Sur une installation avec PAC, ceci peut enclencher des cycles courts de fonctionnement de la machine, dégradant ses performances. *L'augmentation de débit vers le circuit primaire doit donc être contrôlée de sorte qu'elle soit au maximum d'environ 30 % supérieure à celle du secondaire.*

Dimensions	Débit [m³/h]
1"	2,5
1 1/4"	4,0
1 1/2"	6,0
2"	8,5

Tableau 4 : Débit maximum sur l'entrée du séparateur hydraulique

Dimensions	Débit [m³/h]
DN 50	9
DN 65	18
DN 80	28
DN 100	56
DN 125	75
DN 150	110
DN 200	180
DN 250	300
DN 300	420



BALLON TAMPON

Le volume d'eau minimum nécessaire au fonctionnement est fondamental pour toutes les opérations de la pompe à chaleur (chauffage, rafraîchissement et dégivrage) et il doit toujours être garanti, y compris dans les conditions les plus défavorables, à savoir en présence de zones complètement ou partiellement fermées.

Pour garantir un volume d'eau minimum à la pompe à chaleur, il est possible d'installer un ballon tampon en faisant particulièrement attention à son emplacement et à son dimensionnement.

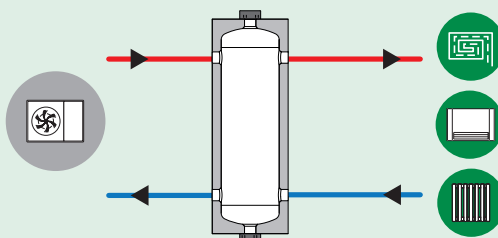
Le ballon tampon peut être **raccordé comme séparateur hydraulique** entre le circuit primaire et le circuit secondaire, de sorte à obtenir deux circuits indépendants d'un point de vue hydraulique. Ce type de configuration garantit une réserve énergétique pour les terminaux et donc une meilleure inertie lorsque la machine s'arrête.

Il est également possible de l'**installer en ligne sur le retour** de l'installation, par exemple sur des installations sans circuit secondaire avec circulateur. Cette disposition permet, sur les machines ON/OFF et sur celles équipées d'inverters obsolètes, de réduire le nombre de cycles du compresseur, de sorte que la machine intervienne moins souvent. La température minimale de retour de l'eau au générateur est garantie pour les opérations de dégivrage de l'évaporateur.

Le ballon tampon **installé sur le départ** joue le même rôle que sur le retour mais, faisant office de réserve énergétique pour le système d'émission, il nécessite plus de temps pour que l'installation soit en régime.

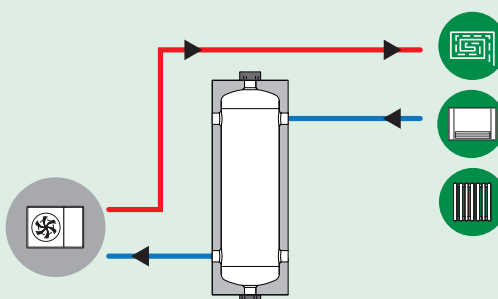
Il est également possible d'installer un ballon tampon en **version trois tubes**. Semblable à la version utilisée comme séparateur hydraulique, il permet de compenser hydrauliquement les circuits tout en fournissant un réservoir énergétique aux terminaux. La différence principale est due à la présence d'un raccordement direct entre la machine et les terminaux, qui accélère la mise en régime.

BALLON TAMPON COMME SÉPARATEUR HYDRAULIQUE



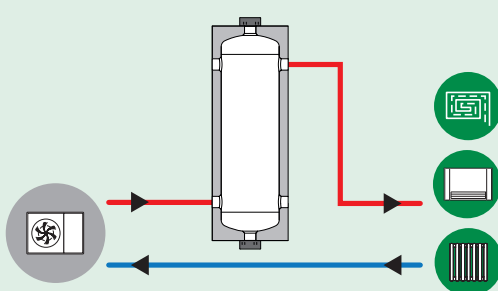
- Séparation des circuits et ballon tampon (2 en 1).
- Stockage plus efficace.
- Température de l'installation plus homogène durant le dégivrage.
- Possibilité d'utiliser un delta de températures sur le circuit secondaire, différent de celui de la pompe à chaleur.

BALLON TAMPON INSTALLÉ SUR LE RETOUR



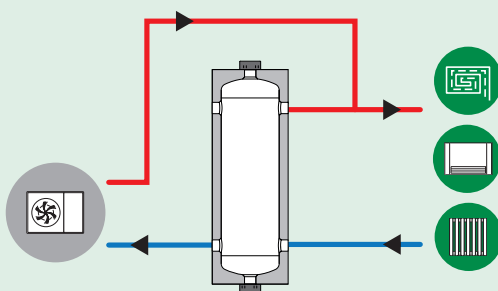
- Mise en régime plus immédiate.
- Séparateur hydraulique, ou by-pass en aval du ballon, nécessaire.
- Cette disposition permet, sur les machines ON/OFF et sur celles équipées d'inverters obsolètes, de réduire le nombre de cycles du compresseur.
- Température minimale de retour de l'eau au générateur garantie pour les opérations de dégivrage de l'évaporateur.

BALLON TAMPON INSTALLÉ SUR LE DÉPART



- Cette disposition permet, sur les machines ON/OFF et sur celles équipées d'inverters obsolètes, de réduire le nombre de cycles du compresseur.
- Continuité de la température garantie sur les émetteurs.
- Contenu minimum garanti durant les cycles de dégivrage.
- Séparateur hydraulique, ou by-pass en aval du ballon, nécessaire.

BALLON TAMPON VERSION 3 TUBES



- Séparation des circuits et ballon tampon (2 en 1).
- Continuité de la température garantie sur les émetteurs.
- Température de l'installation plus homogène durant le dégivrage.
- Raccordement direct machine/terminaux.
- Possibilité d'utiliser un delta de températures sur le circuit secondaire, différent de celui de la pompe à chaleur.
- Mise en régime plus immédiate.

Fig. 43 : Raccordements possibles sur le ballon tampon



DIMENSIONNEMENT DU BALLON TAMPON

Le volume du ballon tampon dépend du volume minimum d'eau exigé par le fabricant pour garantir le bon fonctionnement de la machine, y compris durant le dégivrage. Cette valeur est influencée par les caractéristiques de l'installation, son extension et du mode de gestion (présence de vannes by-pass) et elle doit être garantie au net du volume d'eau contenu dans la pompe à chaleur et du système d'émission : en effet, avec une régulation avec vanne de zone 2 voies, le volume d'eau du système d'émission est exclu du volume total de l'installation lorsque la température ambiante est atteinte.

Le volume minimum d'eau peut être calculé en fonction de la puissance de la machine : **on peut prendre généralement une valeur de 5-7 litres au kW thermique.** Toujours respecter les indications du fabricant.

TRAITEMENT DE L'EAU

En ce qui concerne le traitement de l'eau, une installation avec pompe à chaleur se comporte comme une installation traditionnelle à chaudière et elle doit répondre aux mêmes obligations légales. Certains fabricants rappellent, dans leur documentation technique, la nécessité de respecter ces obligations pour bénéficier de la garantie. Rappelons aussi qu'en assurant la qualité de l'eau destinée à circuler dans le circuit, il sera possible de faire entre 8 et 10 % d'économie d'énergie.

ÉLIMINATION DE L'AIR

La présence d'un dispositif de désaération est obligatoire sur tous les circuits fermés. Il faudra donc installer un séparateur d'air en aval de la pompe à chaleur, et non pas un simple purgeur d'air, à l'exception des installations contenant moins de 300 litres d'eau.

ÉLIMINATION DES IMPURETÉS

De nombreuses pompes à chaleur présentes sur le marché sont équipées d'un filtre, immédiatement en amont du raccord d'arrivée de l'eau sur l'échangeur à plaques. En l'absence de ce filtre, les débris de matériaux et les impuretés présents dans l'installation pourraient obstruer l'échangeur et provoquer la corrosion d'autres composants. Pour éviter que l'engorgement excessif du filtre interne de la machine ne réduise le débit du circuit et n'entraîne des pertes de charge supplémentaires, il convient d'installer un pot de décantation sur le retour vers le générateur. De cette façon, les impuretés seront retenues par le pot de décantation extérieur qui est plus facile à entretenir.



DIMENSIONNEMENT DES SÉPARATEURS D'AIR - POTS DE DÉCANTATION

Les séparateurs d'air et les pots de décantations doivent être dimensionnés en fonction de la vitesse maximale du fluide recommandée sur les raccords du dispositif.

Vitesse maximale = 1,2 m/s

Pour plus de facilité, on choisit la taille du dispositif en fonction du débit maximum recommandé pour garantir le fonctionnement efficace du dispositif.

SÉPARATEURS D'AIR ET POTS DE DÉCANTATION

DN	20	25	32	40
Raccordements	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"
l/min	22	35	58	90
m ³ /h	1,36	2,11	3,47	5,42

Tableau 5 : Débits maxi recommandés pour les séparateurs d'air et les pots de décantation



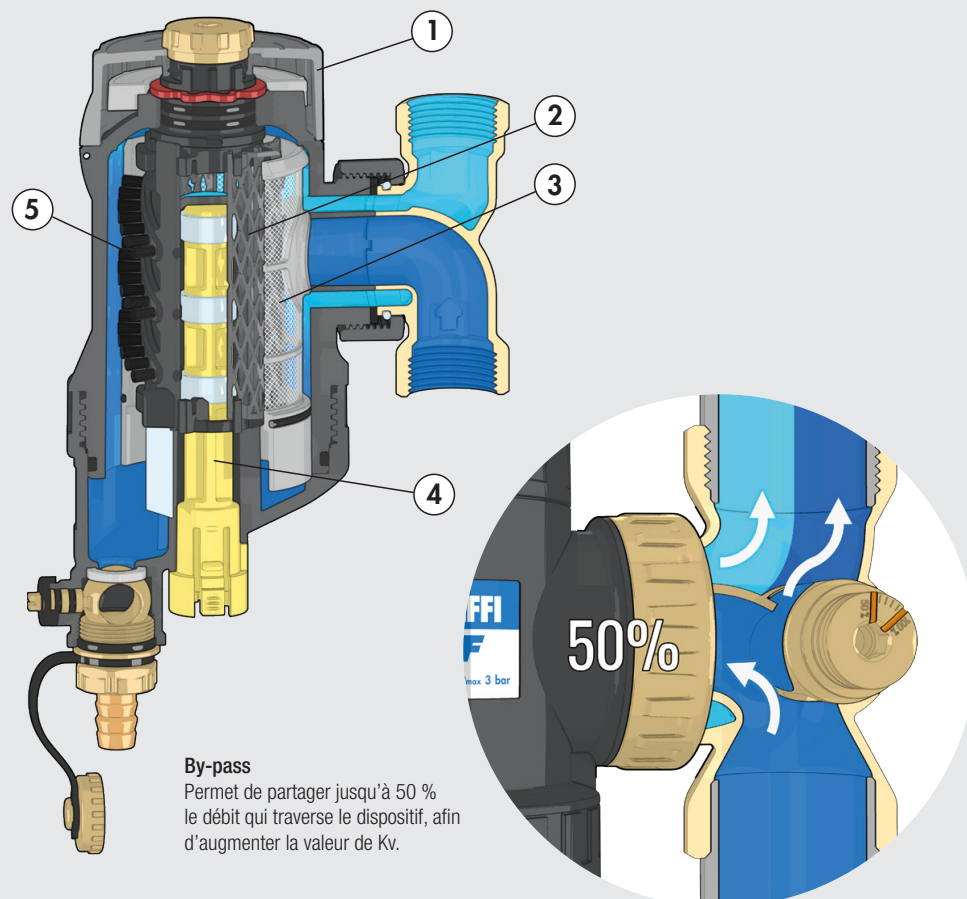
- Grande capacité filtrante
- Attraction magnétique des impuretés ferreuses
- Corps en technopolymère
- Orientable pour installations sur tuyauteries horizontales et verticales.
- Brosses internes pour le nettoyage des mailles du filtre
- By-pass réglable (uniquement pour la version DN 40 et DN 50)

Le pot de décantation magnétique CALEFFI XF sépare les impuretés présentes dans le circuit afin d'éviter l'engorgement des mailles du filtre. Le fonctionnement se base sur l'action de trois éléments distincts qui garantissent une protection continue du générateur et de ses dispositifs contre les impuretés qui se forment dans le circuit hydraulique, tant au cours de la mise en service de l'installation que dans les conditions normales de fonctionnement. L'eau de l'installation passe d'abord à travers la **grille interne réticulaire** (2) qui sépare les impuretés les plus grosses par collision, en les faisant précipiter dans la vaste chambre de collecte inférieure. Après quoi, l'**aimant central** (4) retient toutes les impuretés ferreuses, jusqu'aux plus petites. En dernier lieu, l'eau traverse le **filtre de sortie** (3) qui, grâce à sa grande surface filtrante et aux mailles très fines (0,16 mm), capture toutes les impuretés résiduelles qui n'auraient pas encore été retenues par les deux premiers éléments.

Aucune vanne d'arrêt n'est nécessaire pour procéder à l'entretien car le dispositif présente un mécanisme de **nettoyage des mailles du filtre composé de brosses internes** (5). En tournant la poignée supérieure (1), les brosses nettoient l'intérieur du filtre, en faisant précipiter les impuretés dans la partie inférieure de l'appareil.

L'installation est simple et polyvalente grâce à la possibilité de le raccorder à des tuyaux horizontaux ou verticaux.

Les plus grandes tailles (DN 40 et DN 50) disposent d'un **by-pass** qui permet de partager jusqu'à 50 % le débit qui traverse le dispositif, afin d'augmenter la valeur de Kv et de réduire l'énergie utilisée par le circulateur.



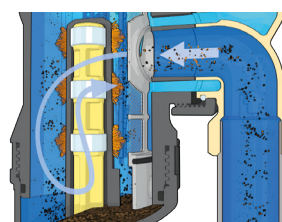
By-pass
Permet de partager jusqu'à 50 % le débit qui traverse le dispositif, afin d'augmenter la valeur de Kv.

Grille interne réticulaire disposée en rayon

Favorise la précipitation des impuretés dans la partie inférieure du corps.

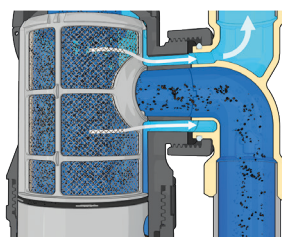
Aimant central

Il capture la magnétite et les impuretés ferreuses jusqu'aux plus petites.



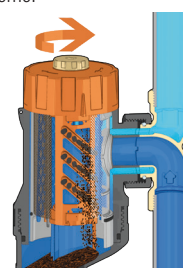
Mailles du filtre

Retient les impuretés à travers la sélection mécanique des particules en fonction de leur dimension.



Brosses internes

Tourner la poignée située sur la partie supérieure du composant pour nettoyer le filtre interne.



TRAITEMENT CHIMIQUE

Le traitement chimique d'une installation de chauffage ou de rafraîchissement est toujours obligatoire, quelle que soit la puissance ou la dureté de l'eau. Pour remplir le circuit, il faut utiliser une eau respectant les critères et les paramètres de potabilité. Une fois le remplissage terminé, rincer impérativement l'installation puis introduire un produit contre la corrosion et les incrustations afin d'assurer son efficacité.

Une attention particulière doit être portée aux installations thermiques récentes avec pompe à chaleur, qui permettent d'exploiter un fluide caloporteur à basse température mais qui, précisément pour cette raison, risquent de favoriser la formation de résidus biologiques. Il sera donc indispensable d'utiliser un biocide en complément du produit protecteur. Le biocide est utile pour prévenir et contrôler la croissance microbienne sur un large spectre de bactéries et autres micro-organismes présents dans l'eau des installations de chauffage.

VANNE DE RÉGULATION 3 VOIES

Les vannes directionnelles motorisées permettent de gérer le flux entre l'installation de chauffage/rafraîchissement et le circuit sanitaire. La gestion est généralement confiée à la régulation électronique de la pompe à chaleur, par le biais d'une sonde installée dans le ballon sanitaire.

La déviation du flux est pleinement efficace lorsqu'elle ne présente aucune fuite et lorsque le temps de manœuvre est réduit. C'est précisément pour cette raison que les vannes directionnelles à sphère à 3 voies, de part leur conformation, sont plus adaptées que les vannes à piston.

La vanne motorisée doit avoir si possible un **temps de manœuvre** de 10 secondes environ, en tout cas jamais supérieur à 50 secondes, de sorte à optimiser les opérations de production d'ECS.



DOSAGE DES AGENTS DE CONDITIONNEMENT CHIMIQUE

Il est donc important de prévoir systématiquement l'utilisation d'additifs chimiques dans les installations de chauffage, indépendamment de la puissance du générateur installé.

Ils sont dosés en fonction du volume d'eau de l'installation.



DIMENSIONNEMENT DE LA VANNE 3 VOIES

S'agissant d'une vanne directionnelle, il faut la **dimensionner en fonction du Kv**, seule valeur intéressante pour que la perte de charge corresponde à celle disponible dans l'installation. Prenons en considération les valeurs moyennes de perte de charge suivantes :

- 200–300 mm CE (installation à faible perte de charge)
- 500–600 mm CE (installation à perte de charge élevée)

DN	20	25	32	40
Raccordements	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"
Kv	9	12	25	47

Tableau 6 : Valeurs moyennes Kv

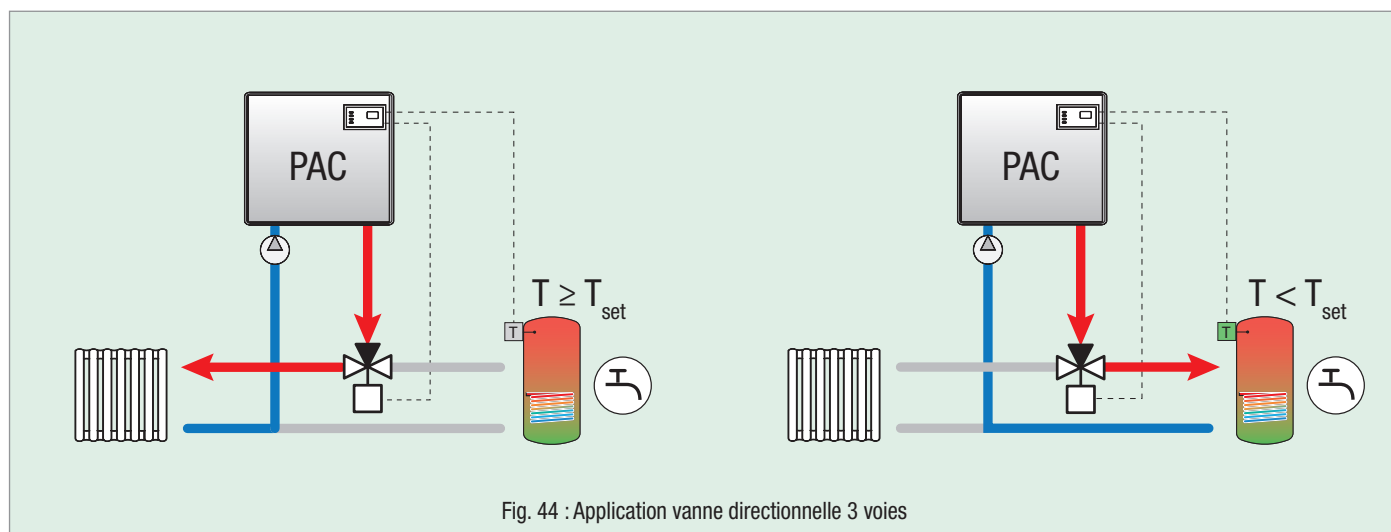


Fig. 44 : Application vanne directionnelle 3 voies

CALEFFI XS[®] ET XP
EXTRA SÉCURITÉ
EXTRA PROTECTION



Un binôme parfait pour les chaudières murales. Caleffi XP assure une installation sanitaire protégée, sans compromettre la potabilité de l'eau, Caleffi XS[®] élimine les salissures présentes dans l'eau du circuit de chauffage. Petits, beaux et efficaces, ils interviennent ensemble pour vous offrir une protection totale.

CALEFFI XS[®]



CALEFFI XP



www.thermador.fr

 **thermador**

INSTALLATION MONOPHASÉ OU TRIPHASÉ ?

D'une manière générale, les pompes à chaleur, et surtout les pompes à chaleur air/eau, sont plutôt gourmandes en électricité. Il faudra donc choisir très attentivement la taille de la machine (voir « dimensionnement des pompes à chaleur », page 30) et les composants accessoires à forte consommation électrique, comme les résistances d'appoint, mais aussi la gestion et la régulation du chauffage/rafraîchissement.

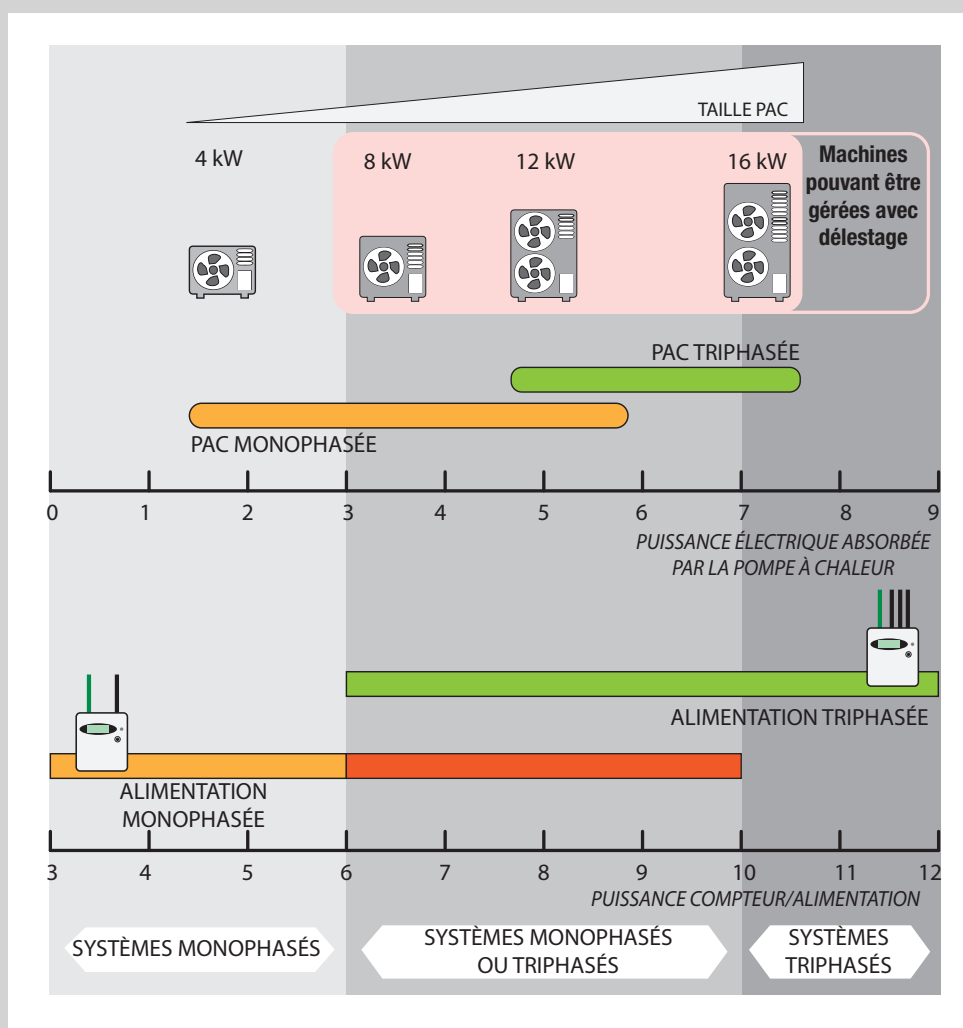
Outre la consommation de pointe, il faut également tenir compte du type d'alimentation électrique : les pompes à chaleur peuvent fonctionner sur alimentation monophasée (généralement jusqu'à la puissance thermique nominale de 12 kW) ou triphasée (généralement pour des puissances supérieures à 9 kW).

En France, les lignes électriques domestiques peuvent être monophasées ou triphasées. La fourniture monophasée est garantie jusqu'à 6 kW mais, dans certains cas, elle peut arriver à 12 kW, après étude et autorisation du fournisseur. Pour une fourniture supérieure à 6 kW, il est possible de disposer d'une ligne triphasée, obligatoire au-delà de 18 kW.

Dans l'étude de la ligne domestique, il est toujours préférable de privilégier des solutions monophasées qui sont plus faciles à réaliser et moins coûteuses. Les électroménagers sont monophasés ce qui implique de les partager sur les trois phases d'une fourniture triphasée pour avoir des charges bien équilibrées : sur une ligne de 12 kW, il n'est pas possible, par exemple, de dériver une installation à une seule phase de 12 kW. Il faudra par contre partager les charges sur trois lignes monophasées de 4 kW, chacune reliée à une phase de la fourniture. La transformation d'une installation triphasée à une installation monophasée s'avère particulièrement onéreuse.

Sachant que la puissance des fournitures monophasées est faible et que les consommations normales d'un logement tournent autour des 3 kW, il sera facile d'atteindre la limite de fourniture de ce type d'alimentation dès que l'on utilise des appareils électriques. Il faudra également tenir compte de la large diffusion des plans de cuisson à induction, surtout si l'installation est équipée d'une pompe à chaleur, qui permettent d'éviter la fourniture de gaz naturel ; ces systèmes impactent énormément sur la puissance électrique de la ligne.

Cette première analyse semble démontrer que les pompes à chaleur de plus de 3-4 kW nécessitent une fourniture triphasée (ou monophasée renforcée). Mais il est possible d'utiliser des pompes à chaleur d'une puissance supérieure sans modifier la puissance au compteur à travers un bon système de gestion de la charge. Certains systèmes électroniques peuvent couper momentanément les charges lorsque la consommation du logement atteint la limite de contrat. Les systèmes de gestion de la charge peuvent s'adapter aux pompes à chaleur air/eau sans que la coupure momentanée n'impacte sur le confort thermique. Ce système devient essentiel là où l'on souhaite requalifier le circuit de chauffage sans pouvoir intervenir sur l'installation électrique.



DISPOSITIFS POUR LE MAINTIEN DE LA CIRCULATION

Dans les pompes à chaleur, la circulation vers l'échangeur réfrigérant/eau doit toujours être active pour assurer une évacuation correcte de la chaleur libérée par les échangeurs et pour exploiter la masse d'eau contenue dans l'installation durant les cycles de dégivrage.

Une circulation bloquée ou un débit d'eau insuffisant peuvent entraîner de graves dysfonctionnements, entraînant parfois la rupture de certains composants de la machine. Pour éviter ce genre de problème, les fabricants de pompes à chaleur prévoient l'utilisation de flussostats qui, par un signal, permettent de les arrêter au cas où le débit descendrait au-dessous d'une valeur limite de sécurité.

Les éléments suivants peuvent être utilisés pour assurer une bonne circulation vers les pompes à chaleur :

1. **Un séparateur hydraulique.** Simple et fiable, il faudra toutefois équilibrer correctement les débits entre circuit primaire et circuit secondaire (voir « Séparateur hydraulique » page 43). Nécessite également d'avoir des systèmes de circulation secondaires. C'est l'option la plus utilisée pour les installations de distribution de moyennes/grandes dimensions.
2. **Un by-pass réglé avec vanne d'équilibrage.** Convient aux installations de distribution de petites dimensions sans circuits secondaires. Il doit cependant être bien réglé et il réduit le débit de la pompe vers l'installation d'une quantité correspondant à celle acheminée dans le by-pass. Choisir de préférence ce système lorsque les circulateurs sont à hauteur manométrique constante afin de pouvoir régler le débit de décharge à travers la vanne de tarage.
3. **By-pass avec AUTOFLOW®.** Cette solution est analogue à la précédente mais elle ne nécessite aucun réglage ni hauteur manométrique constante.
4. **By-pass avec soupape différentielle.** Cette solution permet d'ouvrir la soupape différentielle en faisant circuler l'eau dans le by-pass, uniquement lorsque le débit vers l'installation diminue. Ce système est idéal pour les circulateurs à vitesse fixe et à vitesse variable réglés avec hauteur manométrique constante. Dans ce dernier cas, placer et régler correctement la soupape différentielle afin d'éviter qu'elle ne reste soit toujours ouverte, soit toujours fermée.

DIMENSIONNEMENT

Les dimensionner en fonction du débit minimum nécessaire à la pompe à chaleur.

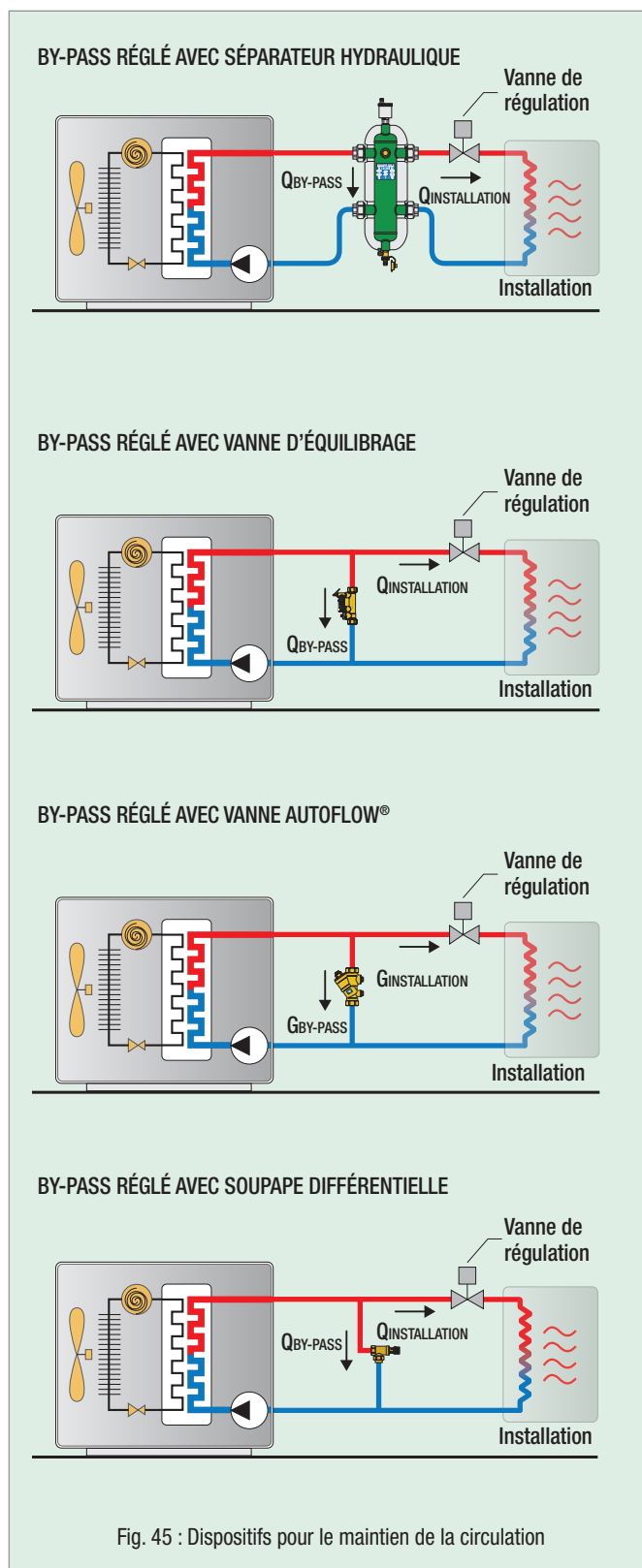


Fig. 45 : Dispositifs pour le maintien de la circulation

VASE D'EXPANSION

Le vase d'expansion est un « récipient » que l'on raccorde à l'installation thermique et qui sert à éviter que la pression n'augmente sous l'effet de la variation du volume d'eau lorsqu'elle chauffe/refroidit. Il comprend un récipient partagé en deux par une membrane : une partie étant réservée à l'eau de l'installation, l'autre à un gaz chargé d'absorber les variations du volume de l'eau. La pression de prégonflage du gaz doit être égale à la pression hydrostatique de l'eau au point d'installation, majorée de 0,3 bar.

Normalement, les pompes à chaleur contiennent un vase d'expansion : lorsque le volume de ce vase n'est pas suffisant pour l'installation, il faut installer un vase supplémentaire.

DIMENSIONNEMENT DU VASE D'EXPANSION

La capacité d'un vase d'expansion fermé à membrane (diaphragme) pour les installations de chauffage se calcule à partir de la formule suivante :

$$V_n = \frac{e \cdot (V_a + V_v)}{1 - \frac{P_a}{P_e}}$$

où

V_n = volume du vase d'expansion [litres], à calculer

V_a = contenance en eau de l'installation [litres]

V_v = volume minimum d'eau contenu dans le vase à froid, conseillé équivalent à 0,5 % de V_a (minimum 3 litres) [litres]

V_e = volume d'expansion dû au réchauffement de l'eau [litres]

e = coefficient d'expansion de l'eau, calculé en fonction de la différence maximale entre la température de l'eau sur l'installation froide (T₁) et maximale de service (T₂). Utiliser la formule :

$$e = n/100$$

où le coefficient s'obtient à partir de la formule :

$$n = 0,31 + 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta t_m^2$$

Δt_m² = température maximale admissible en degrés Celsius se référant à l'intervention des dispositifs de sécurité

P_a = pression absolue initiale côté gaz [bar] égale à la pression P₀ plus la pression atmosphérique (correspondant à 1 bar) plus une éventuelle Δp pompe* relative au circulateur

$$P_a = P_0 + 1 [+ \Delta p \text{ pompe}]^*$$

où

P₀ = pression de prégonflage du vase côté gaz [bar] égale à la pression hydrostatique au point d'installation (**P_{st}**) augmentée d'une valeur de pression de précaution pour assurer qu'il n'y ait aucune dépression sur l'installation

$$P_0 = P_{st} + 0,3 \text{ bar}$$

Δp pompe* = le montage du vase en aval du circulateur prévoit que le calcul de P_a tienne compte de la hauteur manométrique de la pompe [bar]

P_e = pression absolue finale côté gaz [bar], fournie par la P_{er} plus la pression atmosphérique (correspondant à 1 bar)

$$P_e = P_{er} + 1 = P_{vs} - 0,5 \text{ bar [ou } -10 \% P_{vs}] + 1$$

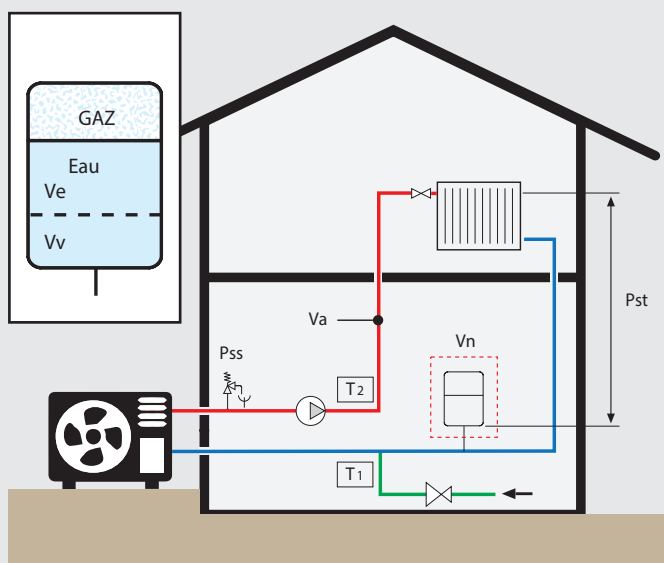
où

P_{er} = pression maximale de service de l'installation côté gaz [bar] soit P_{vs} réduite d'une valeur de pression qui évite l'ouverture de la soupape de sécurité

$$P_{er} = P_{vs} - 0,5 \text{ bar (si } P_{vs} \leq 5 \text{ bar)}$$

$$P_{er} = P_{vs} - 10 \% P_{vs} \text{ (si } P_{vs} > 5 \text{ bar)}$$

P_{vs} = pression de tarage de la soupape de sécurité [bar]



Exemple :

Description		Unité de mesure	Valeur	
Volume installation	V _a	[litres]	200	DONNÉES D'ENTRÉE
Pression hydrostatique	P _{st}	[bar]	0,6	
Pression de tarage Soup. Séc.	P _{ss}	[bar]	3	
Pression de remplissage	P _r	[bar]	1,5	
Contenu glycol	Gl	%	0	
Température finale	T _f	[°C]	65	
Coefficient d'expansion	e		0,017	
Volume minimum vase	V _v	[litres]	3	DONNÉES DE CALCUL
Pression initiale côté gaz	P _a	[bar]	1,9	
Pression finale côté gaz	P _e	[bar]	3	
Pression maxi de service côté gaz	P _{er}	[bar]	2	
Pression de prégonflage côté gaz	P ₀	[bar]	0,9	
Température initiale	T _i	[°C]	10	
Écart thermique	DT	[°C]	60	
Coefficient	n		1,7	
Volume vase d'expansion	V_n	[litres]	8	



DIMENSIONNEMENT DU VASE D'EXPANSION

Sur les installations avec pompe à chaleur, il est possible de dimensionner de façon approximative le **volume nécessaire à l'expansion en considérant ce dernier comme 4 à 5% environ du volume maximum de l'installation.**





La valeur correspondant à environ 4 à 5% a été estimée à partir des hypothèses suivantes :

- tarage des soupapes de sécurité = 3 bar
- pression de prégonflage du vase = 0,9 bar
- température maximale = 65 °C (limite physique de la machine) en présence d'eau sans glycol
- estimation du contenu d'eau selon le type d'installation

Pour simplifier le calcul, il est possible de consulter le tableau 7 qui indique le volume minimum nécessaire du vase d'expansion. **Les pompes à chaleur sont équipées habituellement d'un vase de 6–8 litres. Si cette capacité ne suffit pas, installer un vase supplémentaire pour couvrir la différence.**

$$V_{\text{minimum}} = V_{\text{vase PAC}} + V_{\text{vase supplémentaire}}$$

Attention : en présence de résistances d'appoint, le volume nécessaire pour l'expansion correspond à environ 10 % du volume maximum de l'installation. La température maximale de calcul doit en effet correspondre à 100 °C.

TYPE DE TERMINAUX	 23 l/kW	 fonte 14 l/kW	 acier 11 l/kW	 8 l/kW
Puis. nom. PAC [kW]	V _{MIN} v. exp. [litres]	V _{MIN} v. exp. [litres]	V _{MIN} v. exp. [litres]	V _{MIN} v. exp. [litres]
3	3	2	2	1
4	4	3	2	2
5	5	3	3	2
6	6	4	3	2
7	7	4	3	3
8	7	5	4	3
9	8	5	4	3
10	9	6	5	3
11	10	6	5	4
12	11	7	5	4
14	13	8	6	5
16	14	9	7	5
18	16	10	8	6
22	19	12	10	7
25	22	14	11	8


 Volume du vase d'expansion normalement compris dans la machine.

Tableau 7 : Volume minimum du vase d'expansion sur une installation avec PàC air/eau.

PROTECTION ANTIGEL

DURANT LE FONCTIONNEMENT NORMAL

Les pompes à chaleur disposent d'une fonction intrinsèque antigel servant à protéger l'échangeur de chaleur gaz/eau et les tuyauteries du circuit hydraulique. Lorsque la pompe à chaleur est éteinte et la température extérieure descend au-dessous d'une valeur critique, le circulateur de la machine se met en marche pour laisser circuler l'eau technique afin d'éviter qu'elle ne gèle. Si dans ces conditions la température de l'eau en circulation descend au-dessous d'une limite de sécurité, le compresseur démarre lui aussi pour augmenter la température du fluide jusqu'à une valeur optimale.

Un autre système de protection antigel consiste à installer une résistance électrique sur le côté échangeur qui utilise l'air extérieur. De cette façon, en présence de certaines températures extérieures, il est possible de réchauffer directement la surface de l'échangeur pour faire fondre le givre qui s'y dépose.

En l'absence de résistance, ou si elle a été ajoutée, les fabricants demandent d'installer un câble chauffant pour protéger les tuyaux exposés à l'atmosphère.

EN L'ABSENCE D'ALIMENTATION ÉLECTRIQUE

En l'absence de courant, il est possible d'utiliser les systèmes de sécurité suivants :

- **glycol.** Il est possible d'ajouter du glycol à l'eau sur tous les types de pompes à chaleur. Vérifier régulièrement la concentration du liquide antigel, ainsi que l'étanchéité de l'installation pour éviter toute fuite (produit toxique) ; faire l'appoint si nécessaire. L'ajout de glycol fait augmenter les pertes de charge à cause de la viscosité élevée du produit. Si le glycol atteint des températures élevées, il risque de se décomposer et de devenir corrosif.
- **soupapes de protection antigel,** uniquement en présence d'une pompe à chaleur monobloc (ou hydrosplit), quand on n'utilise pas de glycol.

SOUAPES ANTIGEL

La soupape antigel est un système de protection passif qui permet l'écoulement de l'eau contenue dans le circuit. Lorsque la température de l'eau circulant dans la tuyauterie descend au-dessous de 3 °C, l'obturateur de la soupape antigel s'ouvre et évacue l'eau (prévoir un groupe de remplissage actif). L'obturateur se referme lorsque la température du fluide remonte à 4 °C.

Le dispositif doit être installé uniquement en position verticale, dans la partie basse des tuyauteries, en évitant les raccordements à siphon et en laissant au moins 15 cm par rapport au sol afin d'éviter que la colonne de glace qui pourrait éventuellement se former dessous n'empêche l'eau de s'écouler de la soupape.

En cas d'utilisation de soupapes de protection antigel, définir le point de consigne minimum en mode rafraîchissement en prévoyant au moins 2 °C de plus que la température nominale d'ouverture de la soupape. Dans le cas contraire, la soupape antigel pourrait évacuer l'eau lorsque la pompe à chaleur fonctionne en mode rafraîchissement.

Pour pallier ce problème, on trouve désormais dans le commerce plusieurs types de soupapes antigel dotées d'un capteur d'air pour gérer le fonctionnement en été. Si la température extérieure est supérieure à 5 °C, un capteur de température empêche la soupape antigel de se déclencher. Ceci évite que la soupape ne se déclenche en été lorsque le mode rafraîchissement est activé.



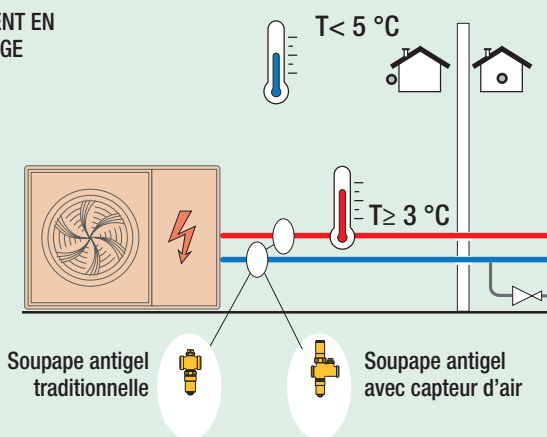
DIMENSIONNEMENT SOUPE ANTIGEL

Le débit de vidange ne dépend pas de la dimension de la vanne mais uniquement de la dimension de la tuyauterie.

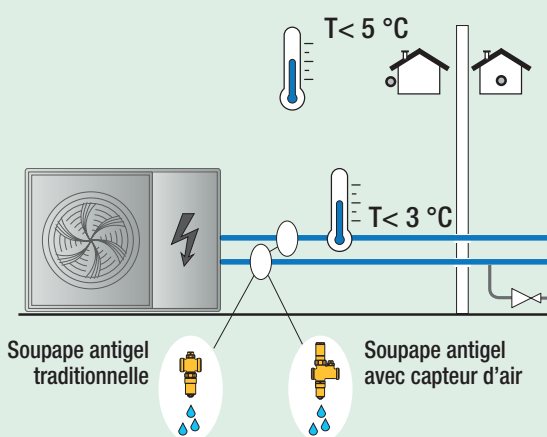
Choisir la dimension de la vanne en fonction de la tuyauterie.

FONCTIONNEMENT EN MODE HIVER

FONCTIONNEMENT EN MODE CHAUFFAGE

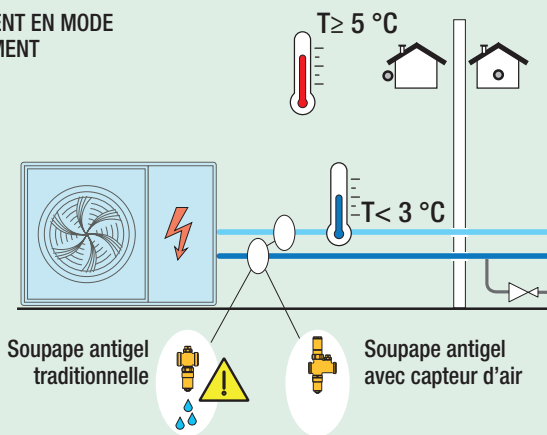


ABSENCE D'ÉLECTRICITÉ



FONCTIONNEMENT EN MODE ÉTÉ

FONCTIONNEMENT EN MODE RAFRAÎCHISSEMENT



FONCTIONNEMENT EN MODE RAFRAÎCHISSEMENT

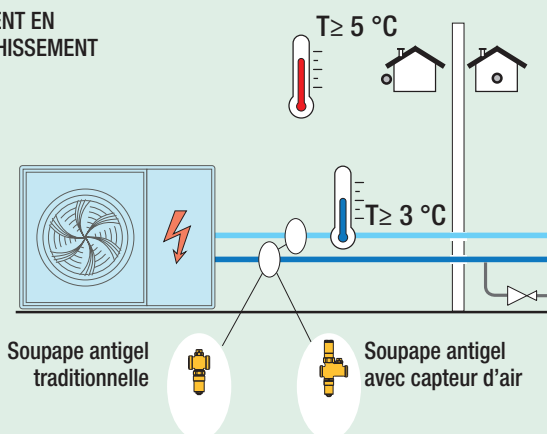


Fig. 46 : Fonctionnement de la soupape antigel traditionnelle et de la soupape antigel avec capteur d'air

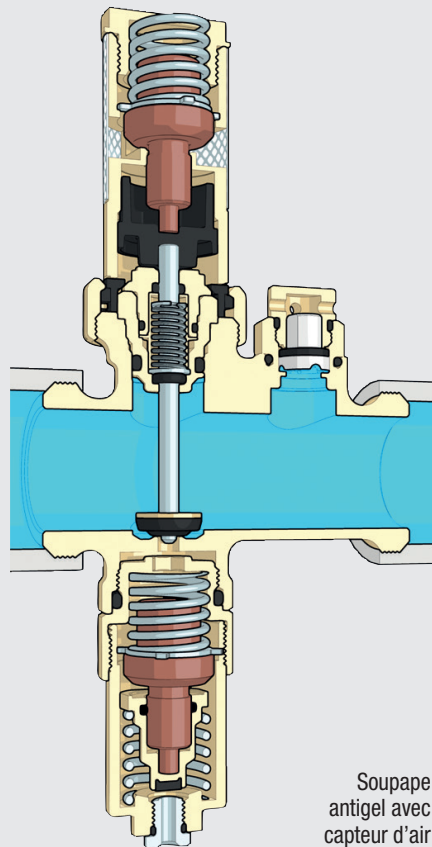
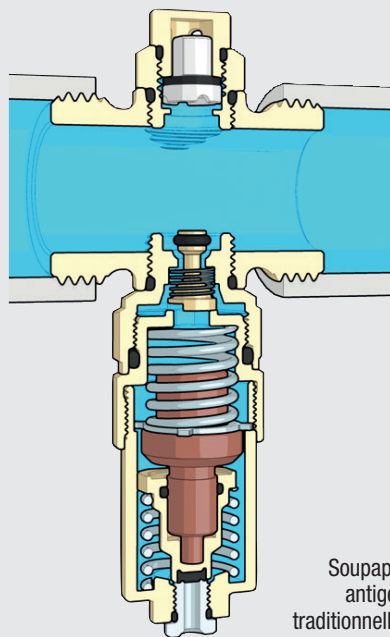


- Protection du circuit contre le gel
- Fonctionnement mécanique
- Simplicité d'installation
- Capteur d'air pour fonctionnement en mode été
- Évite l'emploi de glycol

La soupape antigel permet de **vider l'eau** du circuit lorsque sa température atteint **3 °C**. Cette valeur est typique en saison hivernale, en l'**absence de courant**.

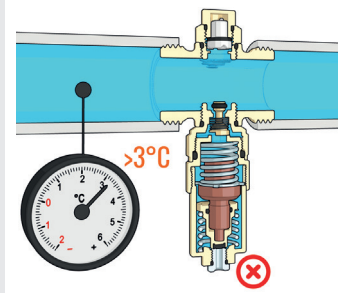
En été, lorsque la température de départ en mode rafraîchissement est inférieure à 3 °C, la **soupape antigel traditionnelle** vide l'eau bien que la machine fonctionne correctement.

Pour éviter ce problème, il est préférable d'utiliser la **soupape antigel avec capteur d'air** extérieur. Lorsque la température extérieure est supérieure à 5 °C, mais celle de l'eau à l'intérieur des tuyauteries est < 3 °C, l'intervention de la soupape antigel est bloquée par le capteur de température de l'air. Ceci évite que la soupape ne se déclenche en été lorsque le mode rafraîchissement est activé.



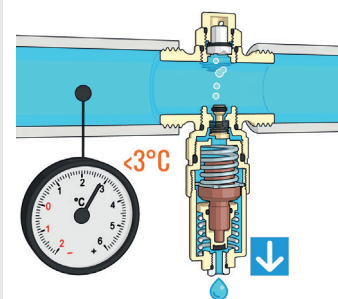
Soupape antigel traditionnelle

Fonctionnement en mode hiver avec TEAU ≥ 3 °C



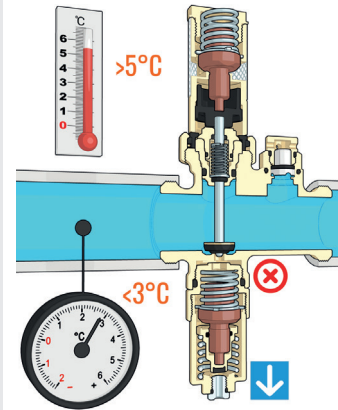
Soupape antigel traditionnelle

Fonctionnement en mode hiver avec TEAU < 3 °C



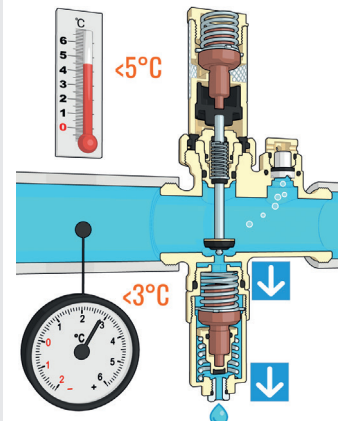
Soupape antigel avec capteur d'air

Fonctionnement en mode hiver avec TEAU < 3 °C et TAIR > 5 °C



Soupape antigel avec capteur d'air

Fonctionnement en mode hiver avec TEAU < 3 °C et TAIR < 5 °C



I STOP[®]
SERIE 108
SOUPAPE
ANTIGEL



IDÉAL POUR
POMPES
À CHALEUR

Pratique et opérationnelle même en l'absence d'électricité, la soupape antigel Istop série 108 est le système de protection mécanique conçu pour toutes les pompes à chaleur. Elle permet d'évacuer le fluide du circuit lorsque la température de ce dernier atteint une valeur moyenne de 3 °C, empêchant ainsi la formation de glace dans l'installation. La version avec capteur d'air empêche l'activation de la soupape lorsque la température de l'air extérieure est supérieure à 5 °C.



THE CALEFFI GREEN



**C'EST NÔTRE ENGAGEMENT DURABLE.
UNE PENSÉE, UNE MANIÈRE D'ÊTRE ET D'AGIR.
C'EST NÔTRE CONTRIBUTION CONCRÈTE À LA
TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOCIALE.**

Nous construisons un avenir plus responsable pour répondre aux besoins des **PERSONNES** d'aujourd'hui et de demain, ainsi qu'à travers des **PRODUITS** qui économisent les ressources et qui visent un confort plus durable. Pour donner vie à un climat propice à la vie et avoir un impact positif sur l'**ENVIRONNEMENT**.

