

Evolution de la technologie des PAC

Congrès des professionnels romands de la PAC – 11.06.2025

Sommaire

1. Fluides frigorigènes
2. Efficacité
3. Adéquation avec l'évolution de la technique des bâtiments
4. Sources de chaleur
5. Plage de température de fonctionnement
6. Conclusions

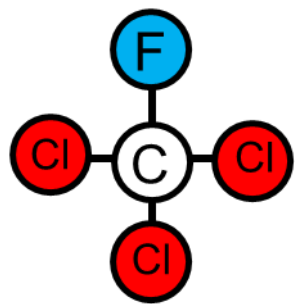
Fluides frigorigènes

- Le choix des substances à utiliser comme « fluide frigorigène » est vaste ; il n'y a pas de différences intrinsèques remarquables en termes d'efficacité énergétique atteignable, mais chaque fluide s'adapte à une certaine plage de températures de travail ;
- Du point de vue technique les fluides se différencient entre eux en termes de toxicité, inflammabilité, pressions de travail, impact environnemental ;
- A partir du ~1930 des molécules de synthèse ont été développées dans le but d'obtenir des fluides :
 - Stables, inertes, non toxiques, non inflammables ;
 - Adaptés au développement de l'industrie de la réfrigération et de la climatisation de masse ;
- Ils sont utilisés dans des autres domaines (ex. mousse isolantes et gaz propulseurs pour aérosol) ;
- A plusieurs reprises ces fluides de synthèse ont été interdits pour des raisons environnementales et remplacés par des autres fluides de synthèse ;
- La suppression progressive des fluides de type HFC est en cours, notamment l'interdiction du R410A, le fluide le plus utilisé dans les PACs domestique, est prévue en Suisse à partir du 01.01.2027 ([projet de modification de l'ORRCHIM](#)).

Effet de serre anthropique (GWP)

Appauvrissement de la couche d'ozone (ODP)

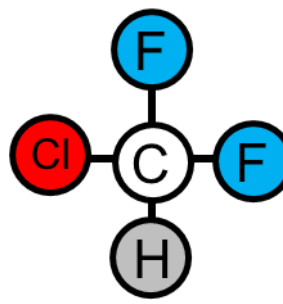
~1930, 1^e génération
CFC ou « freon »



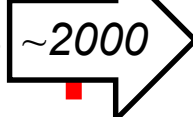
Ex. R11



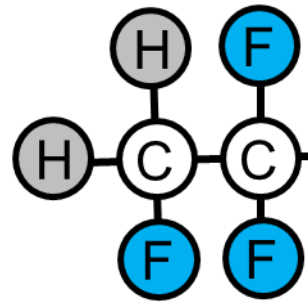
2^e génération
HCFC



Ex. R22



3^e génération
HFC



Ex. R134a, R410A, R32

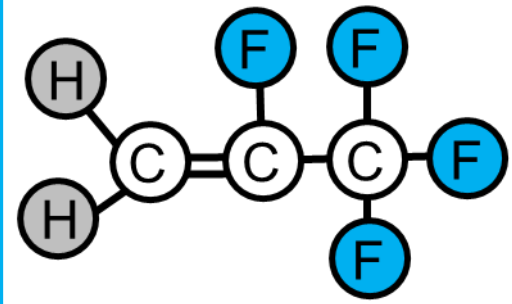


mélanges
HFC / HFO

Ex. R513A, R449A

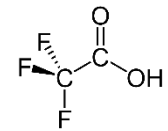
4^e génération

HFO



Ex. R1234yf

PFAs
TFA Acide trifluoroacétique



- Chaque molécule de R1234yf dégrade en atmosphère en une molécule de TFA ;
- Le TFA est très soluble dans l'eau, très mobile et ne dégrade pas dans les organismes vivants ;
- Le TFA est aujourd'hui détecté dans 96% des stations du canton Vaud.

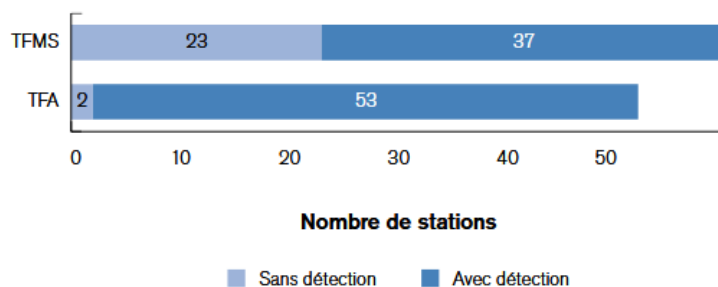
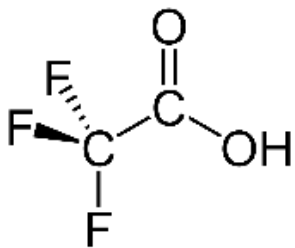
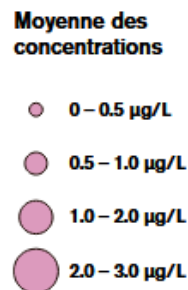


Figure PFAS et TFA 3: Nombre de stations avec détection du TFMS et du TFA.



Source : [Rapport Qualité des eaux souterraines 2018-2022 Canton Vaud](#)

Des solutions techniques **exemptes de ces problèmes environnementaux**, sans fluides de synthèse, et **sans baisse d'efficacité** des PACs existent :

HYDROCARBURES

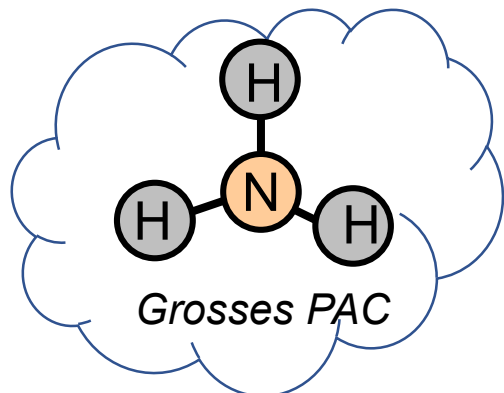
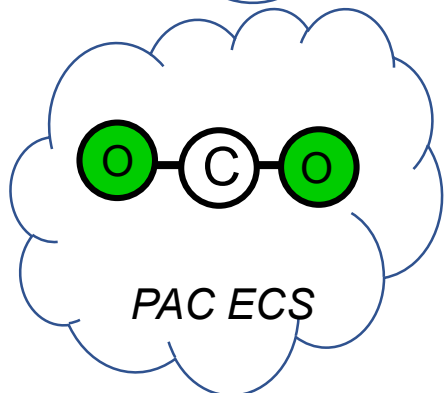
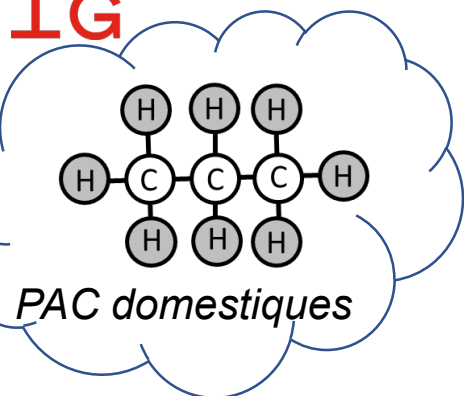
- Propane (R290) très bien adapté aux PACs domestiques ;
- L'inflammabilité peut être facilement gérée en adéquation l'installation (ex. extérieur) et la minimisation de la charge de fluide frigorigène ;
- Isobutane (R600a) déjà utilisé dans la totalité des réfrigérateurs domestiques.

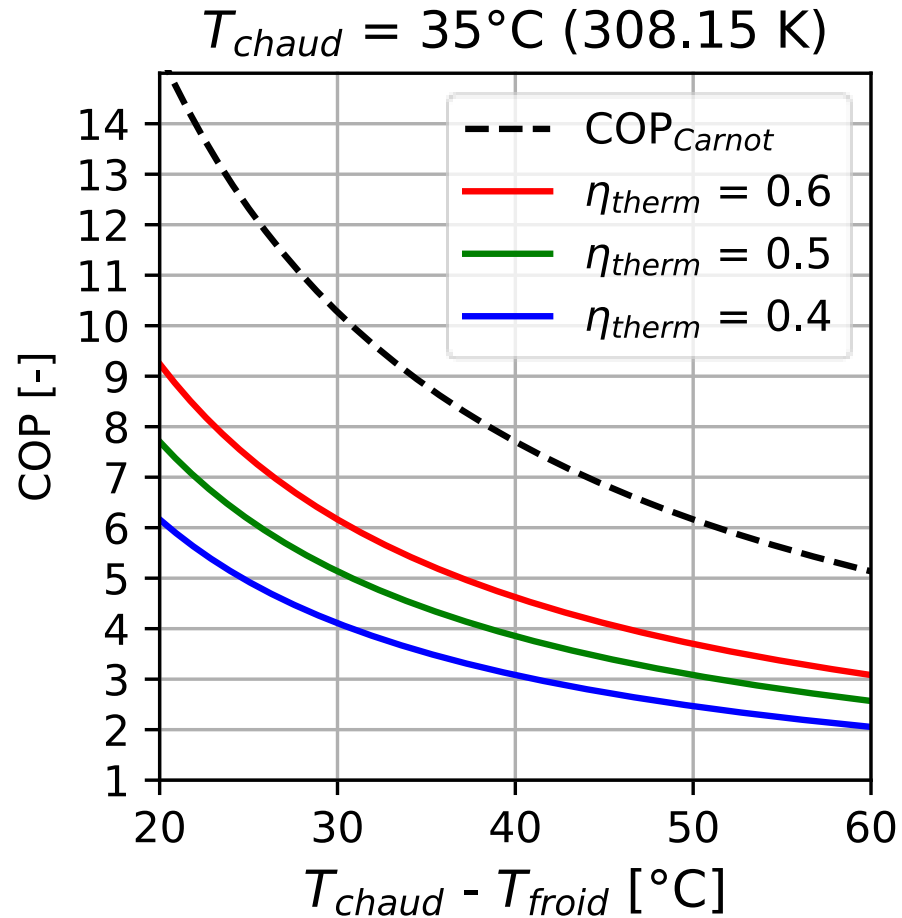
CO₂ (R744)

- Le développement de la technique permet de gérer les pressions de travail élevées ;
- Dominant en Suisse dans la réfrigération commerciale ;
- Peu adapté au chauffage, mais excellent pour la production d'ECS « en direct » ;
- Adéquation de l'intégration hydraulique nécessaire.

AMMONIAC

- Choix de prédilection de la grosse industrie frigorifique grâce aux excellentes propriétés ;
- La toxicité directe mal s'adapte aux applications domestiques, mais peut être gérée dans les application de grosse taille, pour lesquelles on a plus d'un siècle d'expérience.

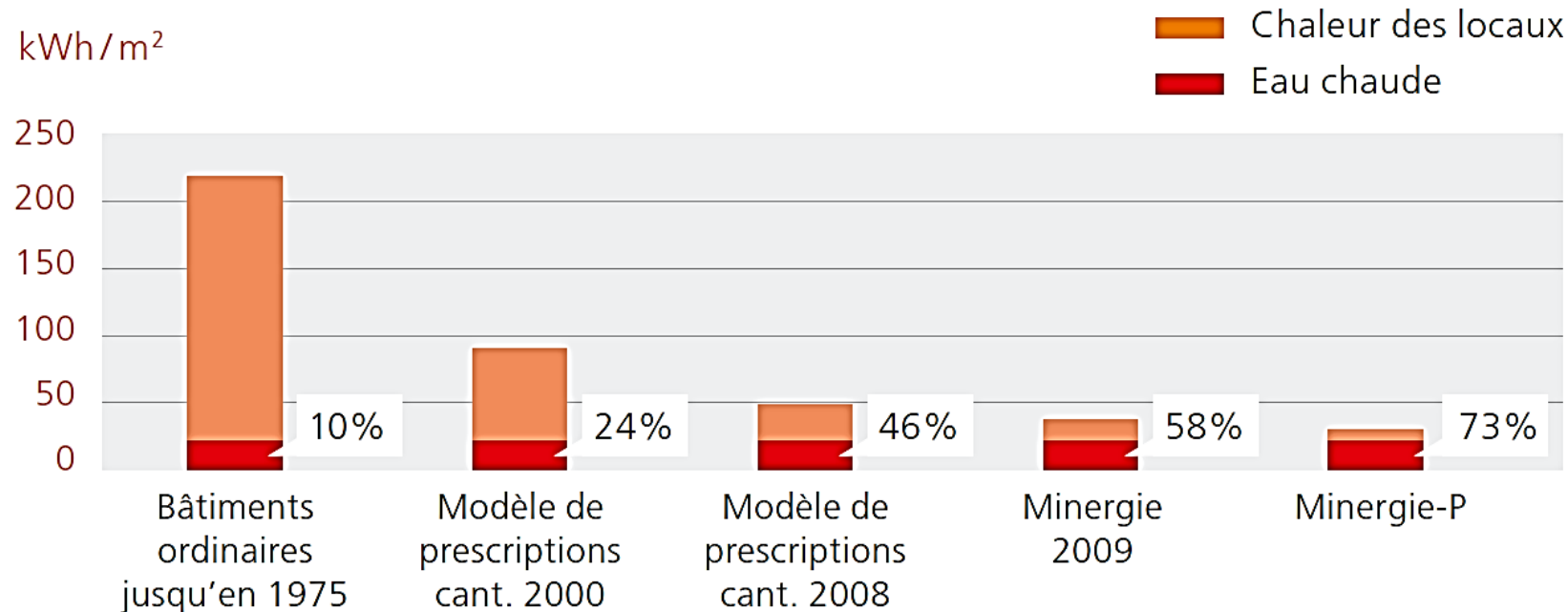




- Indépendamment de l'évolution de la technique, l'efficacité énergétique (COP) des PACs ne peut pas dépasser la limite thermodynamique du « COP de Carnot » ;
- L'efficacité des bonnes PACs actuellement disponibles dans le marché se situe autour du 50% de la limite thermodynamique (ex. COP ~4.5 @ B0/W35) ;
- Se rapprocher à la limite théorique comporte forcément la réalisation de PACs plus complexes, chères et encombrantes, possiblement avec une réduction de leur fiabilité ;
- En même temps, l'efficacité dépend lourdement des températures de travail ;
- A titre d'exemple, à parité de température de production de la chaleur (35°C), une PAC « parfaite » qui exploite une source de chaleur à -25°C aurait un COP égal ou inférieur à celui d'une PAC aujourd'hui disponible dans le marché travaillant avec une source de chaleur à 5°C ;

- L'amélioration de l'efficacité des installations PAC se passe probablement surtout par une adéquation des conditions de travail et de l'hydraulique, plutôt que par une amélioration des machines elles mêmes.

Adéquation avec l'évolution de la technique des bâtiments



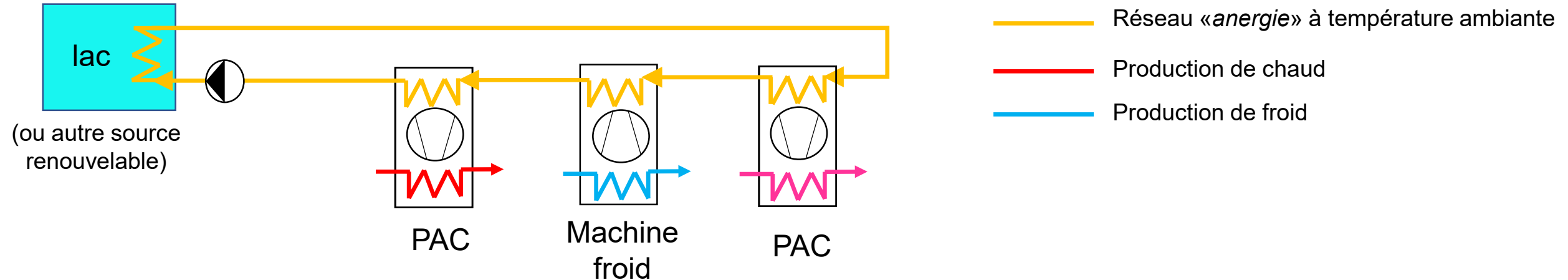
Source : [Production efficace de l'eau chaude sanitaire, suisse énergie](#)

- Les normes de contrôle pour le test (EN14511, EN14825), les labels énergétiques (ErP) et l'état de l'art pour la sélection des PACs sont largement axés sur le chauffage domestique (en particulier le chauffage au sol) ;
- Au contraire, l'évolution de la technique va de plus en plus vers des bâtiments dont les besoin énergétiques sont largement dominés par la production d'ECS ;
- « *La meilleure des PAC (optimisée pour B0/W35), dans le meilleur des bâtiments (presque pas besoin de chauffage) ... n'est pas le meilleur des choix!* ».



Source: D. Pahud, Sondes géothermiques verticales simples: principes et dimensionnement, CAS-ERTA

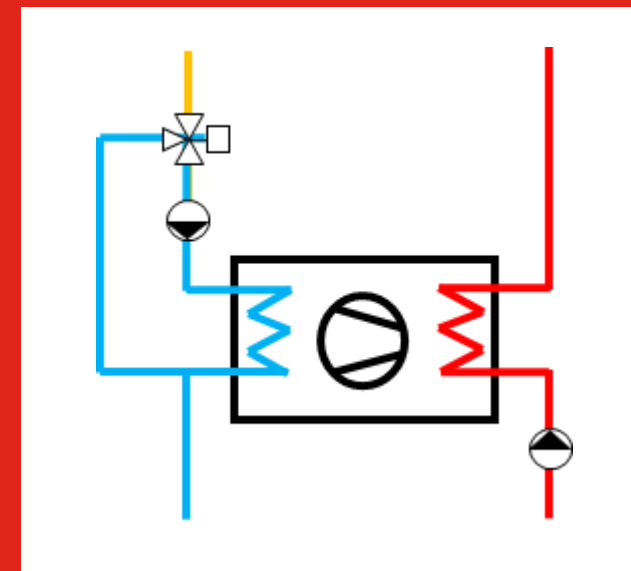
- Les «Pompes À Chaleur» (PAC) ont besoin d'une « source de chaleur » comme l'air ambiant, le sol ou l'eau ;
- Chaleur «gratuite» mais :
 - Besoin d'espace pour les infrastructures ;
 - Investissement économique.
- Le développement des PACs, surtout dans les centres ville densifié, est très limité par l'espace disponible ;
- Des sources de chaleur de bonne qualité (ex. lac) pourraient être disponible à une distance relativement élevée.



- L'utilisation d'une PAC en centrale d'un CAD oblige à produire la chaleur à la température la plus élevée parmi les besoins des consommateurs ;
- Les réseaux « anergie » à température ambiante :
 - Facilitent l'installation de PACs délocalisées en centre ville ;
 - Facilitent la synergie entre besoins de chauffage et de refroidissement ;
 - Améliorent l'efficacité globale car chaque sous-stations opère à la température effectivement demandée ;
- Les réseaux anergie à changement de phase (ex. CO₂) améliorent la compacité.
- Solution « intermédiaire » : réseau CAD à « bonne température » (~40°C) pour satisfaire la majorité des besoins de chaleur, avec PACs délocalisées pour les besoins à température plus élevée.

Plage de température de fonctionnement

- L'exploitation dans des domaines tels que la récupération de chaleur résiduelle ou les réseaux CAD à « bonne température » (~40°C) comporte un élargissement de la plage des températures de travail ;
- La technologie des PACs est une réadaptation de la technologie de la machine de froid ;
- L'augmentation de la température d'évaporation et de la température de condensation est parfois freinée par un manque de développement ou de certification des composants (notamment le compresseur) ;
- Le développement de nouvelles machines « de niche » telles que les « PACs haute température » pourrait inciter à l'utilisation des nouveaux fluides de synthèse (ex. HFO/HCFO), quand des autres solutions sont possibles (ex. ammoniac, butane, pentane) ;
- Il ne faut de toute façon pas oublier que « *Plus le saut de température évaporateur/condenseur augmente, plus une PAC se rapproche à un corps de chauffe électrique* ».



Exemple de potentiel non exploité à cause d'une limitation de la température d'évaporation

Conclusions et perspectives

- La modification actuelle de la réglementation est une opportunité à saisir pour s'affranchir des fluides de synthèse, sans baisse de COP, le tout en anticipant les futures probables interdictions pour raisons environnementales (ex. PFAs/TFA) ; les solutions techniques sont déjà disponibles :
 - PAC domestique → propane ;
 - PAC pour la seule production d'ECS → CO₂ ;
 - PAC de grosse puissance → ammoniac.
- Il ne faut pas s'attendre une amélioration sans limites du COP ; les machines actuelles ont atteint ~50% de la limite théorique ; l'amélioration des installations PAC se passe probablement surtout par une adéquation des conditions de travail et de l'intégration hydraulique, plutôt que par une amélioration des machines ;
- Les labels et les méthodes de sélection des PACs devront s'adapter à l'évolution des bâtiments, qui vont vers des besoin énergétiques de plus en plus dominés par la production d'ECS au détriment du chauffage ;
- Le développement des PACs est lié au développement des réseaux anergie (à eau ou à changement de phase, ex. CO₂) ;
- L'exploitation des PACs dans des nouveaux domaines (ex. récupération de chaleur résiduelle, applications industrielles) comporte un élargissement de la plage des températures de travail.

HE^{VD}
IG

HAUTE ÉCOLE
D'INGÉNIERIE
ET DE GESTION
DU CANTON
DE VAUD