

Source : Unilasalle

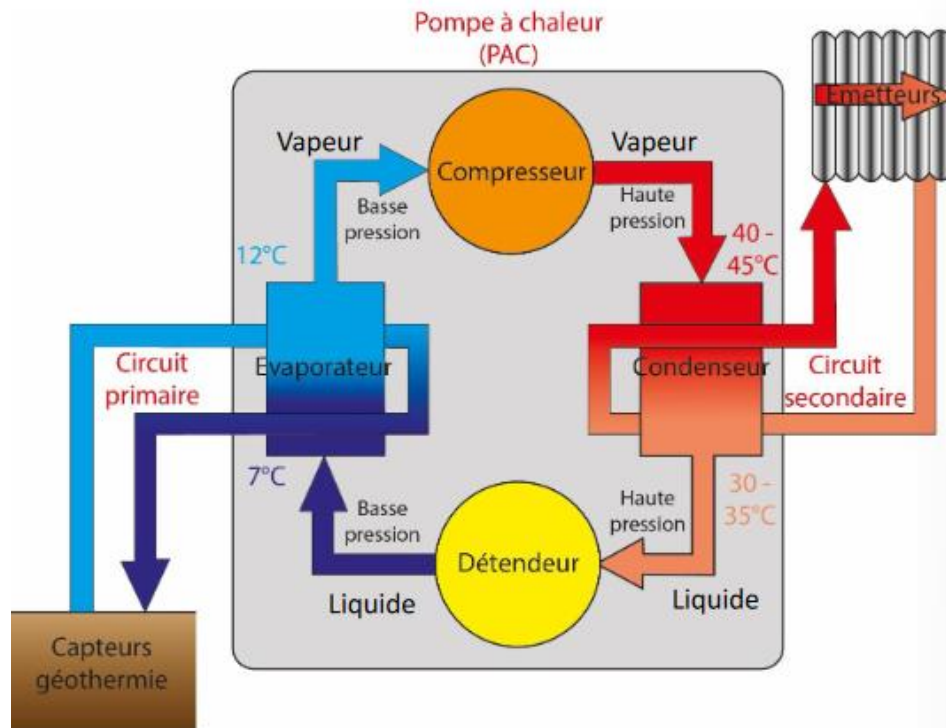


Schéma du principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur

VEILLE TECHNOLOGIQUE

Pompe à chaleur (PAC) à compression : la machine de valorisation thermique

Date	Rédaction	Validation
31/03/2026	Pauline Fortrye Charlotte Sagot	Sophie Dumesnil



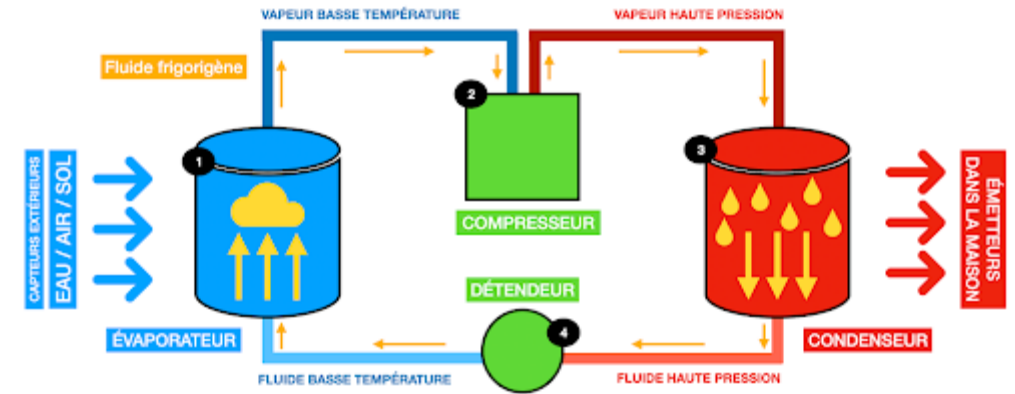
POMPE À CHALEUR COMPRESSION

QU'EST-CE QUE C'EST, À QUOI ÇA SERT?

- **Principe de base** : Une pompe à chaleur capte l'énergie thermique présente dans l'air, l'eau ou le sol (toutes sources de chaleur) et la transforme en chaleur pour différents usages : un procédé industriel, chauffer l'intérieur d'un bâtiment ou produire de l'eau chaude sanitaire...
- **Cycle de fonctionnement** :
 - **Évaporateur** : récupération des calories du captage au contact du circuit primaire.
 - **Compresseur** : mise sous pression, on augmente sa température
 - **Condenseur** : chaleur du fluide transmise au circuit secondaire (aux émetteurs de chauffage)
 - **Détendeur** : la température du fluide est abaissée une seconde fois, un nouveau cycle commence
- **Choix du fluide frigorigène** : Dépend des régimes de température de la PAC. Chaque fluide possède des propriétés thermophysiques spécifiques. Le fluide est sélectionné selon les conditions de fonctionnement et l'application visée



Principe général du fonctionnement d'une pompe à chaleur



- **Choix du moteur** : la pompe à chaleur classique est électrique, mais il existe également des PAC à moteur gaz (*Gas engine Heat Pump*).
 - Rendement mécanique médiocre PAC à moteur gaz (45-50 %), comparé à la PAC électrique (98 %)
- **Coefficient de Performance (COP)** = indicateur de performance d'une pompe à chaleur ;
$$\text{COP} = \frac{\text{énergie obtenue}}{\text{énergie payée}}$$
 - COP PAC = 4 (pour 1 kWh d'énergie consommée, la PAC peut produire 4 kWh d'énergie – 3 kWh sont gratuits issus de l'environnement) vs
 - COP Chaudière gaz = 0,9

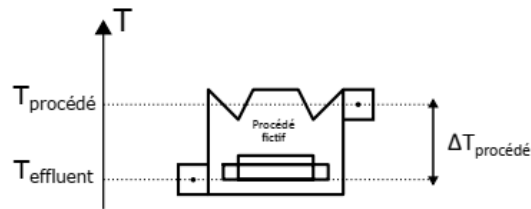
POMPE À CHALEUR COMPRESSION

QU'EST-CE QUE C'EST, À QUOI ÇA SERT?

PAC catégorisées selon leur niveau de température :

- BT : Classiques < 80 °C
- HT : Haute température > 80 °C
- THT : Très haute température > 100-110 °C

$\Delta T_{\text{procédé}}$	Faible 5°C-20°C	Moyen 20°C-40°C	Élevé 40°C et plus
Faible <80°C	Conventionnel - Réseaux de chaleur - Industrie	Conventionnel - Automobile - Industrie	Conventionnel - Froid commercial
Moyenne 80-100°C	Moins Conventionnel - PAC ammoniac	Rare stade R&D - PAC mélange non azéotropique	Quelques PAC commercialisées - CO2 Transcritique
Élevée 100°C et plus	Quelques PAC commercialisées	?	?



Problématiques

- Rupture technologique ?
- Preuve de concept ?
- Fort besoin industriel

- **Rôle dans la décarbonation** : valorisation de l'énergie renouvelable locale, réduction des émissions de CO2 par rapport aux autres technologies (gaz, fioul...). Compatible avec électrification des usages thermiques.
- **Type de production** : eau chaude chauffage, sanitaire, de process ; vapeur ; rafraîchissement
- **Maturité de la technologie** :
 - Eprouvée BT/HT ; THT
 - limité dans l'industrie par rapport à leur potentiel technique et économique. Démonstrateurs rares pour des températures supérieures à 140°C.
 - Implantation industrielle des PAC BT = 89 %; PAC HT = 10 % et THT < à 1 %.
 - Pompe à chaleur à compression > 90 % du marché des pompes à chaleur.
- **Echelle typique** : de la dizaine de kW à plusieurs MW
- **Références industrielles** :
 - Transpac/EDF R&D - WEPA Greenfield : COP = 4 fonctionnant au régime transcritique (70°C → 120°C pour 0,4 MWth.)
 - DryF/consortium AIT - Wienerberger / Agrana Starke : P= 300 à 400 kW, T= 150/160°C (COP = 2,5 à 5 en fonction de la T°C)



POMPE À CHALEUR COMPRESSION

PERFORMANCE, COÛT ET CARBONE

Indicateur technique et financier PAC BT :

Titre	Données	Unité	Incertitude	Source
Temps de fct moyen	2 000 à 4 000	h	Forte	ADEME
Rendement énergétique	COP 3 à 6	x	Moyenne	ADEME
Type d'intrant	Eau, Air, Chaleur	x	-	Pôlenergie
Besoin foncier	0,005 à 0,02	ha/kW	Forte	Adhérents
Température source	8-15 (Géothermie – Aérothermie) 20 à 40 et + (Récupération – indus)	°C	Faible	Pôlenergie
Température sortie	40 à 80	°C	Faible	Pôlenergie
CAPEX	300 à 600	€/kW	Forte	Adhérents
OPEX	10 à 60	€/kW	Forte	ADEME
Taux d'actualisation	2	%	Moyenne	ADEME

Mécanisme de soutien :

Fond Chaleur ADEME ; CEE ; Subventions régionales, nationales ou européennes



Indicateur carbone : 0,01 à 0,05 kgCO₂/kWh_{chaud}
 (Source : Analyse du cycle de vie de systèmes renouvelables de production de chaleur et de froid de grande puissance ADEME 09/20)

Indicateur technique et financier PAC HT :

Titre	Données	Unité	Incertitude	Source
Temps de fct moyen	3 000 à 7 000	h	Forte	Pôlenergie
Rendement énergétique	COP 2 à 5	x	Moyenne	Pôlenergie
Type d'intrant	Eau, Chaleur	x	-	Pôlenergie
Besoin foncier	0,005 à 0,02	ha/kW	Forte	Adhérents
Température source	30 à 90	°C	Moyenne	Pôlenergie
Température sortie	80 à 120	°C	Moyenne	Pôlenergie
CAPEX	300 à 1 500	€/kW	Forte	Adhérents
OPEX	30 à 100	€/kW	Forte	ADEME
Taux d'actualisation	3	%	Moyenne	Pôlenergie

Plusieurs études ont établi des **listes de fournisseurs mondiaux avec les CAPEX, puissances et TRL associés (entre 5 à 9) :**

1. « High-Temperature Heat Pumps. Task 1 – Technologies. Task Report. » - IEA Heat Pump Centre
2. « Steam generating heat pumps – Overview, classification, economics, and basic modeling principles » Sven Klute *, Marcus Budt, Mathias van Beek, Christian Doetsch (2023)

POMPE À CHALEUR COMPRESSION

UTILISATION : QUAND COMMENT ET AVEC QUELLES LIMITES

Pertinence :

- Haute performance énergétique
- Décarbonation de la production thermique
- Valorisation de sources de chaleur variées
- Température stable de source
- Durée de vie importante
- Hybridation possible

Cadre réglementaire :

- Loi sur l'eau
- Déclarations ou autorisations préfectorales, environnementales,
- ICPE (CO2, ammoniac...), F-Gas

Amont : récupération de chaleur sur procédés industriels, sources renouvelables (ex: géothermie)

Couplage : procédés industriels, ou de production de chauffage (plancher chauffant, solaire thermique, ballon tampon, chaudière d'appoint)

Risques / points faibles :

- CAPEX élevé
 - Performances variables selon les conditions d'usage
 - Disponibilité et stabilité des sources froides
 - Dépendance à la qualité et au débit d'eau
 - Sensibilité à une mauvaise exploitation – gestion des risques et adéquation des fluides frigorigènes utilisés.
 - Intégration parfois complexe
-
- Autorisation de forage
 - Code Mine



POMPE À CHALEUR COMPRESSION

QUI SAIT FAIRE ? A QUI S'ADRESSER ?

Légende : Adhérents Pôlénergie

Liste d'apporteurs de solution

Industriels haute et très haute température :

OCHSNER
POMPES A CHALEUR

FE
BY FRANCE EVAPORATION

Carrier

Armstrong

GEA
Engineering for a better world.

Johnson Controls



Hybrid Energy
HIGH TEMPERATURE HEAT PUMPS

°COMBITHERM

KOBELCO

Heatlift

dalkia
GROUPE EDF

EQUANS

enertime

Résidentiel – Collectif – Tertiaire ou Industriels basse température :

Brunet Alpha Climat ; AXIAN ; Opale Fluide ; Nord Chaleur ; Cegelec

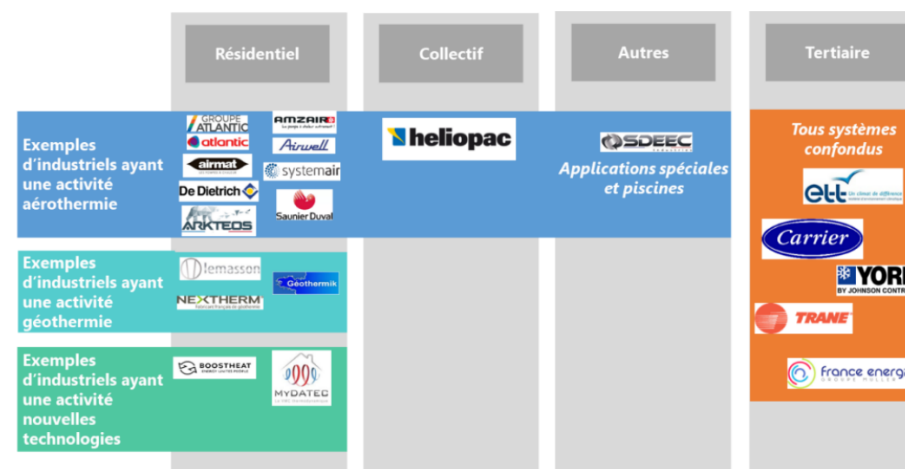


Figure 28: Exemples de positionnement des industriels présents en France selon le secteur et la technologie⁷⁶
(Source : auteurs)



Pôlénergie

Sources : Etat des lieux des filières de la pompe chaleur - ADEME 07/22



TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ET DÉCARBONATION :
UNE OPPORTUNITÉ ÉCONOMIQUE POUR LES HAUTS-DE-FRANCE



03 28 61 57 15

2508 route de l'Ecluse Trystram
59140 Dunkerque

polenergie.org

contact@polenergie.org