

Formation

Se chauffer en 2023

16/11/2023



Raphaël Capart

rc@icedd.be

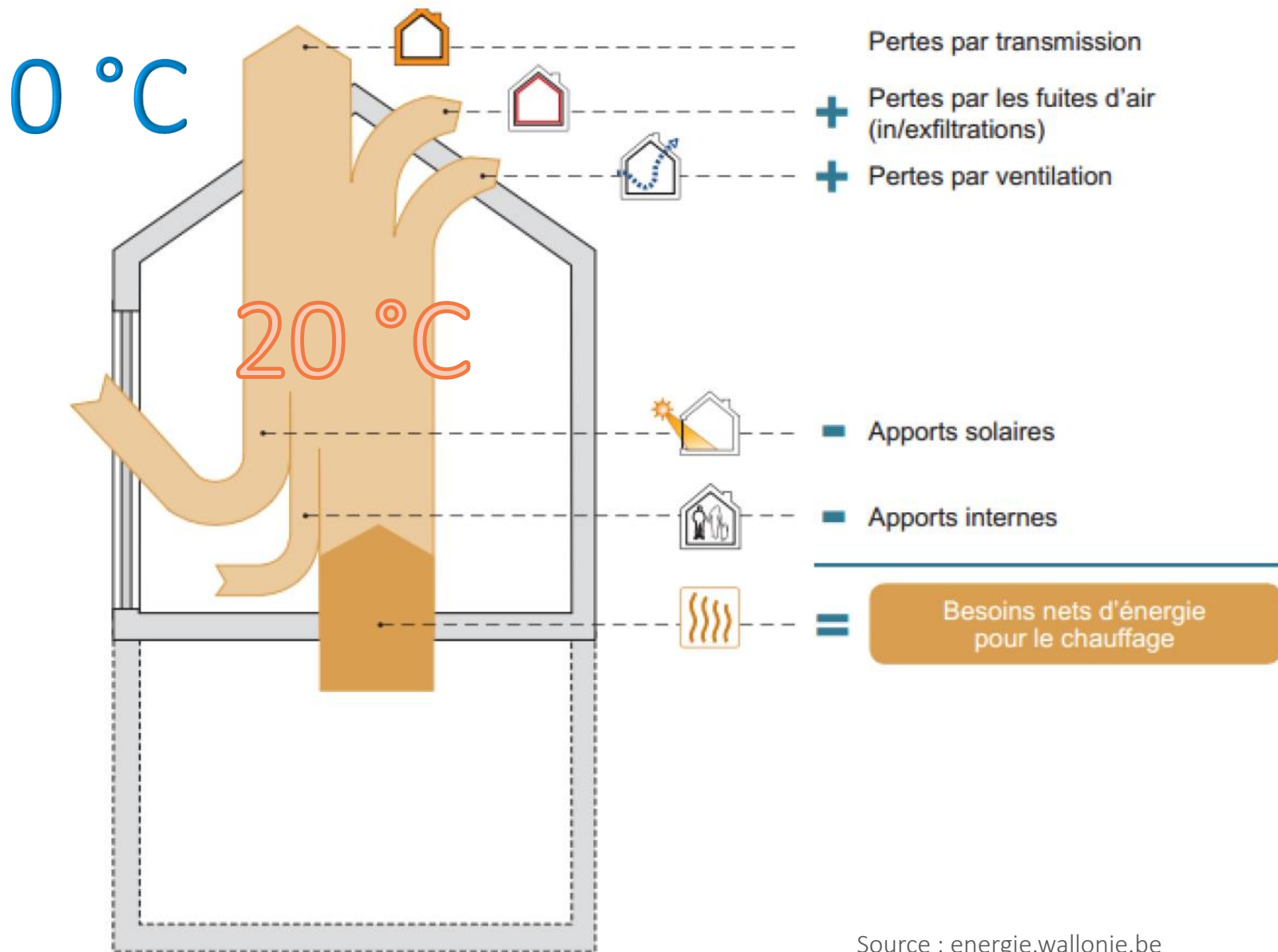


ICEDD





Introduction : pourquoi une installation de chauffage ?



Pour pouvoir rester à l'intérieur moins habillé qu'à l'extérieur, il faut une température supérieure à la température extérieure...

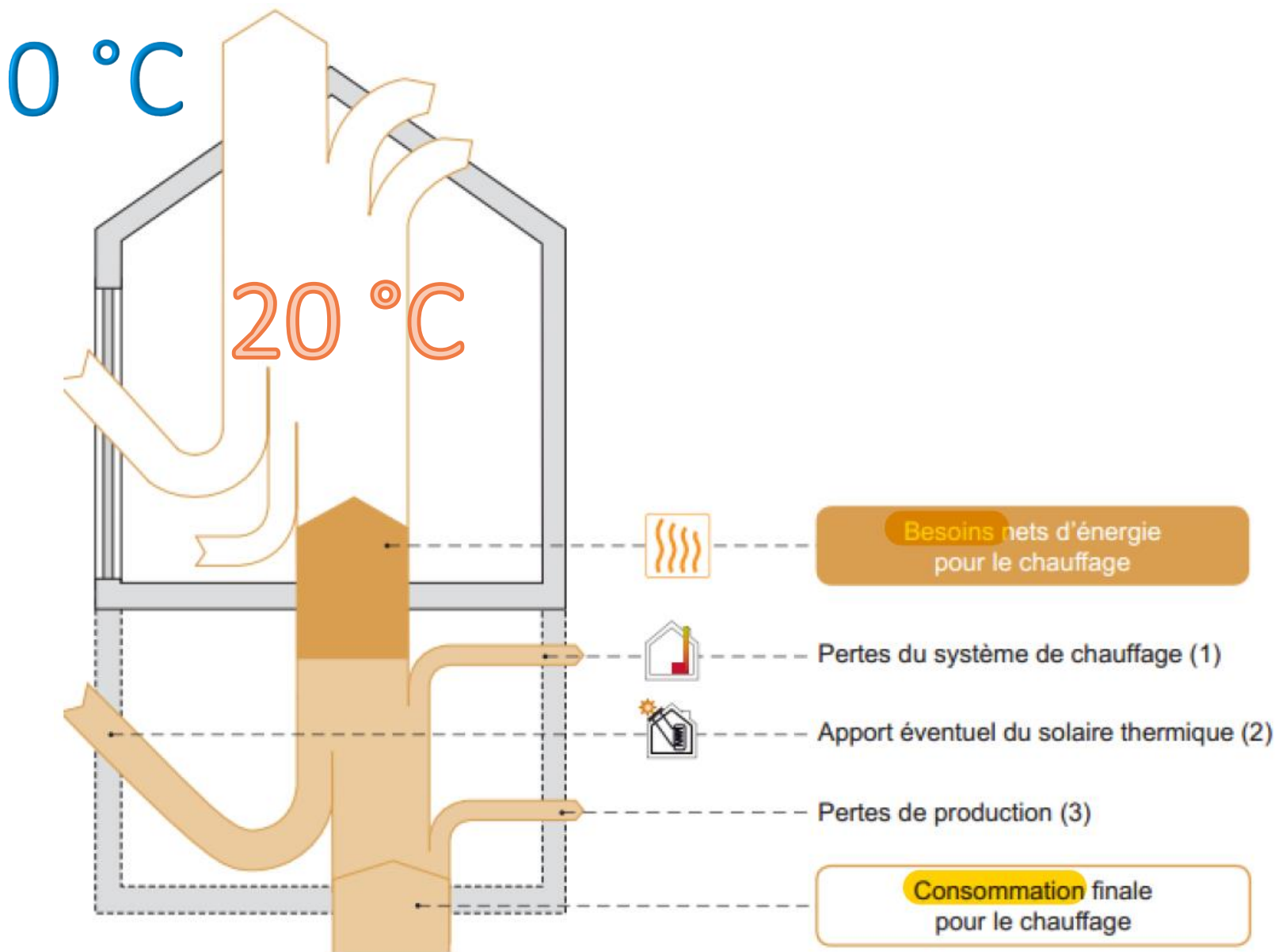
➔ Température de confort

Dépend de :

- ⬢ L'activité physique
- ⬢ Habillement



Introduction : pourquoi une installation de chauffage ?

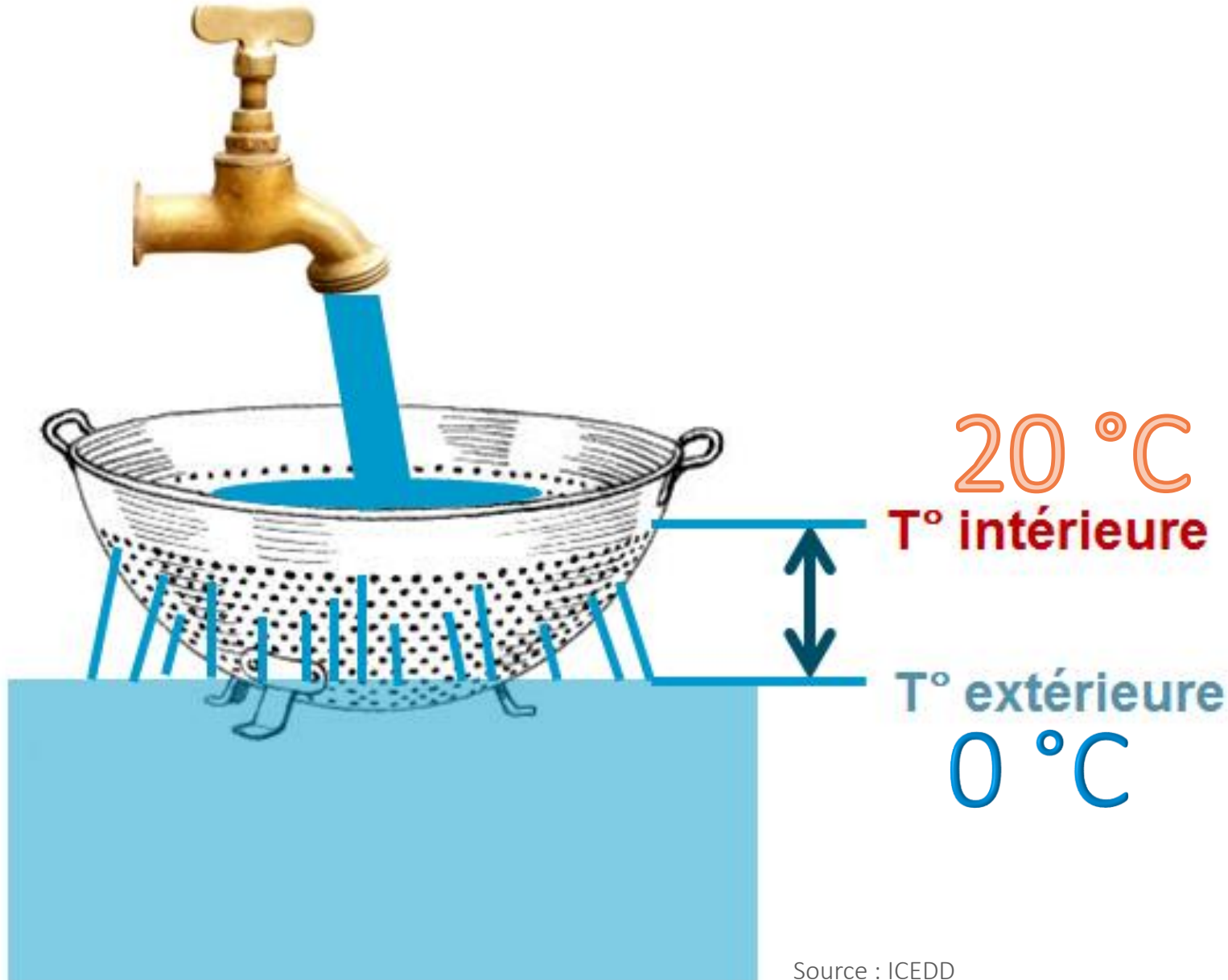


L'énergie que les apports solaires et internes ne peuvent fournir doit être compensée par une source de chaleur...

Mon installation de chauffage!



Introduction : pourquoi une installation de chauffage ?



Source : ICEDD

- ❖ Il faut maintenir un débit pour maintenir le niveau d'eau désiré
- ❖ Il faut maintenir une puissance de chauffage pour maintenir une température désirée
- ❖ La puissance nécessaire est variable en fonction de la différence entre la température intérieure et extérieure

La chaudière gaz à condensation



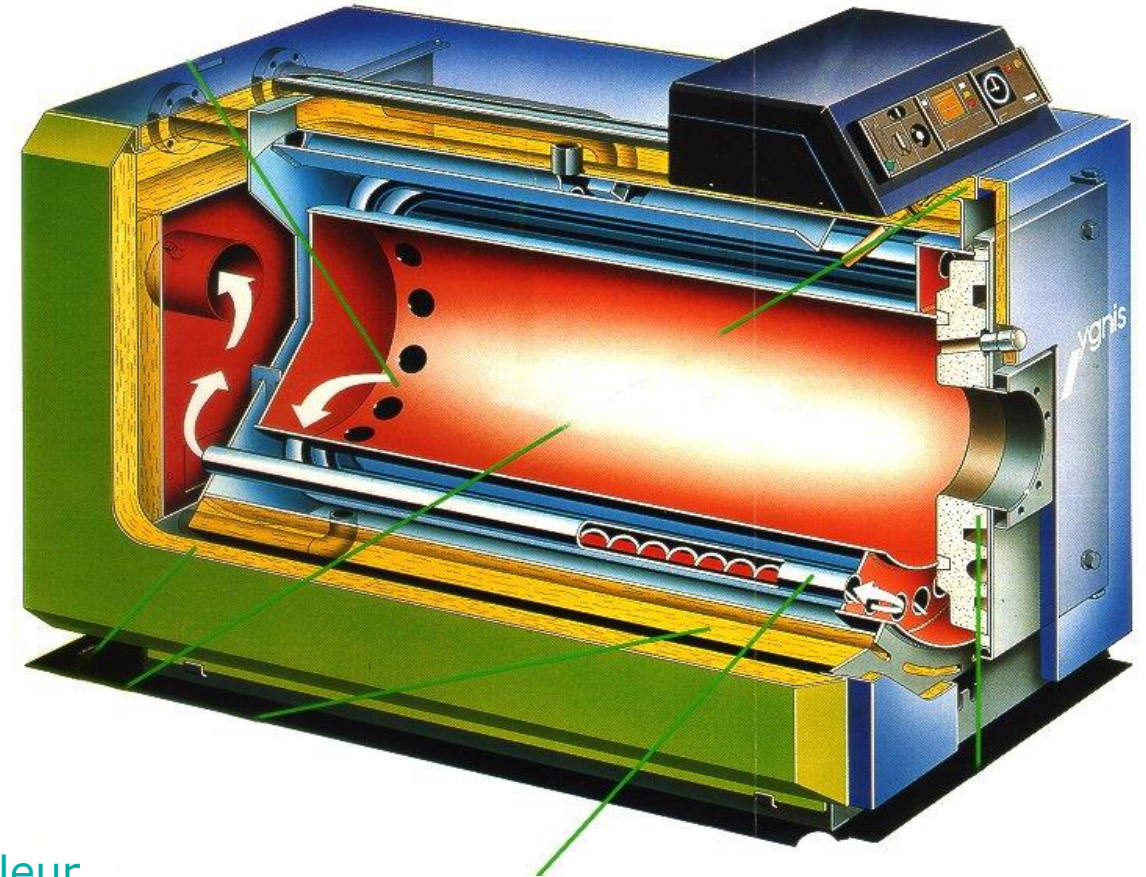
ICEDD



La chaudière

Chaudière :

échangeur de chaleur
parcouru par de l'eau et
équipé d'un **foyer** où a lieu la
combustion d'un combustible
(gaz, mazout, bois, etc)



Principe général :

- la flamme brûle dans un foyer
 - tout autour de ce foyer, de l'eau capte la chaleur
 - ensuite, les fumées passent dans des tubes (toujours entourés d'eau)
 - puis ressortent à l'arrière.
- ➔ l'eau sort plus chaude qu'elle n'est rentrée!



La combustion

Nos combustibles (fuel, gaz, bois,...) sont constitués de Carbone et d'Hydrogène.



Par la combustion,
le Carbone formera du **CO₂**
l'Hydrogène formera ... de l'**eau** !

Cette eau est à l'état de vapeur, donc elle ne se voit pas...

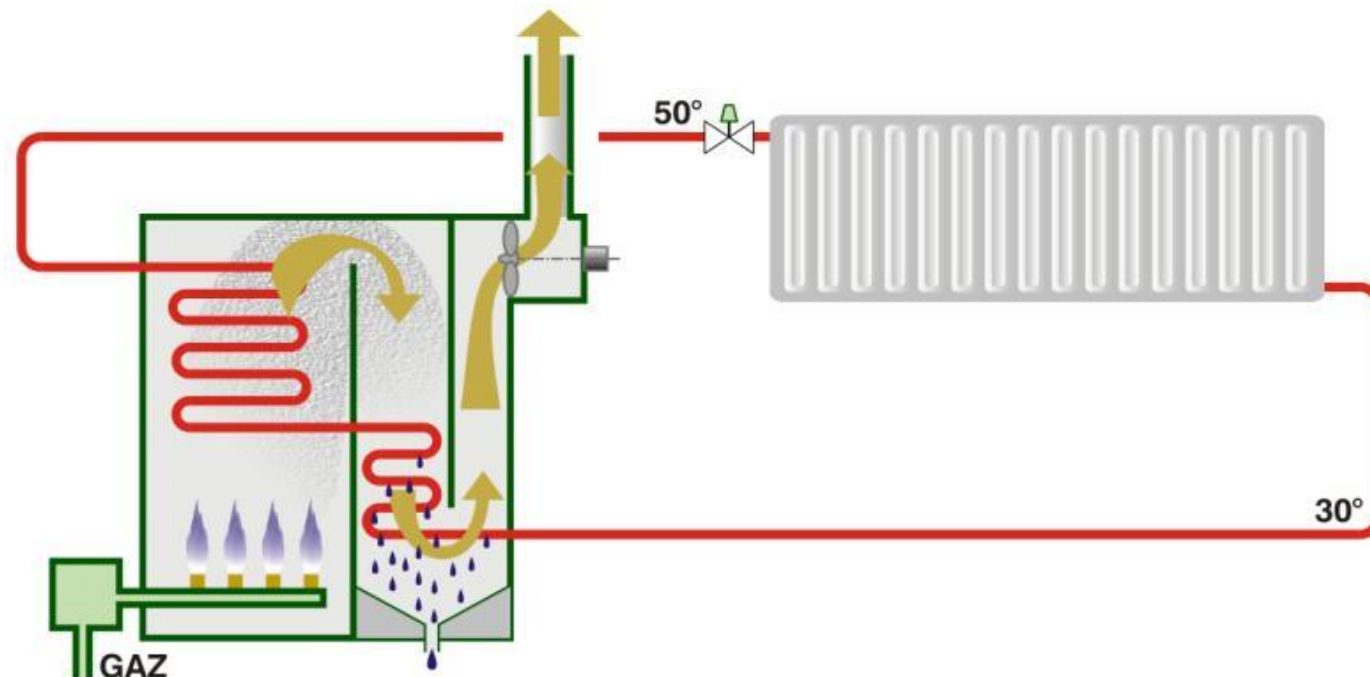
... sauf lorsqu'elle condense et forme de la fumée blanche en sortie de cheminée !





quid de la vapeur d'eau

Pour les chaudières à condensation :



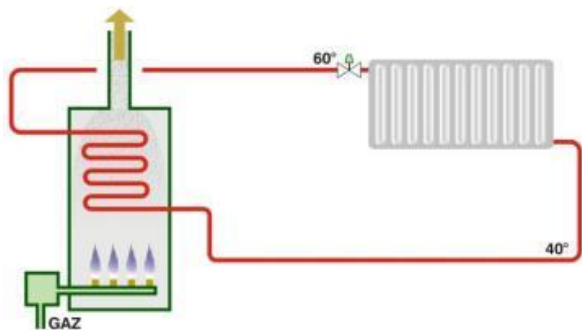
La chaudière recherche la condensation :

- ⬢ Les vapeurs condensent volontairement
- ⬢ Les fumées sortent plus froides
- ➔ le rendement est plus élevé !



Le pouvoir calorifique

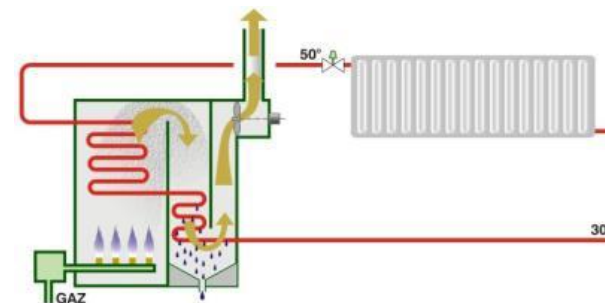
Avant :



Lorsqu'on brûle 1 m³ de gaz, on récupère ~10 kWh dans l'eau de chauffage.

C'est le PCI, Pouvoir Calorifique Inférieur, du gaz

Aujourd'hui :



Lorsqu'on brûle 1 m³ de gaz, on récupère ~11 kWh dans l'eau de chauffage.

C'est le PCS, Pouvoir Calorifique Supérieur, du gaz

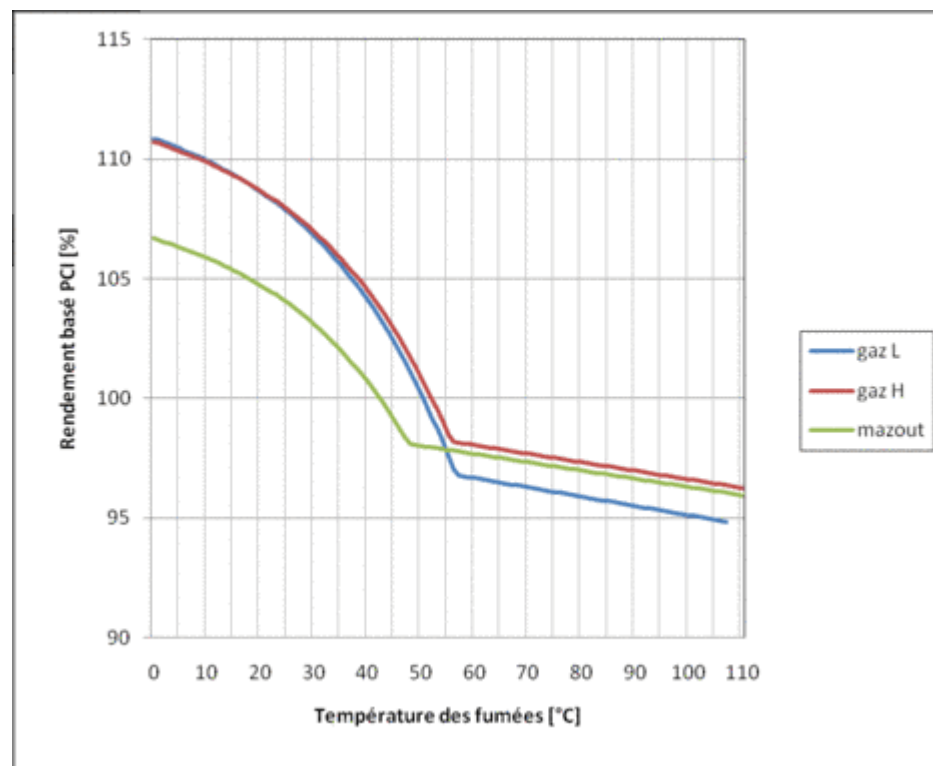
Le rendement d'une chaudière, c'est la quantité de chaleur produite par rapport à la quantité d'énergie brûlée.

La quantité d'énergie brûlée s'exprime en kWh PCI ou en kWh PCS.

→ le rendement peut donc s'exprimer de 2 façons! η_i et η_s



Production : pertes et rendements





Production : pertes et rendements

Rendement saisonnier de production:

- ◆ Impact important du **surdimensionnement** des chaudières!

Ordre de grandeur :

- ◆ Chaudières gaz atmosphériques : 80 ... 91 %
- ◆ Chaudières fuel ou gaz à brûleur pulsé : 86 ... 93 %
- ◆ Chaudières gaz à condensation: 97 ... 103 %



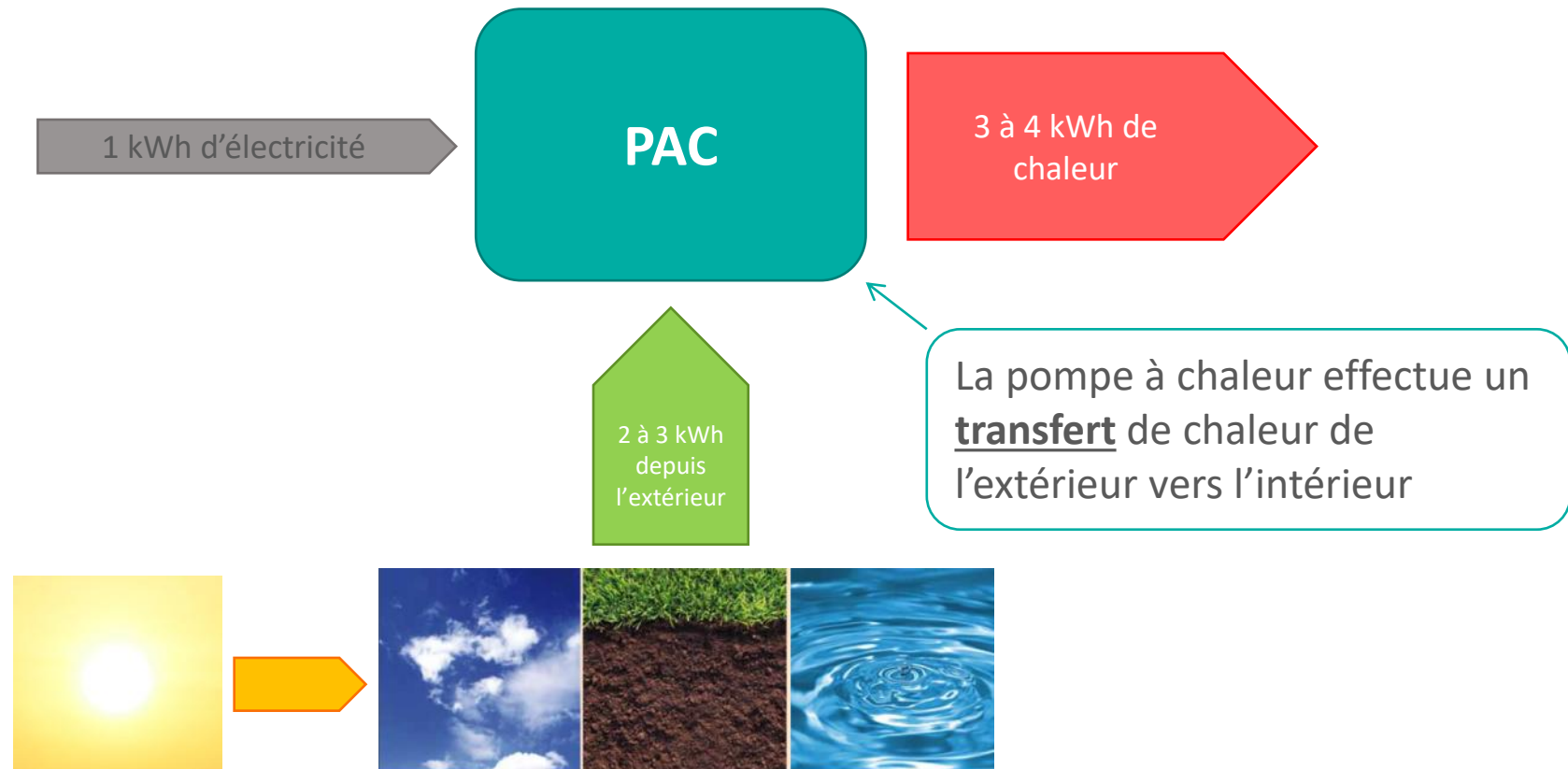
La pompe à chaleur



Principe de fonctionnement

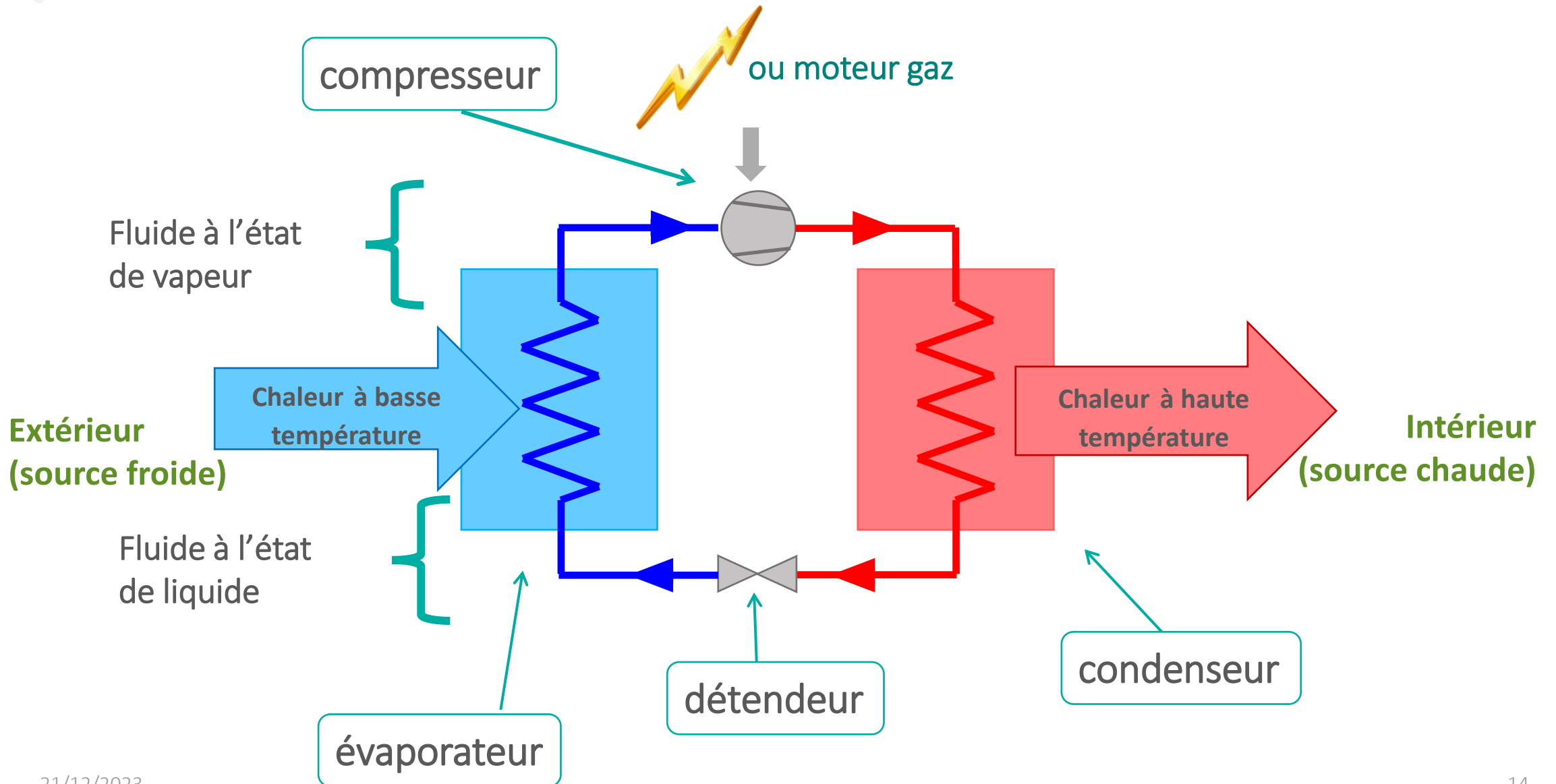
Un rendement (COP) supérieur à 1, possible ???

**Non, il n'est pas possible de « créer » de l'énergie ...
et pourtant on nous promet :**



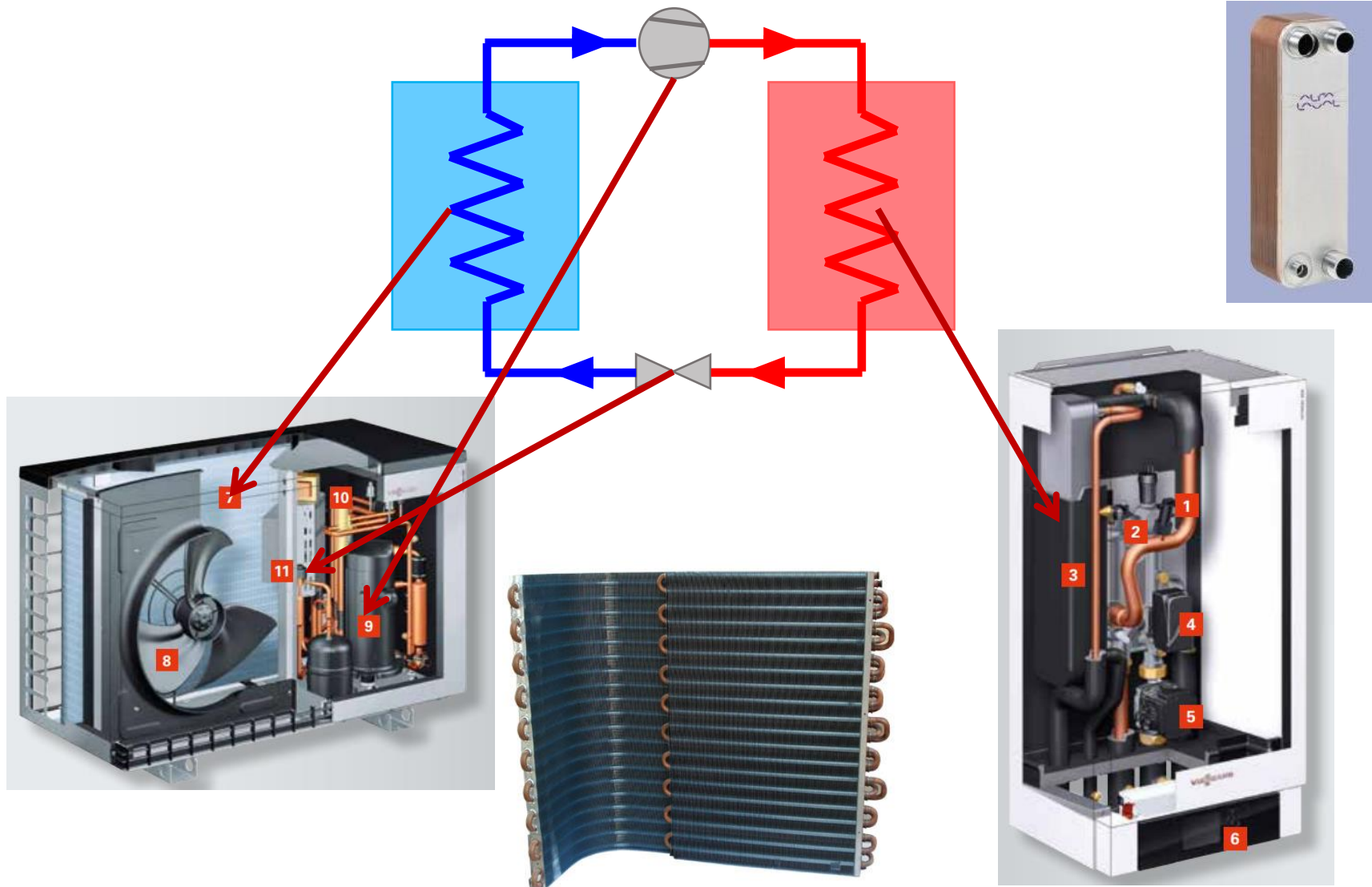


Principe de fonctionnement





Principe de fonctionnement





Mais comment peut-on prendre de la
chaleur dans du **froid** ???



Un peu de thermodynamique

◊ La chaleur contenue dans la matière

- L'énergie thermique est proportionnelle à la température exprimée en Kelvin

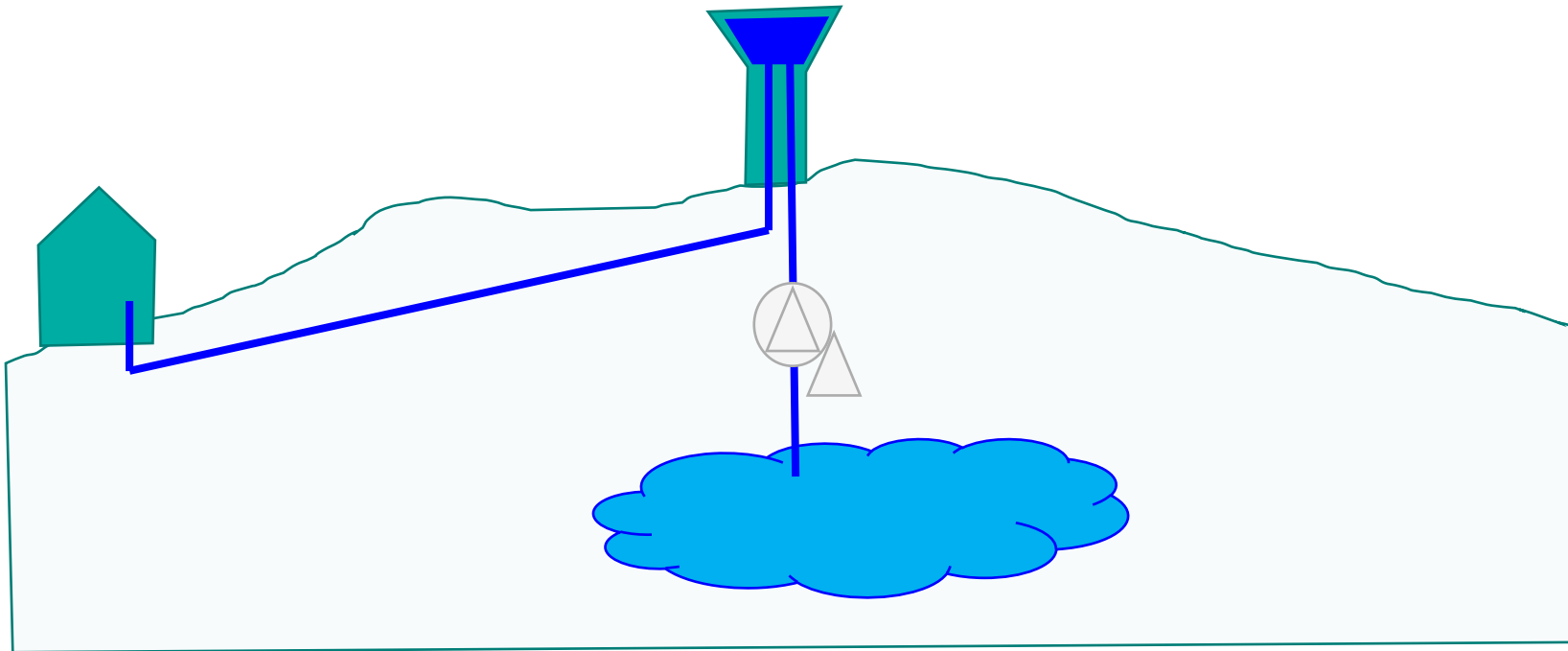
Degrés Celsius	Kelvin
-273 °C	0 K
-10 °C	263 K
0 °C	273 K
20 °C	293 K



Les éléments naturels contiennent encore beaucoup d'énergie même lorsque leur température est inférieure à la température ambiante à l'intérieur d'un bâtiment
-> (de l'air à -10°C ne contient pas beaucoup moins de chaleur que de l'air à 20°C)



La chaleur s'écoule toujours du plus chaud vers le plus froid
=> comment la faire rentrer dans la maison?

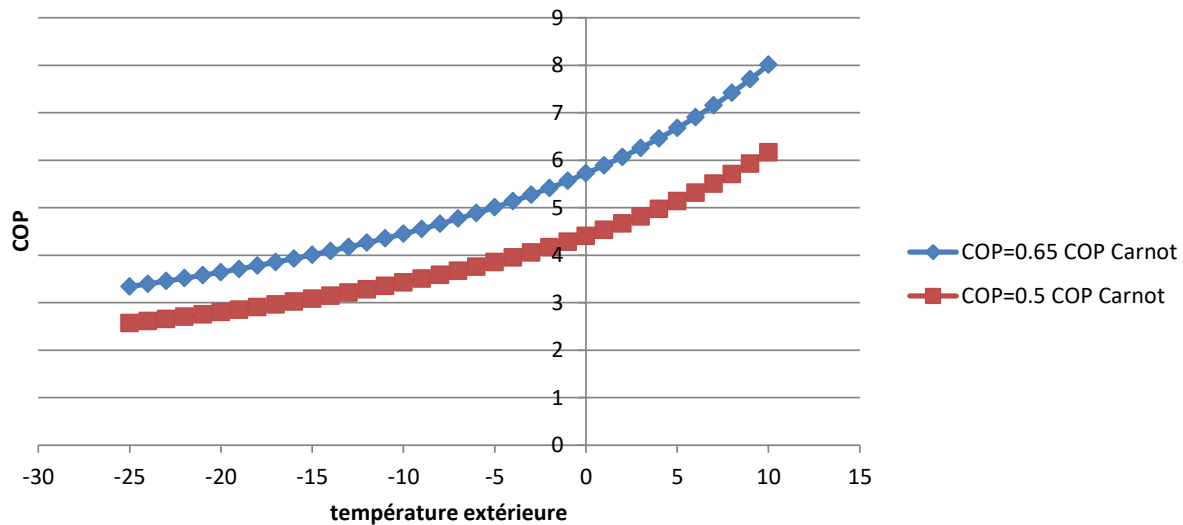


De manière analogue à l'eau qui est pompée pour augmenter sa pression,
on pompe la chaleur pour augmenter sa température

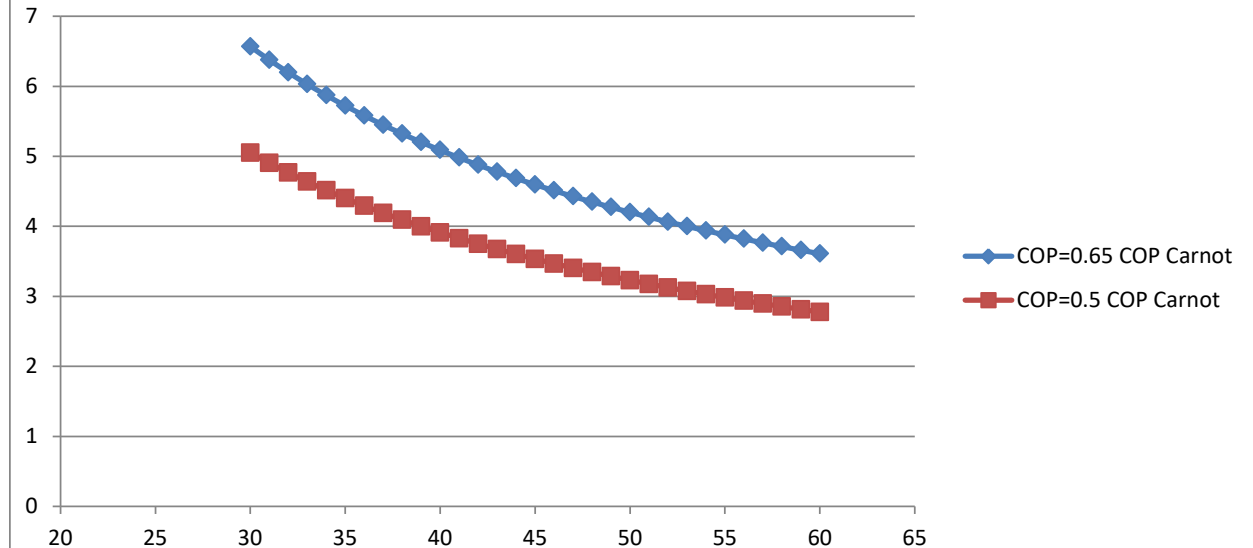


A quelles performances s'attendre ?

variation du COP en fonction de la température à l'évaporateur pour une température au condenseur à 35°C



variation du COP en fonction de la température au condenseur pour une température à l'évaporateur de 0°C



$$COP_C = \frac{T_{source\ chaude}}{T_{source\ chaude} - T_{source\ froide}}$$

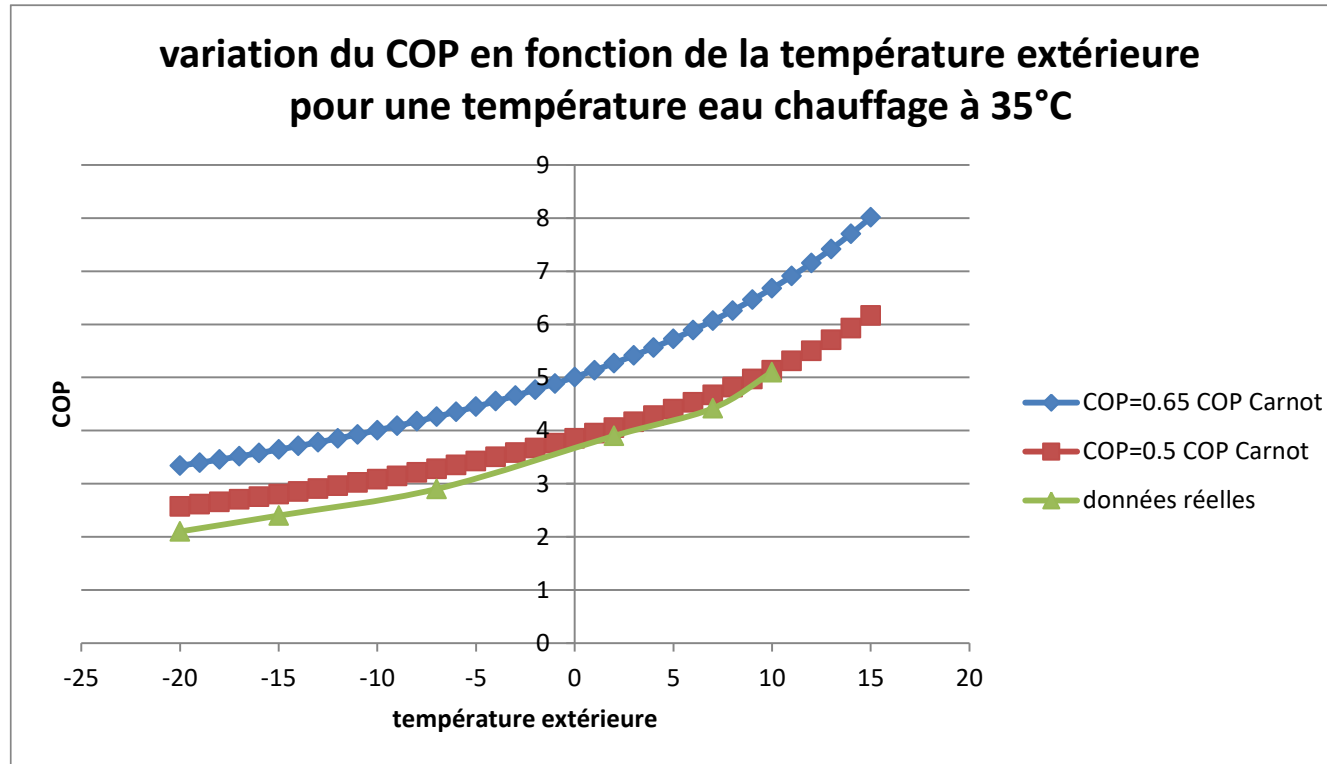
$$COP_{PAC} \sim 0,5 \dots 0,65 COP_C$$

Température exprimée en K !!

- Diminution 1°C évaporateur => ~ -2% de COP
- Augmentation 1°C condenseur => ~ -2% de COP



A quelles performances s'attendre ?



$$COP_C = \frac{T_{source\ chaude}}{T_{source\ chaude} - T_{source\ froide}}$$

$$COP_{PAC} \sim 0,5 \dots 0,65 COP_C$$



Utilisation d'énergie renouvelable ?

- SPF = seasonal performance factor = COP intégré sur toute la saison de chauffe

Intervalles de valeur pour SPF et rendement en énergie primaire				
	Nouvelle construction		Rénovation	
	SPF	η_{prim} (SPF/2.5)	SPF	η_{prim} (SPF/2.5)
AIR – EAU	2.8 - 3.5	112% - 140%	2.5 - 3.0	100% – 120%
SOL – EAU	3.5 - 4.5	140% – 180%	3.2 - 4.0	128% - 160%
EAU – EAU	3.8 - 5.0	152% – 200%	3.5 - 4.5	140% - 180%

Source valeurs SPF : OFEN

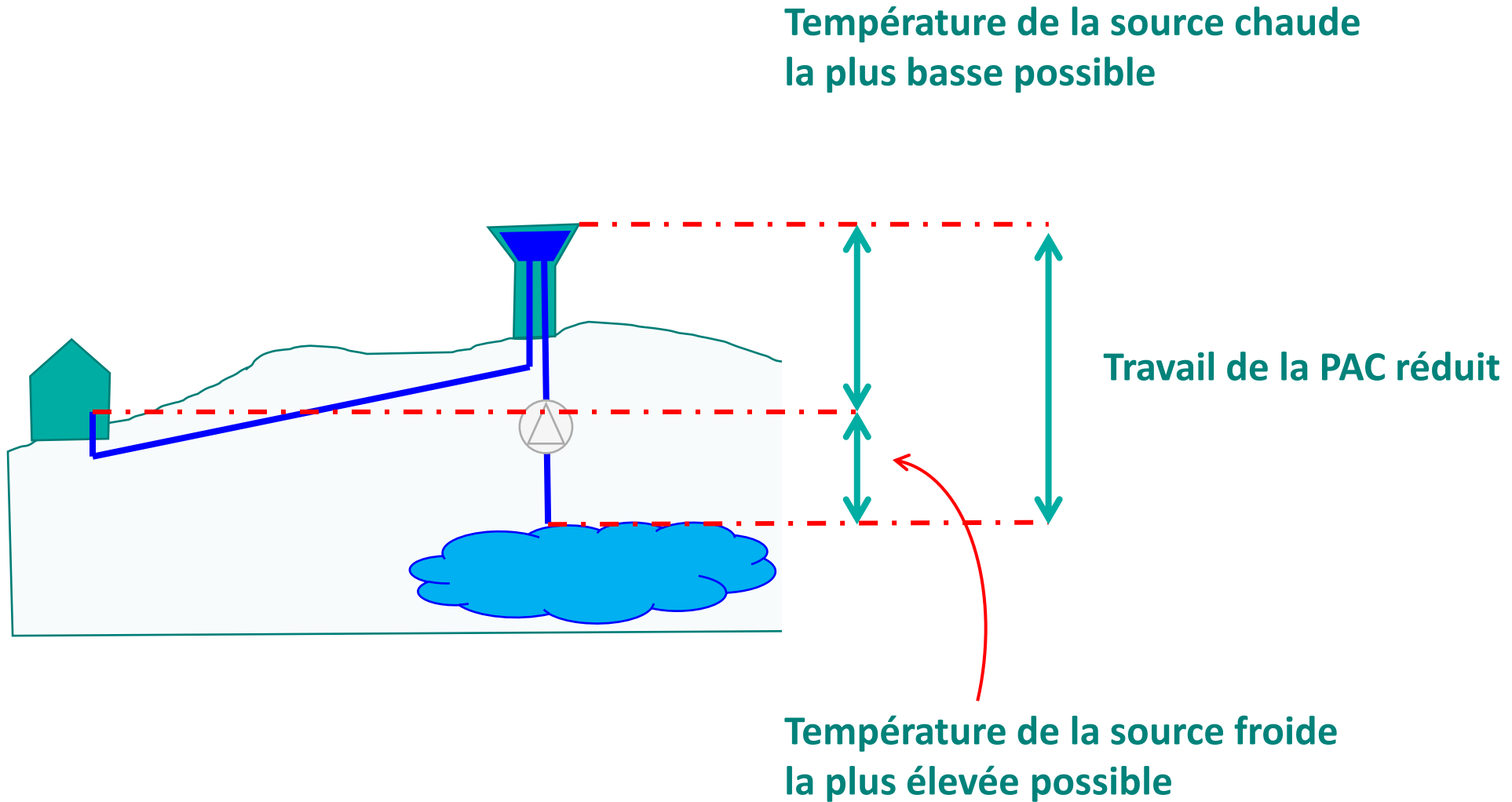
A comparer par exemple avec chaudière gaz à condensation (rendement sur PCS ~ 95%)

Directive 2009/28/CE : PAC considérée comme SER si **FPS > 1,15 * 1/η**
avec η = rendement moyen pour la production d'électricité dans l'Union
(donnée Eurostat 2014 : 46.6%)

=> PAC = SER si FPS > 2.58

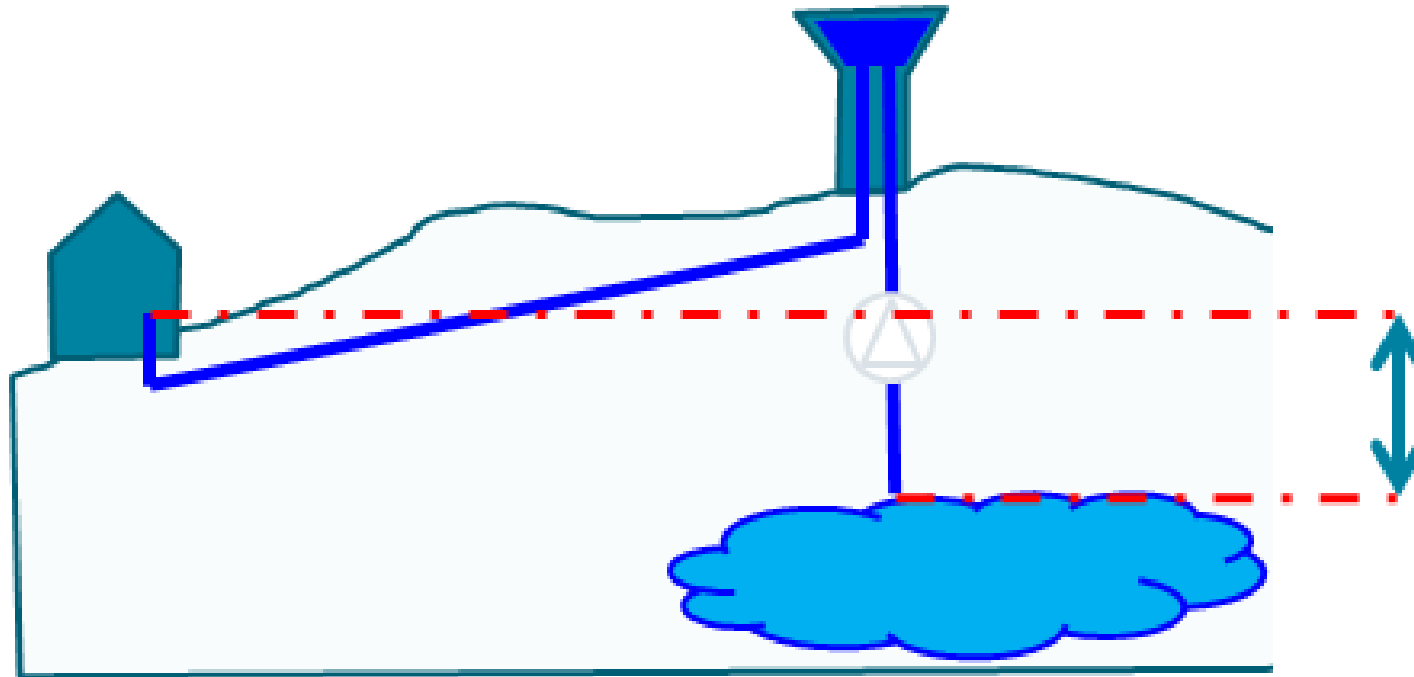


Optimiser les performances





Les différentes sources froides

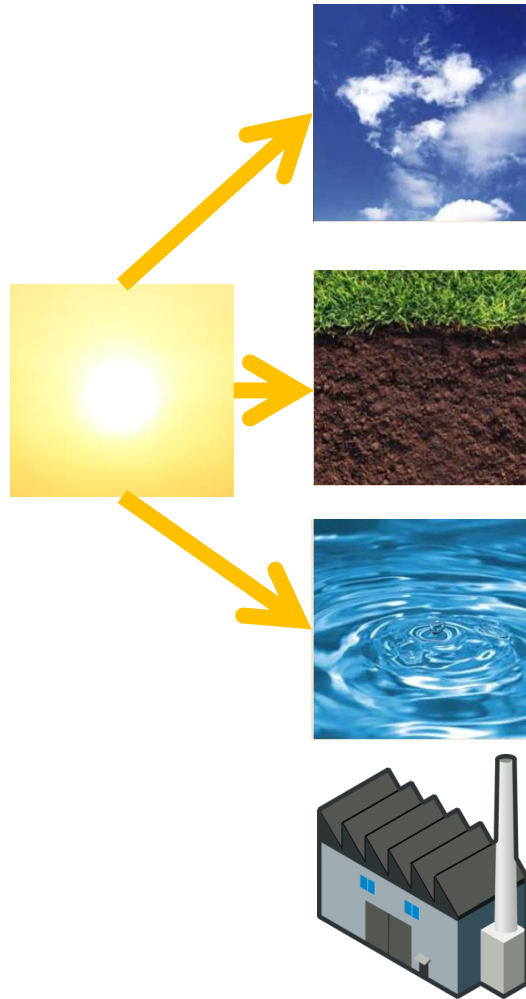




Les différentes sources froides

Stockage de l'énergie solaire => captation indirecte de l'énergie solaire

Les sources froides



Air :

- Dynamique ou statique
- Air extérieur ou air extrait de la ventilation

Sol :

- Proche de la surface (horizontal)
- En profondeur (vertical)

Eau :

- En surface : étang, rivière
- En profondeur : nappe phréatique

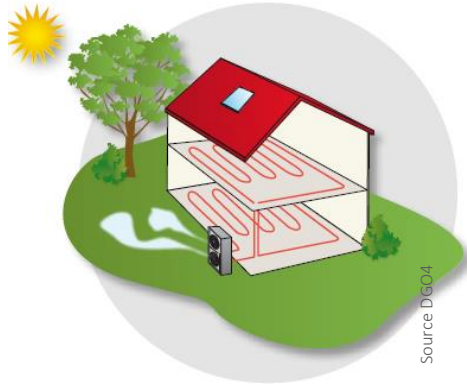
« Chaleur fatale » :

- Egouts
- Centrale, industrie, ...

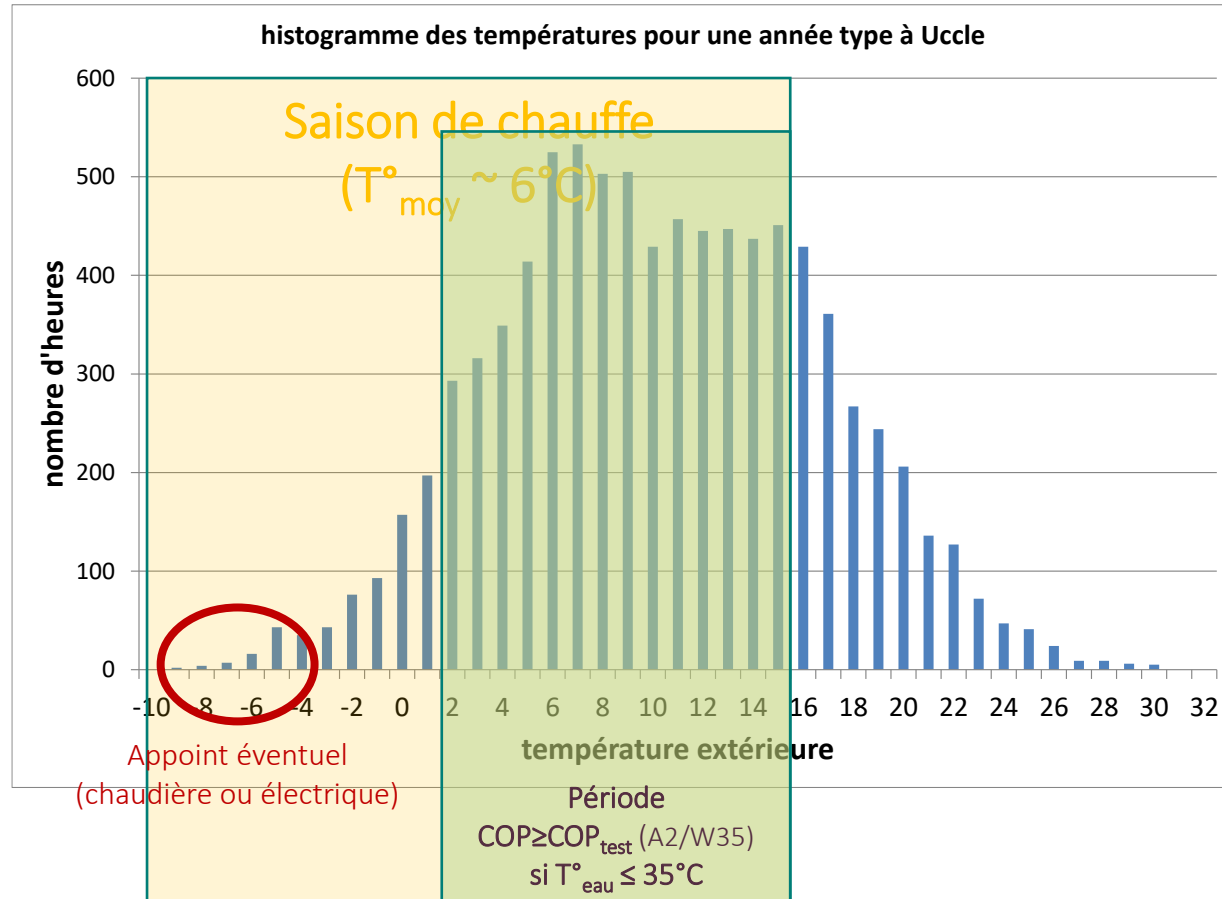


La captation de chaleur

Air dynamique



Température moyenne de la source froide
relativement élevée mais variable et plus basse
lorsque les besoins sont les plus importants





La captation de chaleur

Air dynamique



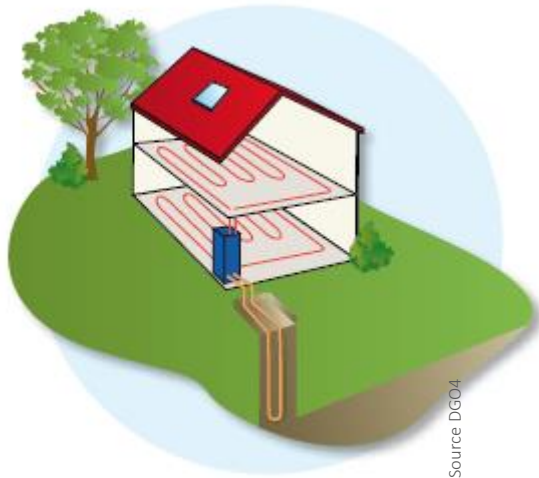
Source DGO4



- **Points forts**
 - En détente directe
 - Coût modéré (~ 1200 - 2000€ HTVA/kWth)
- **Points faibles**
 - Givrage en dessous d'une certaine température de l'air ($< 3-4^{\circ}\text{C}$)
=> cycles de dégivrage
 - Appoint électrique direct (résistances) souvent indispensable (voir dimensionnement)
 - Niveau sonore
(peut être gênant si proximité fenêtre, voisinage, etc.)
 - Esthétique ?



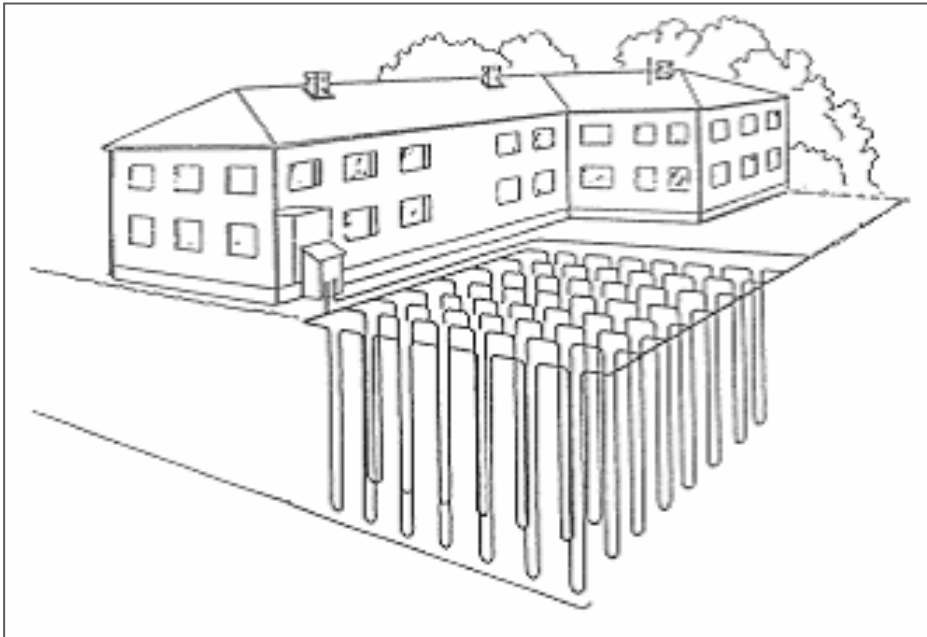
Captation par sonde verticale



- **Points forts**
 - Bonne température moyenne et stable :
 - 2 - 6°C
 - -4 – 0°C en haute Belgique si hiver rigoureux
 - Régénération du sol favorisée par le « free-cooling » estival (voir refroidissement actif dans le tertiaire)
- **Points d'attention**
 - Composition du sous-sol inconnue a priori influence les performances
- **Points faibles**
 - Captation indirecte => consommation pompe
 - Coût des forages
 - => cout global (hors émetteurs) ~ 2500 – 4000 € HVA/kWth



Captation par sonde verticale

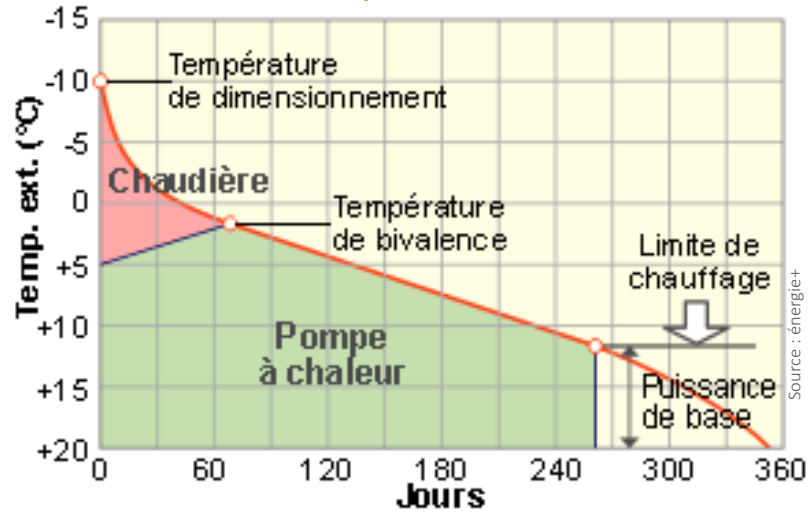


- Pour des bâtiments plus grands, un champs de sonde est nécessaire
- La régénération de la source par geocooling ou froid actif est alors nécessaire
=> solution davantage adaptée au tertiaire



Systemes bivalents

parallèle



⇒ chaudière joue le rôle de résistance d'appoint

⇒ il faut que les régimes de température par temps froid permettent encore le fonctionnement de la PAC

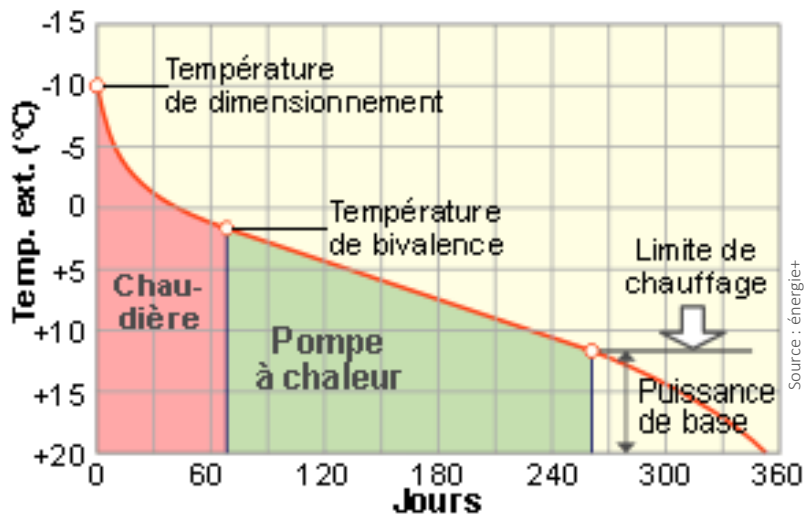
Régulation délicate

- éviter les jeux de « ping-pong »
- problèmes de relance à la limite de la température de bivalence



⇒ PAC complètement stoppée sous la température de bivalence

alternatif



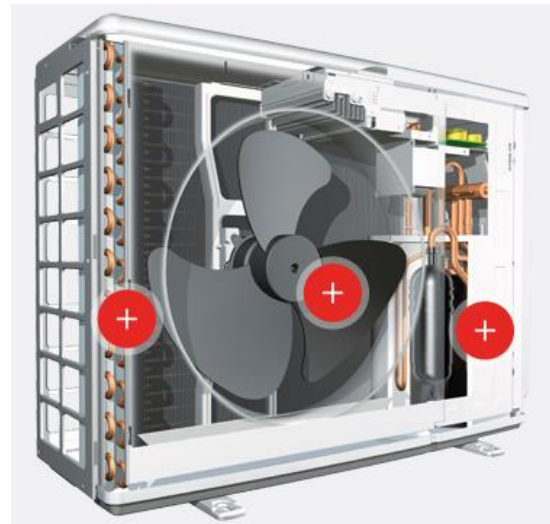
Il existe des appareils combinés PAC+chaudière gaz condensation avec régulation intégrée et optimisée



Systemes bivalents

- PAC hybride

- PAC + chaudière gaz condensation
- Régulation intégrée par le fabricant garantit de bonnes performances
- Au choix, optimisation
 - Économique
 - Environnementale
- Adapté à la rénovation
- Rentabilité par rapport à investissement?

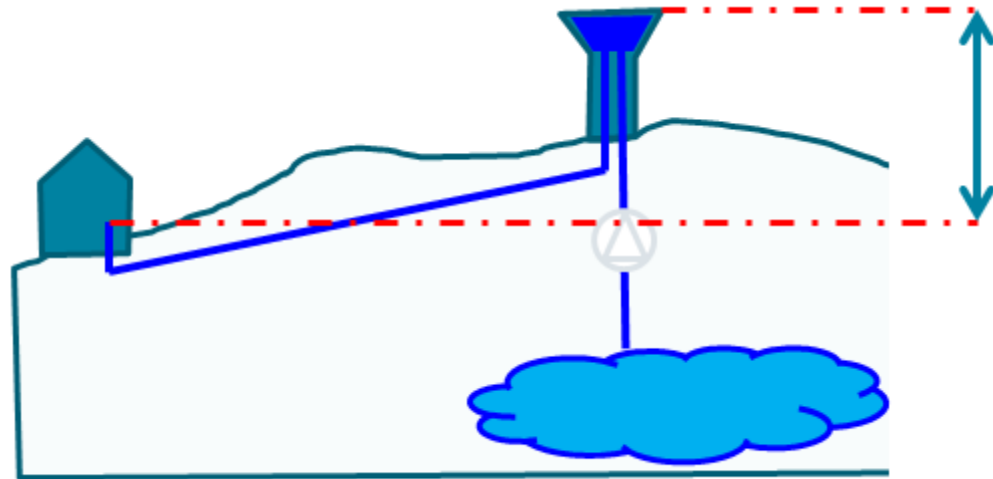


Source : Viessmann



Optimisation de la source chaude

Température de la source chaude



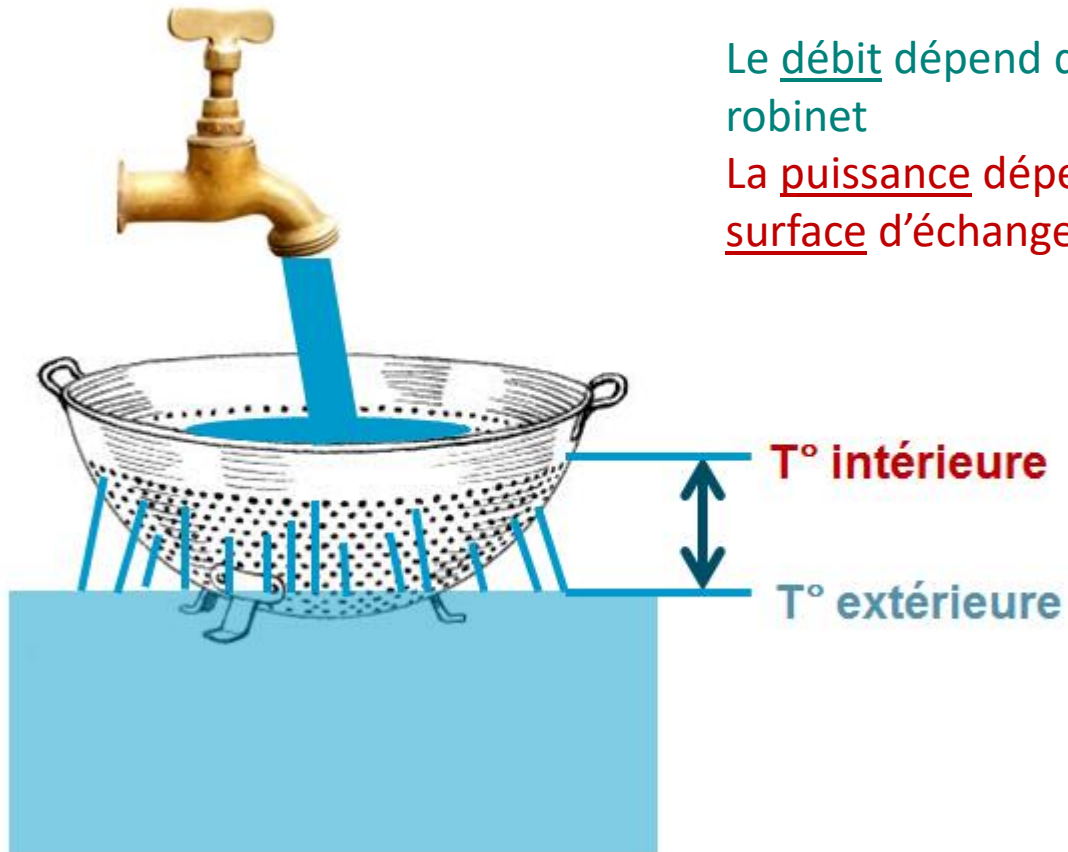
= température requise par le système d'émission



Les systèmes d'émission et de régulation



Optimisation de la source chaude



Le débit dépend de la pression et du diamètre du robinet

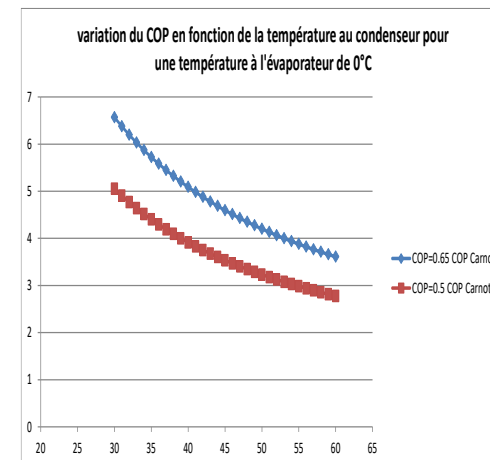
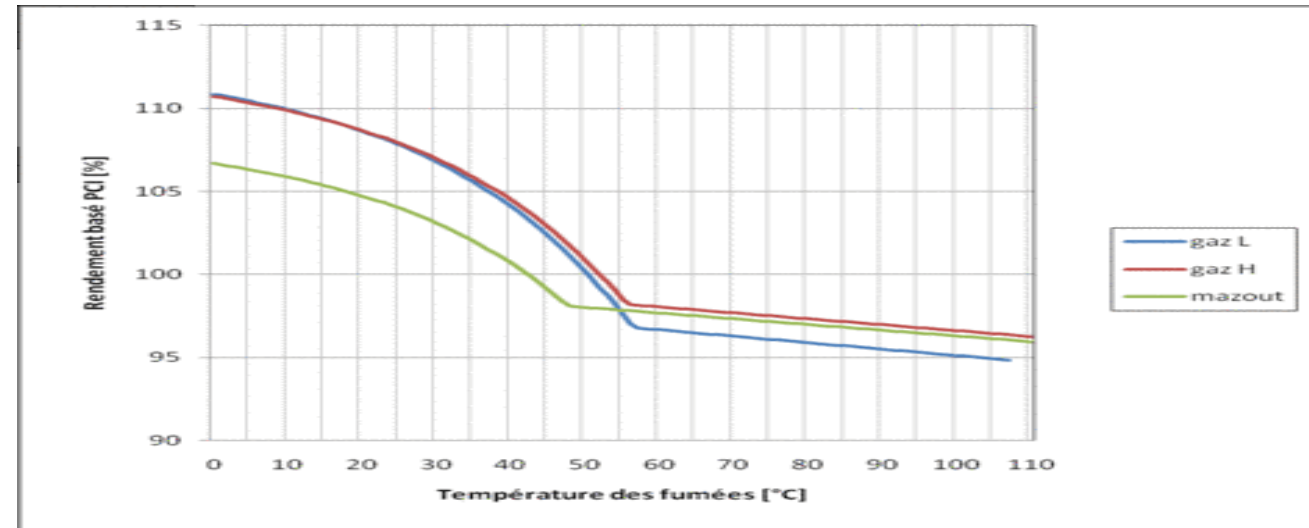
La puissance dépend de la température et de la surface d'échange



L'émission de chaleur

Un seul mot d'ordre : basse température

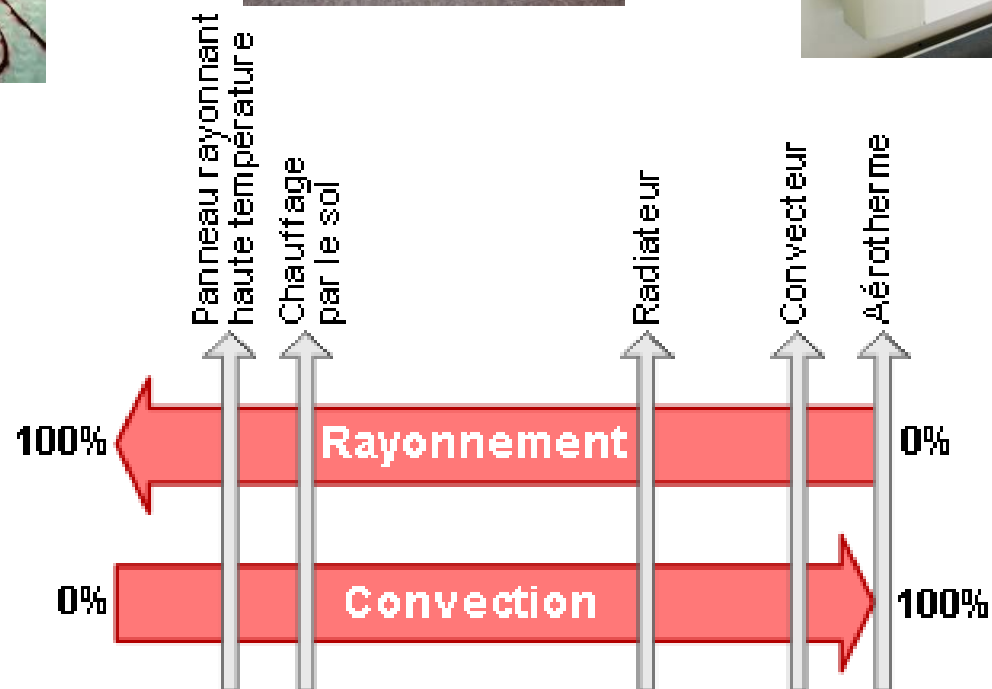
- Plancher chauffant
- Radiateurs surdimensionnés
- Ventilo-convecteurs ou convecteurs boostés
- Air pulsé
- A proscrire :
 - Convecteur standard
 - Installation monotube





L'émission de chaleur

Les différents types d'émetteurs



Source : formation certificateur PEB bâtiments résidentiels existants en Wallonie

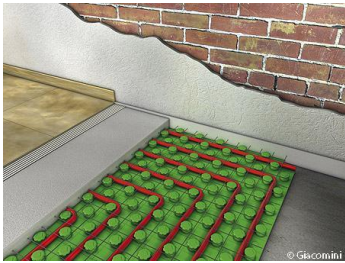
Parts relatives du « rayonnement » et de la « convection » dans le mécanisme de transmission de chaleur pour différents systèmes d'émission



L'émission de chaleur

Inertie des différents systèmes

Forte inertie



Faible inertie

Les besoins en chauffage dans les bâtiments énergétiquement performants fluctuent rapidement (influence forte d'apports ponctuels : internes et solaires)

- Au plus le système d'émission aura une inertie importante, au plus il sera difficile de réguler la température ambiante
→ pertes à la régulation



Chauffage par le sol



→ Intérêts :

- fonctionne à basse T° (rayonnement)
- T° air intérieur plus basse pour un même confort (pas de stratification des t°)

→ Inconvénients :

- forte inertie
 - > surchauffe
 - > régulation délicate
 - > ralenti moins efficace (voir impossible)



Ne pas entraver l'émission par le revêtement de sol :

- Carrelage : idéal
- Parquet : envisageable sous certaines conditions
- Tapis plain : à proscrire



Chauffage par le sol

Minimiser les pertes à l'émission en-dessous d'un plancher chauffant



**Pour les planchers en contact avec l'extérieur,
le sol, un espace non chauffé**

→ La surface inférieure du plancher doit être
fortement isolée **afin de** limiter les pertes à
l'émission

Source : www.massiefpassief.be



Ventilo-convecteurs

- Convection forcée -> puissance importante même à basse température
- Attention au bruit (exigences variables suivant la destination de la pièce : bureau, living, chambre à coucher)
 - => Les faire dimensionner pour une vitesse de ventilateur moyenne





Convecteur boosté

- Puissance renforcée à basse température
- Très silencieux (convient pour les chambres à coucher)
- Régulation électronique des ventilateurs





Radiateurs « surdimensionnés »



- C'est-à-dire dimensionnés pour fonctionner en régime basse température
 - voir puissance en fonction du régime de température : information fournie par le fabricant
il existe des facteurs correctif si les données n'existent pas pour des régimes de températures basses
 - si radiateur existant (rénovation) et information indisponible, il existe des outils. P.ex sur le site energie+ : http://www.energieplus-lesite.be/fileadmin/resources/04_technique/05_chauffage/08_calculs/01_programmes_calcul/chaucalpuissanceradiateur.xls
- En cas de rénovation, après isolation de l'enveloppe, les radiateurs sont souvent suffisamment surdimensionnés
- Encombrement important



L'émission de chaleur

Systemes à détente directe :

Systemes splits ou multi-splits

- Pas de fluide caloporteur intermédiaire : le fluide frigorigène circule entre l'unité extérieure et une ou plusieurs unités intérieures
- Unités intérieures : consoles murales (ventilo-convecteurs)
- Souvent installées pour de la climatisation
- Pas de prime car toujours réversibles





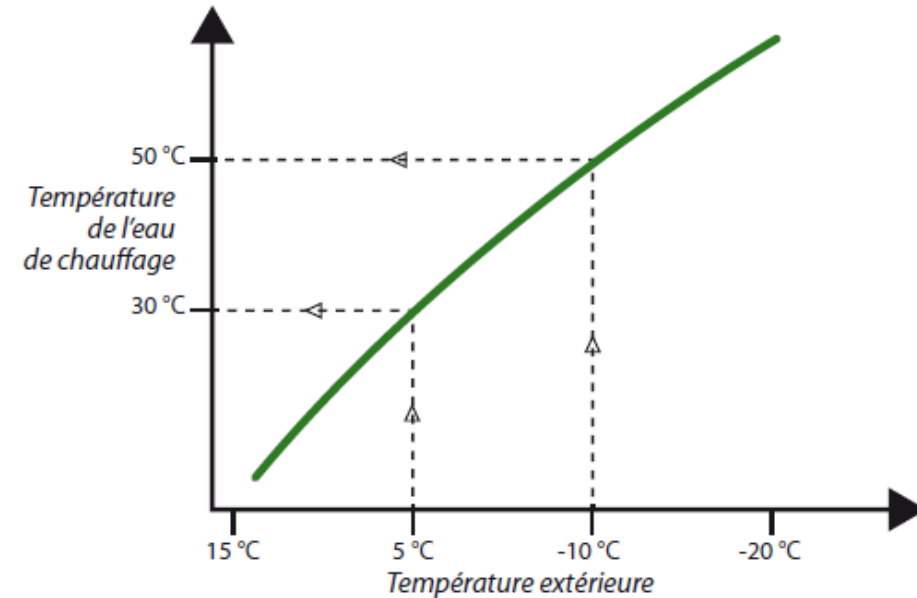
La régulation de la température de l'eau

Régulation en « température glissante » :

- La température de l'eau est fonction de la température extérieure
- Nécessite une sonde de température extérieure (pour les PAC air/eau, elle est intégrée à l'unité extérieure)



Source DGO4



Source DGO4

S'assurer que cette régulation soit bien paramétrée (conforme au dimensionnement des émetteurs) et effective (évitez le passage en mode manuel !)

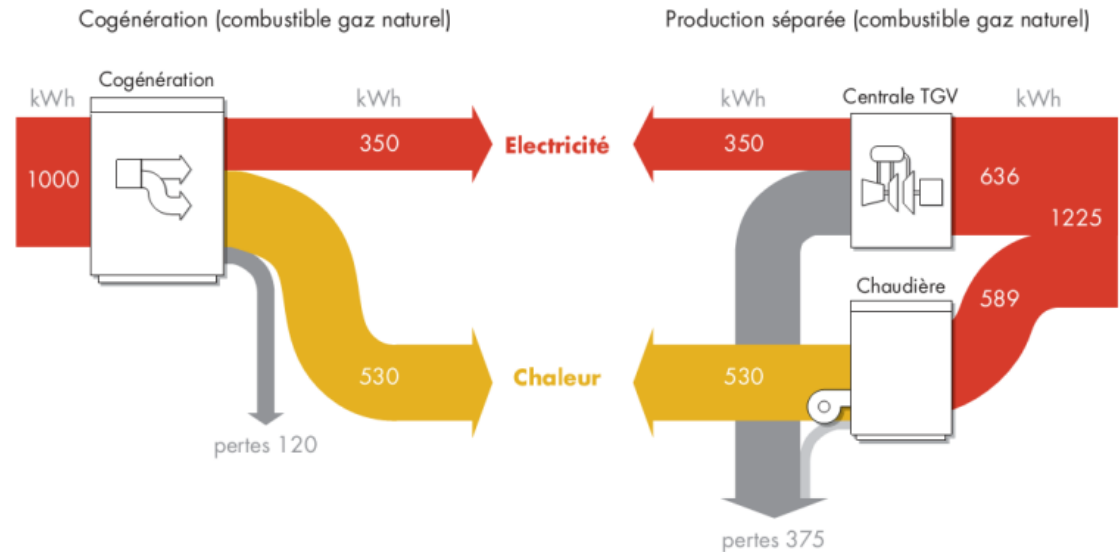
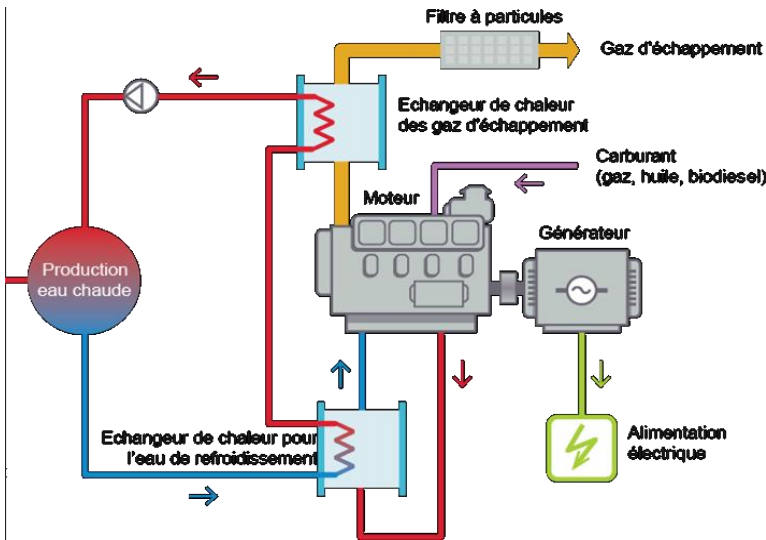


La cogénération



La cogénération

La cogénération est la production combinée d'électricité et de chaleur valorisée à partir d'une même énergie primaire.



Une économie de 225 kWh de gaz naturel (22 %) !

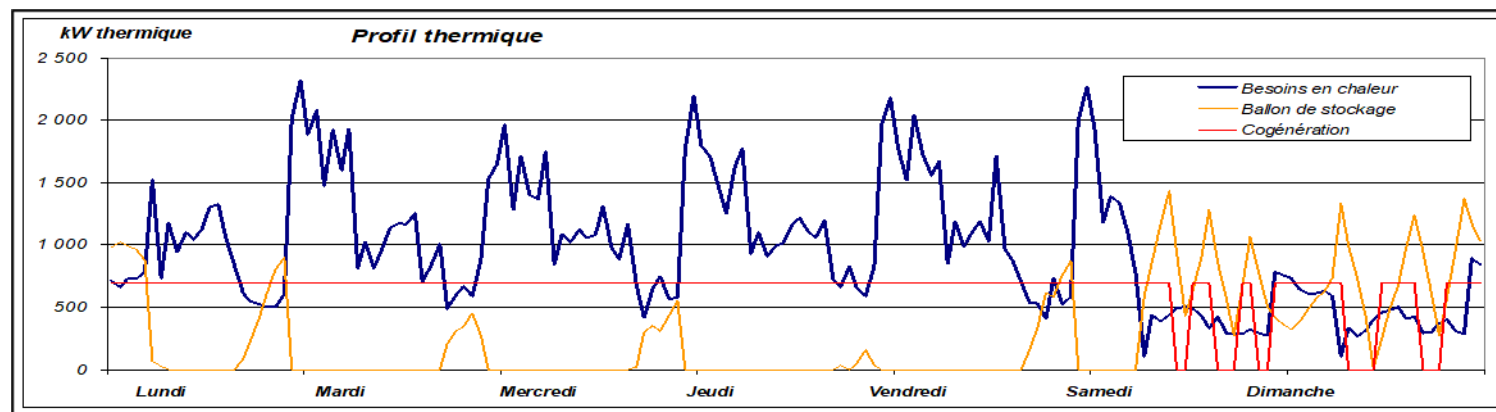
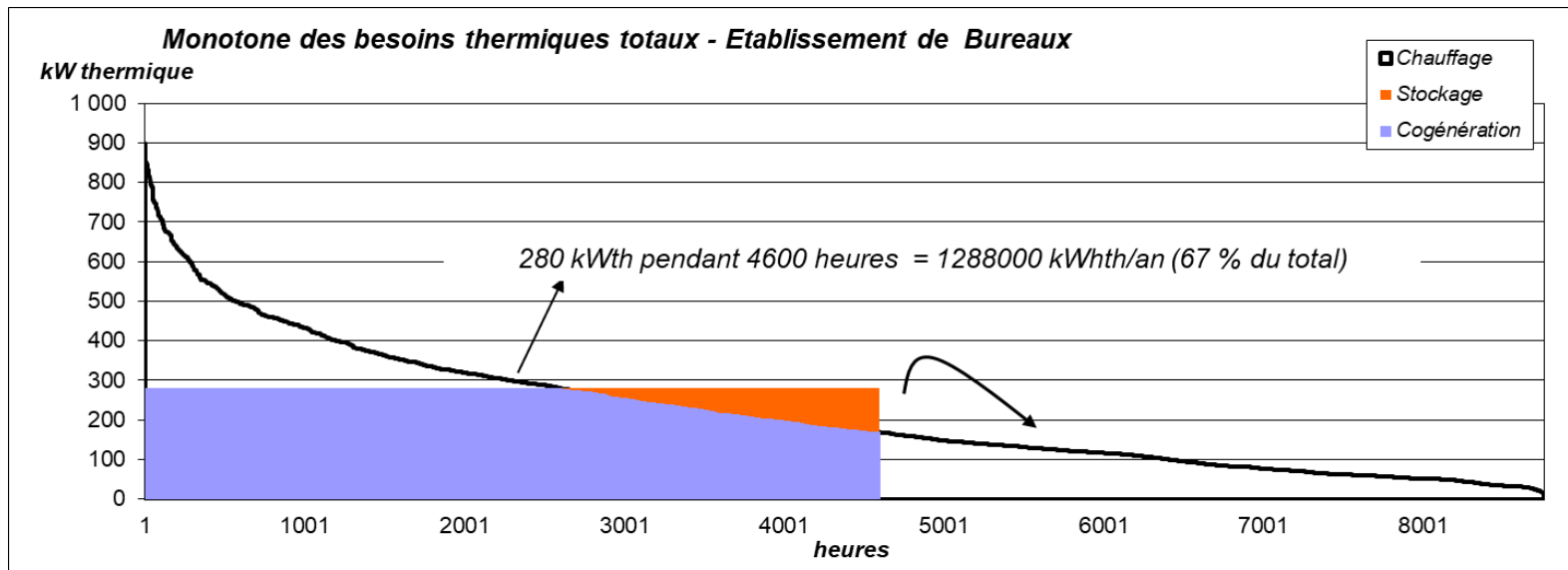
Attention : augmentation de la facture combustible de 411 kWh de gaz \Rightarrow 350 kWh d'électricité produite
 $3 \text{ à } 6 \text{ c€} / kWh_{gaz} \ll 8 \text{ à } 21 \text{ c€} / kWh_e$



La cogénération

La cogénération assure la base des besoins.

Représente généralement 20 à 35% de la puissance de chauffe max nécessaire.





La cogénération

1. Permet de diminuer la facture énergétique globale d'un bâtiment (diminution de la facture d'électricité mais augmentation de la facture de combustible du site)
2. Est favorable pour l'environnement
 1. Nécessite une étude préalable : ATTENTION au risque de surdimensionnement !
 2. Simultanéité des besoins d'électricité et chaleur mais possibilité de revendre l'électricité et/ou de stocker la chaleur
3. Ne remplace pas totalement une chaudière classique
4. Nécessite un investissement initial supplémentaire (p/r chaudière)
5. Nécessite un suivi plus régulier et plus coûteux (p/r chaudière)



Stop : Soutien CV pour la cogen fossile 2025

Si cogen de 35 kWél – 53 kWth qui aurait tourné 10 h (cas fictif!)

- Gain en CO2:

$$G_{CO2} = \frac{Pr_{elec} * C_{gaz}}{55\%} + \frac{Pr_{therm} * C_{gaz}}{90\%} - \frac{Pr_{elec} * C_{cogen}}{\eta_{elec}}$$

- Nombre de CV :

$$N_{CV} = \frac{G_{CO2}}{C_{gaz}}$$

Cgaz (coefficient d'émission du gaz) = 217 kgCO2/Mwh gaz.

=> dans l'exemple fictif chiffré ici : Nb CV octroyés pour les 350 kWhél produits dans cet exemple = 48,9/217 = 0,22 CV
soit si prix min garanti de 65 €/CV= 15€ pour les 350 kWhél produits.

Pour les 350 kWhél produits, on obtient une économie sur facture élec dans le cas d'une autoconsommation à 100% = 350 * 0,33 kWhél = 115€

Ce que la chaudière HR en place aurait consommé = 530/100% * 0,079 =42€

Ce qui donne un cout pour la conso gaz de la cogen de 79€.

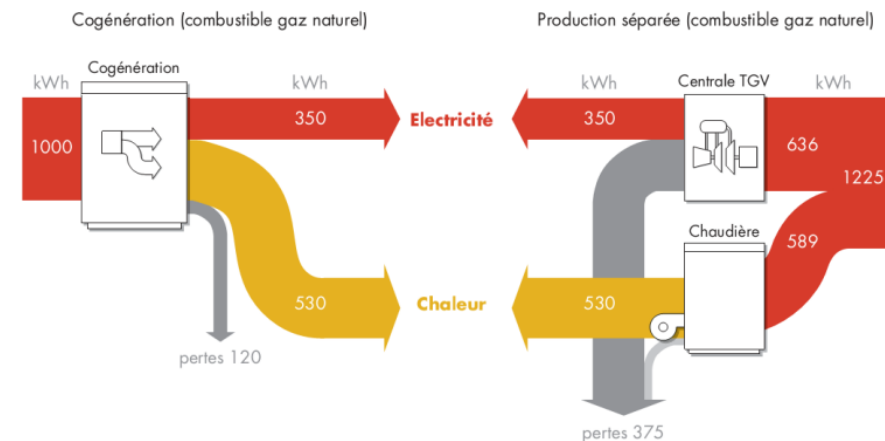
Si on considère des couts d'entretien de 1€/heure de fonctionnement, on compte ici 1€x10h = 10 €

Le gain financier, sans soutien CV, est donc de 115 + 42 -79 -10 = 68€

Si cette cogen avait tourné 5000 h sur une année, vu les montants d'investissement de l'équipement présenté dans l'exemple = 3,5 ans de trs (contre 2.3 ans avec gain CV)

L'intérêt financier reste pour une cogen bien dimensionnée et bien régulée/suivie/entretenu.

Attention à la variabilité des couts combustibles et maximiser l'auto-conso élec !





Éléments de rentabilité économique



Éléments de rentabilité économique

Cout du kWh thermique produit (hypothèses : prix TVAC au détail de l'énergie d'août 2023, source Energie Commune) :

- Cout du kWh PCS de gaz à Bruxelles : 7,5 c€/kWhPCS
- Cout du kWh électrique à Bruxelles : 33,0 c€/kWh

Type de PAC	Intervalles de valeur du cout du kWh thermique produit [c€]	
	Nouvelle construction	Rénovation
AIR – EAU	11,8 – 9,4	13,2 – 11,0
SOL – EAU	9,4 – 7,3	10,3 – 8,3
EAU – EAU	8,7 – 6,6	9,4 – 7,3

A comparer par exemple avec chaudière gaz à condensation (rendement sur PCS ~ 95% => **7,9** c€/kWh_{th})



Éléments de rentabilité économique

Exemple de cout d'investissements (à titre purement informatif):

- PAC air/eau de 10 kW : ~ 12 000 ... 14 000 €
=> (prime Renolution de 35% sur les couts éligibles disponible)
- Chaudière gaz à condensation de 10 kW : ~2000 ... 3000 €

Pour une puissance de 10 kW en considérant 1500 heures de fonctionnement à puissance nominale
=> production de 15 000 kWh de chaleur

Consommation sur une période de 15 ans (calcul simple, sans valeur actualisée, sans cout d'entretien)

	PAC air-eau construction neuve max	PAR air-eau construction neuve min	PAC air-eau rénovation min	PAC air-eau rénovation max	Chaudière à condensation
Consommation finale [kWh]	80 357	64 286	90 000	75 000	236 842
Cout conso [€]	26 518	21 214	29 700	24 750	18 711
Cout total avec investissement (prime renolution 35% déduite) [€]	34 968	29 664	38 150	33 200	21 211



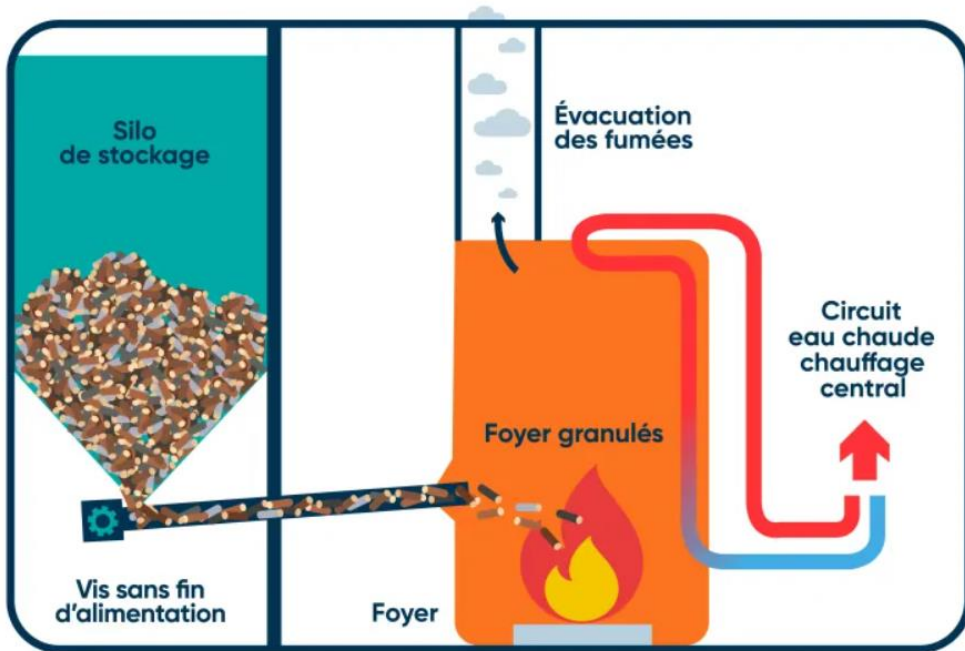
Alternatives Biomasse



Les chaudières biomasse : pellet

Chaudière à pellet

Fonctionnement d'une chaudière à granulés de bois



Source quelleenergie.fr

Principe:

- Combustible solide acheminé mécaniquement
- Régulation et allumage automatique (électrique)
- Certains modèles à condensation
- Rendement élevé (>90%)



Les chaudières biomasse : pellet

Chaudière à pellet



Source quelleenergie.fr

- **Points forts**
 - Combustible renouvelable possiblement local
 - Prix du combustible bas et plus stable
 - Neutre en CO₂ (cycle complet) sauf transport
- **Points d'attention**
 - Modulation de puissance plus limitée
 - Pollution atmosphérique aux particules fines
 - Prévoir un système de filtration des particules fines
- **Points faibles**
 - Volumineux (grande chaufferie + stockage des pellets)
 - Coût de l'installation élevé
 - Gestion des cendres et manutention



ICEDD

**Institut de Conseil et d'Etudes
en Développement Durable**

4 Boulevard Frère Orban
B-5000 Namur
Tél : +32 81 250 480

www.icedd.be
icedd@icedd.be



Déchets et ressources naturelles



Climat et transition énergétique



Mobilité et territoire



Bâtiment et industrie durables



Les chaudières biomasse pellet

Quel prix d'une installation?

- 10.000 à 20.000€ pour une petite installation (~ le double du prix pour un modèle gaz)
- Aucune prime à Bruxelles

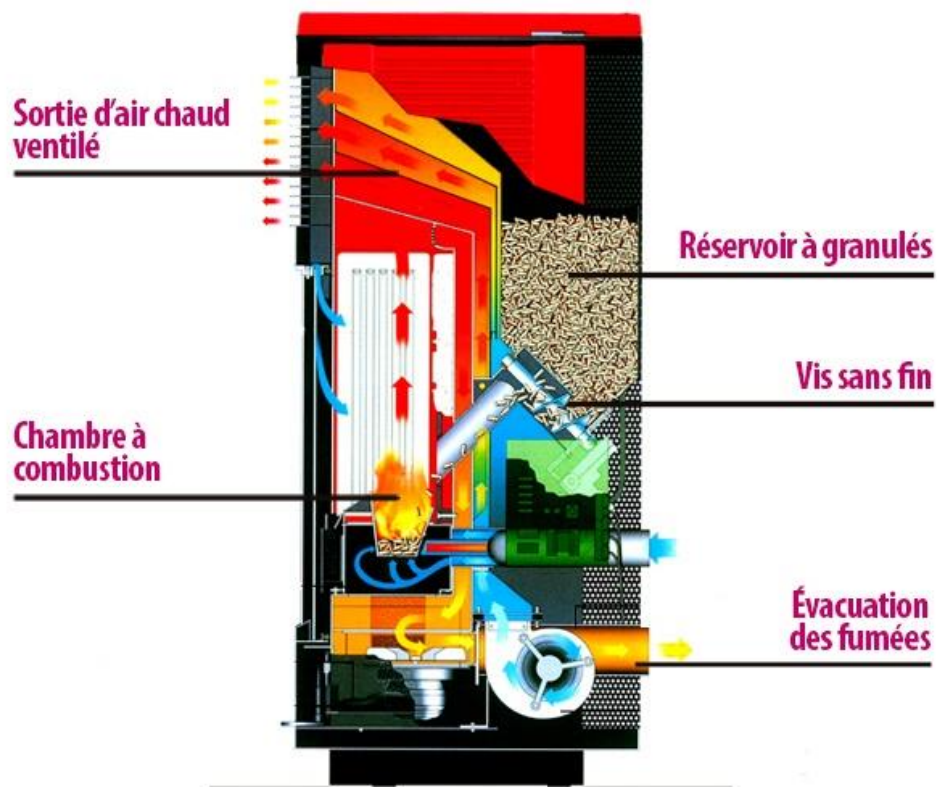
Quel coût d'utilisation?

- Prix assez stable du pellet : 0,09 € /kWh
- Entretien : 180-350 €/an (équivalent aux autres technologies)



Les Poêles à pellets

C'est un chauffage décentralisé



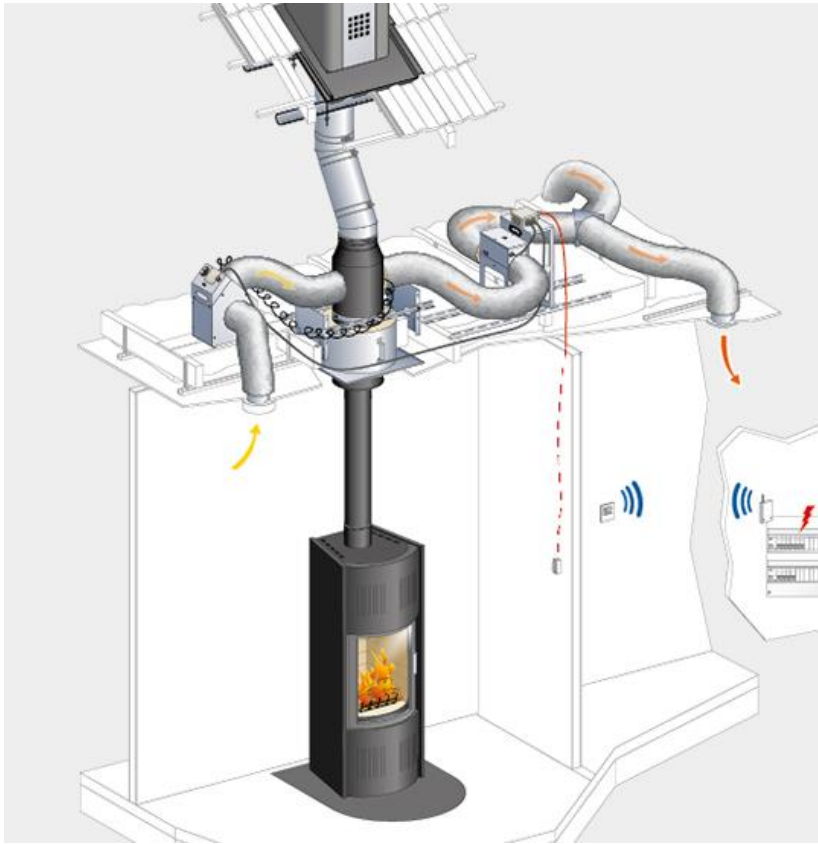
Source kbane

Principe:

- Chauffage local (mais extensible)
- Emission de la chaleur principalement par air chaud et rayonnement
- Possède toutes les régulations et automatismes modernes



Récupération et de distribution d'air chaud



Source Poujoulat

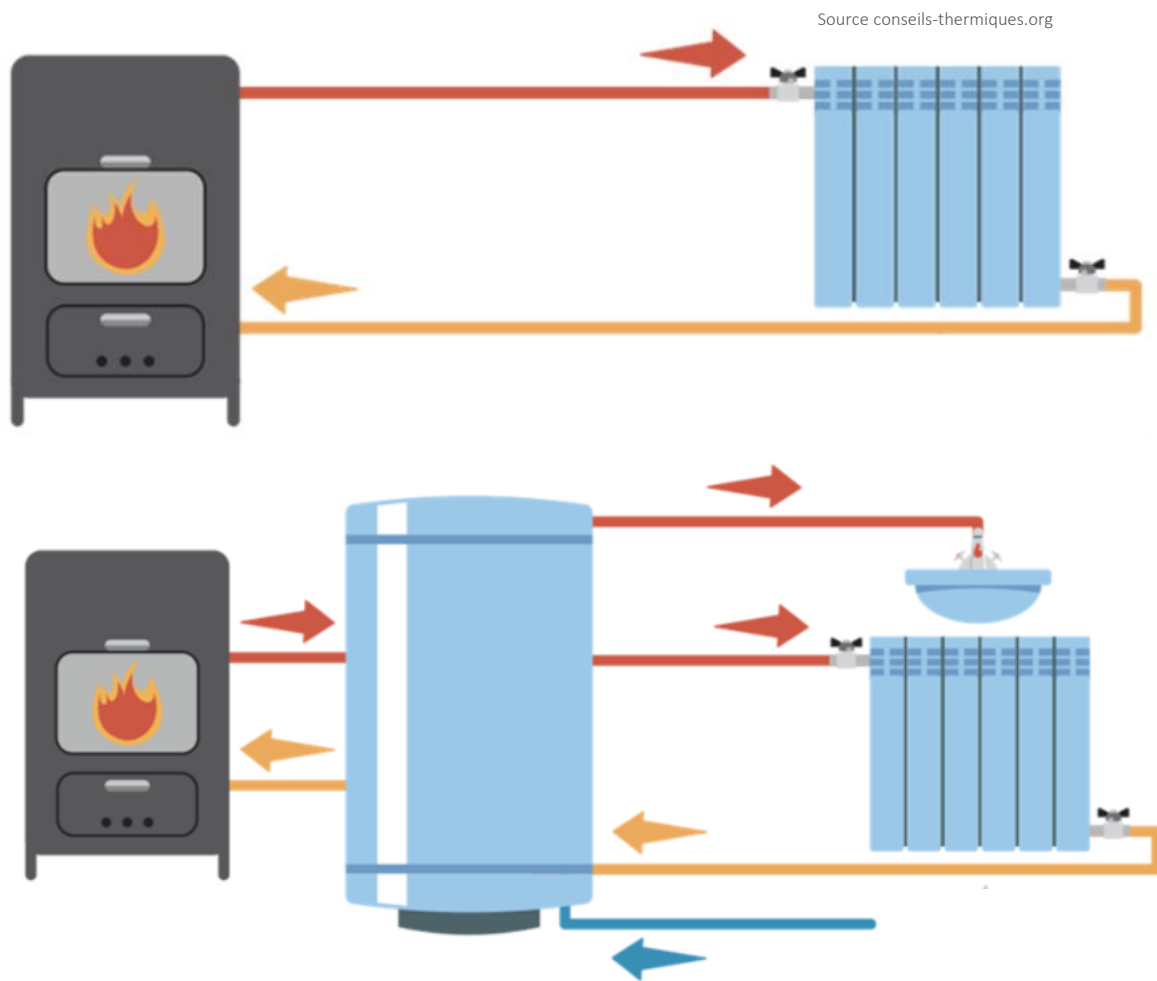
Principe:

- Récupération de la chaleur et redistribution grâce à un système de ventilation
- Régulation indépendante des pièces adjacentes



Les Poêles à pellets **hydro**

Le chauffage peut être étendu à d'autres pièces



Principe:

- Chauffage secondaire via un/des radiateurs

- Option de ballon tampon et/ou de production d'ECS



Les Poêles à pellets (classiques ou hydro)

Les Poêles à pellets



- **Points forts**
 - Combustible renouvelable
 - Neutre en CO₂ (cycle complet) sauf transport
 - Facilement modulable et pilotable
 - Convivial
- **Points d'attention**
 - Répartition de la température inégale
 - Localisation du poêle et répartiteurs de chaleur
 - Pollution atmosphérique aux particules fines
 - Prévoir un système de filtration des particules fines
- **Points faibles**
 - Recharge en pellet tous les 1 à 3 jours
 - Coût de l'installation assez élevé (selon la complexité)
 - Gestion des cendres et manutention
 - Limité aux petites surfaces

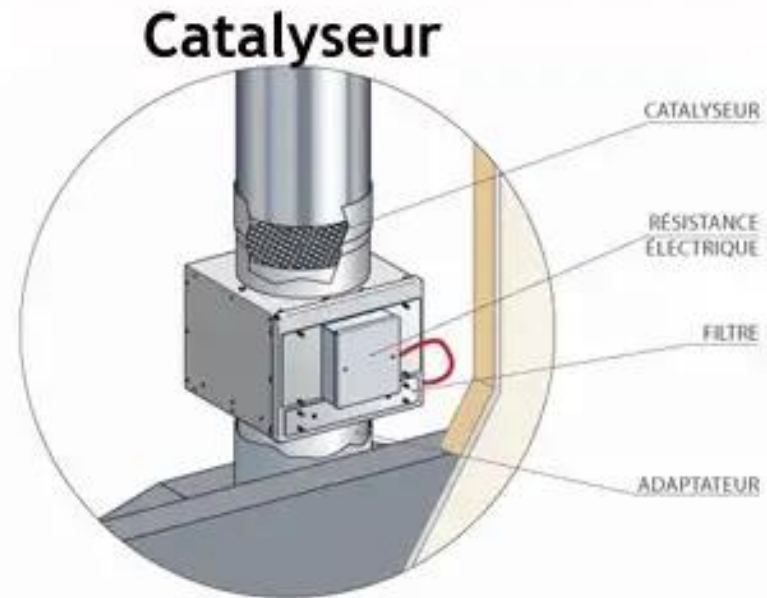
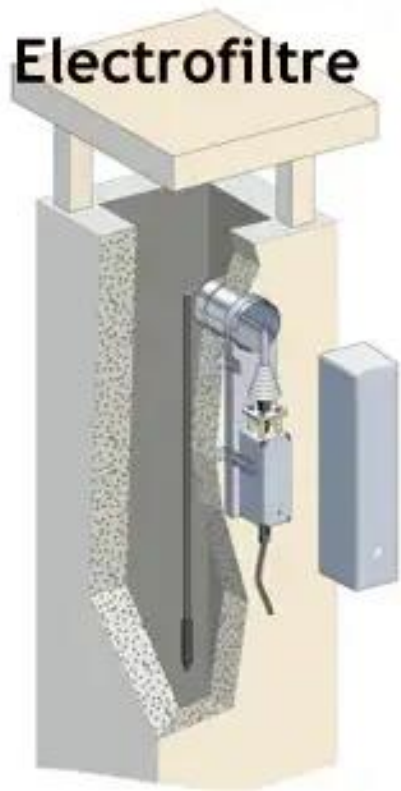


Slides additionnelles



Les filtres à particules fines

2 technologies de filtres



(c) Poujoulat

Source poeleabois.com

Principe:

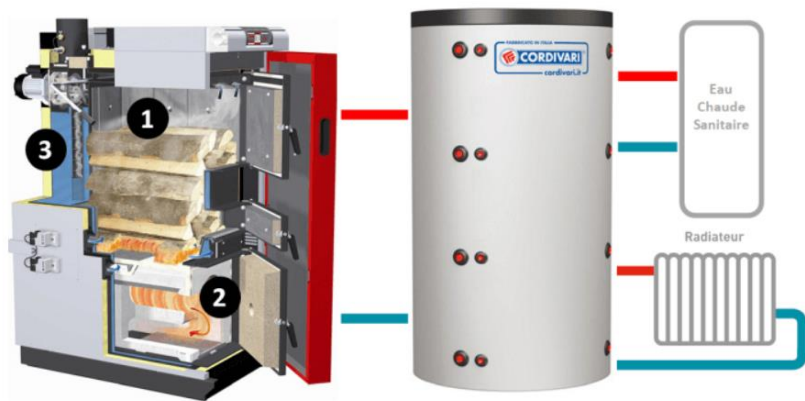
- Permet de réduire fortement l'émission des particules fines (>80%)
- Doit être renouvelé régulièrement



Les chaudières biomasse : buches

Chaudière à buches

Source Bobex,be



Chaudière bûches

Ballon tampon

Source : conseils-thermiques.org

- **Points forts**
 - Combustible renouvelable
 - Valorisation de déchets verts locaux
 - Très faible prix du combustible
 - Neutre en CO₂ (cycle complet) sauf transport
- **Points d'attention**
 - Adapter la puissance aux besoins
 - Pollution atmosphérique aux particules fines
 - Prévoir un système de filtration des particules fines
- **Points faibles**
 - Très volumineux (grande chaufferie + stockage du bois+ ballon de stockage)
 - Pas de modulation de puissance !
 - Coût de l'installation élevé
 - Manutention des buches et gestion des cendres