

# Les stockages d'électricité thermodynamiques

- 1<sup>ère</sup> partie : Compressed Air Energy Storage (CAES)
- 2<sup>ème</sup> partie : Stockage Electricité par Pompage Thermique (SEPT)

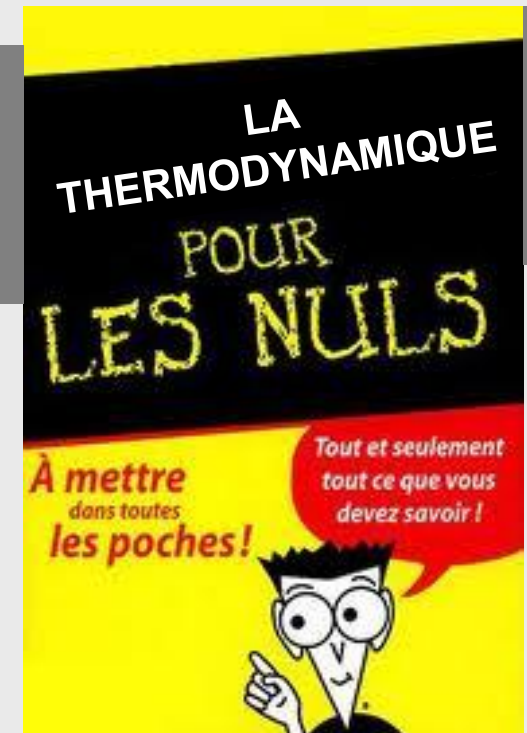
*Jacques Ruer – IDEES – 9 février 2015*

# Les stockages d'électricité thermodynamiques

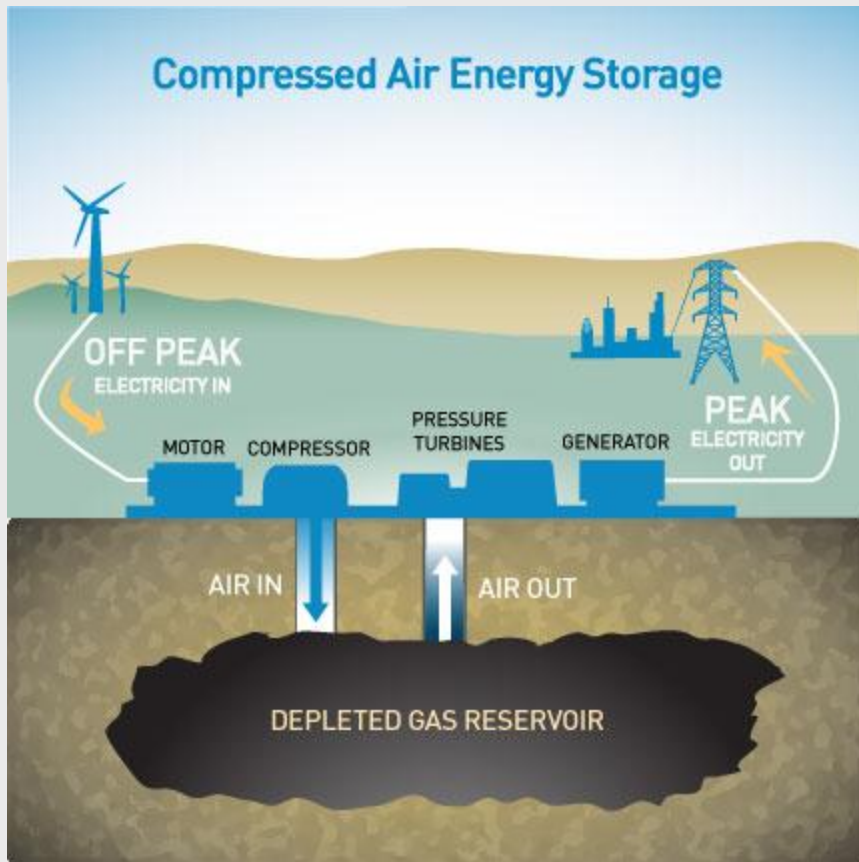
- Systèmes de stockage mettant en œuvre un gaz qui subit des changements de pression, de volume et de température

## La thermodynamique: C'est très simple

- Chauffer un corps solide demande de l'énergie calorifique
- Un corps chaud reste chaud s'il est bien isolé thermiquement
- Comprimer un gaz demande de l'énergie mécanique
- La détente d'un gaz peut en fournir
- Un gaz s'échauffe lorsqu'il est comprimé
- Un gaz se refroidit quand il est détendu en fournissant un travail externe
- Un gaz circulant au contact d'une surface plus chaude que lui s'échauffe
  
- La thermodynamique est la science qui s'intéresse à tout ceci

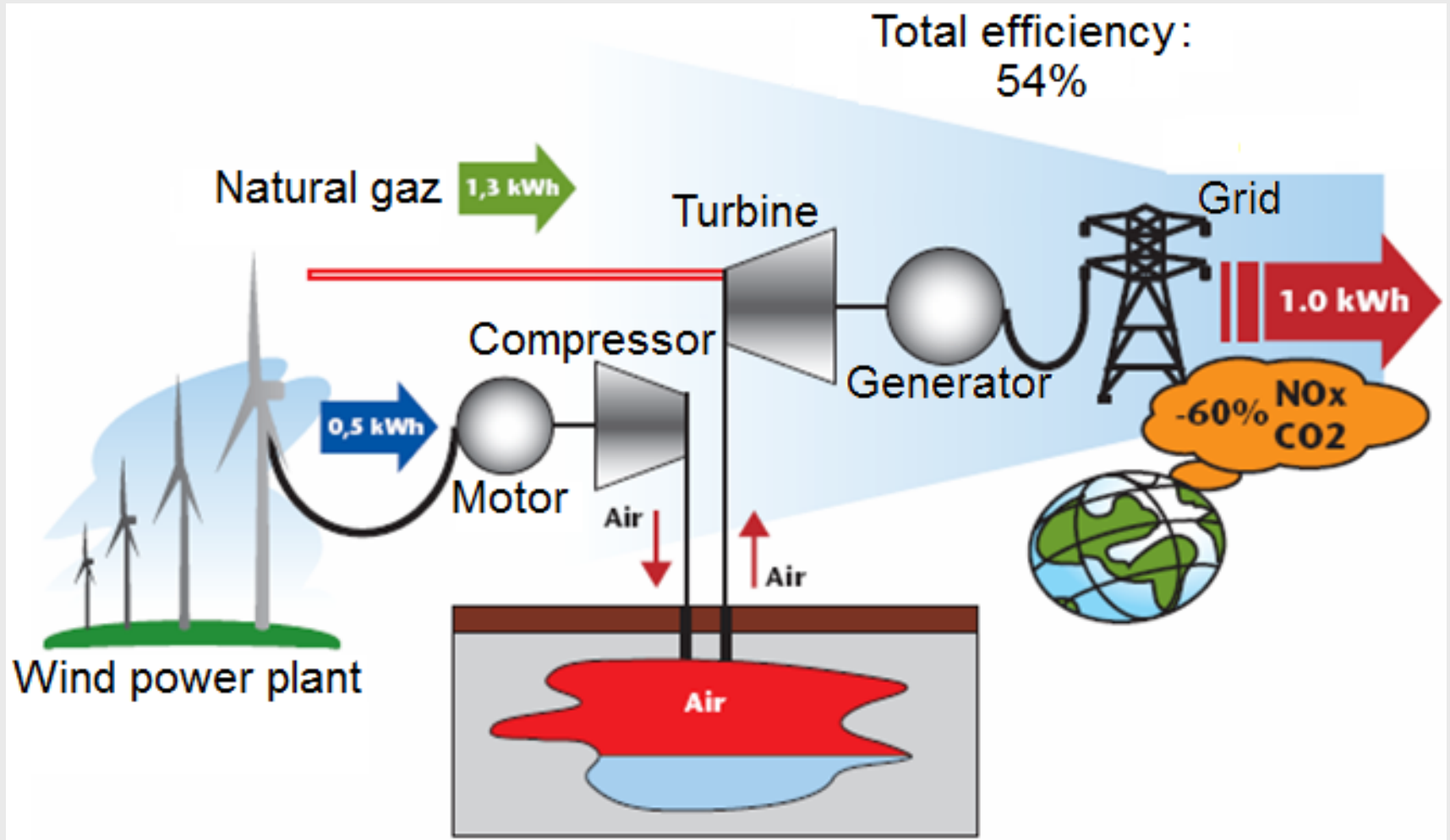


# CAES : compressed air energy storage

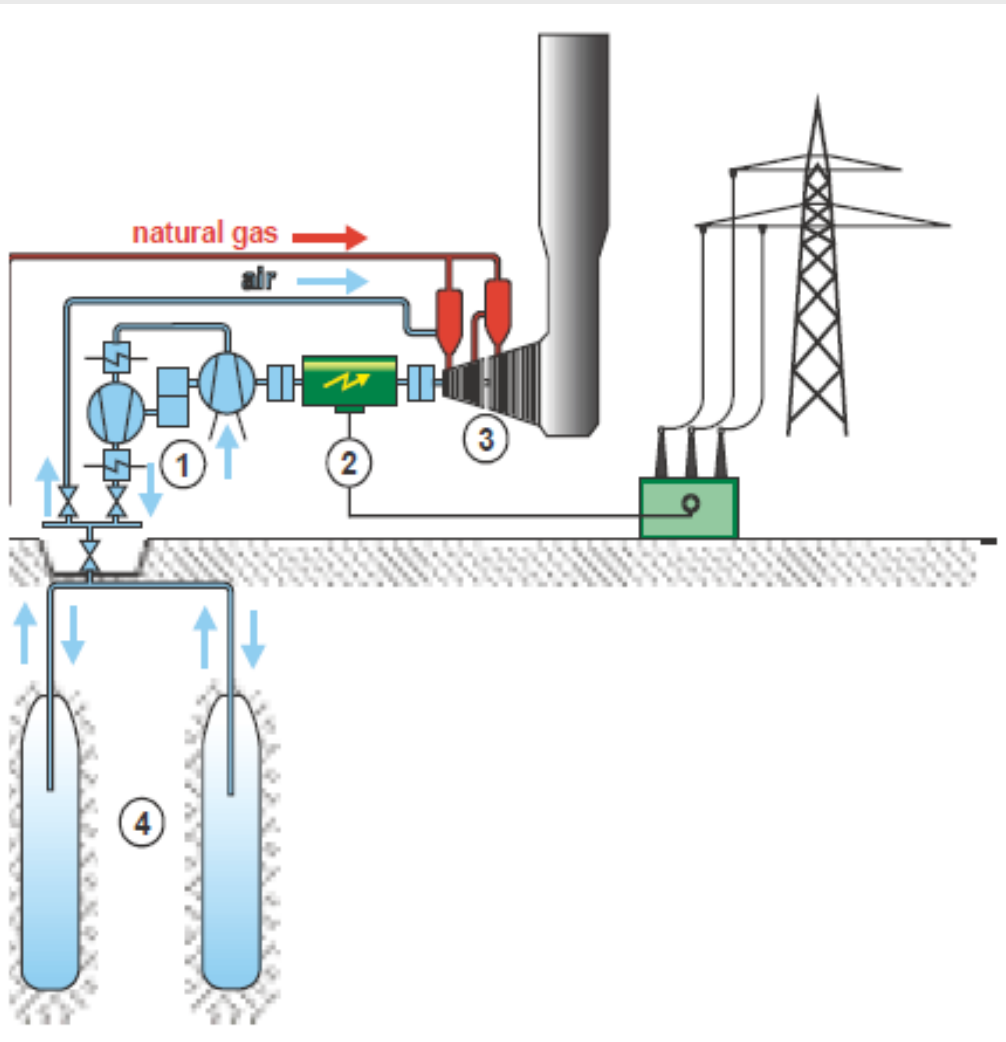


- Electricité utilisée pour comprimer de l'air
- Air comprimé stocké dans de grands réservoirs souterrains
- Electricité restituée en détendant l'air comprimé

# Simple CAES Process



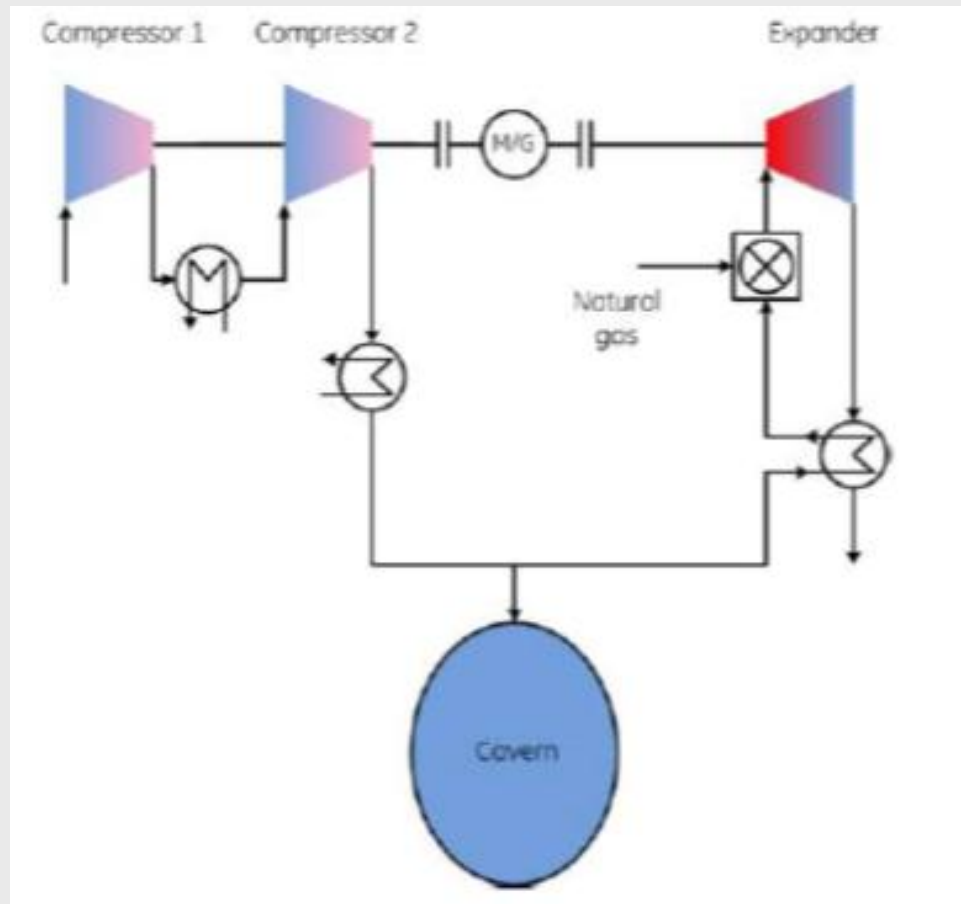
# L'usine de Huntorf (D) - 1978



**Table: Specifications of the Huntorf CAES plant**

output	
➤ turbine operation	290 MW ( $\leq 3$ hrs)
➤ compressor operation	60 MW ( $\leq 12$ hrs)
air flow rates	
➤ turbine operation	417 kg/s
➤ compressor operation	108 kg/s
air mass flow ratio in/out	1/4
number of air caverns	2
air cavern volumes (single)	$\approx 140\ 000\ \text{m}^3$ $\approx 170\ 000\ \text{m}^3$
total cavern volume	$\approx 310\ 000\ \text{m}^3$
cavern location – top	$\approx 650\ \text{m}$
- bottom	$\approx 800\ \text{m}$
maximum diameter	$\approx 60\ \text{m}$
well spacing	220 m
cavern pressures	
➤ minimum permissible	1 bar
➤ minimum operational (exceptional)	20 bar
➤ minimum operational (regular)	43 bar
➤ maximum permissible & operational	70 bar
maximum pressure reduction rate	15 bar/h

# 2<sup>nd</sup> Generation CAES process with Recuperator





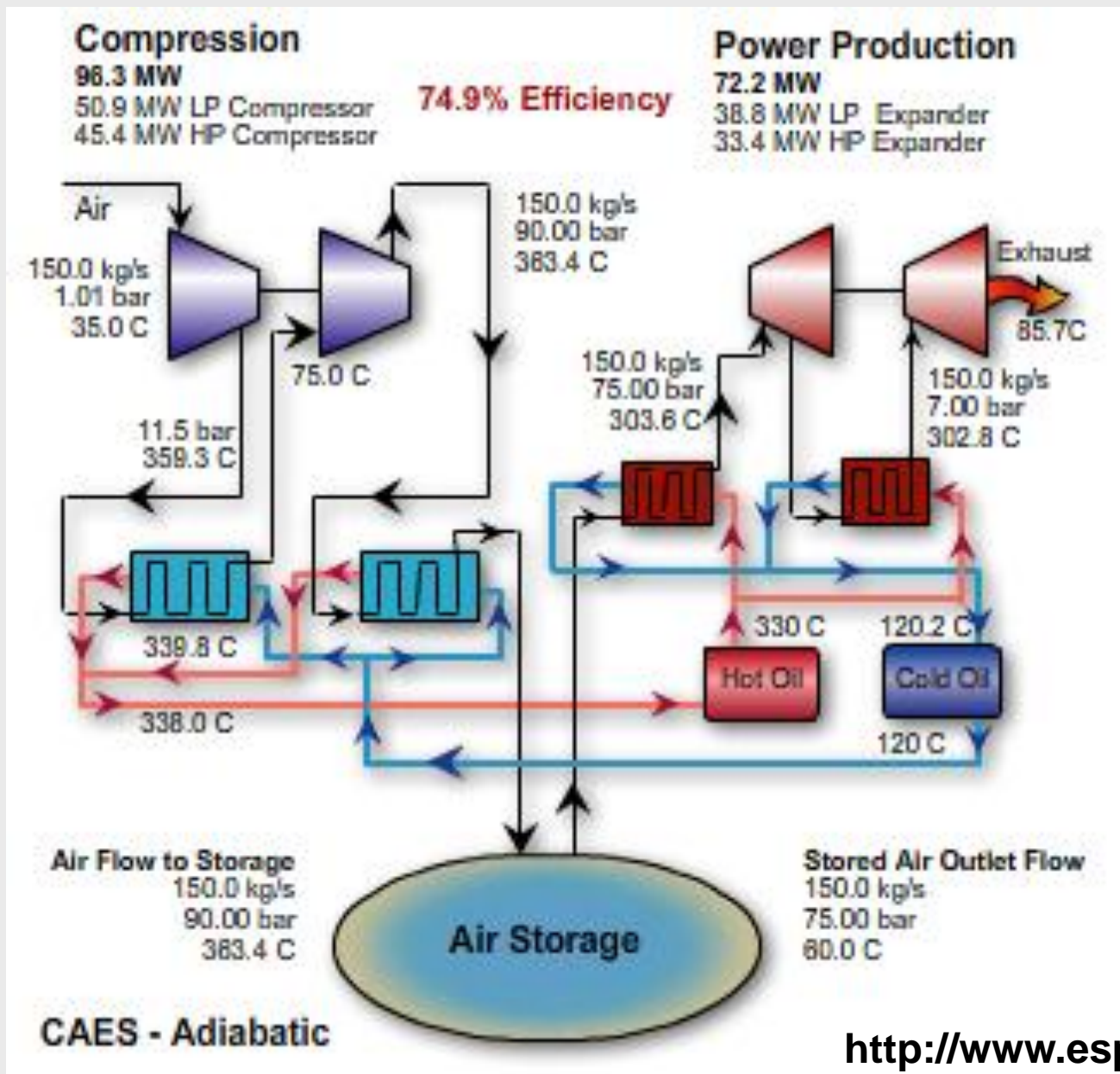
# L'usine de Power South (USA) - 1991



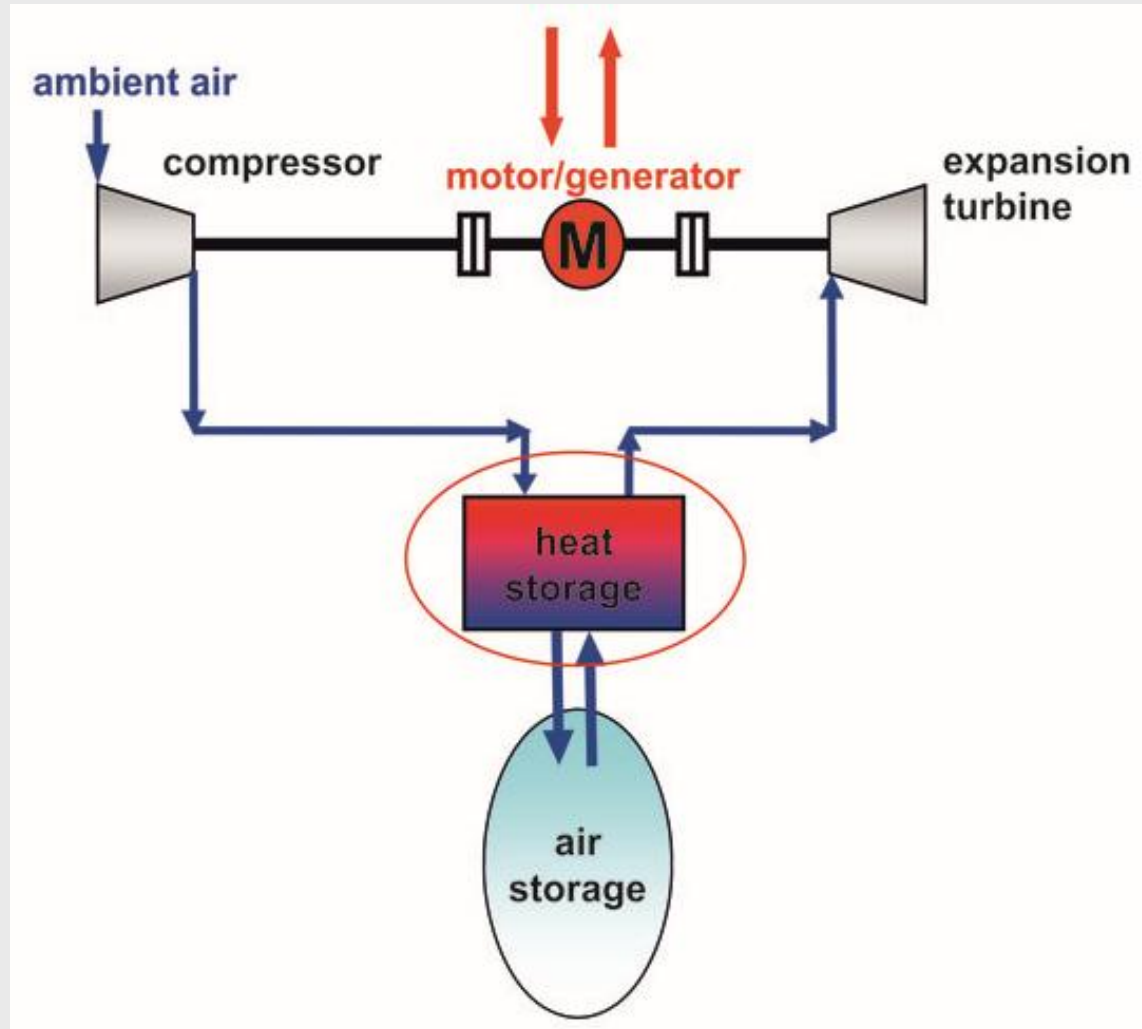
Alabama Compressed Air Energy Storage Plant Peak Power 110 MW  
26 hrs of continuous Power Generation; Heat rate is 4000 Btu/kWh  
Off-Peak Power 51MW, Capital Cost \$800/kW



# Adiabatic CAES

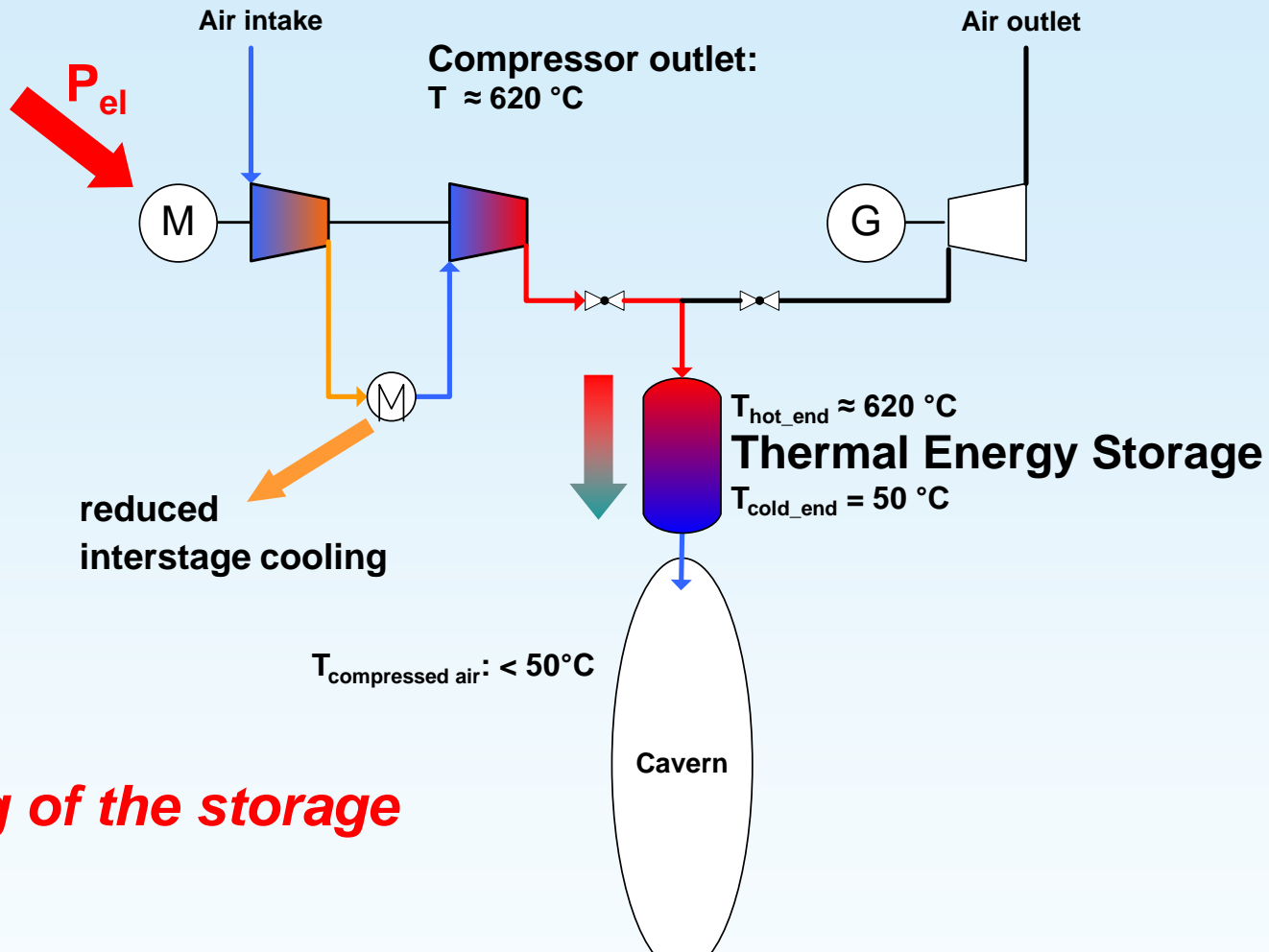


# Advanced Adiabatic CAES



# ADELE – Charge Cycle

## Adiabatic Compressed Air Energy Storage for Electricity Supply

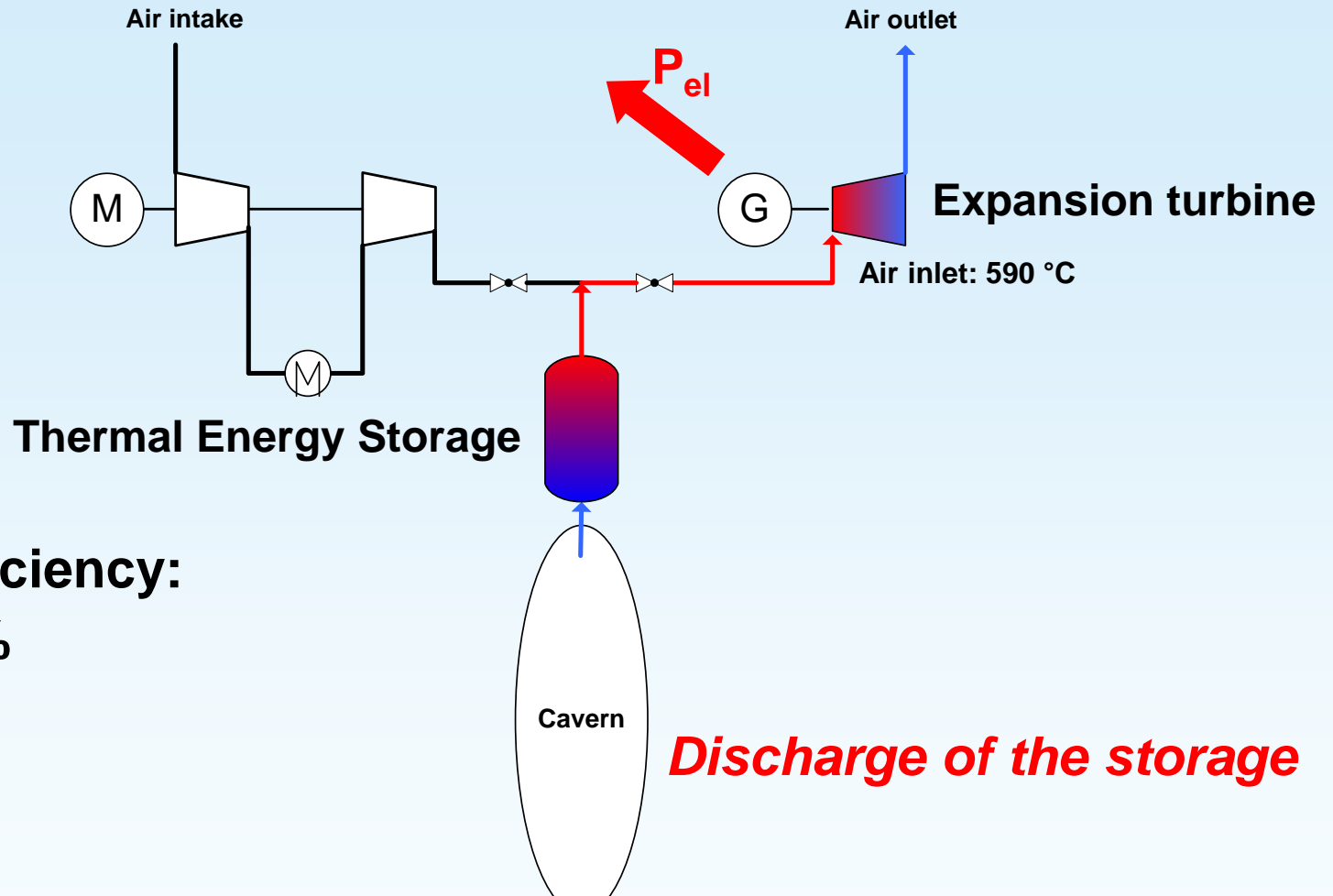


***Loading of the storage***

Minimisation of interstage cooling during air compression,  
Compression heat is stored for later usage

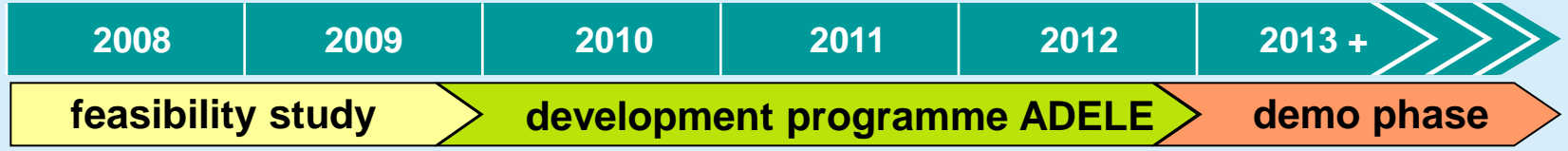
# ADELE – Discharge Cycle

## Adiabatic Compressed Air Energy Storage for Electricity Supply



**Total efficiency:**  
**app. 70%**

The thermal energy storage heats up the compressed air that is expanded in a turbine without combustion of natural gas



## Development Programme Adiabatic Compressed Air Energy Storage

- 200 MW compressor power, approx. 250 MW turbine power
- approx. 1 ...2 GWh capacity ( $\cong$  4 ... 8 full load hours)

### Project Partners:

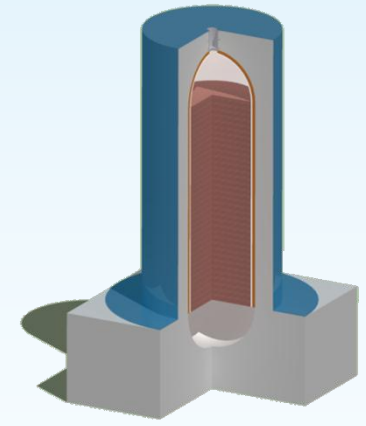
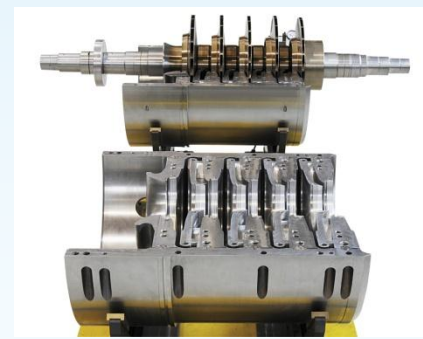
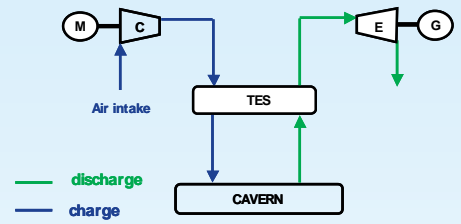
- RWE Power (coordination), GE Oil & Gas and GRC, DLR, Züblin, OIH, ESK

### Budget

- budget app. 10 mil. €, funding announced by BMWi

### Status

- project started in 12/2009



**Goal: Solve all remaining technical / economical issues, design a first-of-its-kind demo plant, develop the technology up to “approval to quote” level**



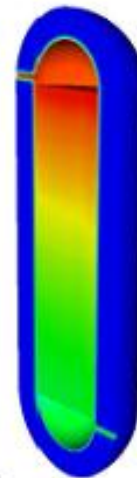
## Expected Design Conditions for the TES [250 MW layout]



Source: Ed. Züblin

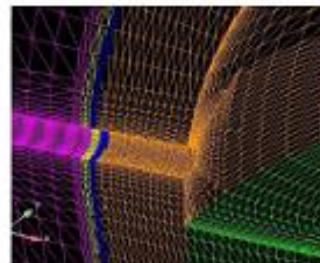
Design criteria of the Thermal Energy Storage (TES) from today's perspective:

- operating temperature range up to 620°C
- large operating pressure range up to about 80 bar
- design as pressure vessel with armed concrete shell
- isolation between hot inventory and pressure concrete shell
- system for condensate drainage



- high thermal power and storage capacity
- small pressure drop and heat losses
- small derivation of output temperature during TES discharge
- long-live materials at high T, P and moisture
- breakthrough of particles into the turbine

Computational Fluid Dynamics Analysis using „Syrthes“ and „Code\_Saturne“ in cooperation with



## Wie man Energie aus Luft gewinnt - 19/09/2014

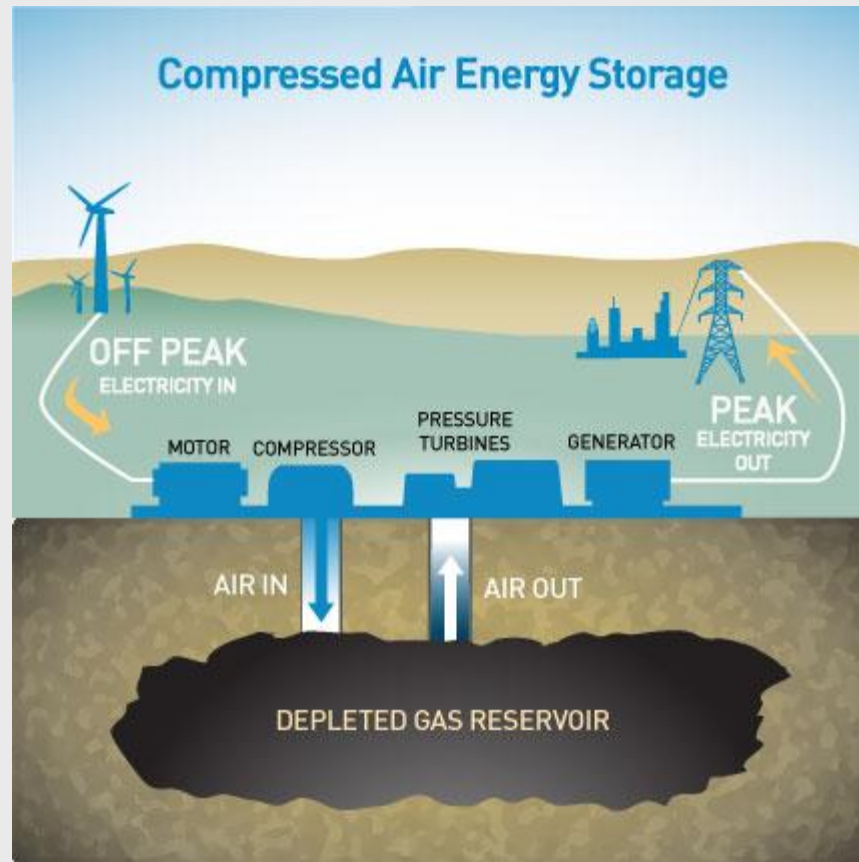
- Das Problem: Adele kommt nicht voran. Zwar haben die Vorarbeiten, an denen unter anderem auch das Institut für Technische Thermodynamik des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt (DLR) teilgenommen hat, eine grundsätzliche technische Machbarkeit bescheinigt.
- Doch deuten die gewonnenen Erkenntnisse, so ein Sprecher des RWE-Konzerns, darauf hin, dass ein solches Speicherverfahren unter den derzeitigen Prämissen nicht wirtschaftlich ist. Das Projekt liegt damit faktisch auf Eis.

**LE PROJET ADELE EST ABANDONNE**



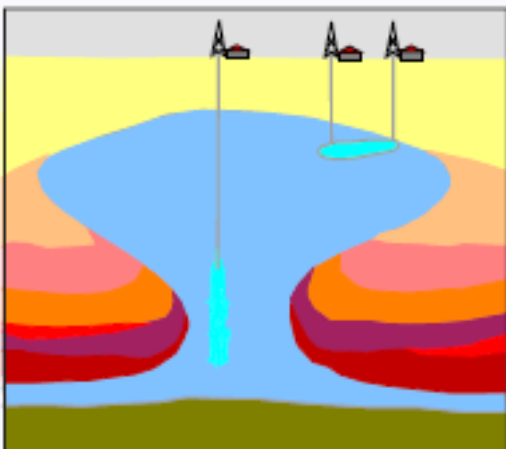
# Projet USA

- PG&E 300MW – 10 heures - 2020

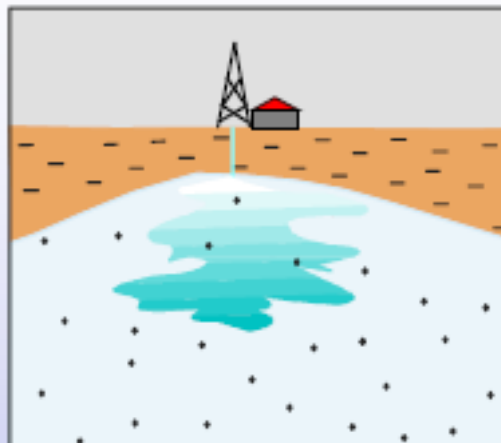




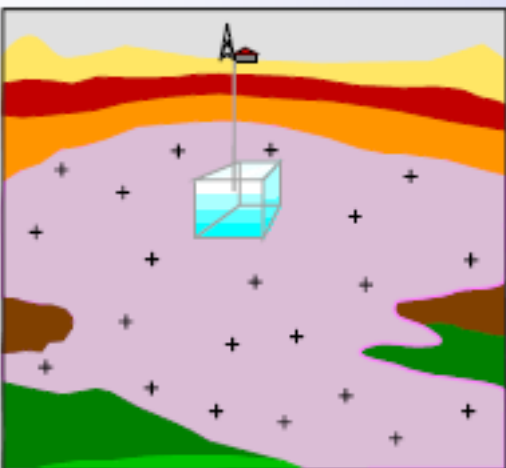
# Types de réservoirs



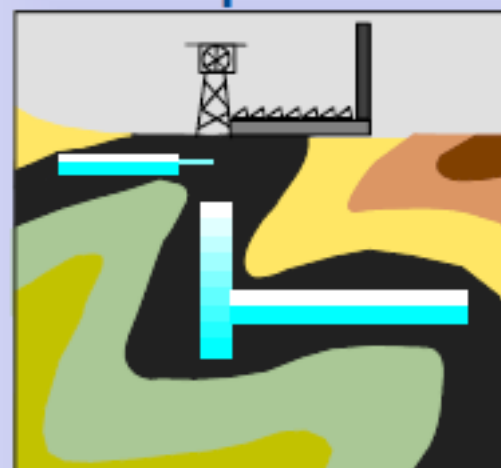
Cavernes dans le sel



Aquifères

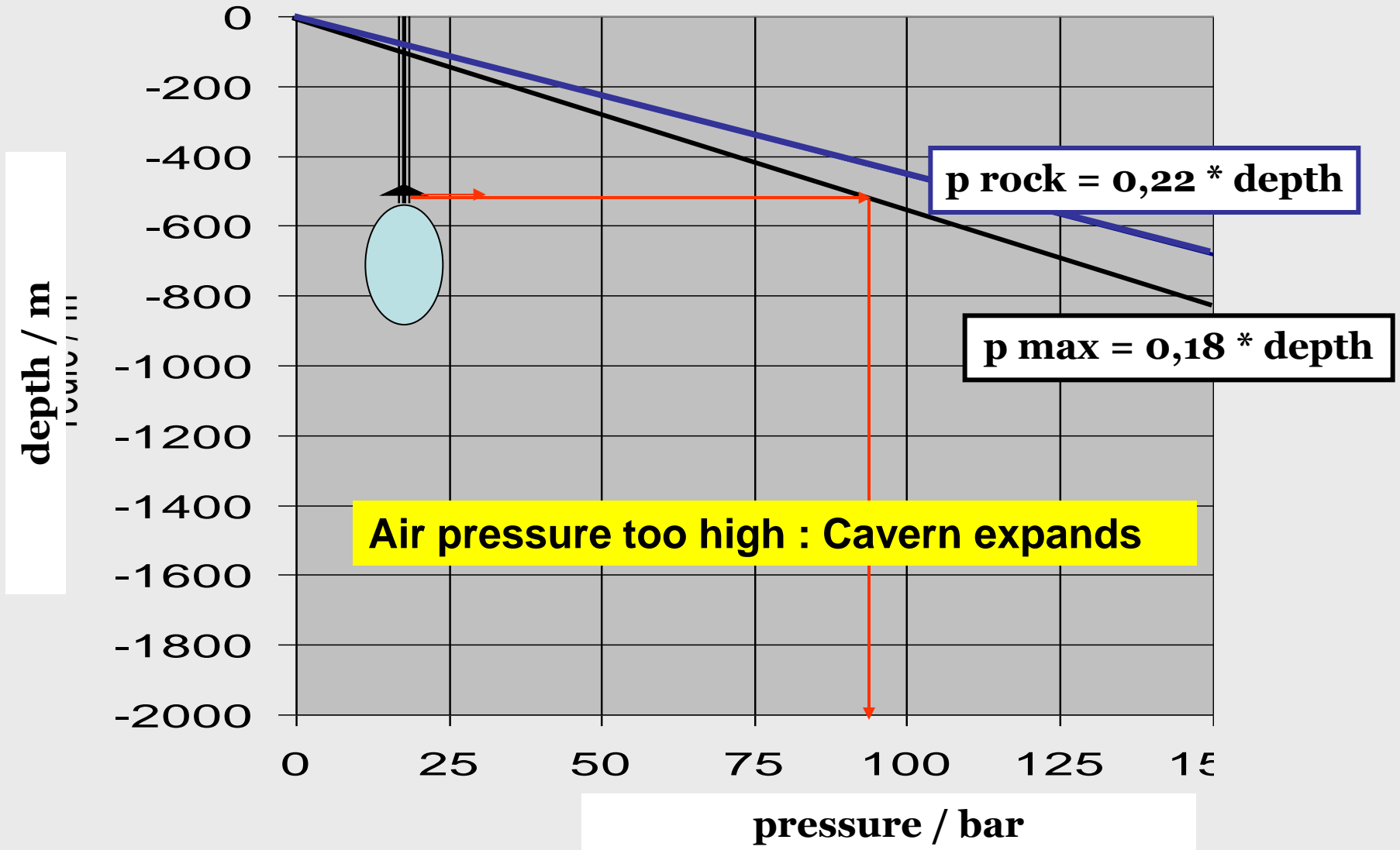


Cavernes minées

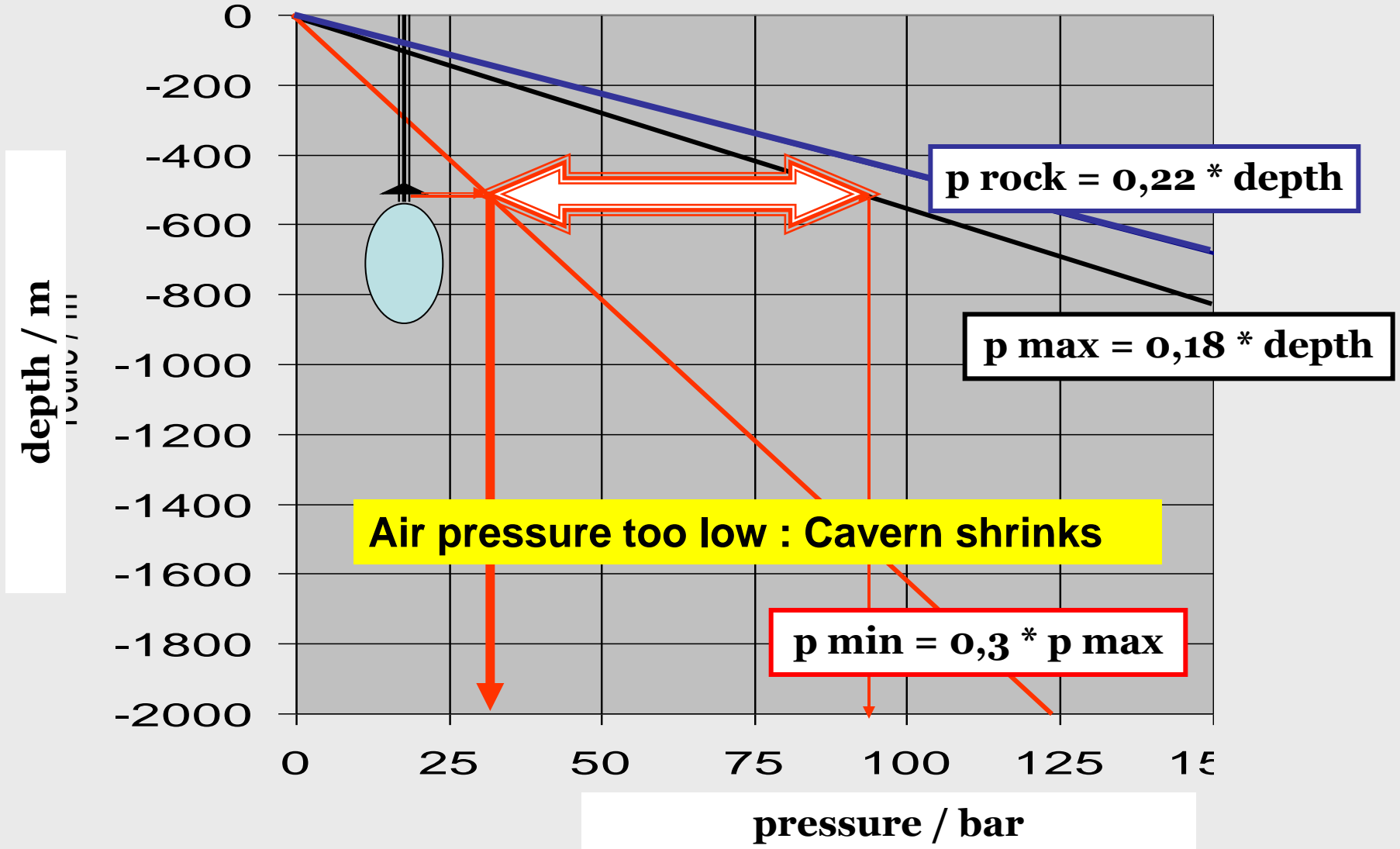


Anciennes mines

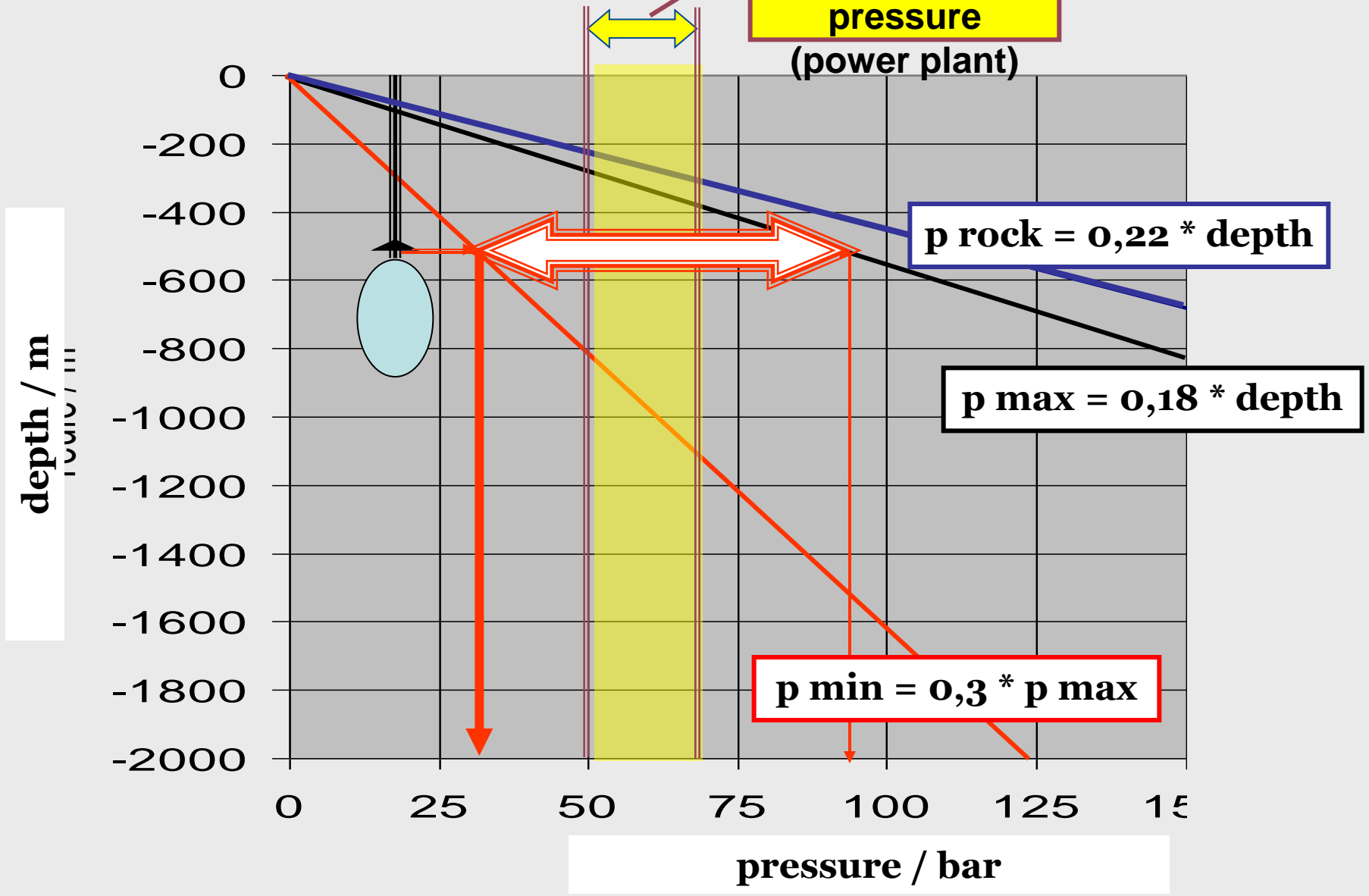
# Pressures vs depth



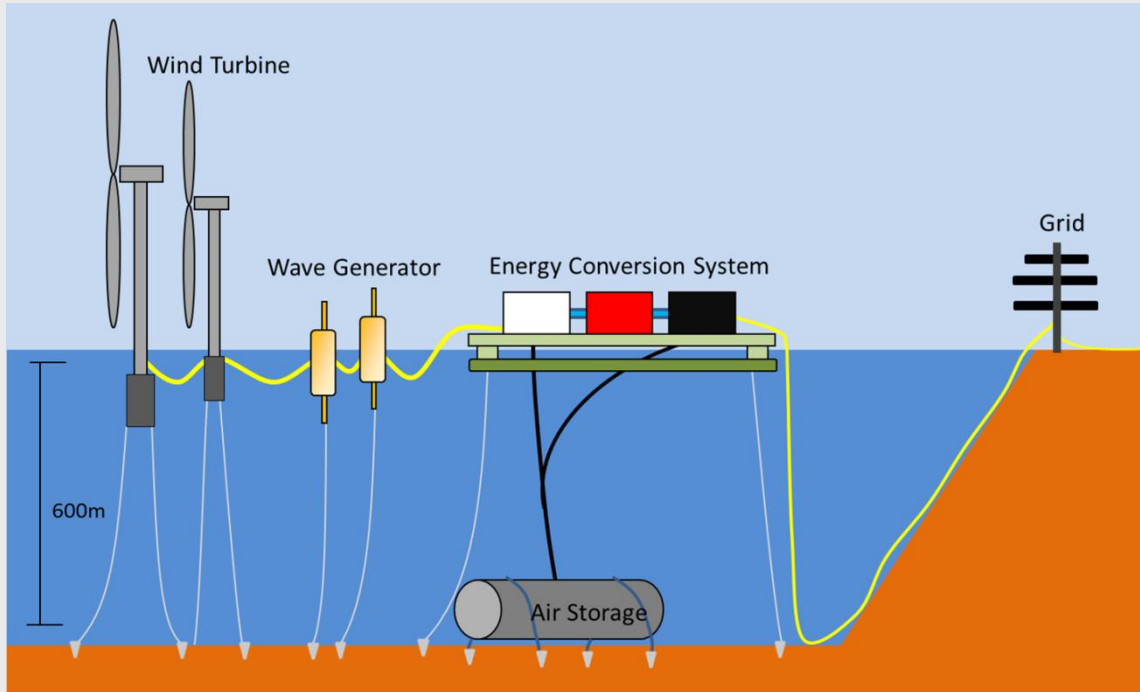
# Pressures vs depth



# Pressure vs depth

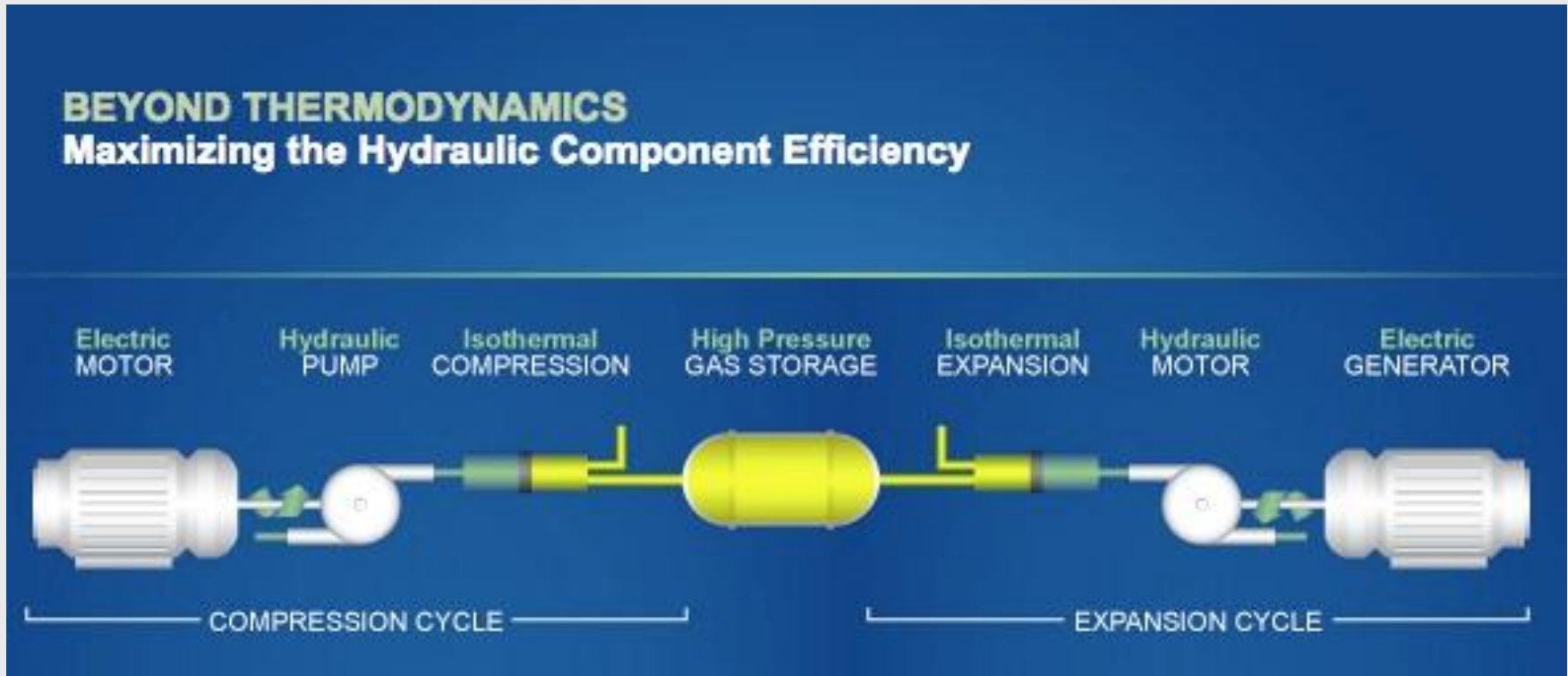


# Ocean CAES



# Isothermal CAES

- Compression / détente mélange air+eau quasi isotherme

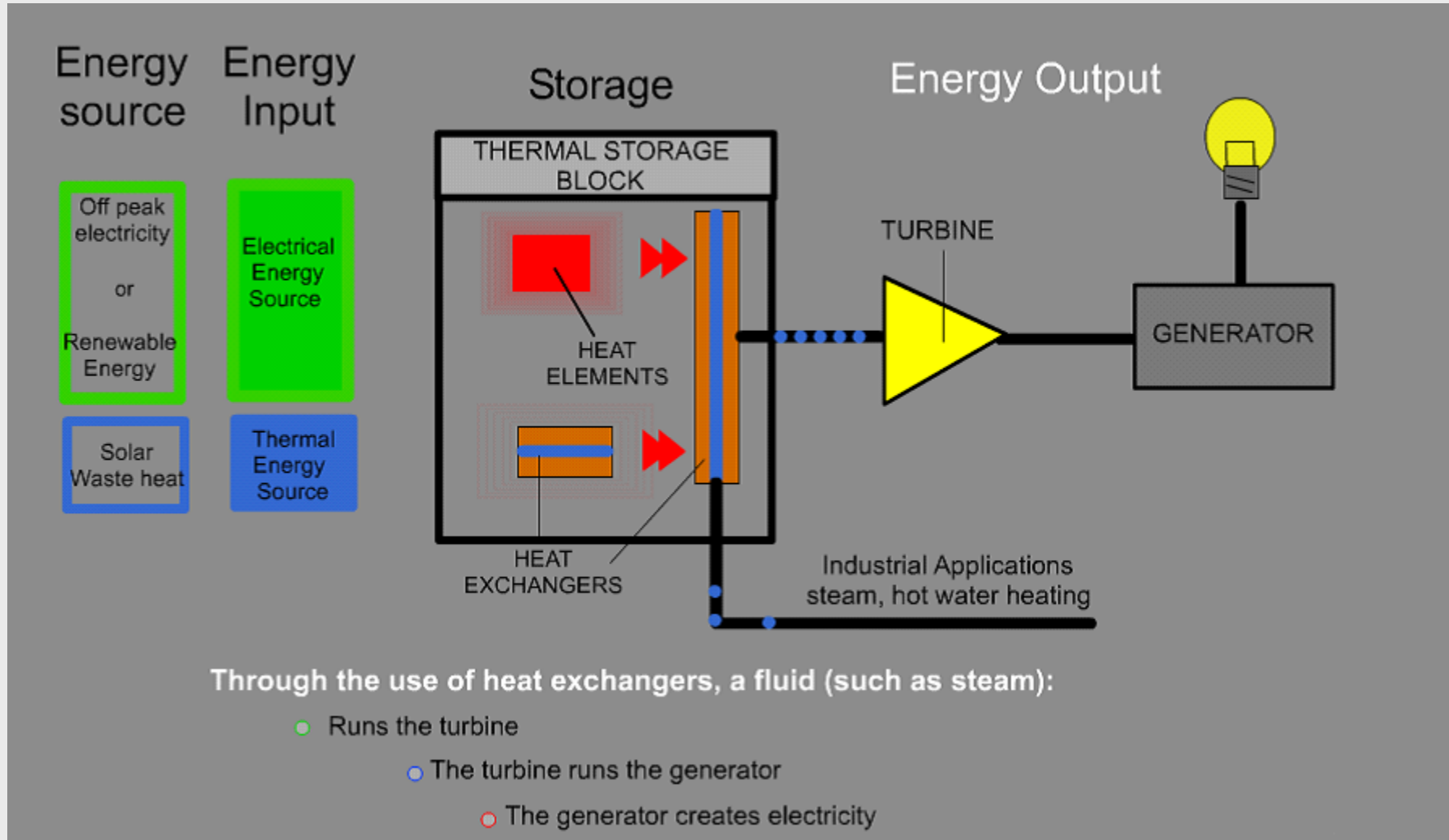




## Procédé Lloyd Energy (Australie) - 1998

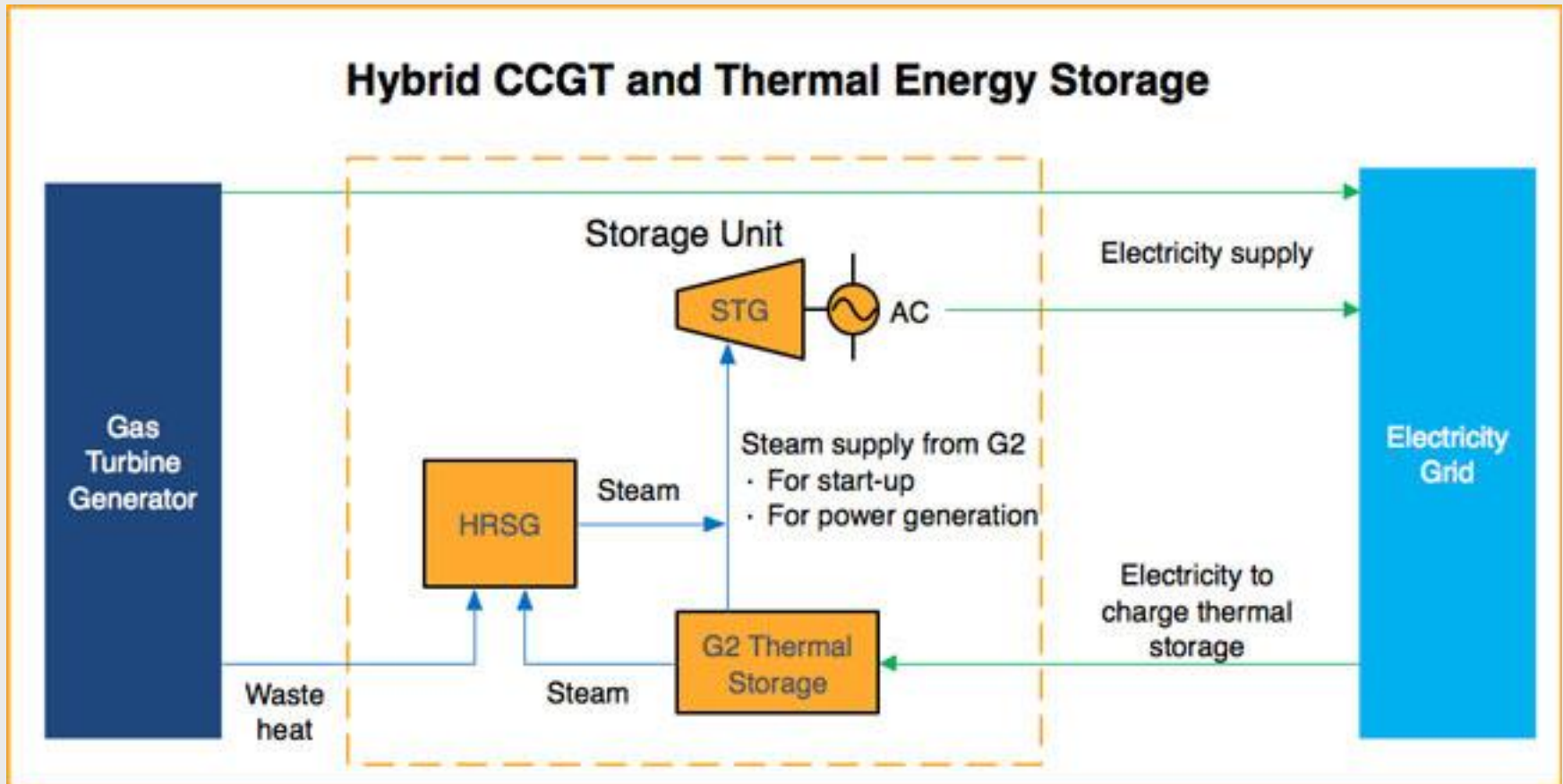
### Chauffage électrique de blocs de graphite

### Rendement assez faible (40% max)



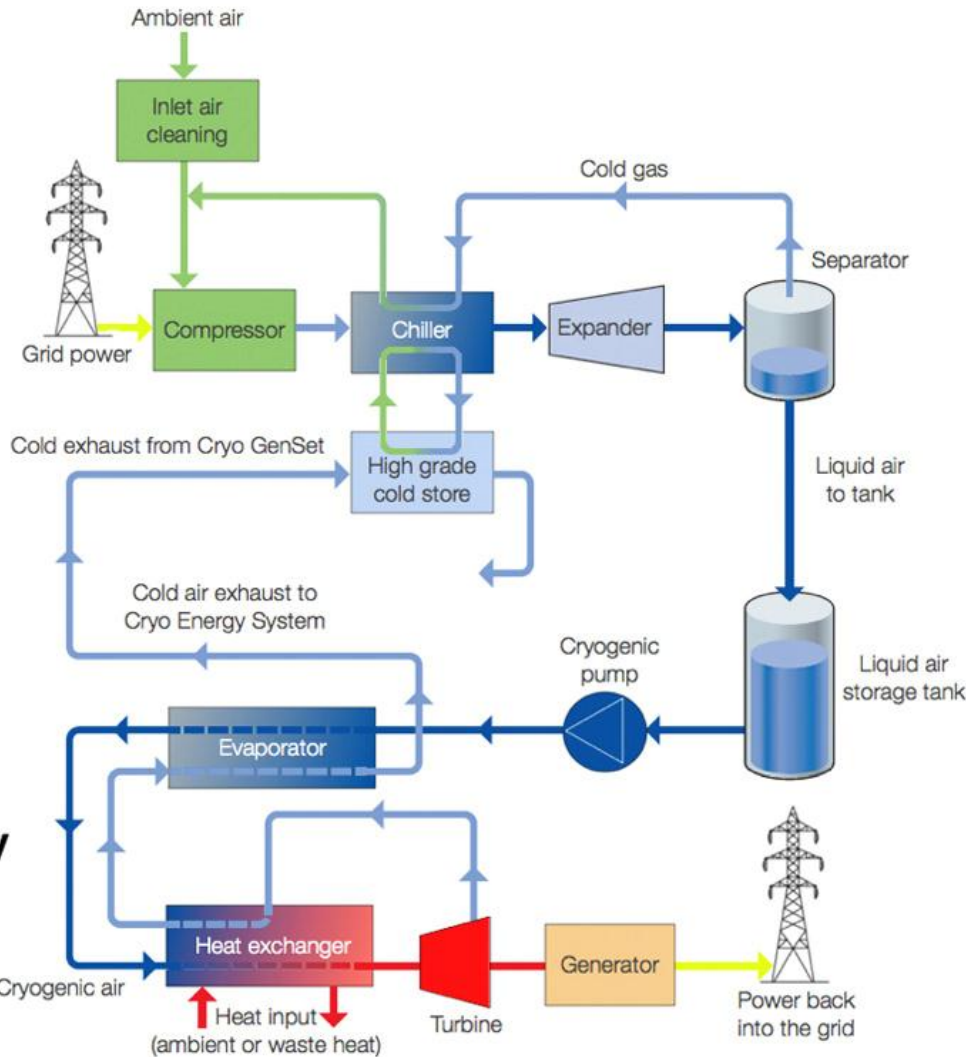
## Graphite Energy :

- La chaleur est stockée pour booster en cas de besoin la turbine à vapeur d'un cycle combiné



# Liquid Air Energy Storage (LAES)

## Liquefaction



## Storage

## Power Recovery

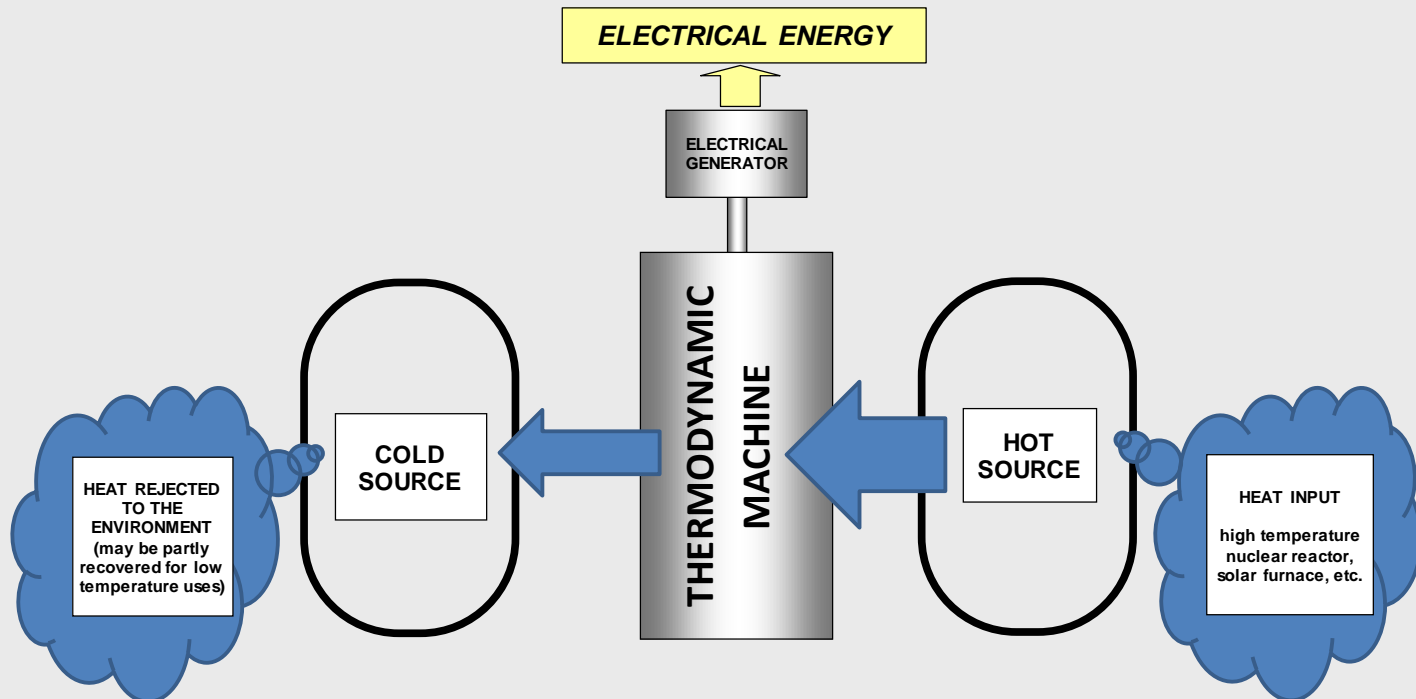
- Air liquide stocké
- Rendement assez faible
- Peut être amélioré en utilisant une source de chaleur lors du déstockage et un stockage de froid

## 2<sup>ème</sup> partie : Le procédé SEPT



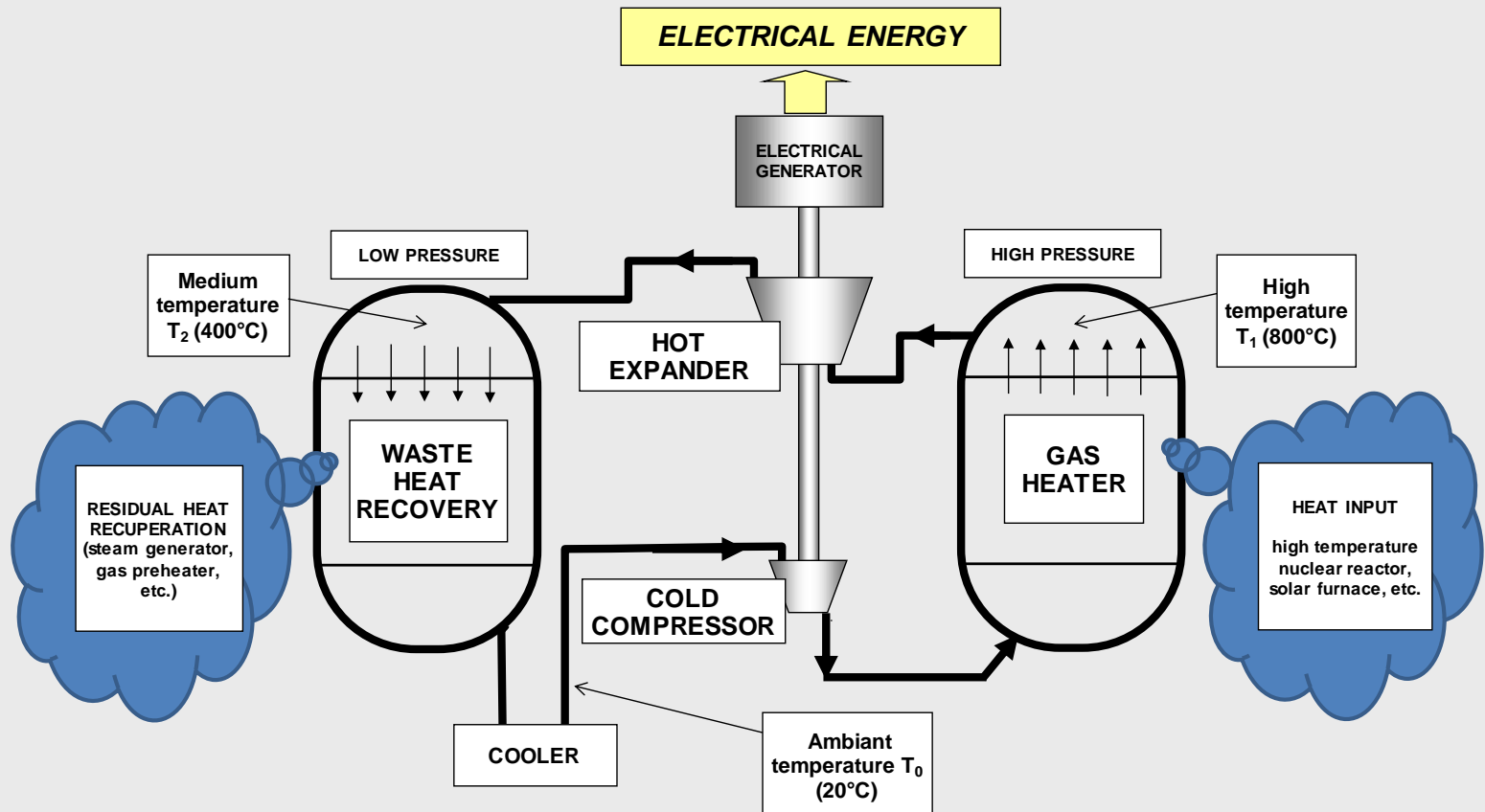
## Transformation de la chaleur en électricité

- Le principe de Carnot dicte qu'il est possible de transformer de la chaleur en énergie mécanique en faisant travailler une machine entre une source chaude et une source froide



## Transformation de la chaleur en électricité

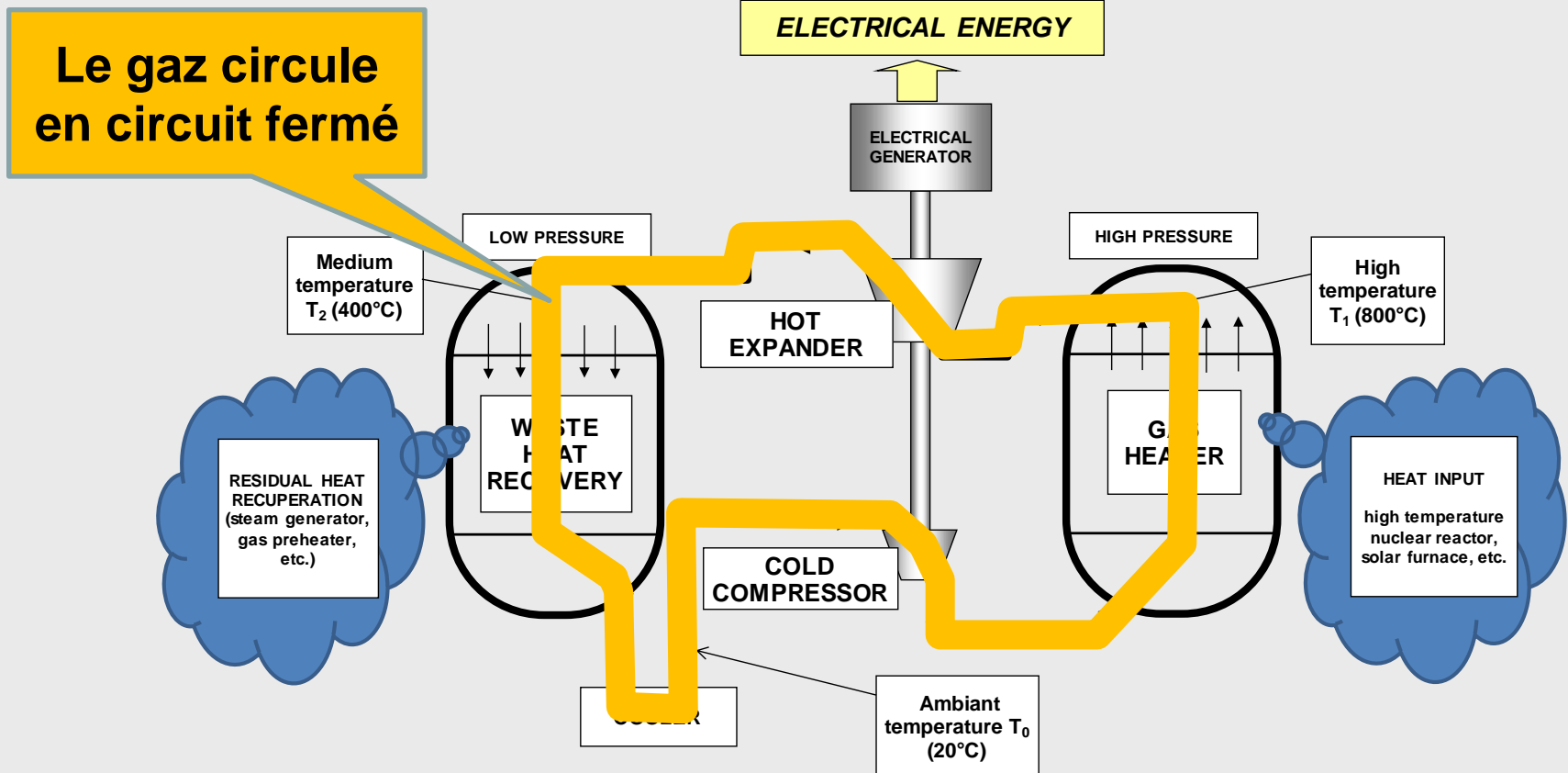
- Une mise en œuvre est possible avec une machine travaillant, avec un gaz circulant en circuit fermé (cycle de Joule)
- Le gaz est comprimé à froid, échauffé, détendu à chaud, refroidi avant d'être comprimé à nouveau



# Principe du procédé

## Le gaz circule en circuit fermé

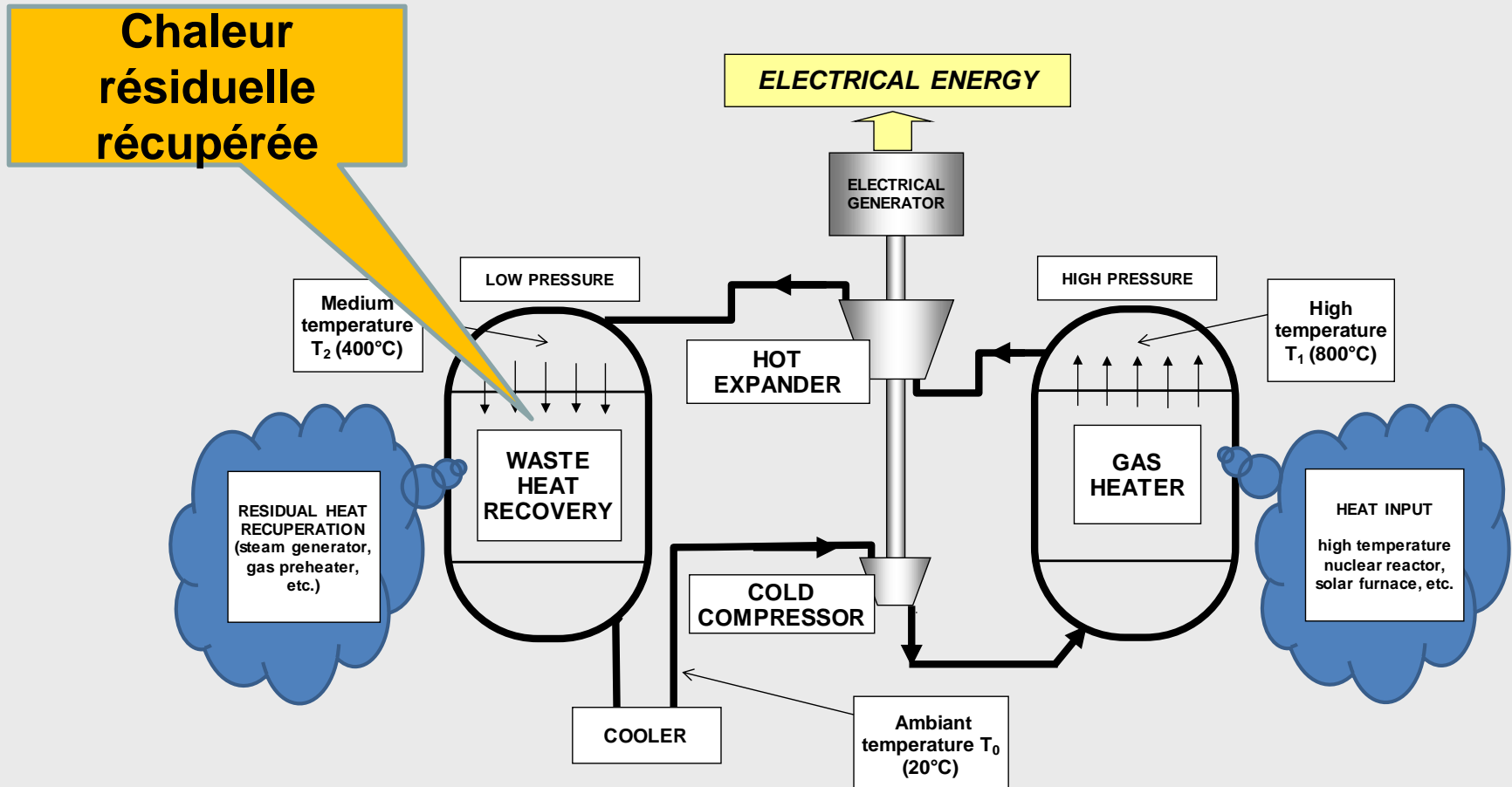
- Une mise en œuvre est possible avec une machine travaillant, avec un gaz circulant en circuit fermé (cycle de Joule)
- Le gaz est comprimé à froid, échauffé, détendu à chaud, refroidi avant d'être comprimé à nouveau





## Récupération de la chaleur résiduelle

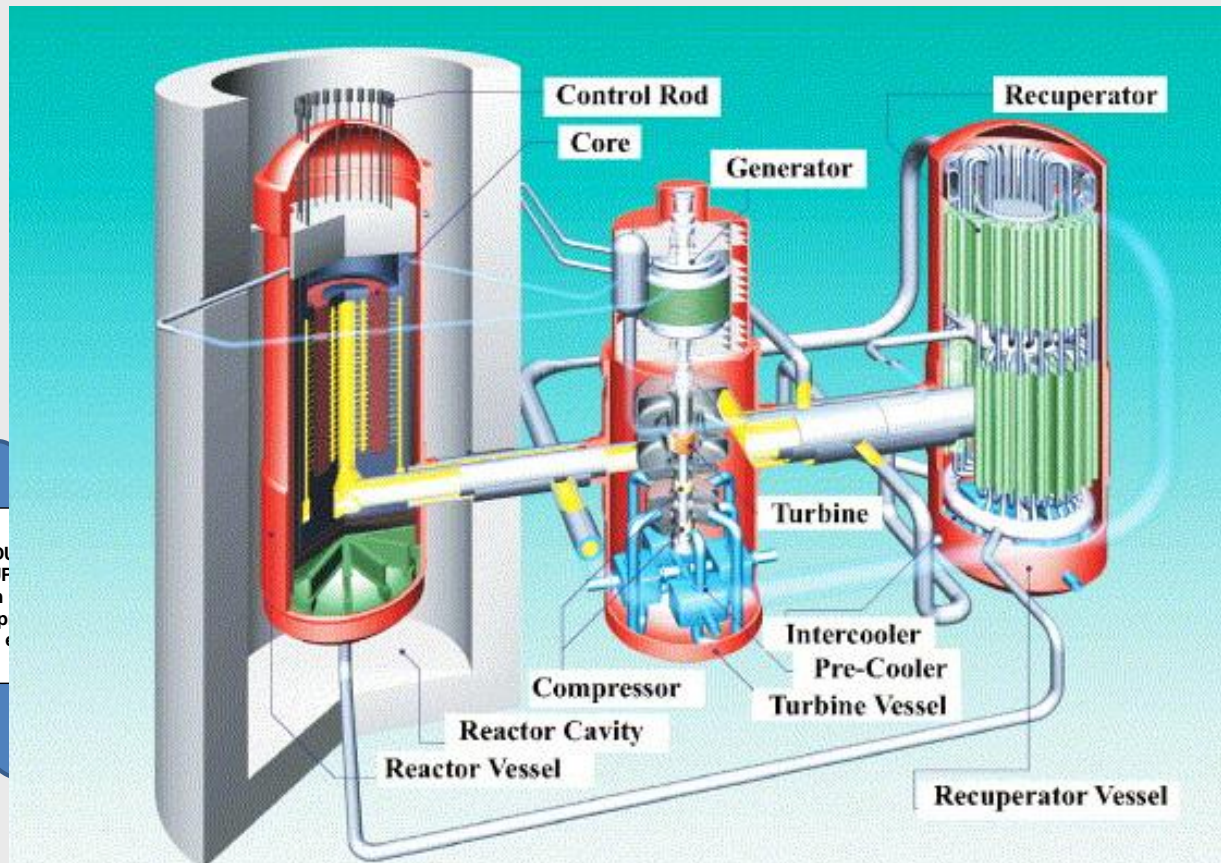
- Dans un cycle de ce genre, le gaz sort encore relativement chaud après la détente, il reste de la chaleur disponible pour d'autres usages à basse température



# Principe du procédé

## Turbine à gaz en circuit fermé

- La combinaison d'un compresseur froid et d'un détenteur chaud constitue une turbine à gaz, qui travaille ici en circuit fermé
  - La chaleur est apportée par une source externe
- Exemple d'application: réacteurs nucléaires à haute température



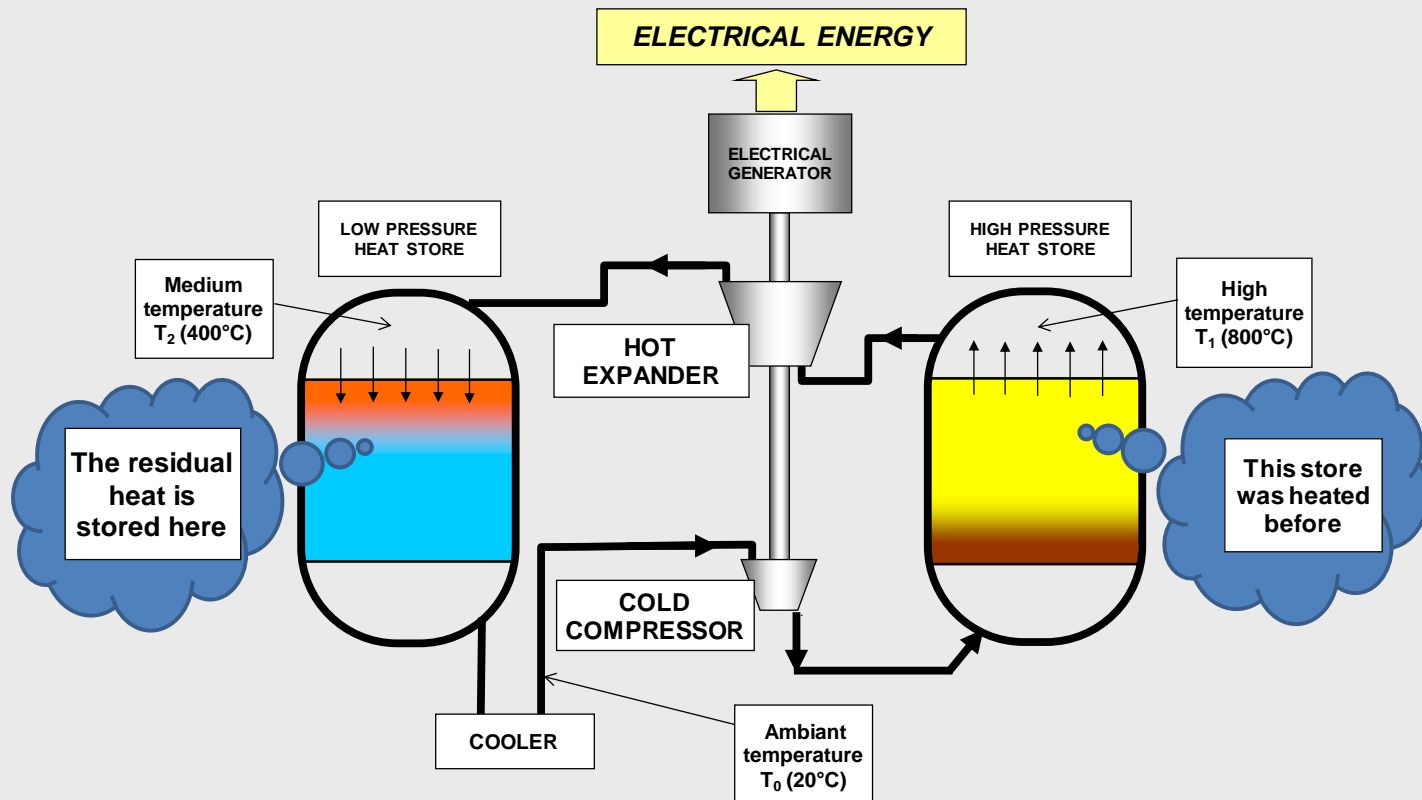
RESIDU  
RECUP  
(steam  
gas p

n  
ature  
(°C)

HEAT INPUT  
n temperature  
clear reactor,  
r furnace, etc.

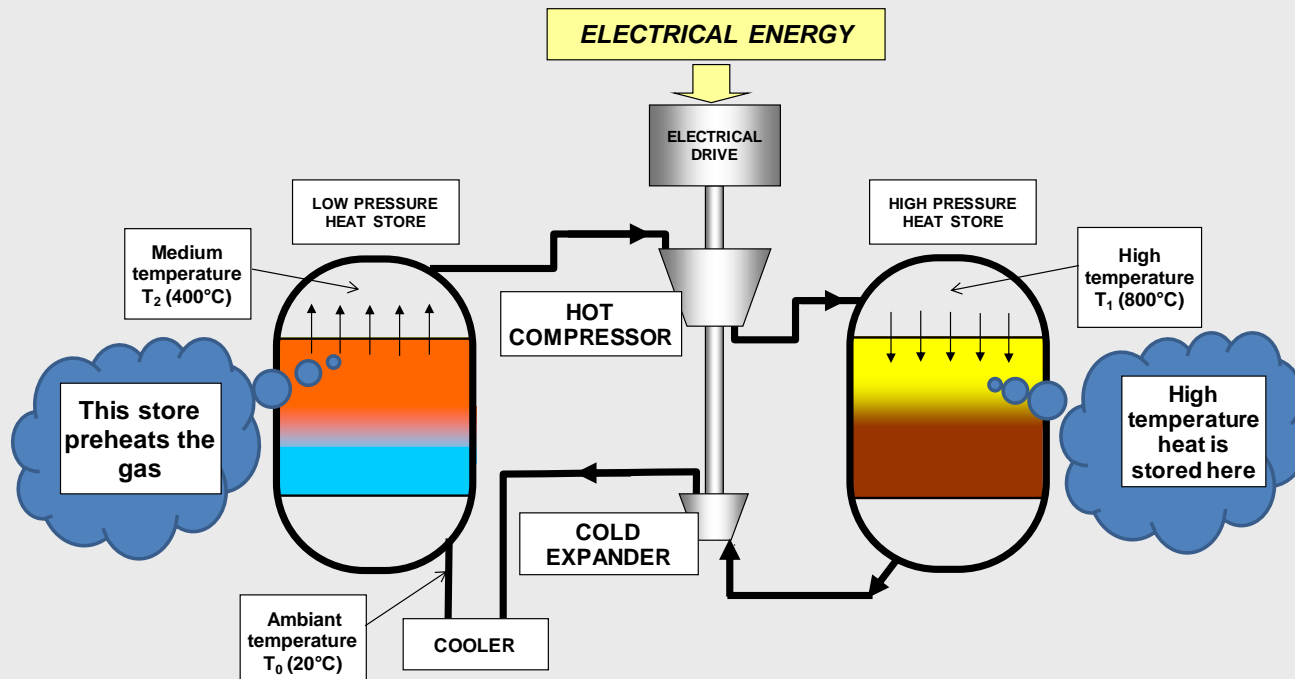
## Dessine moi un stockage...

- Imaginons que le gaz soit chauffé en traversant un régénérateur dans lequel de la chaleur à haute température a été stockée auparavant par un moyen externe
- Tant que ce régénérateur n'est pas complètement refroidi, le système fournit de l'électricité – On a dessiné un stockage d'énergie
- Imaginons aussi que la chaleur résiduelle soit à son tour récupérée et stockée dans un second régénérateur



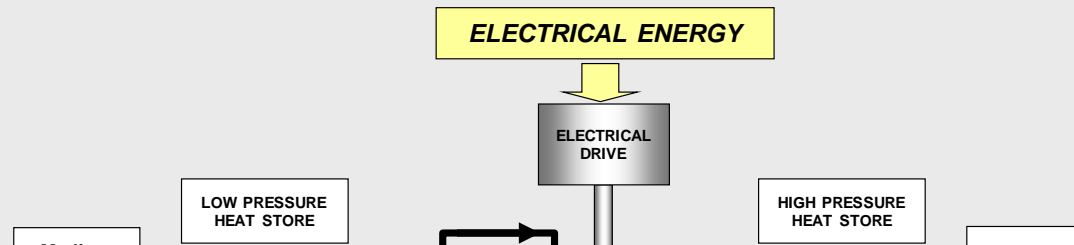
## Imaginons un stockage

- Imaginons de plus que les machines de compression et de détente soient parfaites, sans pertes
  - En thermodynamique, on parle de machines réversibles
- Alors, si on inverse le sens de circulation du gaz, tous les phénomènes s'inversent parfaitement
  - Les compresseurs deviennent des expandeurs et réciproquement
  - Le régénérateur chaud se réchauffe à nouveau, le froid est refroidi
  - Le stockage d'énergie est rechargé en consommant de l'électricité

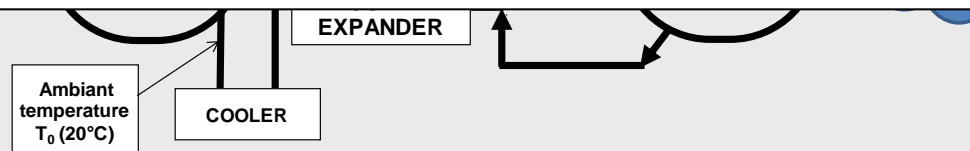


## Imaginons un stockage

- Imaginons de plus que les machines de compression et de détente soient parfaites, sans pertes
  - En thermodynamique, on parle de machines réversibles
- Alors, si on inverse le sens de circulation du gaz, tous les phénomènes s'inversent parfaitement
  - Les compresseurs deviennent des expandeurs et réciproquement
  - Le régénérateur chaud se réchauffe à nouveau, le froid est refroidi
  - Le stockage d'énergie est rechargé en consommant de l'électricité

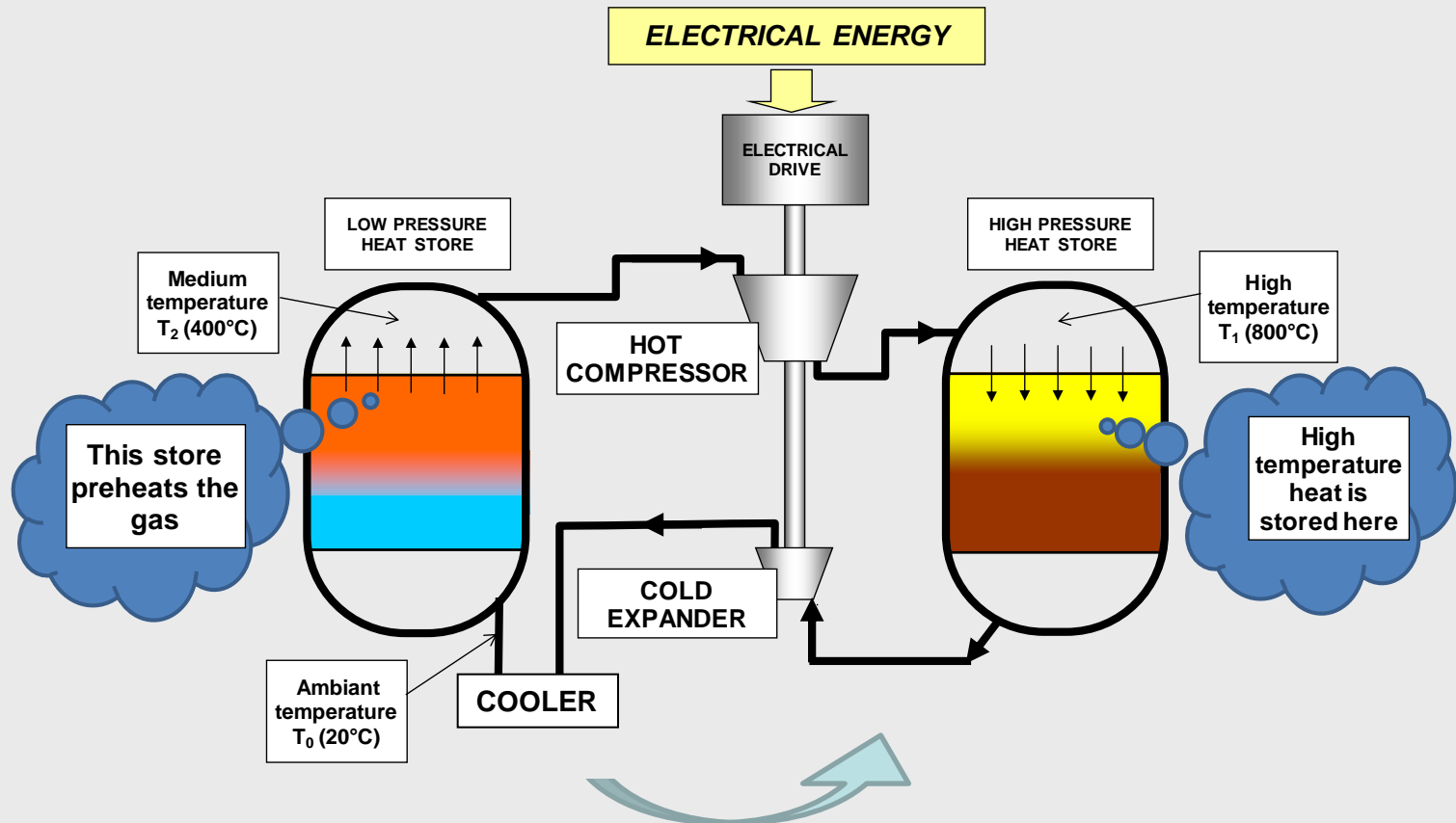


**La chaleur est pompée vers le réservoir à haute température, d'où le nom du procédé:  
Stockage d'Electricité par Pompage Thermique**



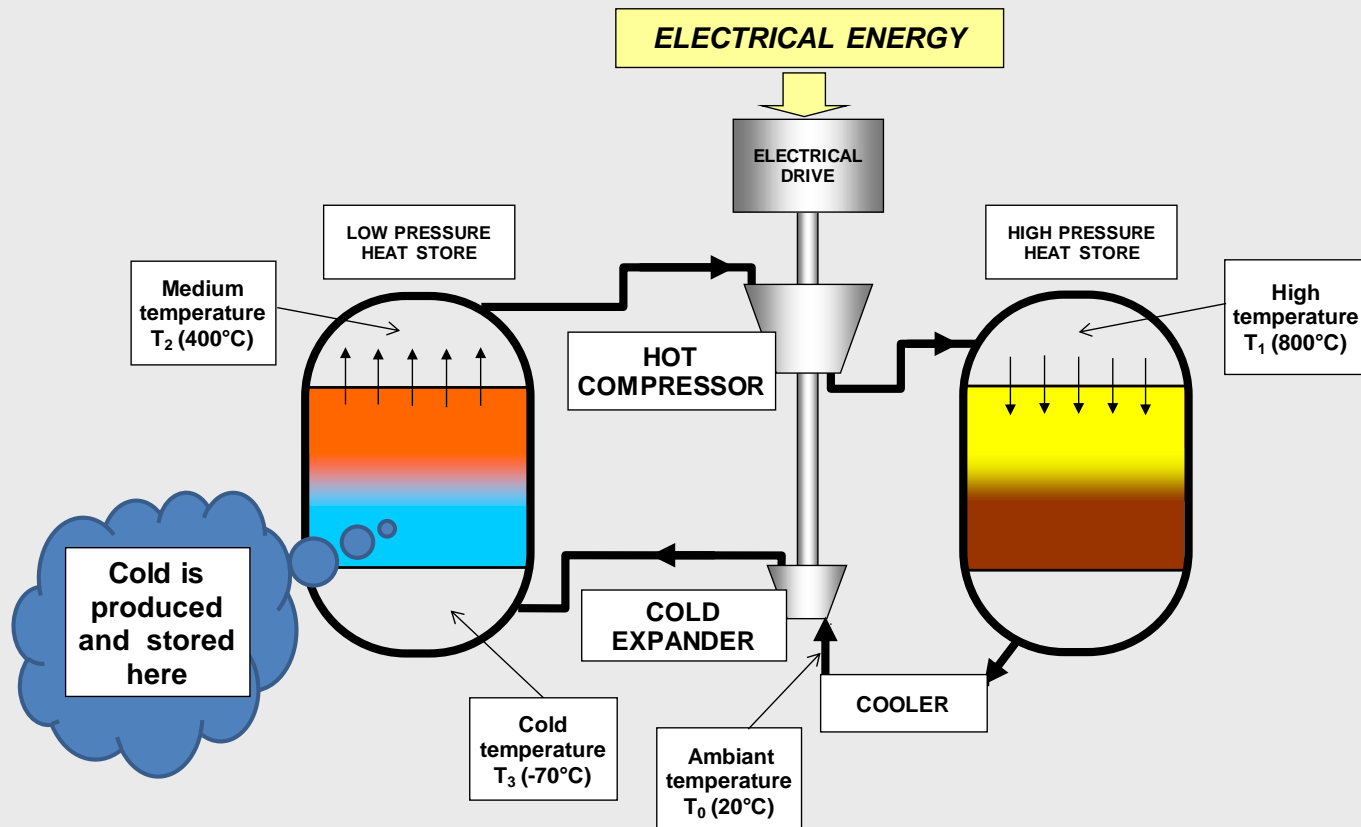
## Améliorons le stockage

Le procédé peut être grandement amélioré en changeant l'emplacement du refroidisseur sur le circuit gaz



## Stockons le froid

- On constate alors, durant la phase de stockage, que le gaz qui entre à la température ambiante dans le détendeur en ressort très froid
  - Ce froid est stocké dans le régénérateur basse pression

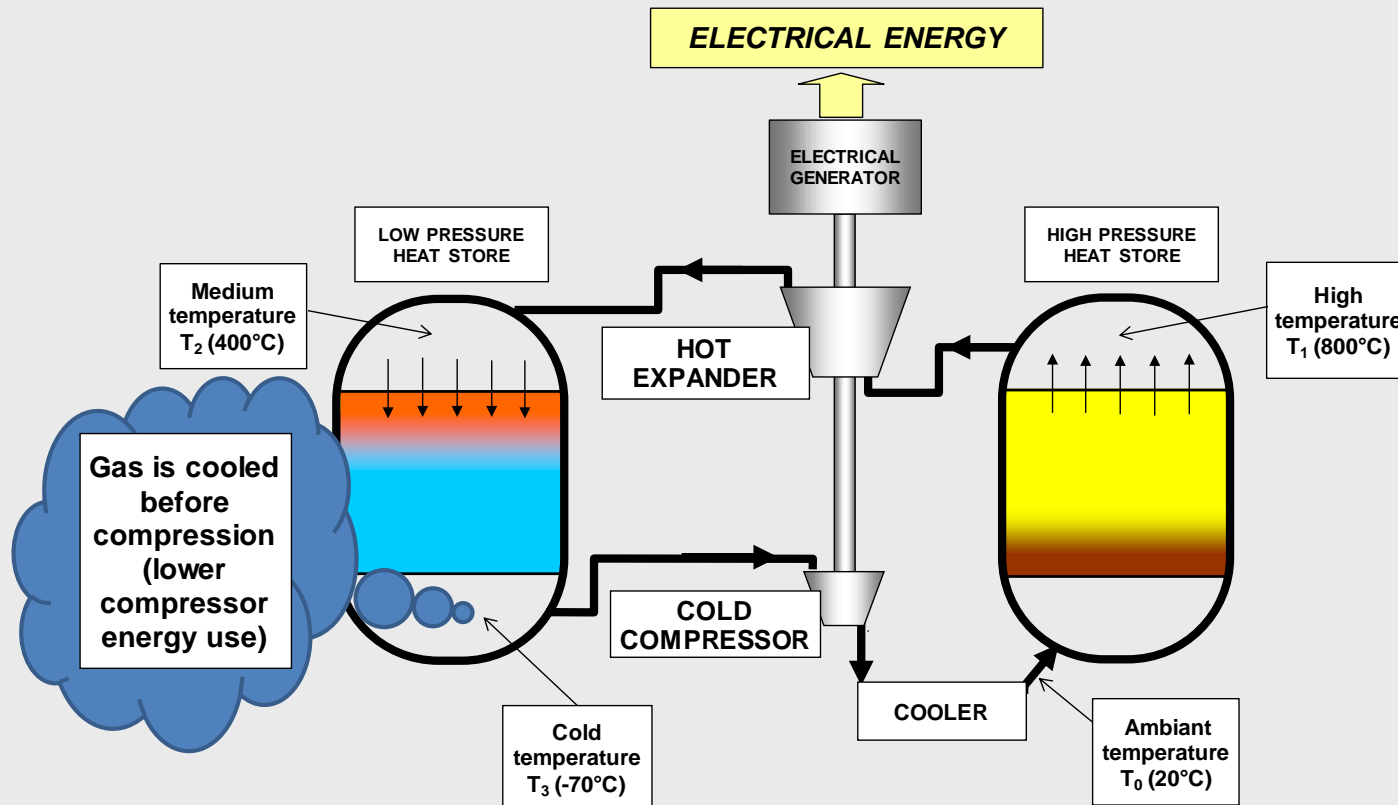




# Principe du procédé

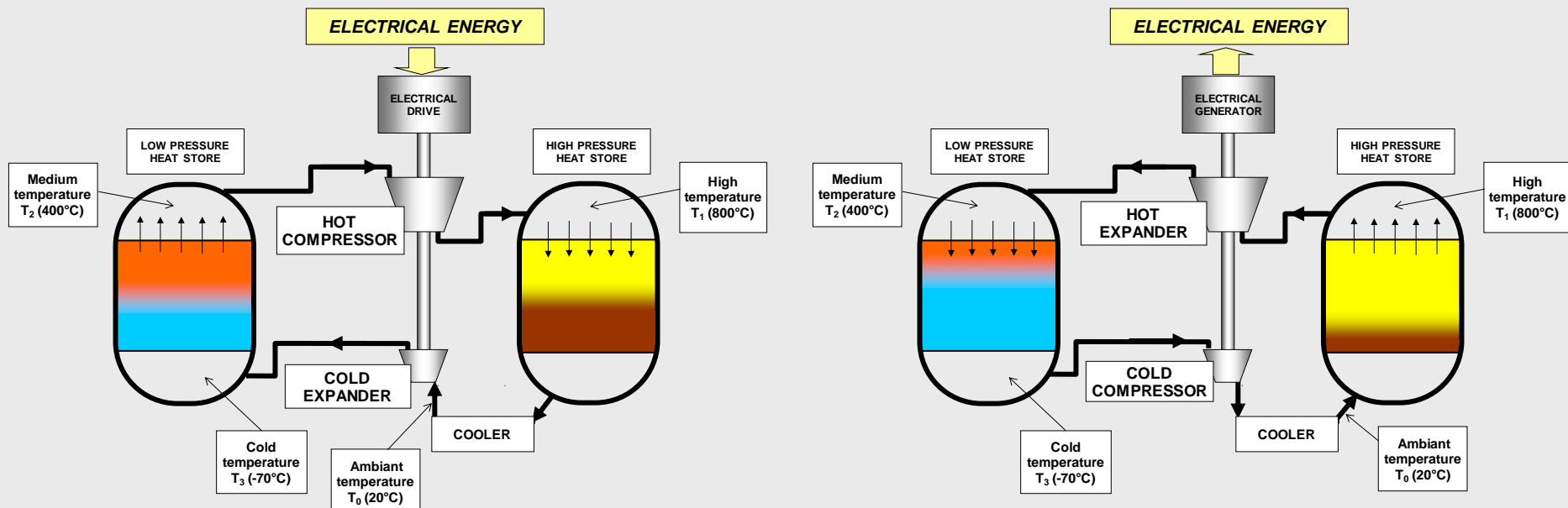
## Un gaz froid est plus facile à comprimer

- L'avantage apparait lors de la phase de déstockage
- Le gaz entre froid dans le compresseur. Celui-ci consomme moins d'énergie
  - Il reste plus d'énergie mécanique produite par le détendeur chaud, non consommée par le compresseur froid, disponible pour le générateur électrique
    - Le rendement est amélioré



## Ceci est un stockage

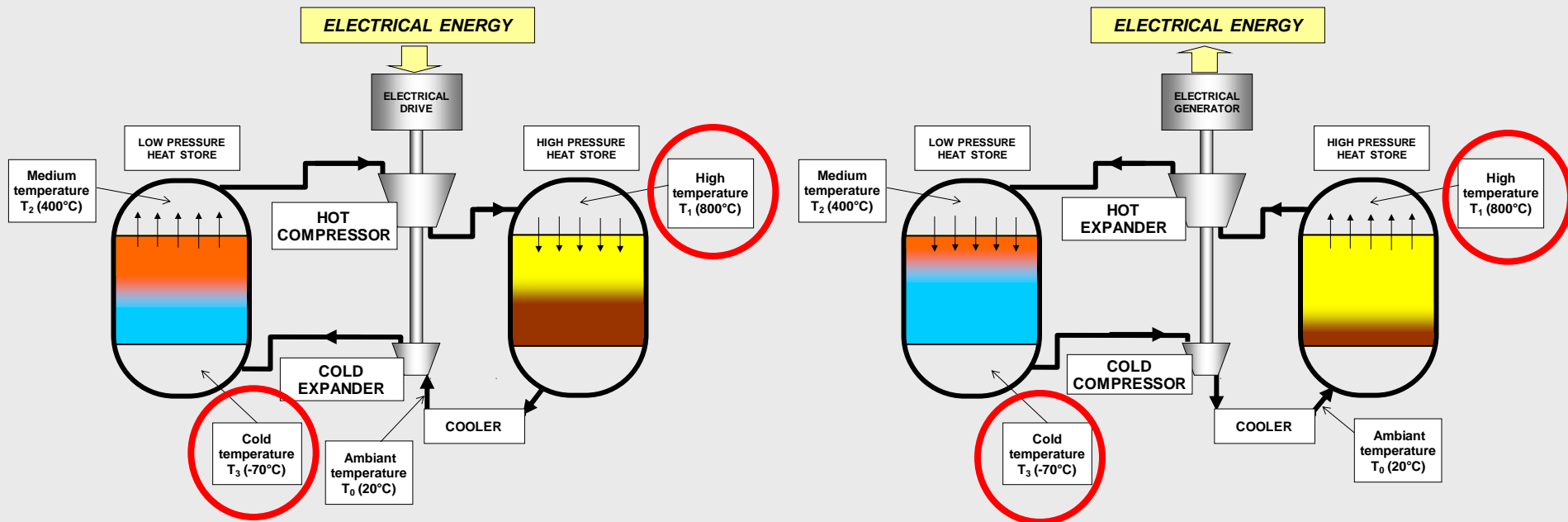
On a ainsi conçu un système de stockage d'énergie



# Principe du procédé

## Ceci est le stockage SEPT

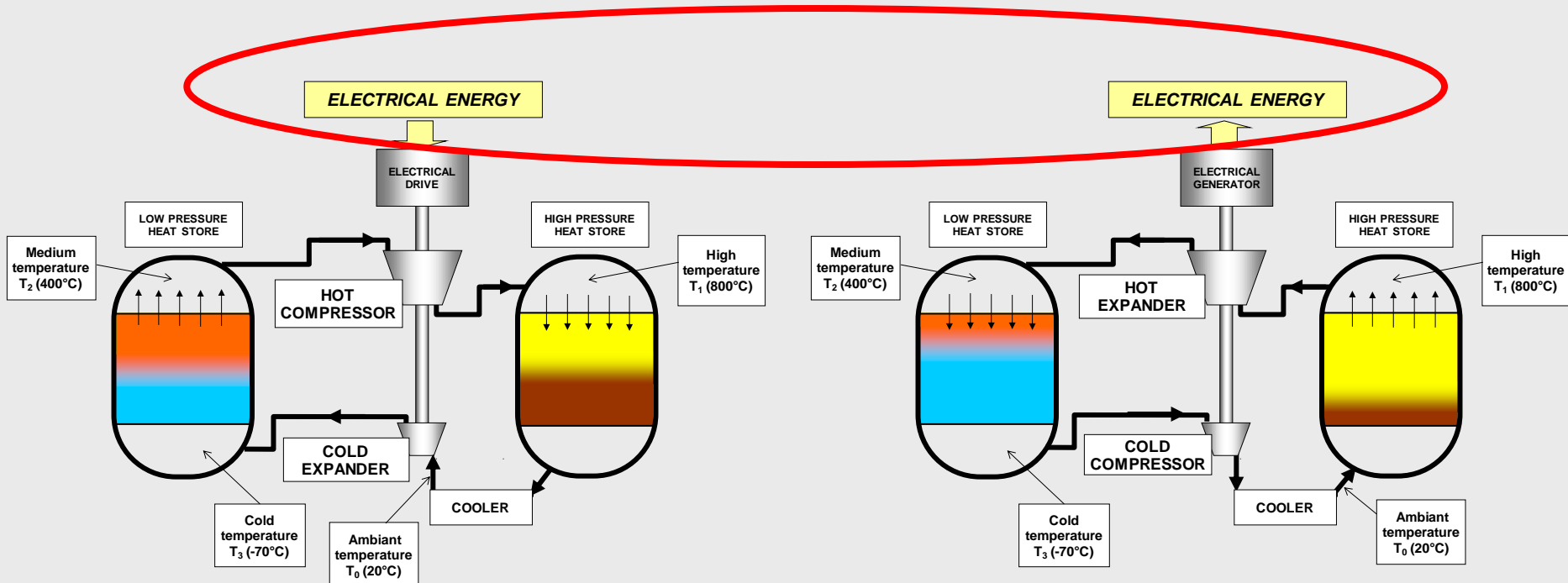
On a ainsi conçu un système de stockage d'énergie  
L'énergie est stockée sous forme de chaud et de froid



## Ceci est le stockage SEPT

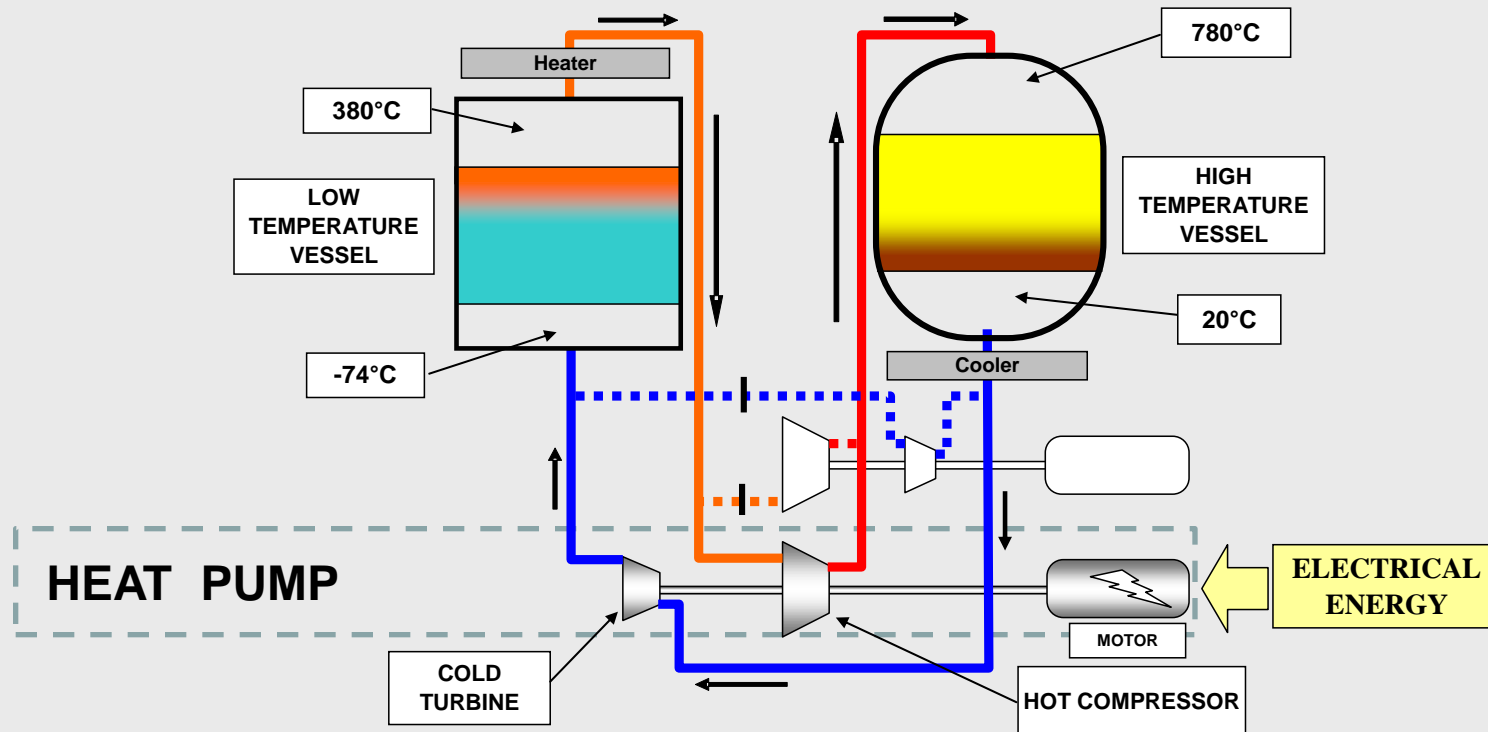
On a ainsi conçu un système de stockage d'énergie  
L'énergie est stockée sous forme de chaud et de froid  
Mais l'énergie entre et sort sous forme d'électricité

Il s'agit donc d'un stockage d'électricité



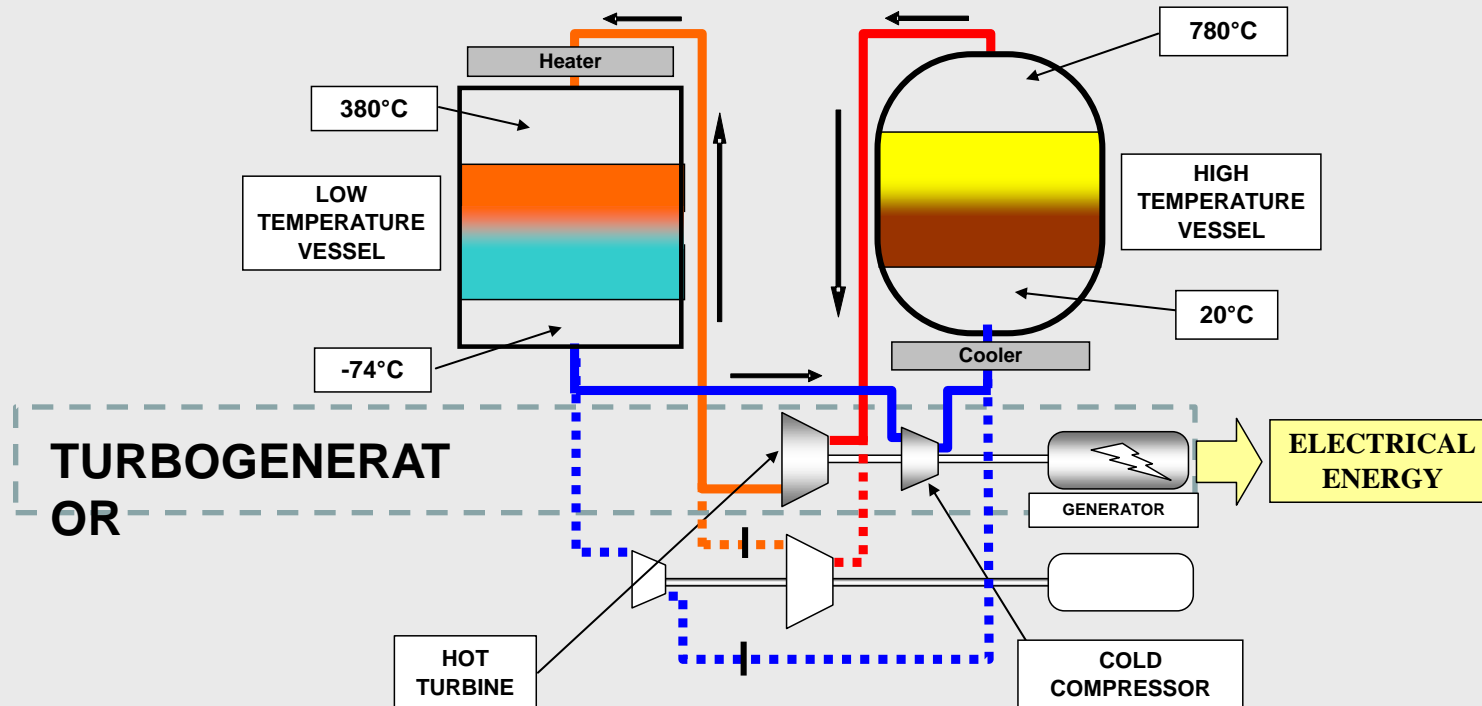
## Mise en œuvre : 2 trains séparés

**Phase de chargement : Pompage de la chaleur**  
**Le moteur électrique entraine un train comprenant**  
**compresseur chaud et turbine froide (pompe à chaleur)**



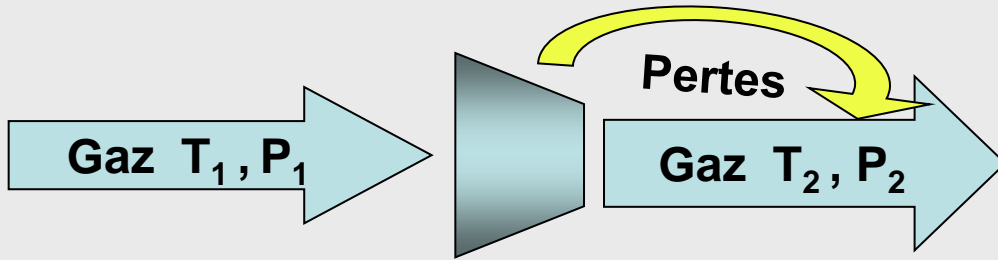
## Mise en œuvre : 2 trains séparés

**Phase de déchargement : Turbinage de la chaleur**  
**Un train comprenant compresseur froid et turbine chaude entraîne un générateur (turbogénérateur)**



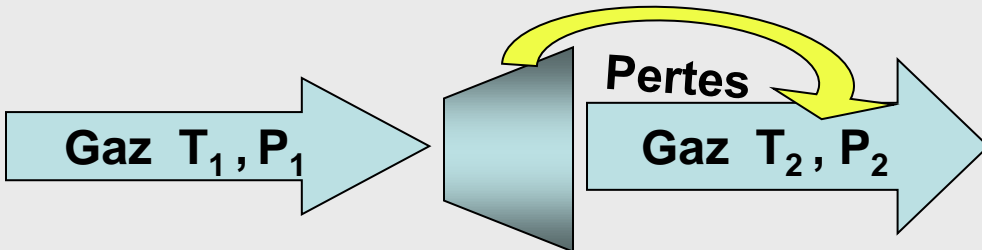
## Machines non parfaites

- Les machines réelles de compression et de détente ne sont pas parfaites.
- Il faut tenir compte des pertes dans les calculs de modélisation du système



**Compression : Le gaz s'échauffe plus que ne l'indique la théorie**

$$T_2 = T_1 \cdot (1 + ((P_2/P_1)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1) / \eta)$$



**Détente : Le gaz se refroidit moins que ne l'indique la théorie**

$$T_2 = T_1 \cdot (1 + \eta \cdot ((P_2/P_1)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1))$$

**Définition :  $\eta$  = efficacité isentropique de la machine  
( $\eta = 1$  pour une machine parfaite)**

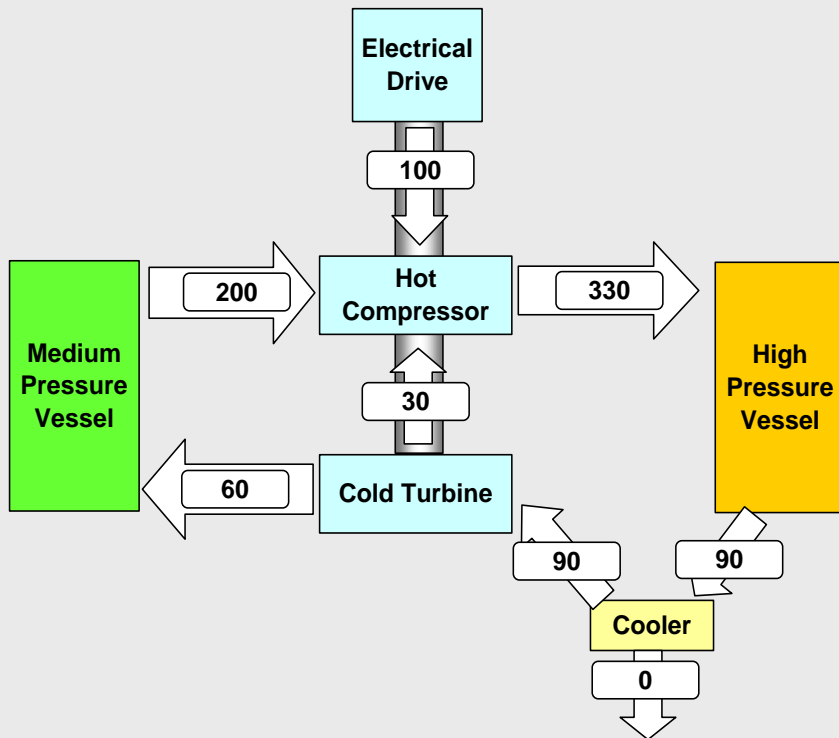


# Principe du procédé

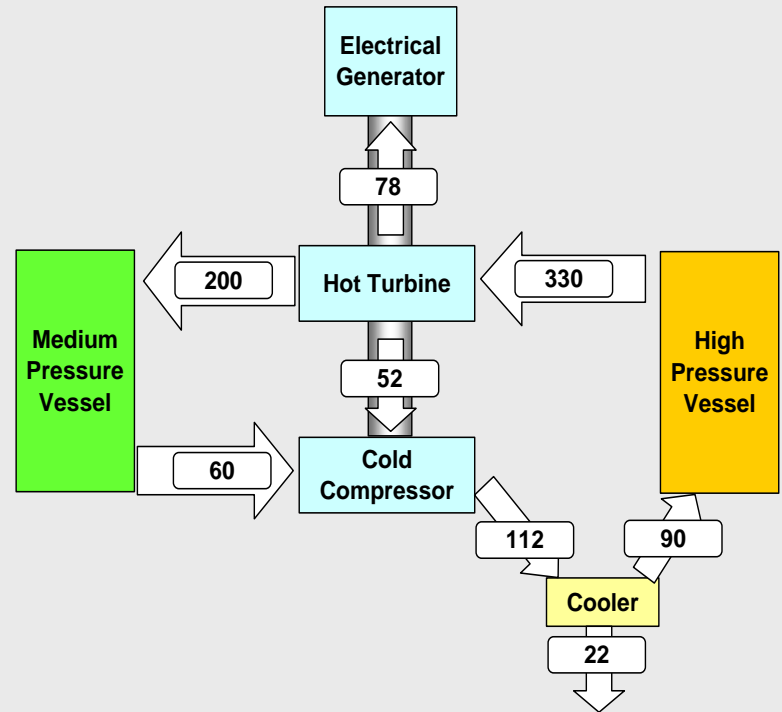
## Flux d'énergie

### Exemple d'analyse des flux d'énergie

#### CHARGEMENT



#### DECHARGEMENT

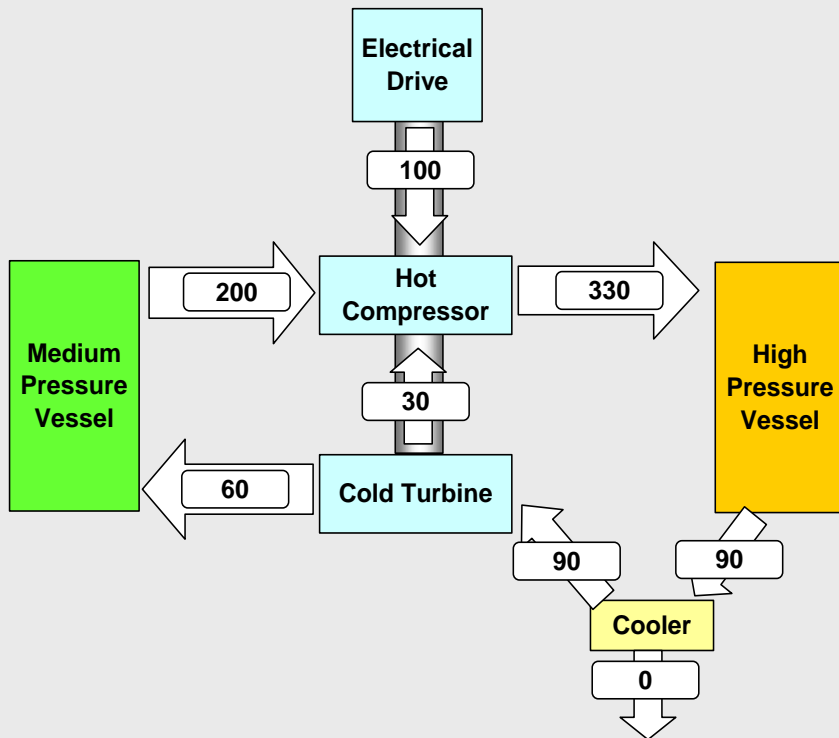


# Principe du procédé

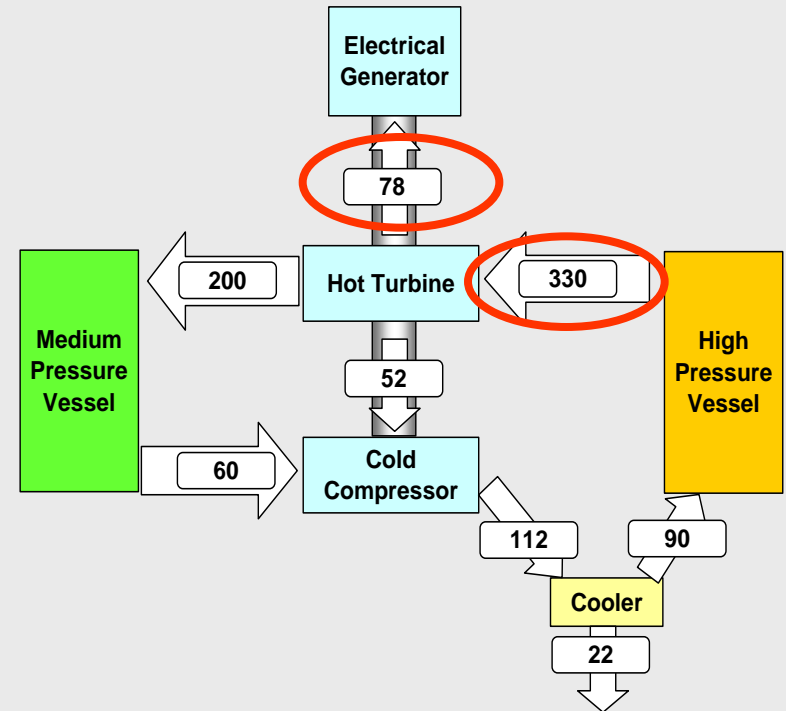
## Flux d'énergie

### Exemple d'analyse des flux d'énergie

#### CHARGEMENT



#### DECHARGEMENT



**Efficacité turbine : 24%**

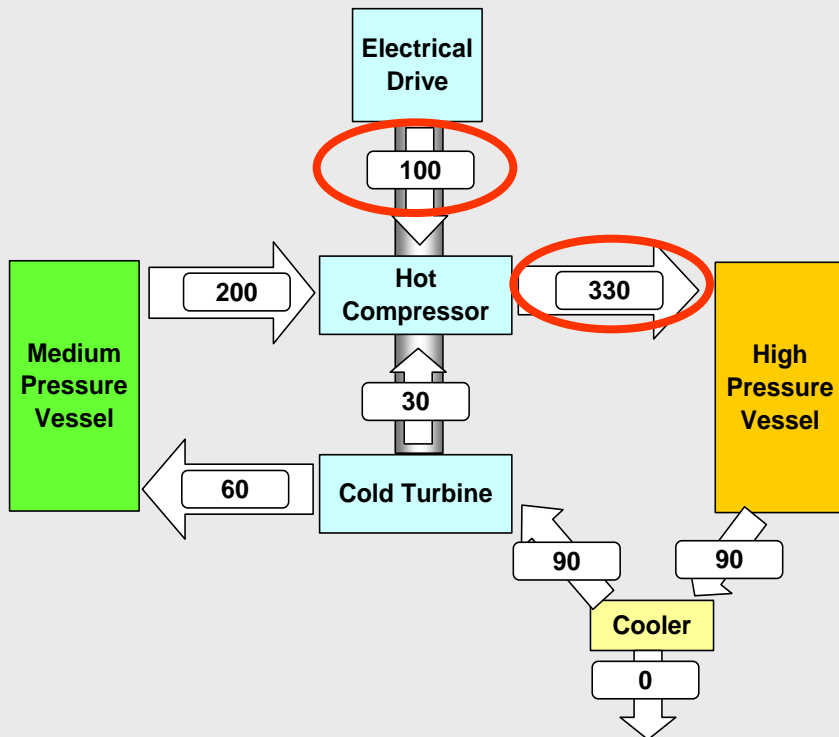
Une turbine à gaz n'a pas un très bon rendement...

# Principe du procédé

## Flux d'énergie

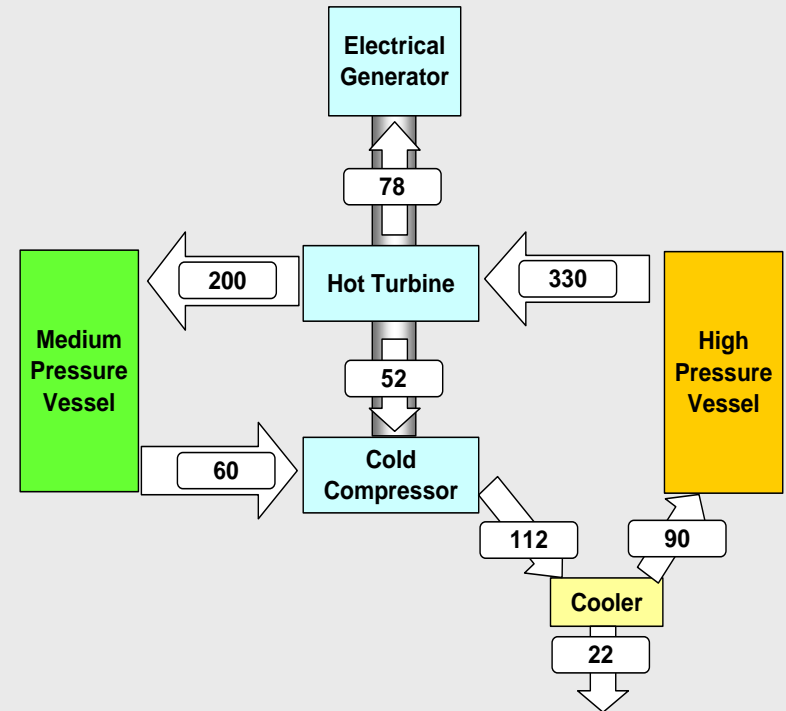
### Exemple d'analyse des flux d'énergie

#### CHARGEMENT



**Efficacité pompe à chaleur : 330%**

#### DECHARGEMENT



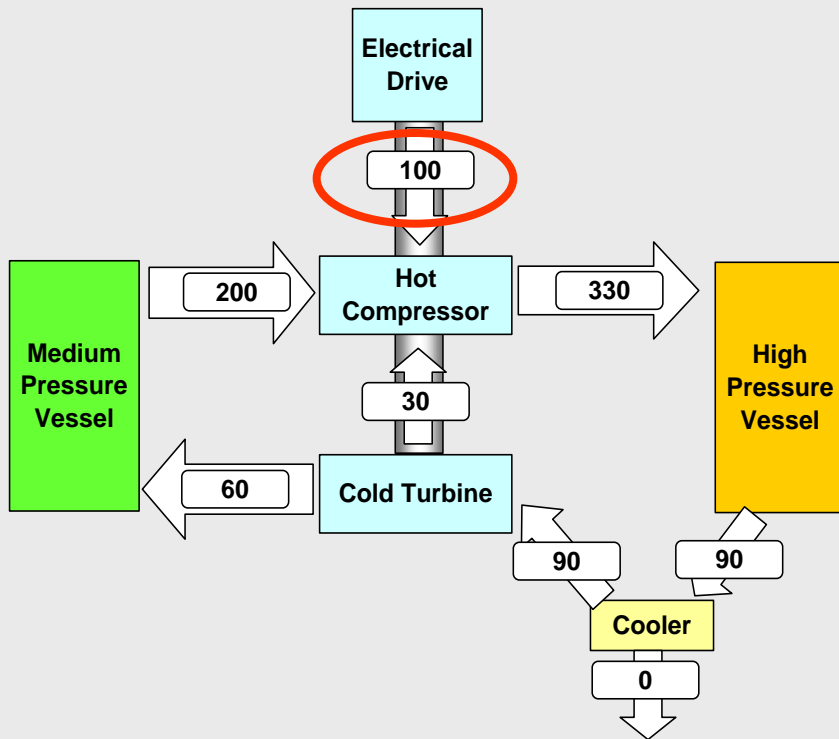
... Mais une pompe à chaleur a un excellent coefficient de performance

# Principe du procédé

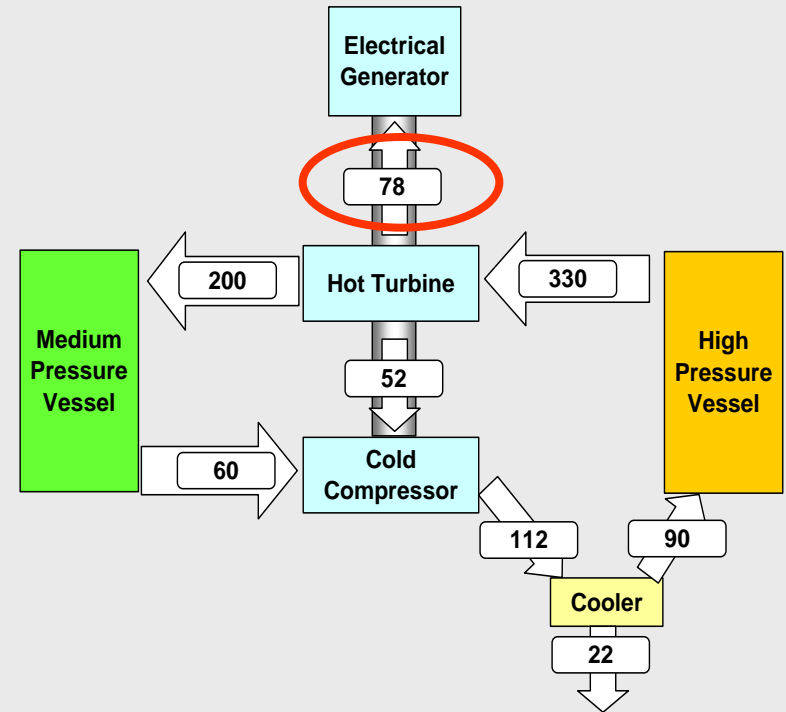
## Flux d'énergie

### Exemple d'analyse des flux d'énergie

#### CHARGEMENT



#### DECHARGEMENT



**Rendement énergétique du stockage : 78%**

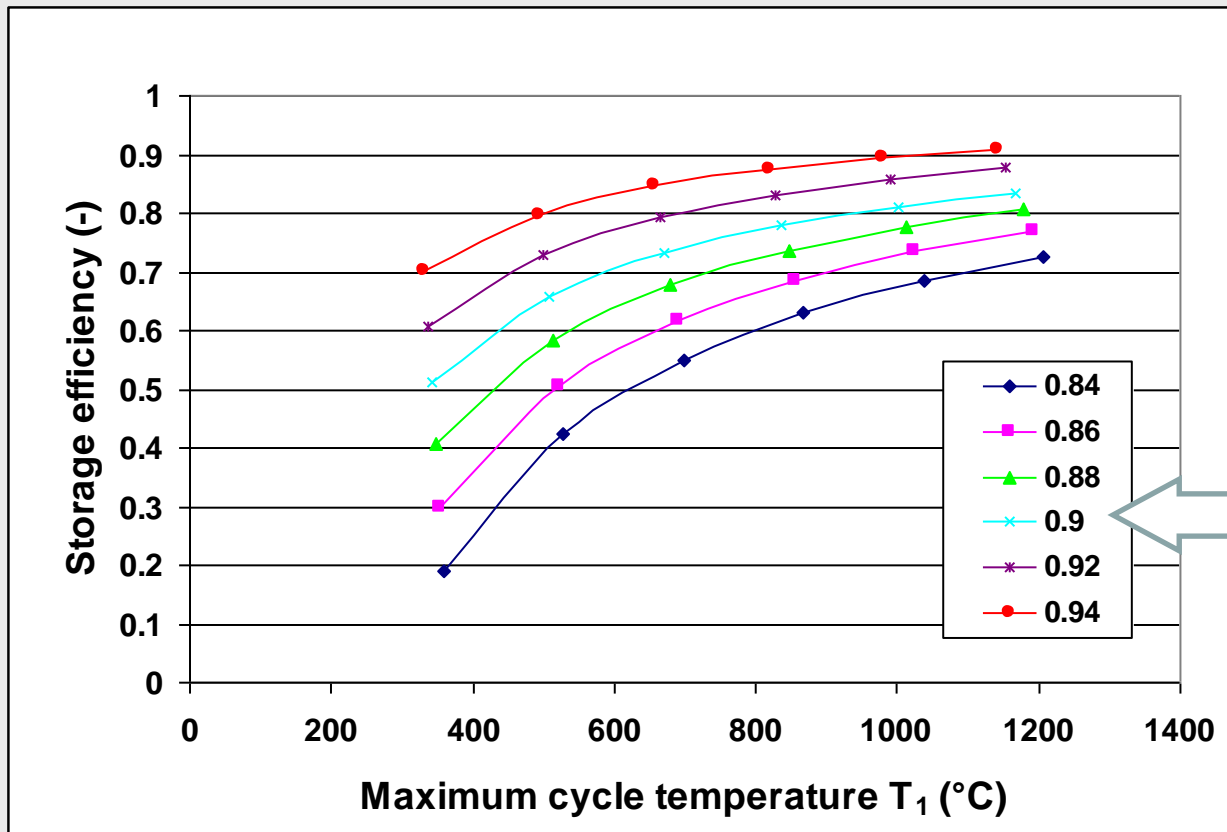
**Le stockage complet a un bon rendement**

# Principe du procédé

## Influence des principaux paramètres

Pour atteindre un rendement de 70% et plus, il faut:

- Une température maximale de l'ordre de 800°C
- Des machines ayant une grande efficacité (peu de pertes)



$\eta$  : efficacité isentropique (supposée identique pour les 4 machines)

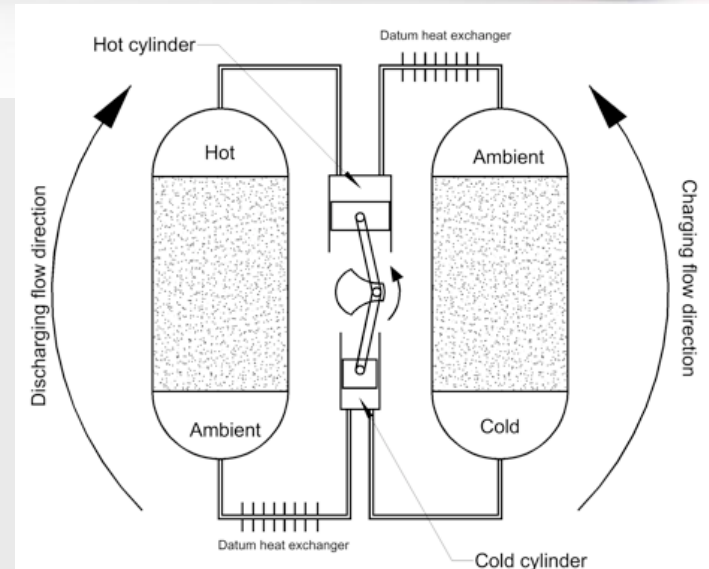
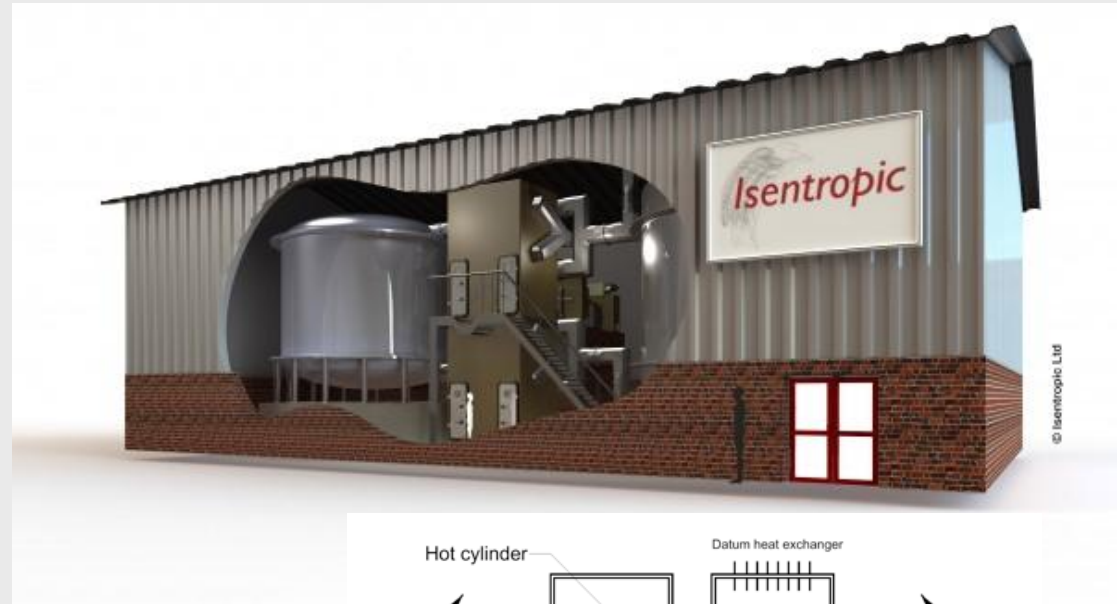
- **La modélisation permet de calculer les principales caractéristiques d'un stockage SEPT**
- **EXEMPLE pour un stockage de 10 GWh**

<b>Capacité électrique</b>	<b>10 GWh</b>
<b>Puissance</b>	<b>100 MW</b>
<b>Dimensions de chaque réservoir</b>	<b>diamètre : 65m – hauteur : 45m</b>
<b>Pression réservoir chaud</b>	<b>4 bars relatifs</b>
<b>Température maximale réservoir chaud</b>	<b>800°C</b>
<b>Pression réservoir froid</b>	<b>voisine de l'ambiante</b>
<b>Température minimale réservoir froid</b>	<b>-70°C</b>
<b>Masse de graviers de basalte</b>	<b>250000 t</b>
<b>Rendement</b>	<b>70%</b>
<b>Autodécharge</b>	<b>0,5% par jour</b>

# Stockage d'électricité par pompage thermique : La mise en œuvre peut prendre d'autres formes

**Isentropic Ltd (UK)**  
développe un procédé  
tout à fait similaire, mais  
qui utilise des machines  
alternatives fort  
originales à haut  
rendement à la place des  
machines rotatives

**Une fois au point, ce  
système sera bien adapté  
aux faibles capacités**





# Les stockages d'électricité thermodynamiques



**Merci pour votre attention**