



Jacques Ruer – Conférence ASPROM – 30/11/2016

Les stockages d'électricité thermodynamiques

- 1^{ère} partie : Généralités et exemples de stockage thermodynamiques (CAES et autres)
- 2^{ème} partie : Stockage Electricité par Pompage Thermique (SEPT)

Jacques Ruer – Conférence ASPROM – 30/11/2016

Les stockages d'électricité thermodynamiques

- Définition:

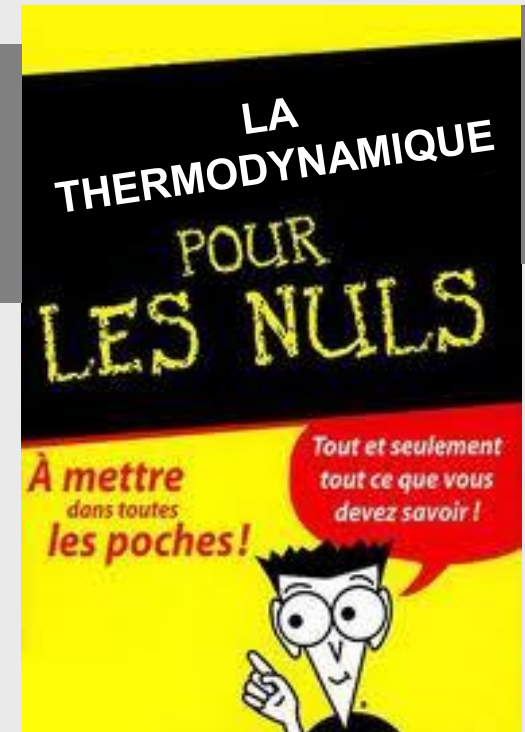
Systemes de stockage mettant en œuvre un fluide qui subit des changements de pression, de volume et de température

Les bases pour comprendre

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



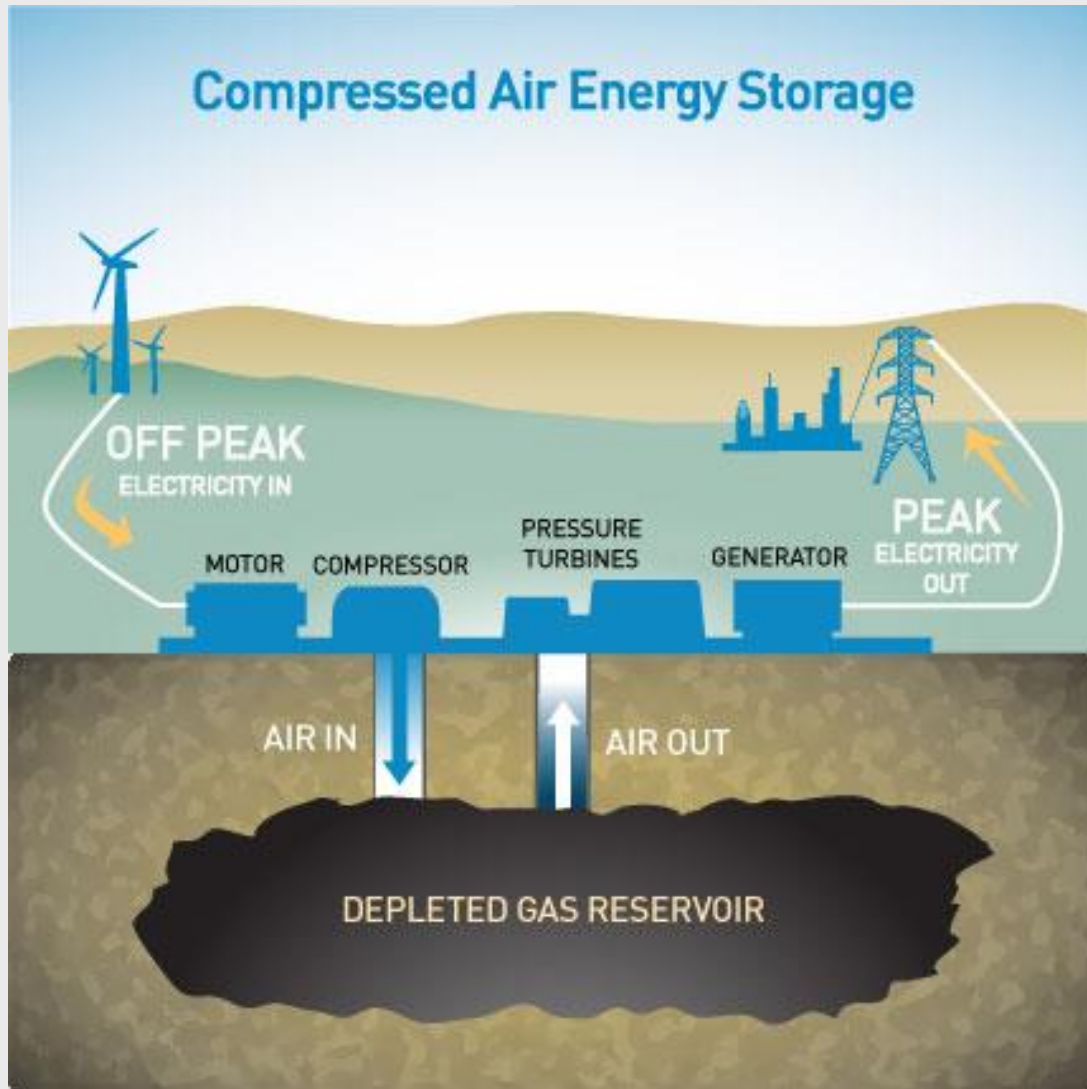
Points communs des stockages thermodynamiques

- Fluide de travail, comprimé, puis détendu, de façon cyclique
- Certains procédés stockent l'énergie de pression
- Certains procédés stockent l'énergie thermique chaude et/ou froide
- Certains procédés stockent les deux

Exemples de stockages thermodynamiques

- Air comprimé (CAES)
- Air comprimé adiabatique (A-CAES)
- Air comprimé isotherme
- Stockage chaleur
- Stockage du froid (Air liquide)
- Pompage thermique – stockage du chaud et du froid
- *Tous ces procédés peuvent avoir des variantes...*

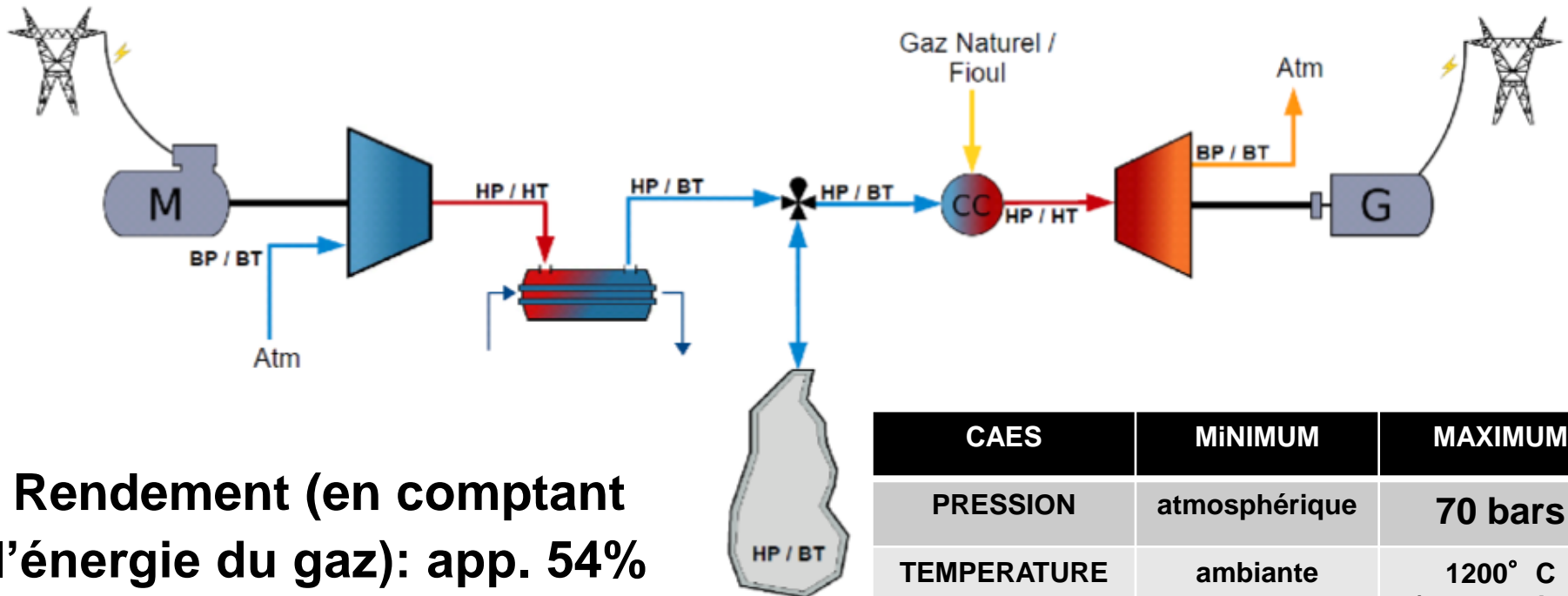
CAES : compressed air energy storage



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

CAES (type Huntorf)

- Air comprimé stocké dans des cavités souterraines
- La chaleur de compression est évacuée à l'atmosphère
- On réchauffe l'air comprimé en brûlant du gaz avant la détente

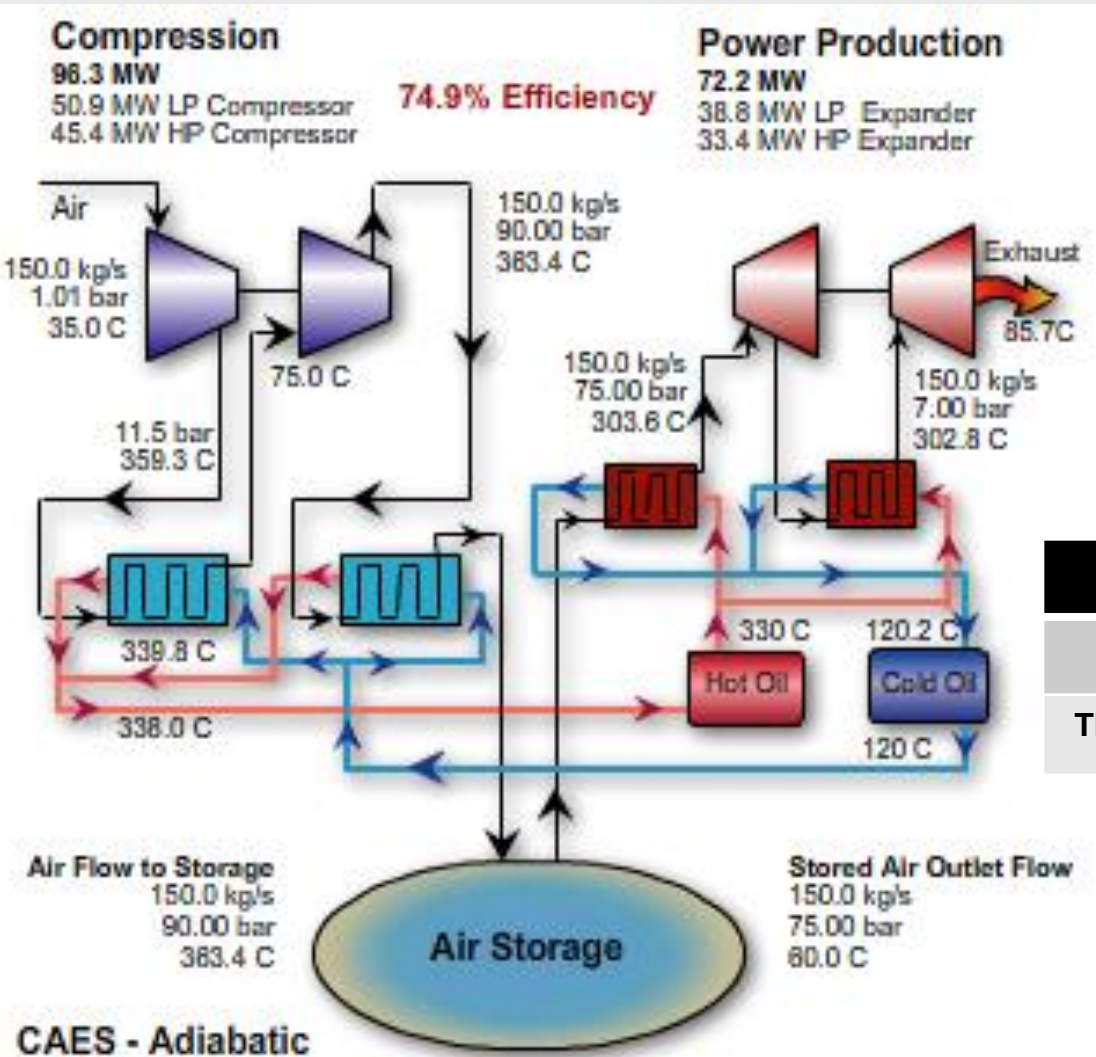


Rendement (en comptant l'énergie du gaz): app. 54%

CAES	MINIMUM	MAXIMUM
PRESSION	atmosphérique	70 bars
TEMPERATURE	ambiante	1200° C (combustion)

Adiabatic CAES

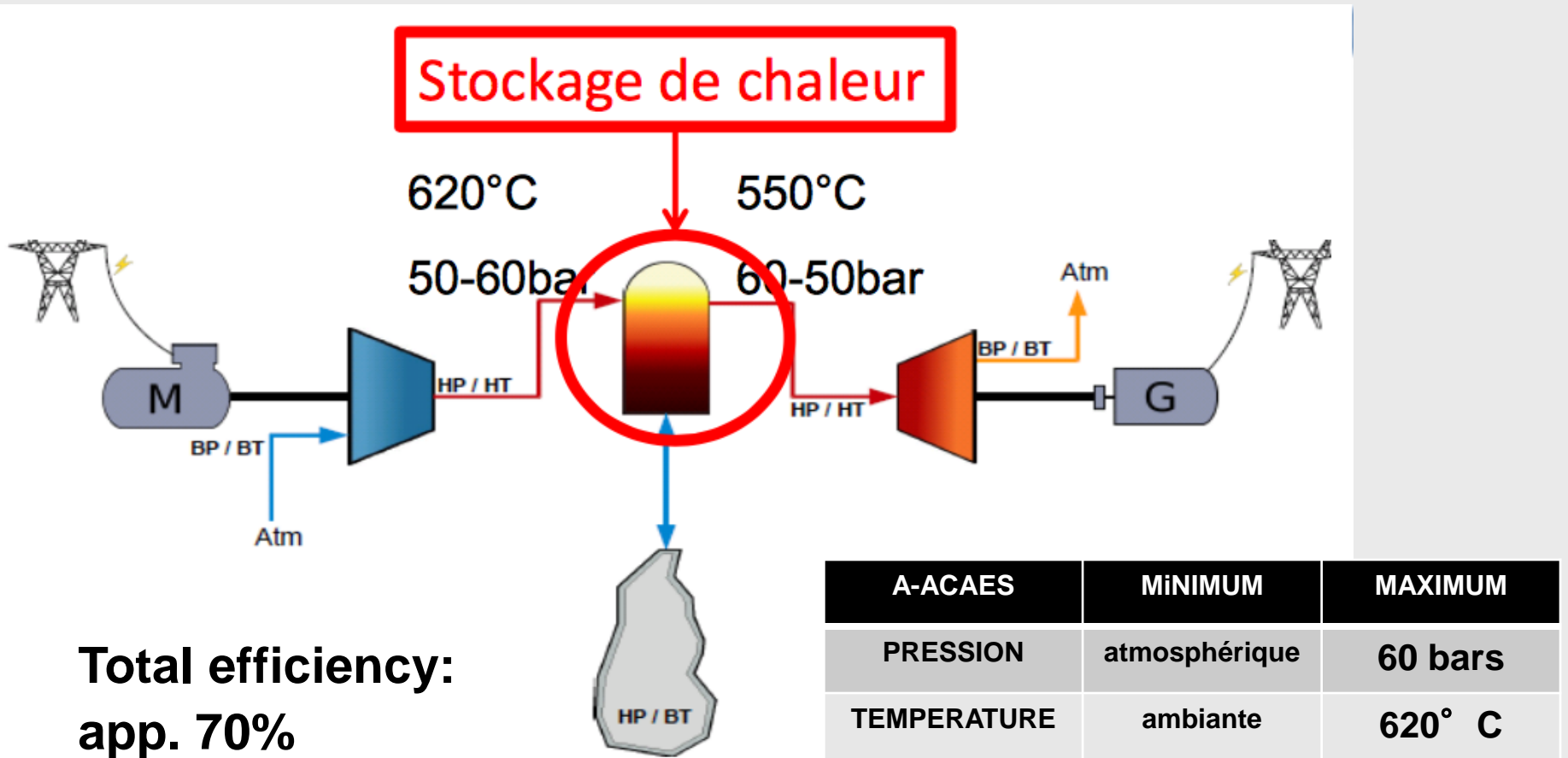
- La chaleur de compression est stockée dans de l'huile
- Cette chaleur est récupérée avant la détente



ACAES	MINIMUM	MAXIMUM
PRESSION	atmosphérique	90 bars
TEMPERATURE	ambiante	380° C

Advanced Adiabatic CAES

- La chaleur de compression est stockée à haute température

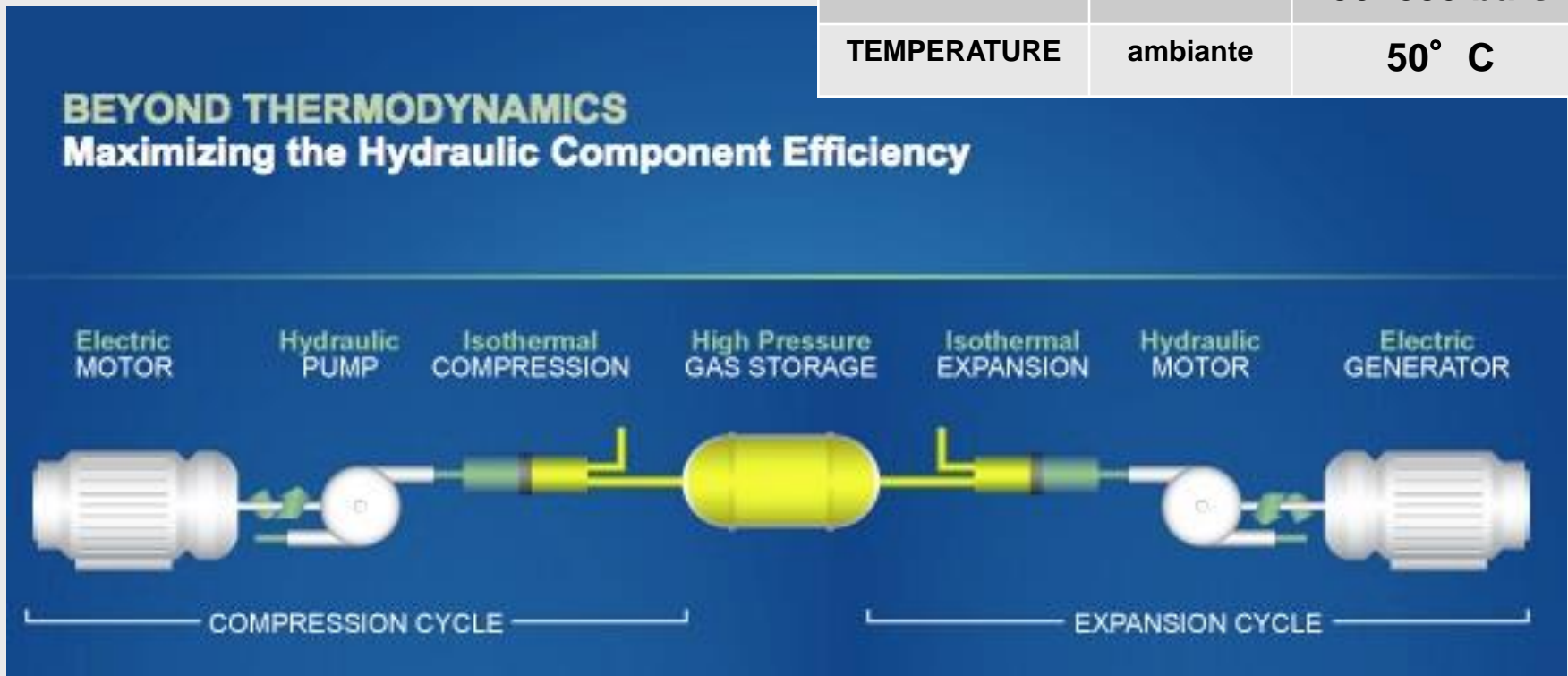


Isothermal CAES

Compression / détente conçue quasi isotherme

(SustainX – General Compression – Lightsail Energy - Airthium)

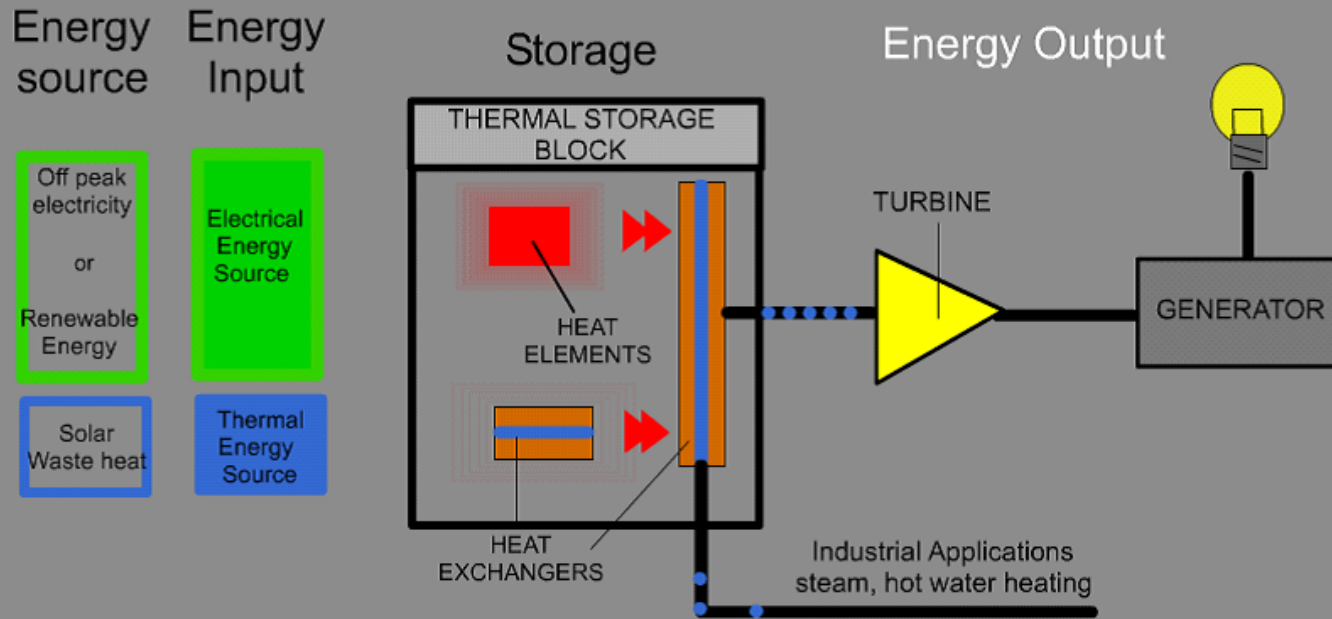
ICAES	MINIMUM	MAXIMUM
PRESSION	Atmos.	90 -350 bars
TEMPERATURE	ambiante	50° C



Electrothermal

Chauffage électrique de blocs réfractaires
 Rendement assez faible (40% – 50%)
 (Lloyd Energy - Australie – 1998)

LLOYDS	MINIMUM	MAXIMUM
PRESSION	atmosphérique	1 b (stock) 150 b (TAV)
TEMPERATURE	ambiante	1500° C



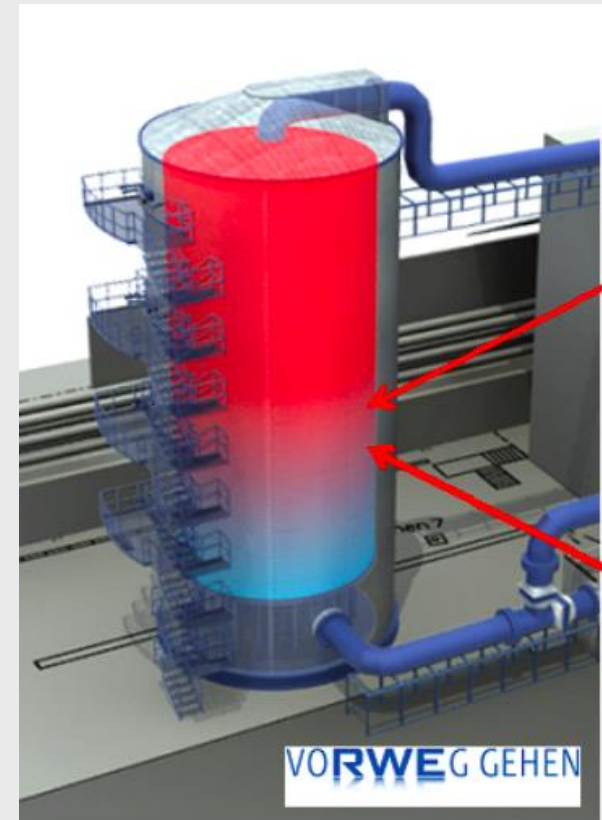
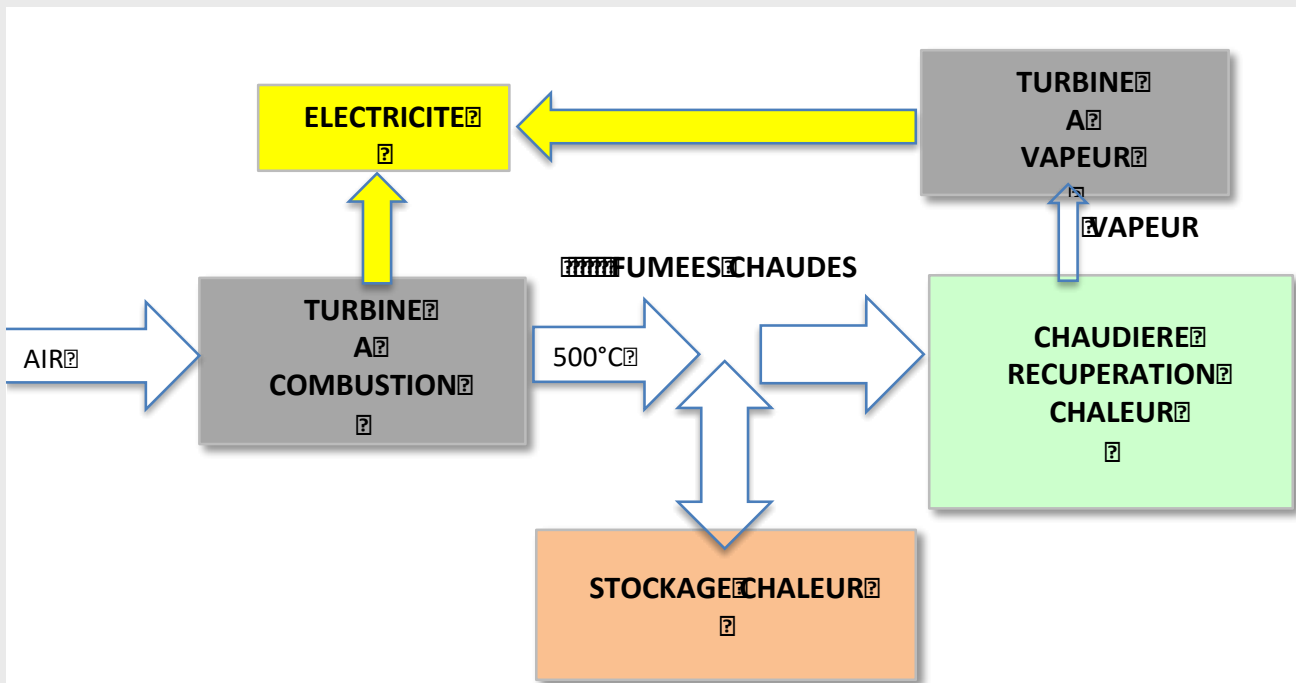
Through the use of heat exchangers, a fluid (such as steam):

- Runs the turbine
- The turbine runs the generator
- The generator creates electricity

Stocker la chaleur pour produire de l'électricité

La chaleur de l'échappement d'une turbine à combustion est stockée pour booster en cas de besoin la turbine à vapeur d'un cycle combiné

CC	MINIMUM	MAXIMUM
PRESSION	atmosphérique	1 b (stock) 150 b (TAV)
TEMPERATURE	ambiante	500° C

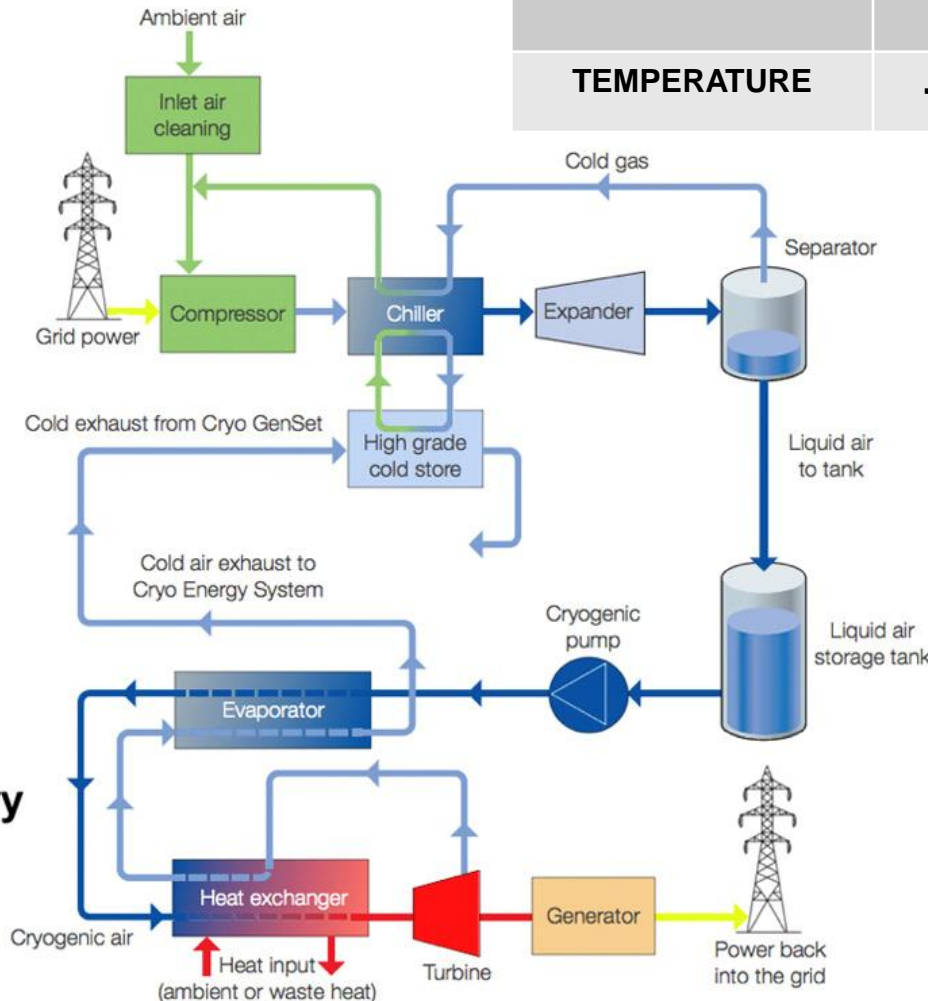


Stocker le froid pour produire de l'électricité

Liquid Air Energy Storage (LAES)

LAES	MINIMUM	MAXIMUM
PRESSION	atmosphérique	1 b (stock) 200b (process)
TEMPERATURE	-196° C	ambiante

Liquefaction



Storage

Power Recovery

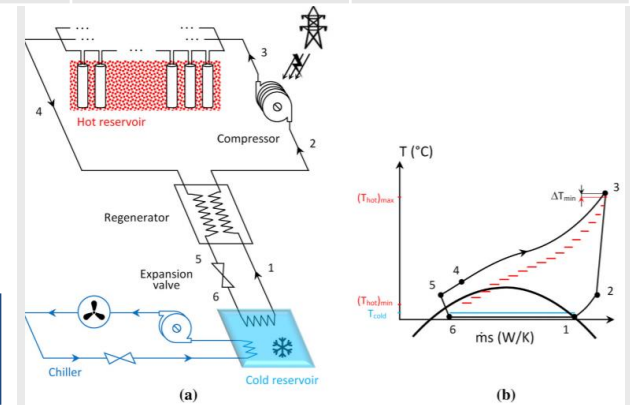
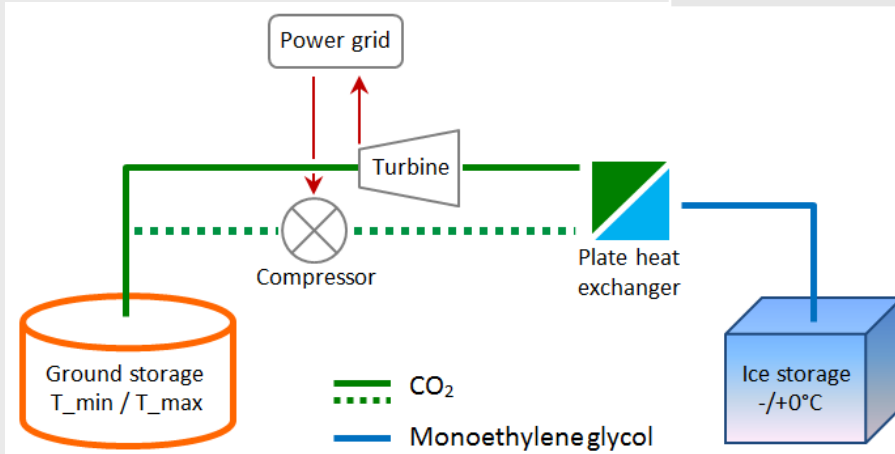
- Air liquide stocké
- Rendement assez faible (25%)
- Peut être amélioré (60%) en utilisant une source de chaleur lors du déstockage et un stockage de froid

Large-scale electricity storage by thermal doublet "Ground storage + Ice storage" & CO₂ as working fluid: SeleCO2 research project



<http://seleco2.free.fr/>

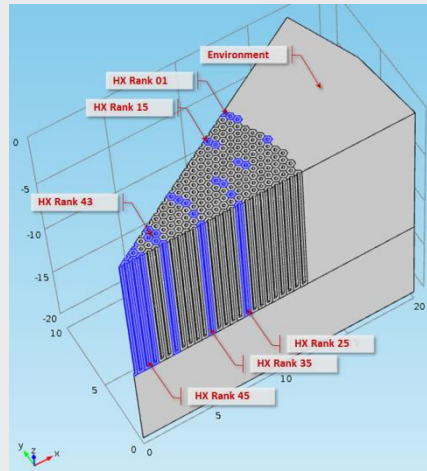
SeleCO2	MINIMUM	MAXIMUM
PRESSION	atmosphérique	110 b (CO ₂)
TEMPERATURE	ambiante	140° C



↑ Charging process: (a) Process layout - (b) Diagram {T, ms}

↖ Large-scale thermo-electric energy storage by thermal doublet

↖ 30° sector of the geostock showing 4 parallel lines of 45 geothermal heat exchangers (HX) in series (2161 exchangers in total in 12.3m radius geostock set up in unfractured dry crystalline bedrock)





Large-scale electricity storage by thermal doublet "Ground storage + Ice storage" & CO₂ as working fluid: SeleCO₂ research project

- Superficial unfractured dry crystalline bedrock (e.g., granite) can constitute the diffusive hot storage for large-scale thermo-electric energy storage by thermal doublet, an ice storage being the latent cold sink of the thermal doublet and supercritical CO₂ (sCO₂) the heat transfer working fluid circulating inside the closed-loop vertical geothermal exchangers.
- Operative 30° C-140° C thermal range of the diffusive hot storage will not alter mechanical resistance or thermal conductivity of the encasing bedrock.
- Technological issue of thermal coupling of a geothermal heat exchanger with the bedrock for working fluid temperatures above 100° C is solved by a 200mm diameter co-axial geothermal exchanger design implementing silicone rubber as wall material.
- Difficulty of modeling heat transfer for the full-scale geothermal exchanger due to Reynolds number up to 10⁶ for flow regime inside the exchanger is addressed through a simplified modeling approach.
- Experimental investigation on 1/10 scale heat exchanger prototype is conducted at CEA Grenoble to study the heat transfer performance and the storage dynamics with sCO₂ working fluid, and also to validate the full-scale modeling.

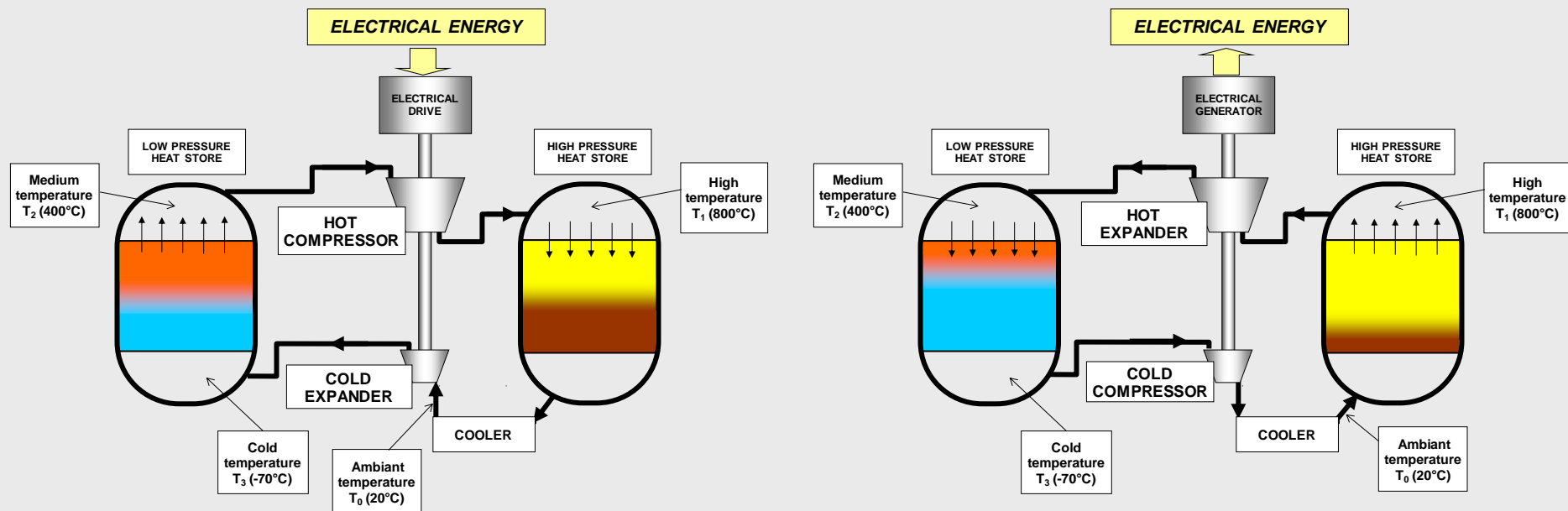


2^{ème} partie : Le procédé SEPT



Stockage d'Electricité par Pompage Thermique

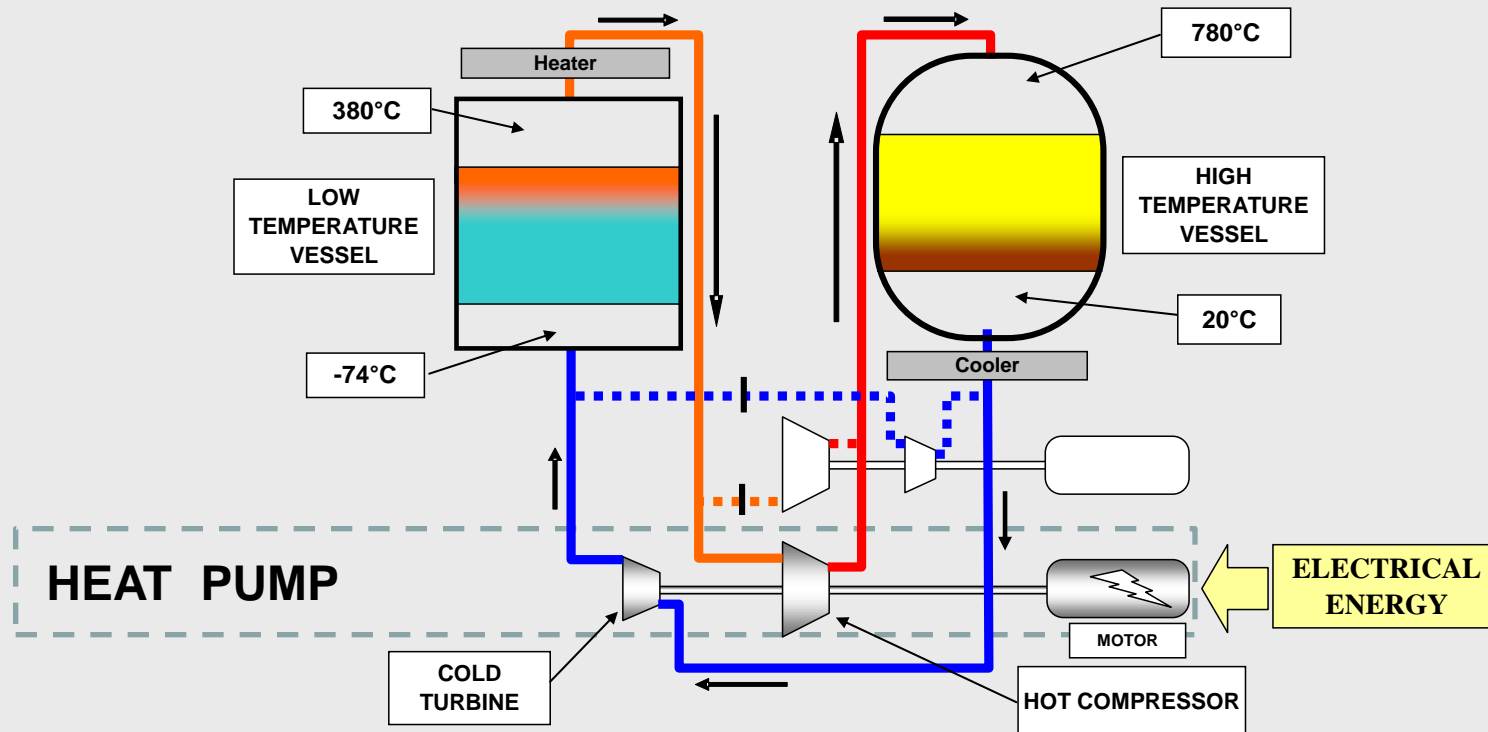
Stockage de masse d'électricité sous forme de chaleur et de froid
Energie stockée sous forme de chaleur sensible dans des matériaux solides
résistant aux températures mises en œuvre
(ruchage réfractaire, graviers basalte, etc.)
Excellente densité d'énergie (50kWh/m³ de réservoir)
Bon rendement global (70%)



Principe du procédé

Mise en œuvre : 2 trains séparés

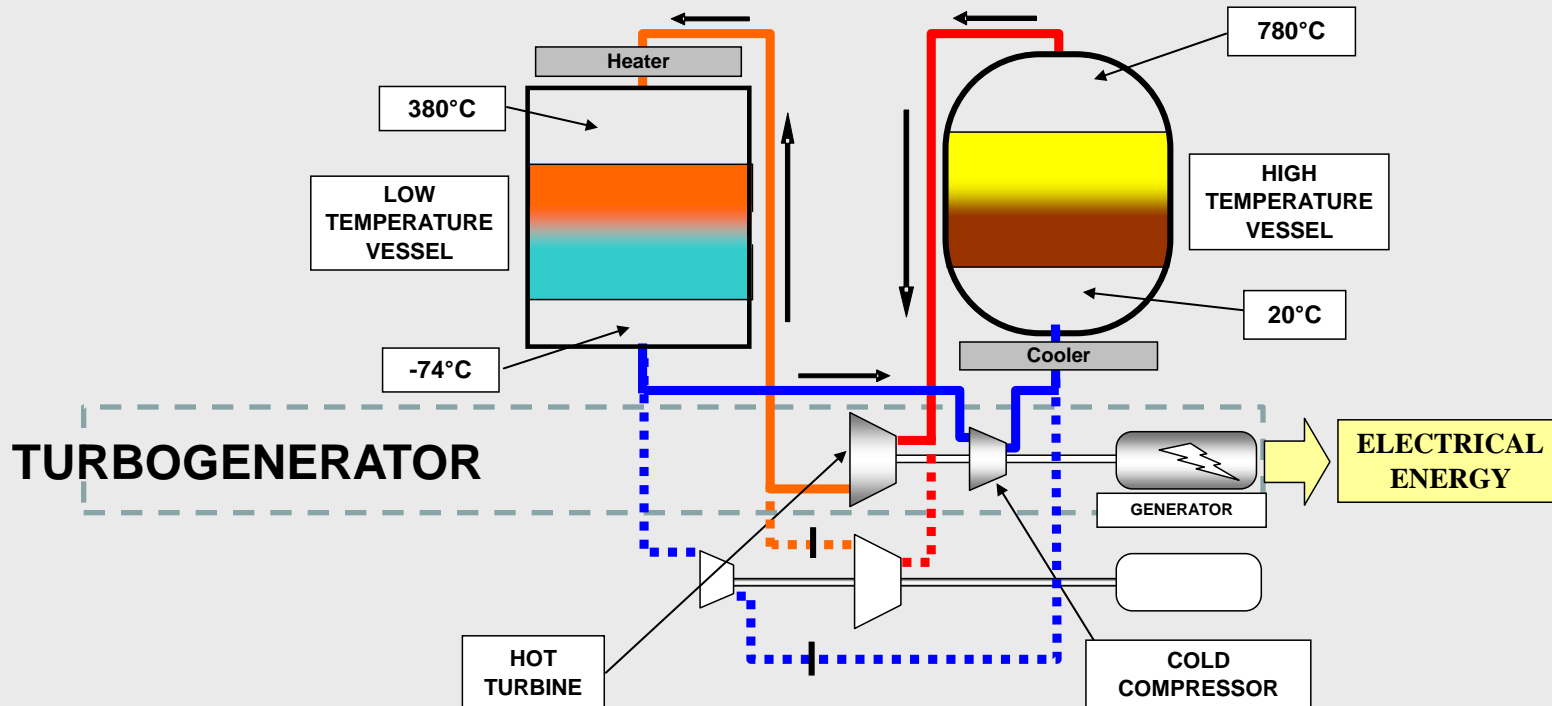
Phase de chargement : Pompage de la chaleur
Le moteur électrique entraine un train comprenant
compresseur chaud et turbine froide (pompe à chaleur)



Principe du procédé

Mise en œuvre : 2 trains séparés

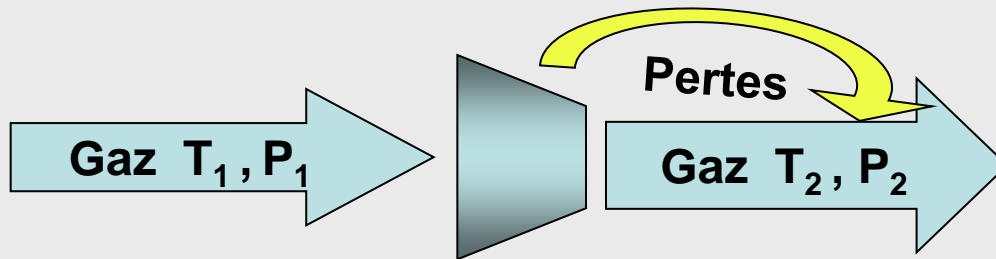
Phase de déchargement : Turbinage de la chaleur
Un train comprenant compresseur froid et turbine chaude entraîne un générateur (turbogénérateur)



Principe du procédé

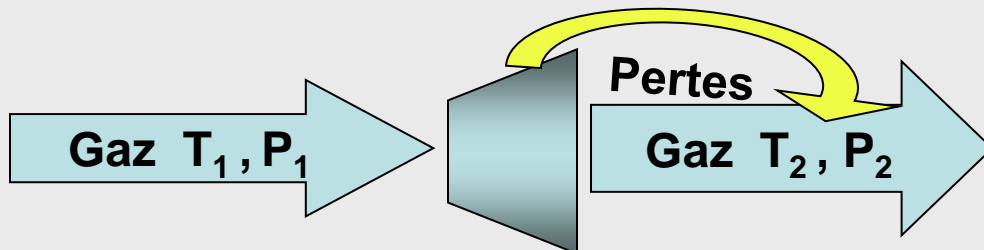
Machines non parfaites

- 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

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

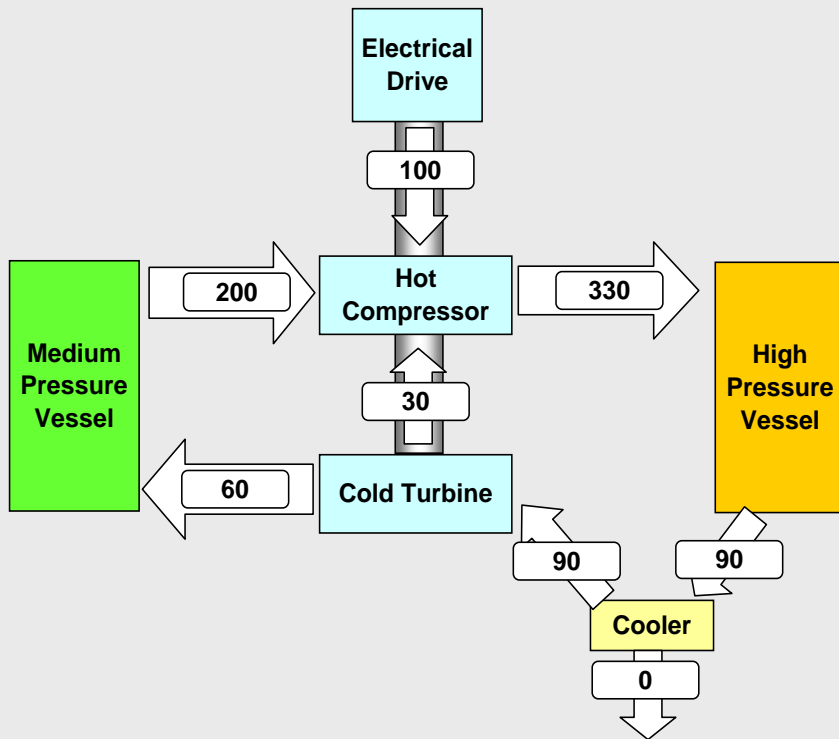
**Définition : η = efficacité isentropique de la machine
($\eta = 1$ pour une machine parfaite)**

Principe du procédé

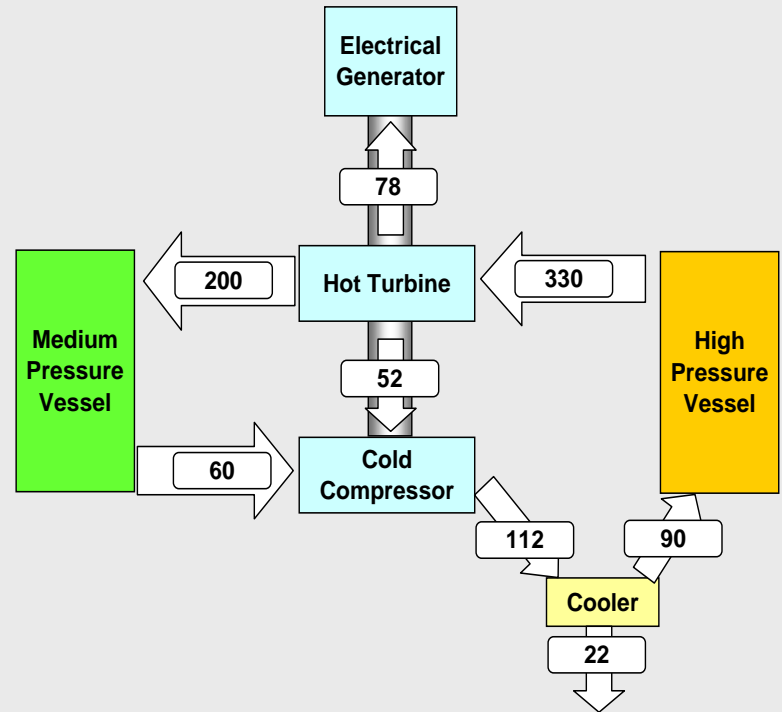
Flux d'énergie

Exemple d'analyse des flux d'énergie

CHARGEMENT



DECHARGEMENT

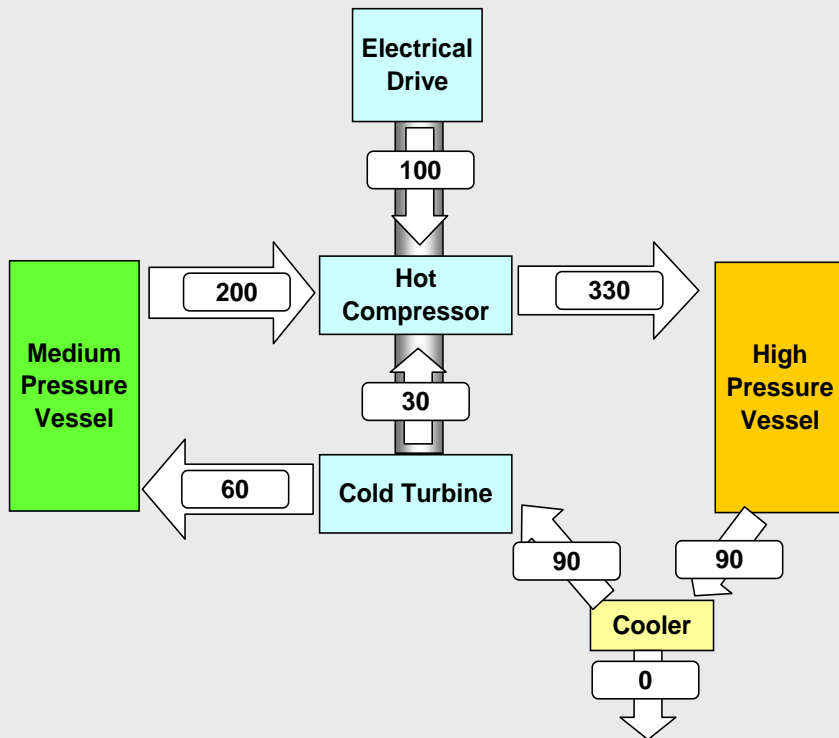


Principe du procédé

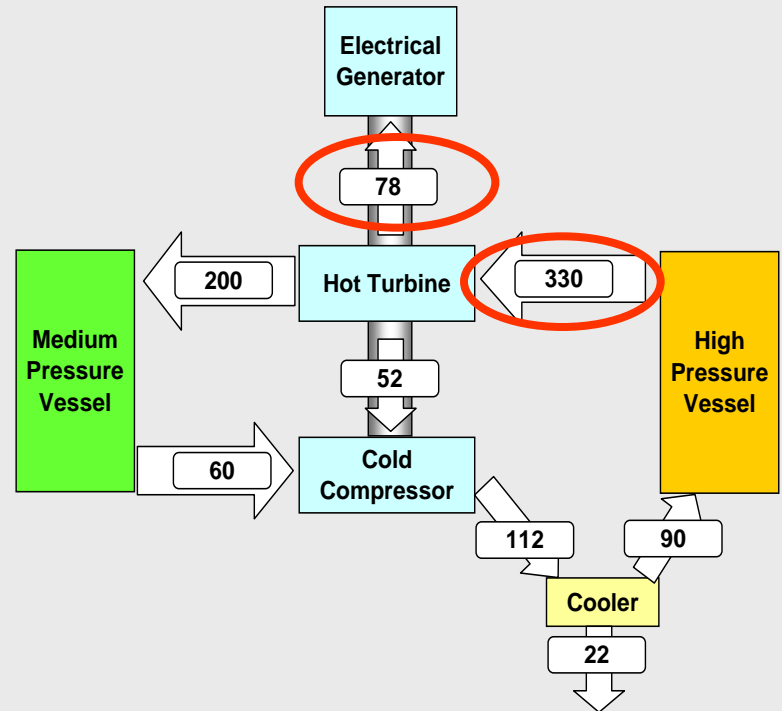
Flux d'énergie

Exemple d'analyse des flux d'énergie

CHARGEMENT



DECHARGEMENT



Efficacité turbine : 24%

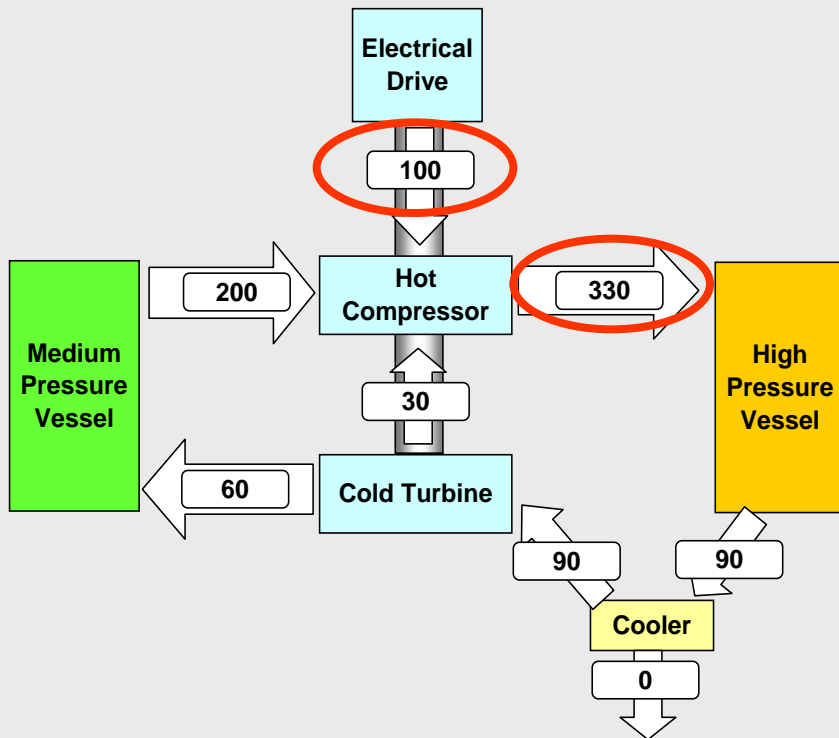
Une turbine à gaz n'a pas un très bon rendement...

Principe du procédé

Flux d'énergie

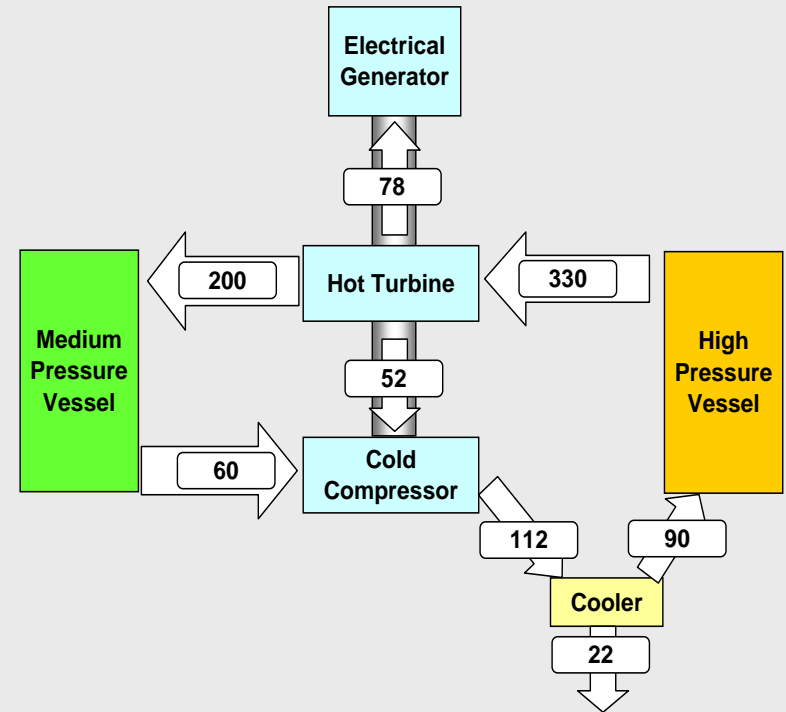
Exemple d'analyse des flux d'énergie

CHARGEMENT



Efficacité pompe à chaleur : 330%

DECHARGEMENT



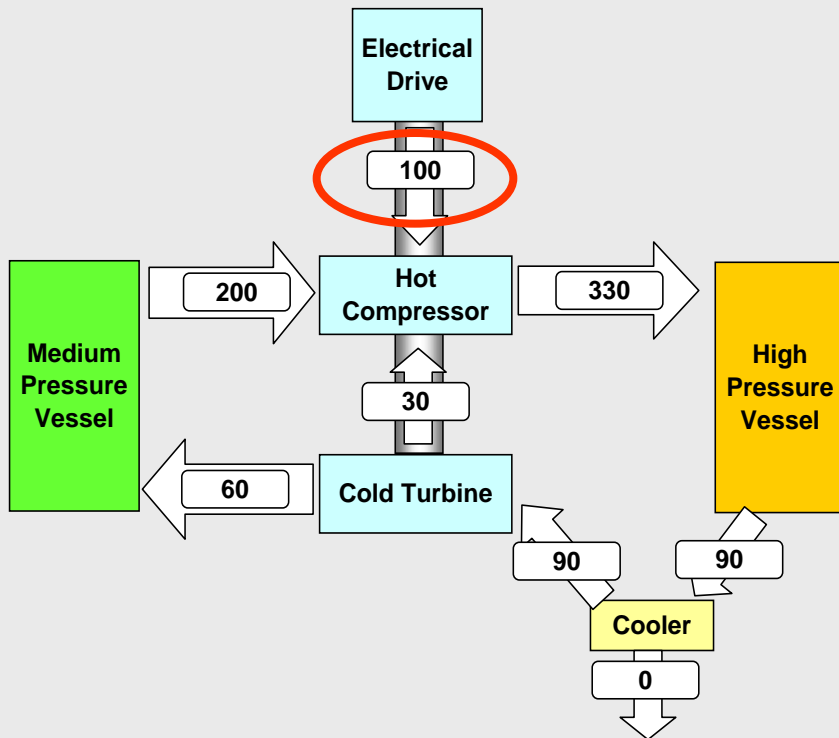
... Mais une pompe à chaleur a un excellent coefficient de performance

Principe du procédé

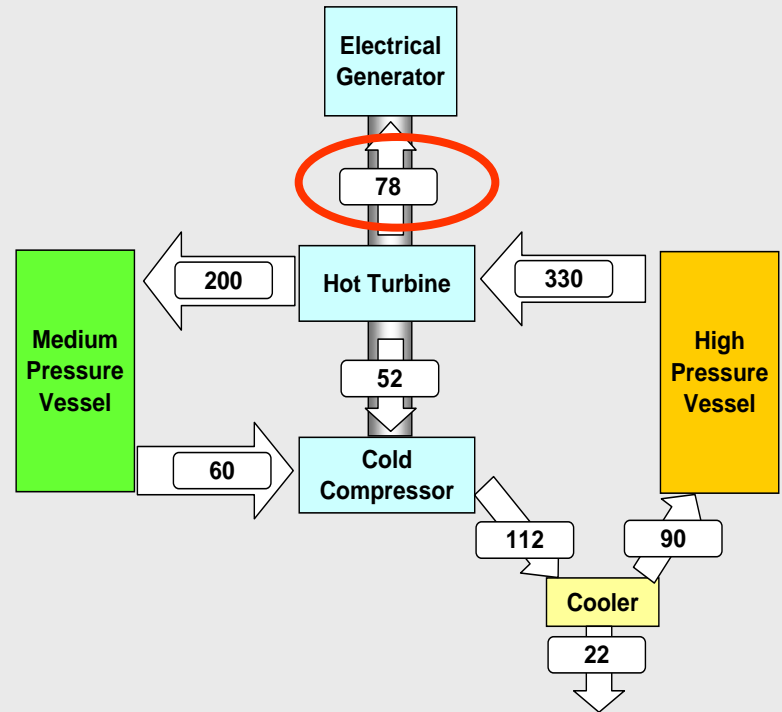
Flux d'énergie

Exemple d'analyse des flux d'énergie

CHARGEMENT



DECHARGEMENT

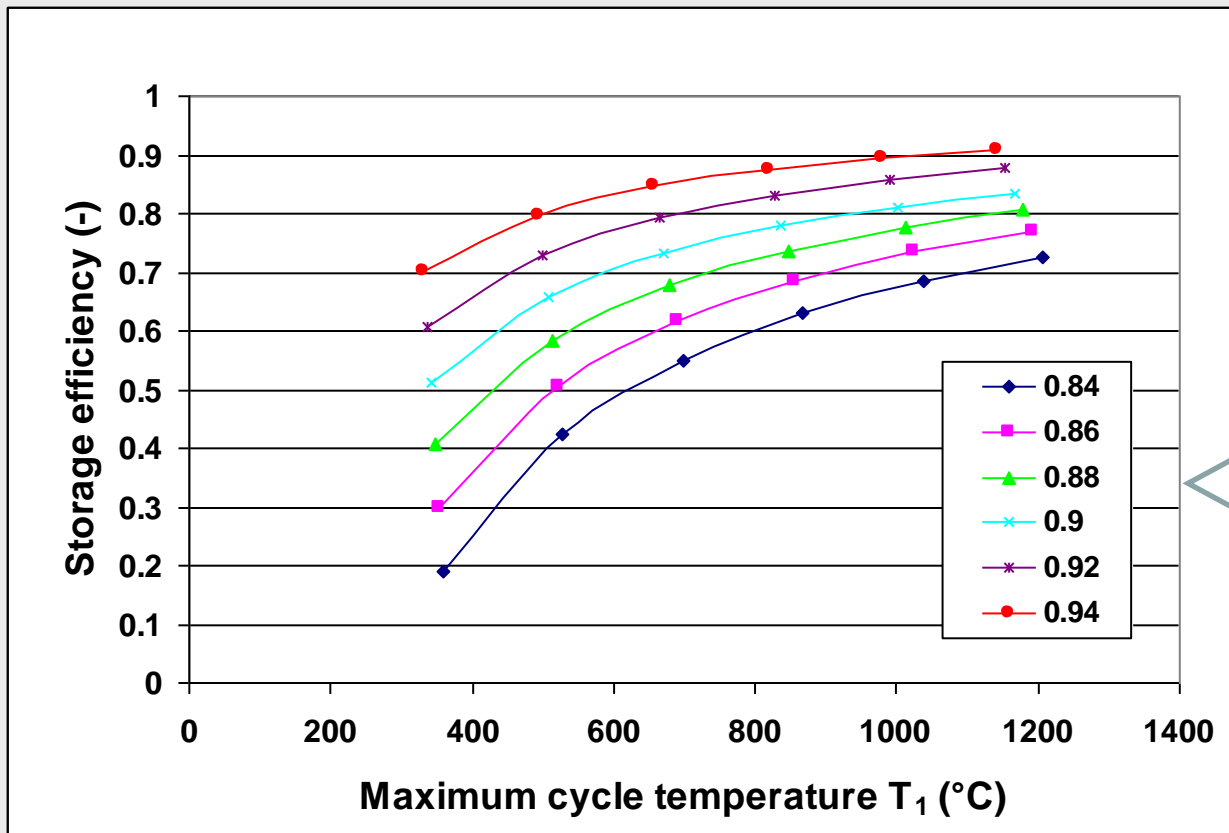


Rendement énergétique du stockage : 78%

Le stockage complet a un bon rendement

Recherche & développement – (Projet SETHER)

- Le procédé a fait l'objet d'un projet financé par l'ANR (projet SETHER)
- Une thèse effectuée au CEA a confirmé la faisabilité du procédé



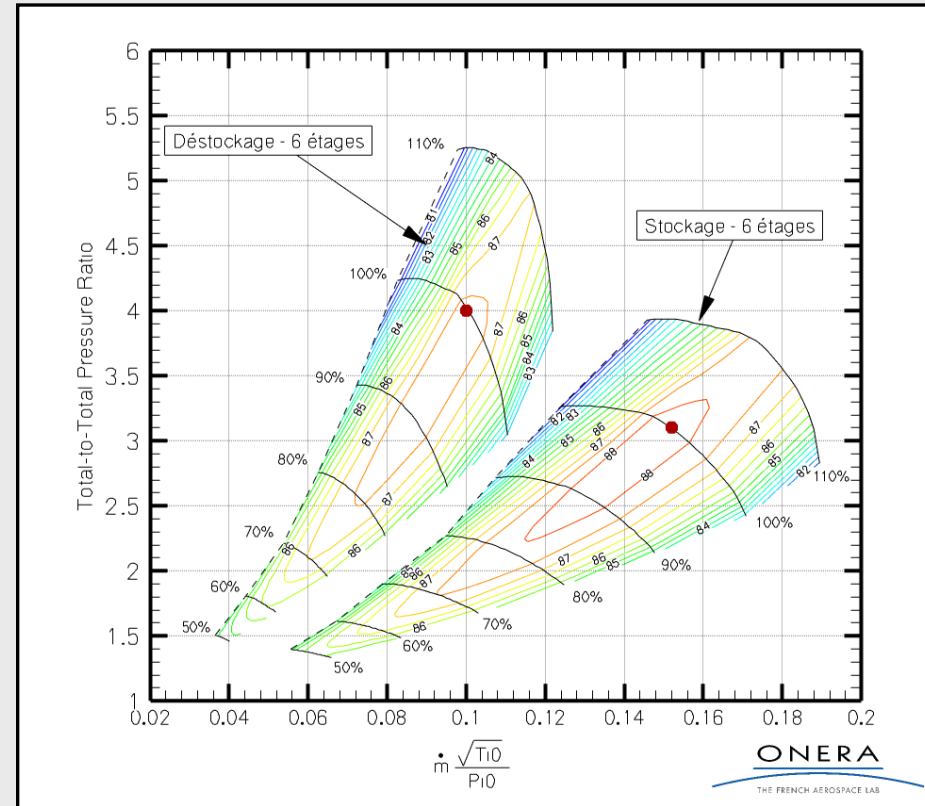
η : efficacité isentropique (supposée identique pour les 4 machines)

Recherche & développement – (Projet SETHER)

- Les turbomachines nécessaires ont été calculées



Example of a 45MW hot gas expander working at 760° C
(source ELLIOTT company)

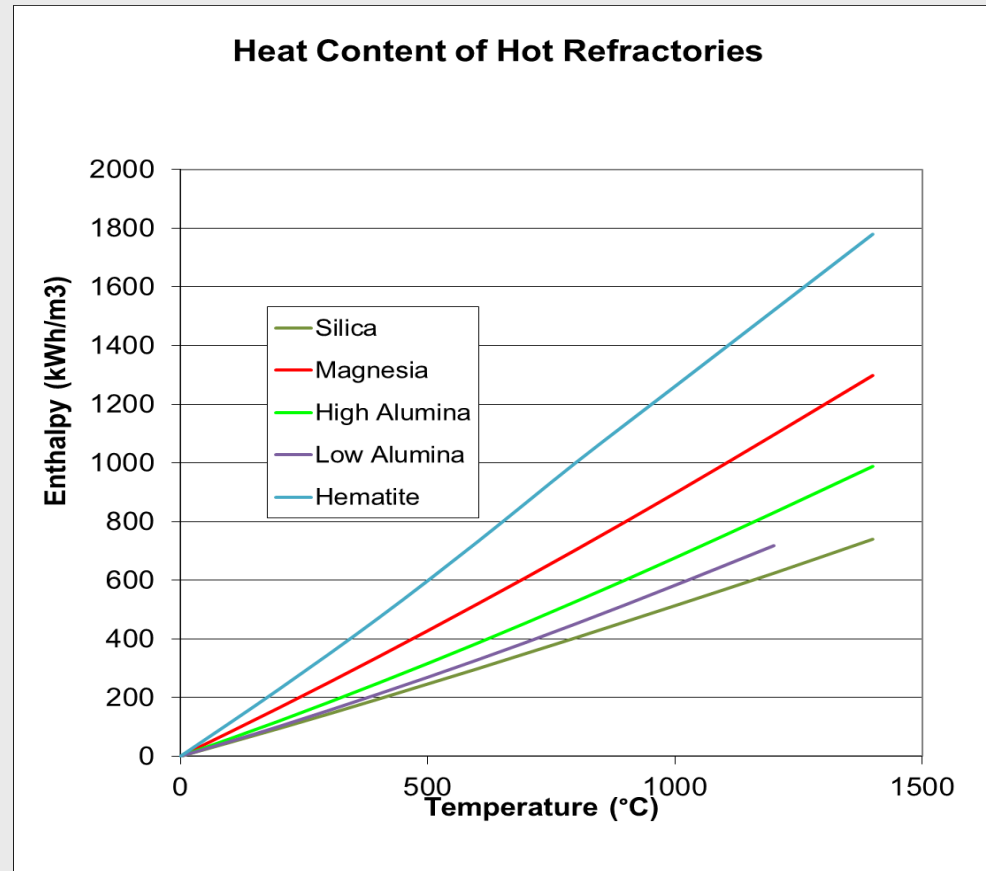


Recherche & développement – (Projet SETHER)

Matériaux de stockage de la chaleur

Propriétés nécessaires :

- Bonne tenue mécanique à chaud
- Résistance à la fatigue thermique cyclique
- Grande capacité calorifique
- Bonne conductibilité thermique
- Faible coût

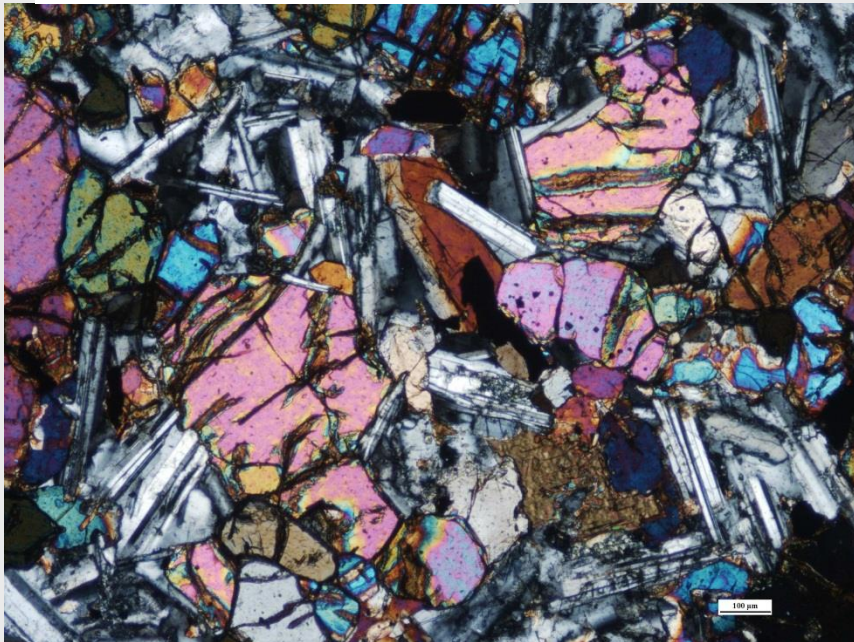


Recherche & développement – (Projet SETHER)



- Des matériaux naturels convenables ont été identifiés et testés par le CEA à 800° C à Grenoble (CEA boucle CLAIRE)

Matériau de stockage: graviers de basalte riche en olivine

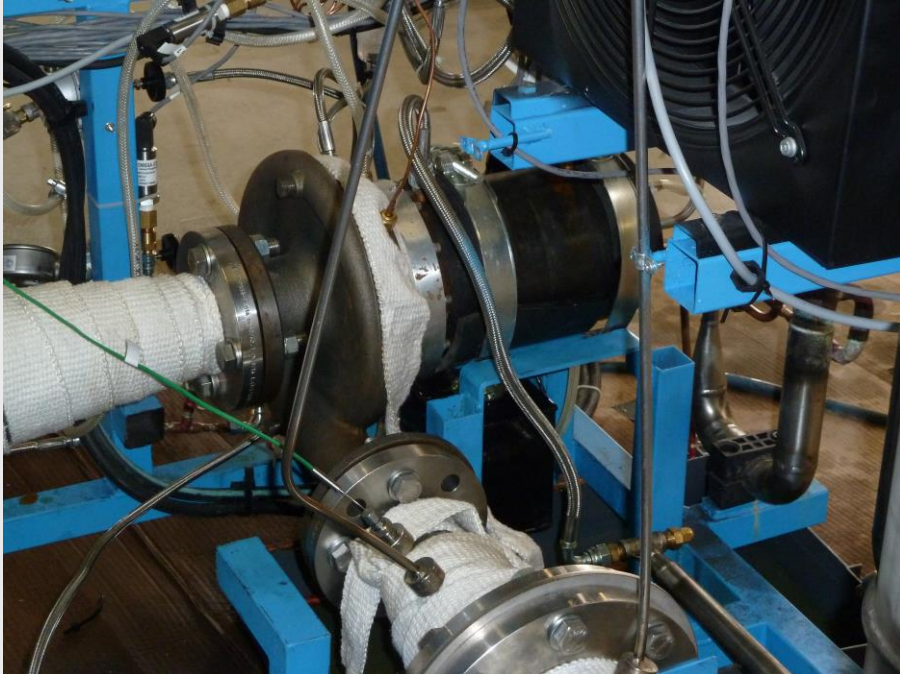


Composition chimique (typique)	49%SiO ₂ – 13%Al ₂ O ₃ – 3%FeO 10%Fe ₂ O ₃ - 6%MgO – 4%CaO 3%(Na ₂ O+K ₂ O) – 2% TiO ₂
Densité	2800 kg/m ³
Capacité calorifique	0.84 kJ/kg/K - 2.5 MJ/m ³ /K
Conductibilité thermique	1.7 W/m/K
Ramollissement	1050 - 1070° C
Fusion	1150° C – 1250° C

Recherche & développement – (Projet STOLECT)

**Le procédé met en œuvre des machines de compression et de détente de gaz,
dont un compresseur chaud (une machine inédite)**

**La démonstration d'un compresseur chaud est effectuée dans le cadre du
projet STOLECT lauréat du Concours Mondial d'Innovation 2014
Projet mené par Keynergie**



**Vue du démonstrateur de
compresseur chaud en
cours de montage sur le
banc d'essai**

Stockage d'Electricité par Pompage Thermique

SEPT	MINIMUM	MAXIMUM
PRESSION	atmosphérique	4 bars
TEMPERATURE	-70° C	800° C

- **EXEMPLE** pour un stockage de 10 GWh

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

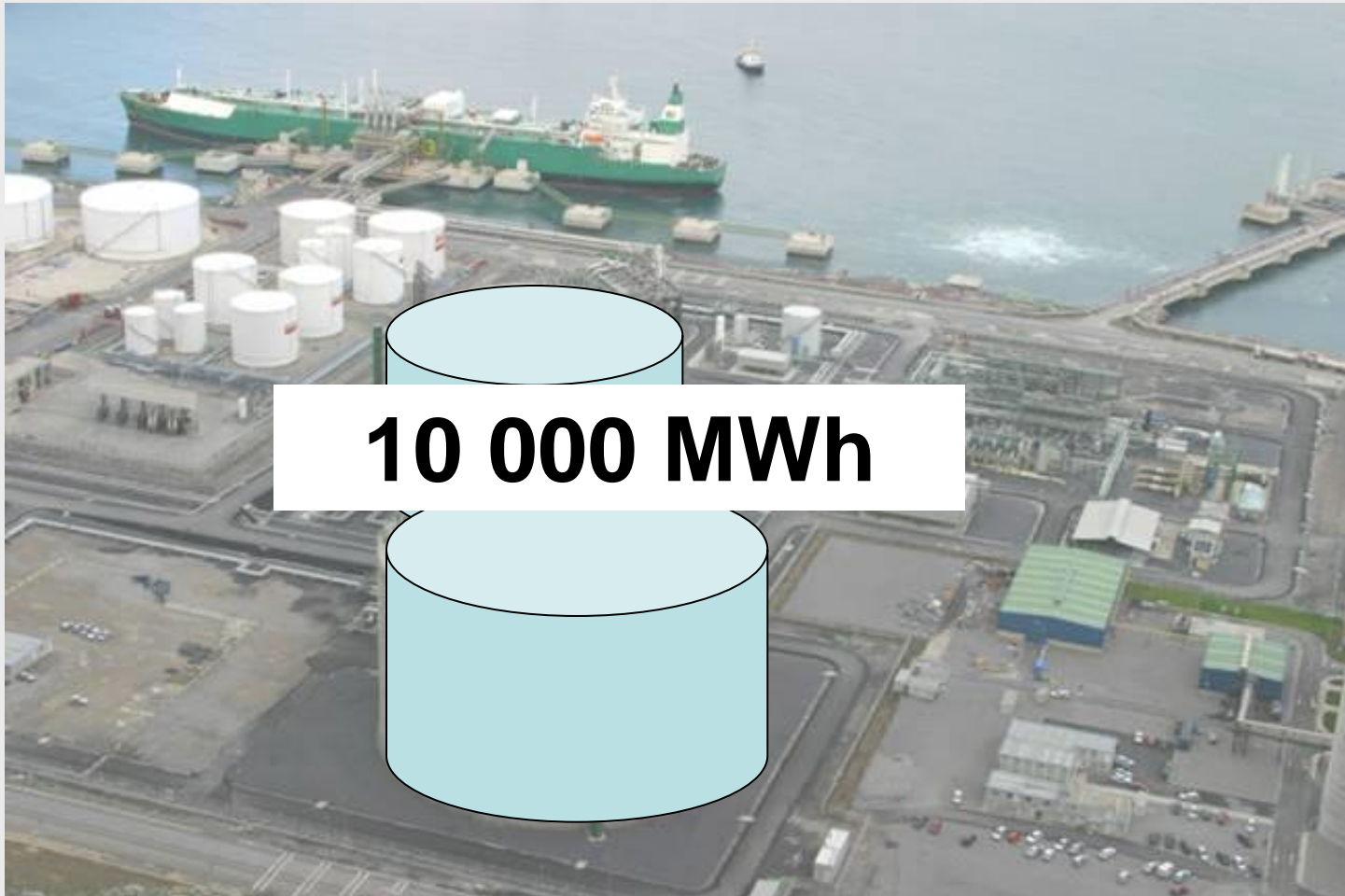
Stockage d'Electricité par Pompage Thermique

2 LNG Tanks of 140000 m³ capacity (Bilbao)



Stockage d'Electricité par Pompage Thermique

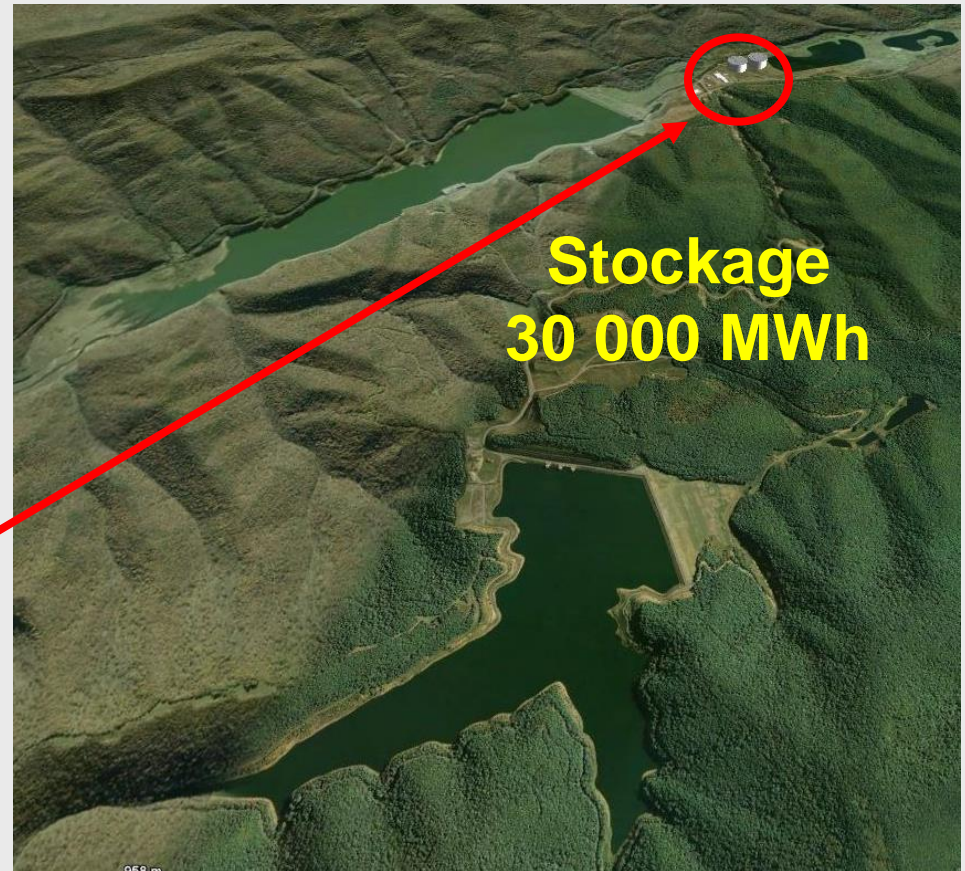
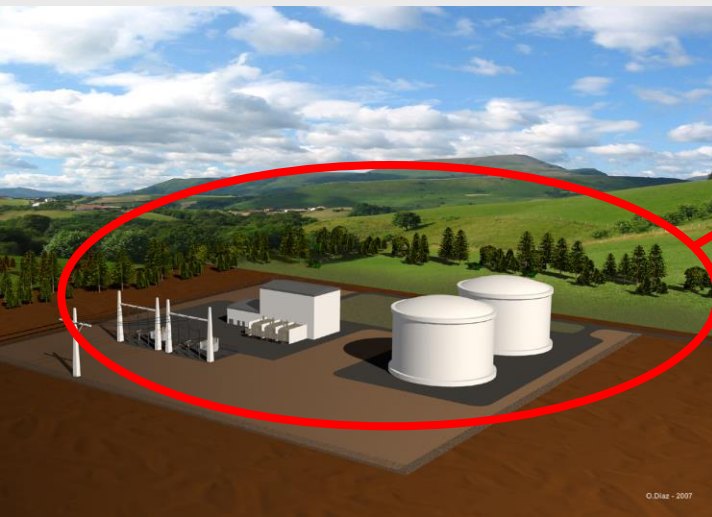
Des réservoirs de cette taille permettraient de stocker 10GWh



Stockage d'Electricité par Pompage Thermique

Comparaison de l'emprise d'une STEP et d'un stockage SEPT

- **STEP 30 GWh** - Bath County (USA)
- Réservoirs de 3 km²
- Un stockage thermique de capacité équivalente est 300 fois plus petit



Les stockages d'électricité thermodynamiques : résumé

	T max	Tmin	Pmpax	P min	kWh/m ³	rend
ACAES	380° C	amb	≈ 90 bars (caverne)	amb	20 (caverne)	0,7
A-ACAES	620° C	amb	≈ 60 bars (caverne)	amb	14 (caverne)	0,7
ICAES	≈ 50° C	amb	≈ 90-350b (réservoirs)	amb	11- 60 (réservoirs HP)	0,7
ELECTRO-THERMAL	≈ 1500° C	amb	1 bar (stock) 150b (vapeur)	Vide condenseur	600+	0,4-0,5
SeleCO2	140° C	-1° C	110 bars (fluide CO2)	amb	12 (stock)	0,53
LAES	amb	-196° C	200b (circuit liquéfacteur)	amb	200 (stock air liquide)	0,25-0,5
SEPT	800° C	-70° C	4 bars (réservoir HT)	amb	50 (2 réservoirs)	0,7

Ces valeurs dépendent des paramètres choisis (P, T, etc)

Les stockages d'électricité thermodynamiques



Merci pour votre attention