

STOCKAGE ET CENTRALES SOLAIRES

**3A ENSEM Em-Sys Banque 1
& Master ME**

Alexandre LABERGUE

alexandre.labergue@univ-lorraine.fr

Bureau 015 Jaune



Echangeurs et chaleur fatale

Positionnement de la partie « stockage et centrales solaires »

- Changement de phase liq/gaz, liq/solide et échangeurs → N. Rimbert
- Chaleur fatale → F. Lemoine
- Stockage et centrales solaires → A. Labergue

Echangeurs et chaleur fatale

Positionnement de la partie « stockage et centrales solaires »

3 séances de 2 heures

- Vecteur énergétique ciblé : électricité
- Source primaire principale ciblée: le soleil
- Stockage + échangeurs: 2 composants présents dans les centrales solaires thermiques à concentration (CSP in english)

PLAN

I. Introduction

II. Stockage de l'énergie mécanique

II. 1 Introduction

II. 2 Stockage gravitaire

II. 3 Stockage par air comprimé

II. 4 Les volants d'inertie

III. L'énergie solaire

III. 1 Le Soleil

III. 2 Bilan énergétique sur Terre

IV. Les centrales solaires thermodynamiques

IV. 1 Introduction

IV. 2 Principaux composants d'une centrale solaire

IV. 3 Le stockage thermique

IV. 4 Etat de l'art des centrales solaires

IV. 5 En guise de conclusion

PLAN

- I. Introduction
- II. Stockage de l'énergie mécanique
 - II. 1 Introduction
 - II. 2 Stockage gravitaire
 - II. 3 Les volants d'inertie
- III. L'énergie solaire
 - III. 1 Le Soleil
 - III. 2 Bilan énergétique sur Terre
- IV. Les centrales solaires thermodynamiques
 - IV. 1 Introduction
 - IV. 2 Principaux composants d'une centrale solaire
 - IV. 3 Le stockage thermique
 - IV. 4 Etat de l'art des centrales solaires
 - IV. 5 En guise de conclusion

Références bibliographiques

- Thermique Solaire; Y. JEANNOT– polycopié de cours; Mines Nancy
- Génie Energétique Appliquée au Solaire – Energie solaire thermique; M. FEIDT, M. COSTEA, C. PETRE et R. BOUSSEHAIN; Editura Printech (2004)
- Centrales solaires thermodynamiques; A. FERRIERE; Technique de l'Ingénieur, réf BE8903, 2008
- Revues: *International Journal of Solar Energy*, *Solar Energy*,
- *etc...*

I. INTRODUCTION

Energie solaire

Les principales applications



Energie solaire

Les principales applications

- Production d'eau chaude: conversion en énergie thermique



- Production d'électricité: conversion en énergie électrique



Mais pas que les PV...

Energie solaire

Les centrales solaires

- Filières traditionnelles de production d'électricité



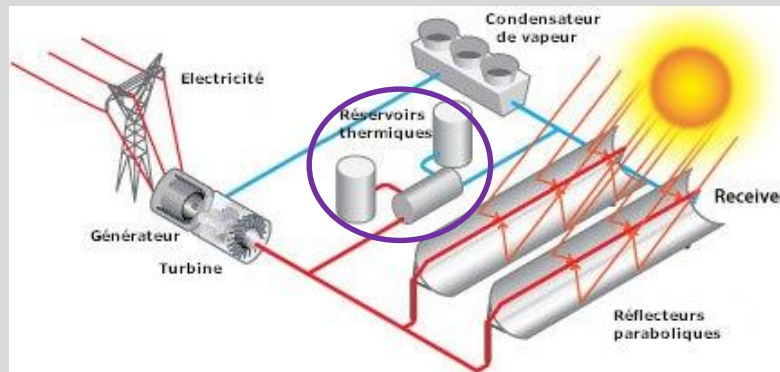
- Alternative « **verte** »: les centrales solaires thermodynamiques ou thermiques



Energie solaire

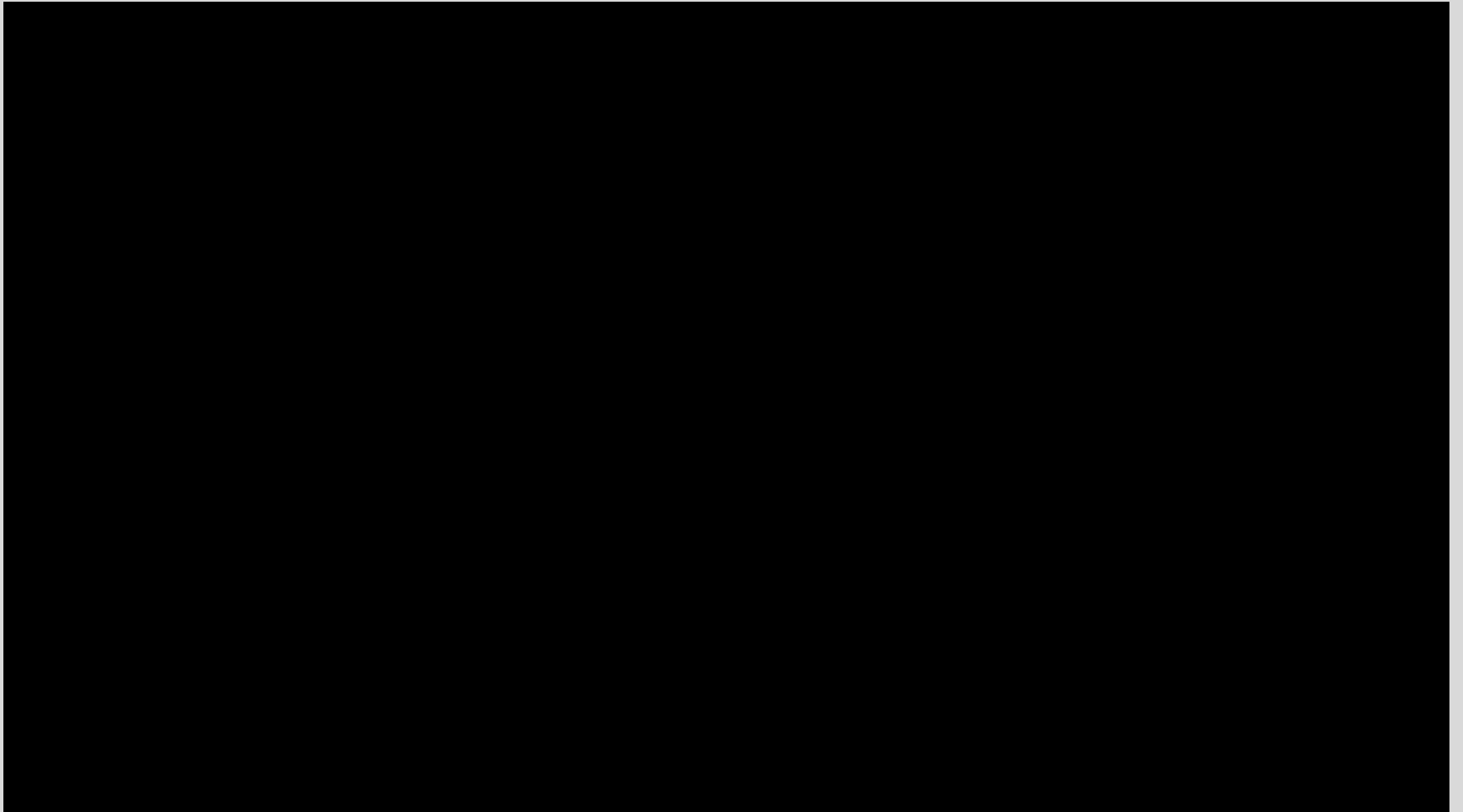
Les centrales solaires

- les centrales solaires thermodynamiques ou thermiques
 - Moment d'effervescence dans les années 80 (centrales de 1^{ière} génération), puis déclin par la suite
 - Actuellement (centrales de 2^{ond} génération) → renouveau lié à des contraintes environnementales & économiques
 - Mais approche révisée des centrales de 2^{ond} génération
- Principaux composants d'une centrale solaire:



- Centrale solaire → applications de plusieurs notions déjà vues à l'ENSEM

Energie solaire
Les centrales solaires



II. STOCKAGE DE L'ENERGIE

MECANIQUE

II.1 Introduction

Energie : *Les unités*

- Plusieurs formes d'énergie primaire:
 - Combustibles
 - Energie nucléaire
 - Energie mécanique et thermique
- 3 principales unités:
 - Le Joule *J*
 - Le Watt heure *Wh*
 - Le tonne équivalent pétrole *tep*
- Leurs équivalences:
 - $1Wh = ? J$
 - $1tep = ? J = 1000 m^3 \text{ de gaz} = 7,33 \text{ barils de pétrole}$
- Production

Puissance électrique produite sur une année

➤ **The electrical energy carrier**

- Easy to product
- But remains hard to store
- Electrical storage require to convert electrical energy into an other form of energy

➤ **Main energy storage domains**

- Potential
- Kinetics
- Thermal
- Electrochemical
- Hydrogen



➤ **Energy storage domain**

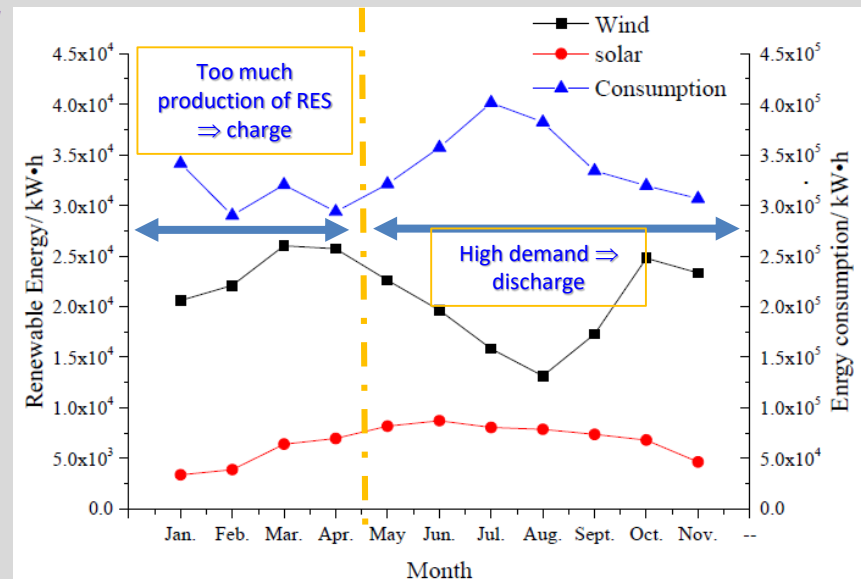
- Mobile energy storage: cell/laptop, vehicules, power lighting
- Fixed energy storage: grid-connected and off-grid (remote islands)
- Large-scale = electrical grid level
- Small-scale = customer level

➤ **Our focus in this course**

- Potential and kinetics domains
- Fixed grid-connected energy storage

➤ Why store electricity?

- Proliferation of Renewable Energy Sources (**RES**) implies severe challenges for the electrical grids
- **RES** (sun and wind) are naturally intermittent and thus unpredictable
 - ✓ Peak generation and peak demand are often uncorrelated
 - ✓ High level of RES penetration may cause serious problems of power grid reliability and stability
 - *frequency fluctuations and*
- Storage can:
 - ✓ Smooth the flow power from **RES**
 - ✓ Increase the **RES** penetration rate into electrical grid

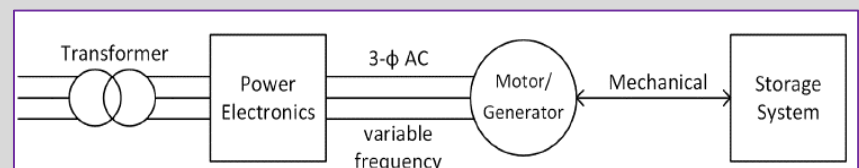
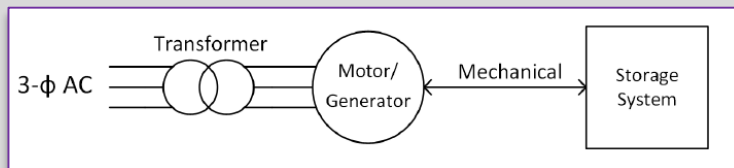


➤ Integration of renewables storage requirements :

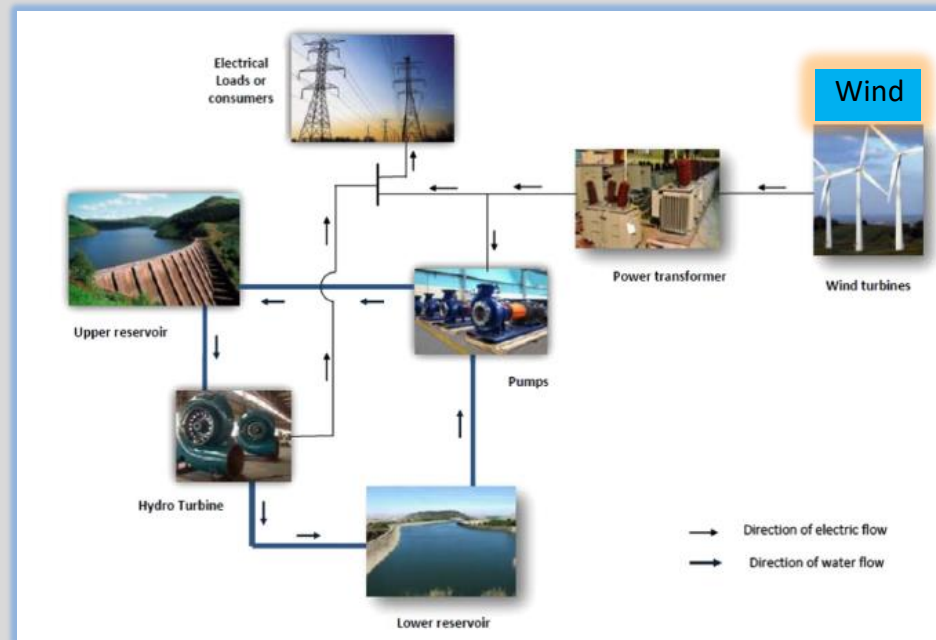
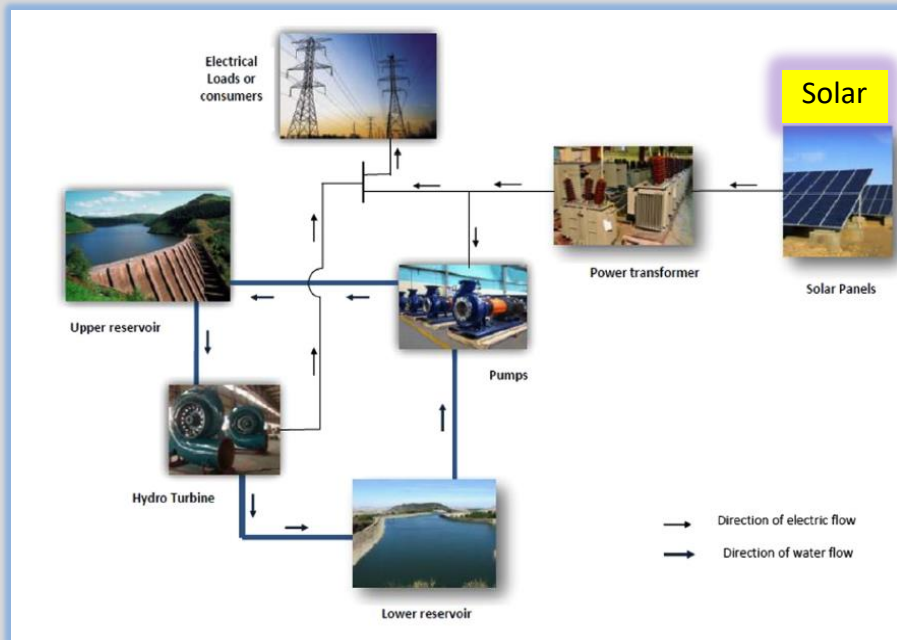
- Power: 1 – 400 MW
- Discharge time: 1 min – 1 day
- Cycles: several times/day
- Typical location: renewable sites (Wind or solar farm) and distribution network
- Suitable technologies storage technologies: batteries and flow batteries, PHES or CAES

➤ Energy storage facility:

- Conversion is needed between the storage domain and the electrical grid domain
 - ⇒ Electricity has to be change of form
- Mainly composed of a storage medium and a power conversion system (motor/generator)
- Motor/generator may be
 - ✓ Run at fixed rotation speed ⇒ directly connected to the grid fixed rotation speed
 - ✓ Run at variable rotation speed ⇒ undirectly connected to the grid: interface grid/storage domain with power electronic

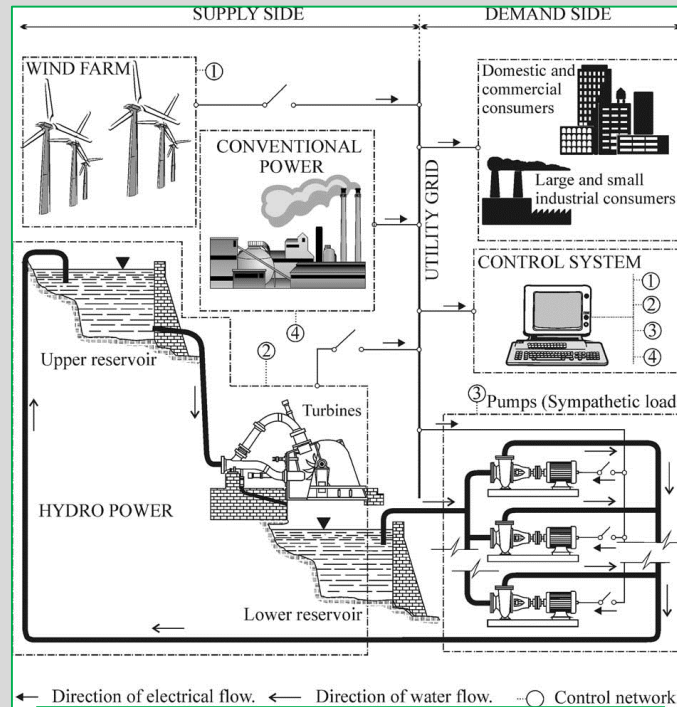


Conceptual of the using of energy storage to improve RES penetration



Exemple

- Ile de Fer dans les Canaries^{1,2,3}: association d'une STEP avec des éoliennes
- Ile intégralement autonome d'un point de vue énergétique



D'après ³Bueno C. and Carta JA (2006)

¹Bueno C. and Carta JA « Technical-economic analysis of wind-powered pumped hydrostorage systems. Part I: model and development », *Solar Energy* 78, 382-395 (2005)

²Bueno C. and Carta JA « Technical-economic analysis of wind-powered pumped hydrostorage systems. Part II: model application to the Island of El Hierro », *Solar Energy* 78, 396-3405 (2005)

³Bueno C. and Carta JA « wind powered pumped hydrostorage systems, a means of increasing the penetration of renewable energy in the Canary Islands », *Renewable & Sustainable Energy reviews* 10, 312-340 (2006)

Energy Storage Performance Characteristics

CAPACITY

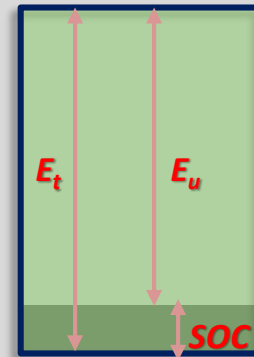
- Capacity is the amount of energy E that a device can store
- Parameter in the unit as an energy, generally in Wh (Watt-hours)
→ Question : link between $1 Wh = ? J$ (Joule) ?
- Total energy capacity, E_t
→ Total energy that is stored in a device when fully charged
- Usable energy capacity E_u
→ Total energy that can be extracted from a device when used
- Specific energy e_m
→ Usable energy capacity per unit **mass** (Wh/kg)

$$e_m = \frac{E_u}{m}$$

- Energy density e_v
→ Usable energy capacity per unit **volume** (Wh/m³)

$$e_v = \frac{E_u}{V}$$

Storage device



$$SOC = \text{State Of Charge} = E_t - E_u$$

Energy Storage Performance Characteristics

POWER

- Power P is the rate (or flux) at which energy can be stored and extracted
- Obviously limited due to losses
- Strongly linked to the capacity and both charge and discharge times (see below)
- Specific power p_m
→ Power available from a storage device per unit **mass**

$$p_m = \frac{P}{m}$$

- Power density p_v
→ Power available from a storage device per unit **volume**

$$p_v = \frac{P}{V}$$

Energy Storage Performance Characteristics

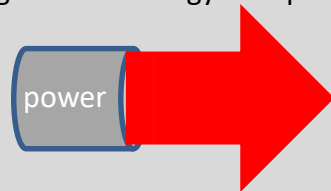
ENERGY VS POWER!

- Capacity and Power (rate of energy) are clearly two different characteristics
- According to the objective (ie the application), a power device or an energy device may be choosed

Power

For a power device application, a high rate of energy is required but not necessary for a long duration:

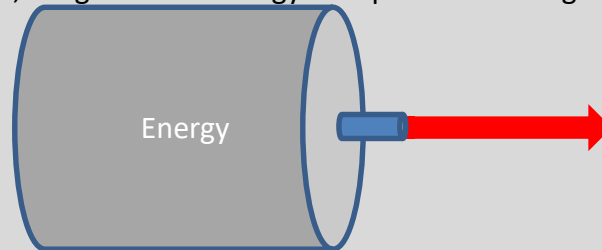
- *High specific power*
- *Low specific energy*
- *Short discharge time*



Energy

For an energy device application, a high tank of energy is required for a long time but not necessary with a high power

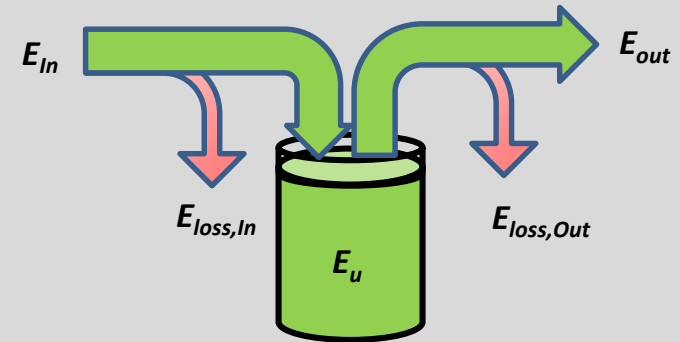
- *Low specific power*
- *High specific energy*
- *Long discharge time*



Energy Storage Performance Characteristics

THE EFFICIENCIES

- The part of input energy E_{in} really stored is E_u
- The part of stored energy E_u really extracted is E_{out}
- All storage systems suffer from losses:
 - ✓ Losses during energy storage process, $E_{loss,in}$
 - ✓ Losses during energy discharge process, $E_{loss,out}$
- In general, efficiency is a function of :
 - ✓ Charging and discharging power, P_{in} and P_{out}
 - ✓ State of charge



Energy Storage Performance Characteristics

THE EFFICIENCIES

- Charging efficiency

$$\eta_{in} = \frac{E_u}{E_{in}} = \frac{E_{in} - E_{loss,in}}{E_u}$$

- Discharging efficiency

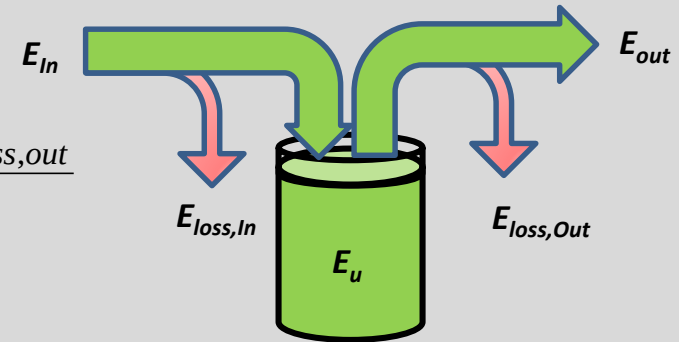
$$\eta_{out} = \frac{E_{out}}{E_u} = \frac{E_u - E_{loss,out}}{E_u} = \frac{E_{in} - E_{loss,in} - E_{loss,out}}{E_{in} - E_{loss,in}}$$

- Round-trip efficiency

$$\eta_{rt} = \eta_{in} \cdot \eta_{out} = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{E_{in} - (E_{loss,in} + E_{loss,out})}{E_{in}}$$

→ Round-trip efficiency is a cascade of the charge and discharge processes

→ Due to the wears of the storage system, η_{rt} decreases with time



Energy Storage Performance Characteristics

CHARGING AND DISCHARGING TIME

➤ Charging time:

The time it takes to store the usable energy E_u

$$t_c = \frac{E_u}{P_c} = \frac{E_u}{P_{in} - P_{loss,in}} = \frac{E_u}{P_{in} \cdot \eta_{in}}$$

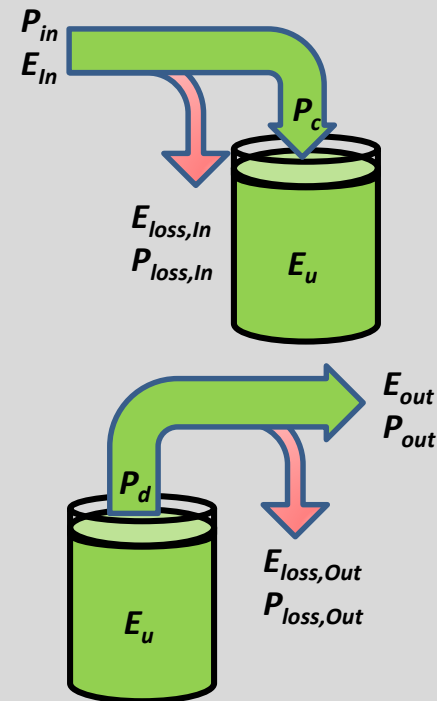
P_c is the rate of energy during the storage process that is, due to losses, lower than P_{in}

➤ Discharging time:

The time it takes to extract the usable energy E_u

$$t_d = \frac{E_u}{P_d} = \frac{E_u}{P_{out} - P_{loss,out}} = \frac{E_u}{P_{out} \cdot \eta_{out}}$$

P_d is the rate of energy during the discharge process that is, due to losses, greater than P_{out}



OTHER PARAMETERS

- It exists other considerations:
 - Number of charge/discharge cycle
 - Size
 - Cycle Life
 - Self-discharge
 - Recycling
 - capital and maintenance costs
 - Safety
 - Environmental impact
 - Political influences
 - Etc...

COMPARISON

	PHES	CAES	FES
Power rating (MW)	100 - 500	5 - 300	0 - 0.250
Energy density (kWh/m ³)	0.5 - 1.5	0.5 - 12	20-80
Specific energy (kWh/kg)	0.005 - 0.015	Strong with pressure	0.1 – 0.2
Response time	~ minutes	~ minutes	~ seconds
RT efficiency (%)	65-85	50-70	90-95
Charging time	~ hours	~ hours	~ seconds
Discharging time	~ hours	~ hours	~ seconds - minutes
selfdischarge	very small	small	high
Lifetime (years)	40 - 60	20 - 40	~ 15
Capital cost (\$/kW)	600-2000	400-8000	250-350
Environmental impact	May be harmful (nature/wild life)	Exhaust of CO ₂	light

EXERCICE

Consider a car having a gasoline tank of 40 liters. We want to change the energy form by using a flywheel

→Derive the mass of the flywheel to achieve this challenge

We give:

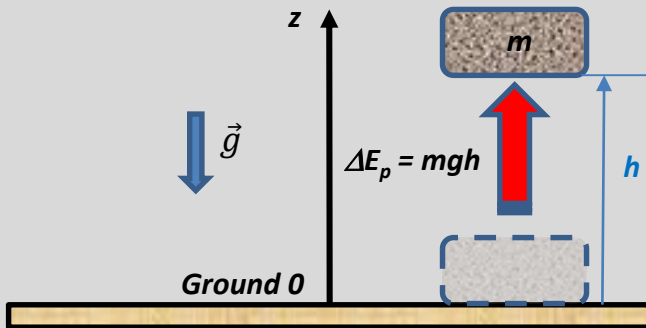
- Specific energy of the flywheel $e_{m, fly} = 200 \text{ Wh/kg}$
- Specific energy of the gasoline $e_{m, g} = 10\,000 \text{ Wh/kg}$

II.2 Stockage gravitaire

INTRODUCTION

Pumped Hydro Storage System (**PHES**):

- Technique based on the potential energy E_p stored by a suspended mass m at a given height h

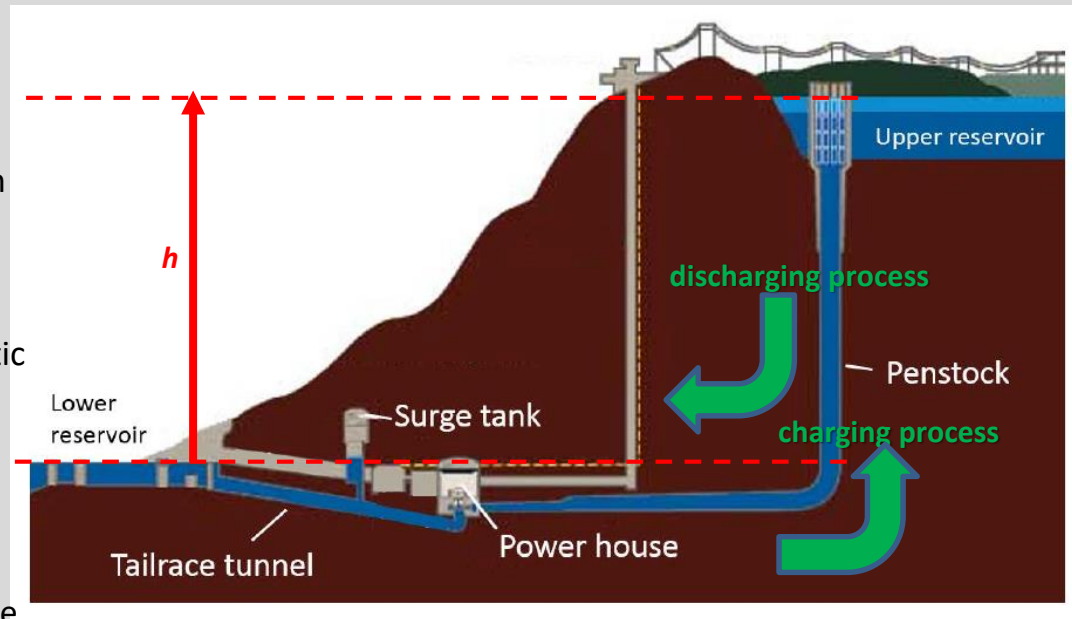


- First plant in Switzerland (Alps mountains) in 1890's
- Great flexibility and storage capacity
- Worldwide scale: represents $\sim 99\%$ of bulk energy storage capacity, 300 plants for a capacity of 127GW
- But suitable location for **PHES** facilities are becoming rare



PHES Principle and Basis

- Two storage water reservoirs (upper and lower) separated by a height of h (the hydraulic head) and connected by means of a penstock
- Electrical energy (E_{in}) is used to pump water from the lower reservoir to the upper one (charge process)
- The potential energy stored is released into kinetic energy to drive a water turbine and finally into electricity by means of a generator (discharge process)
- Charging to offload the grid during higher RES production or during off-peaks hours (inexpensive energy)
- Discharging for peaks shaving



Main Components of a PHES Plant

➤ Two reservoirs

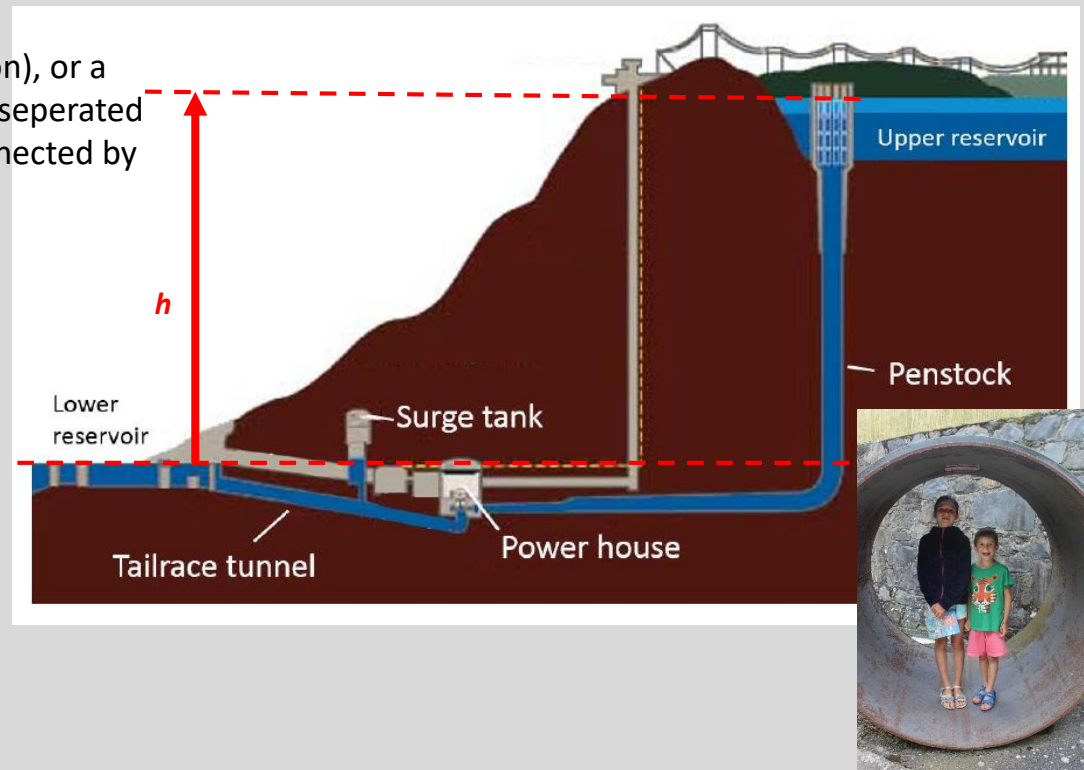
- Upper: a natural lake or a dam
- Lower: another lake (closed loop configuration), or a river, even the sea (open loop configuration) separated by a height of h (the hydraulic head) and connected by means of a penstock

➤ Penstock (input pipes)

- A tunnel for flowing water between both reservoirs and to the pump/turbine
- Diameter : ~ 1 up to 10 m
- Velocity : ~ 1 up to 5 m/s

➤ Surge tanks

Tank to absorb high pressure changes and thus to protect the equipments of the plant



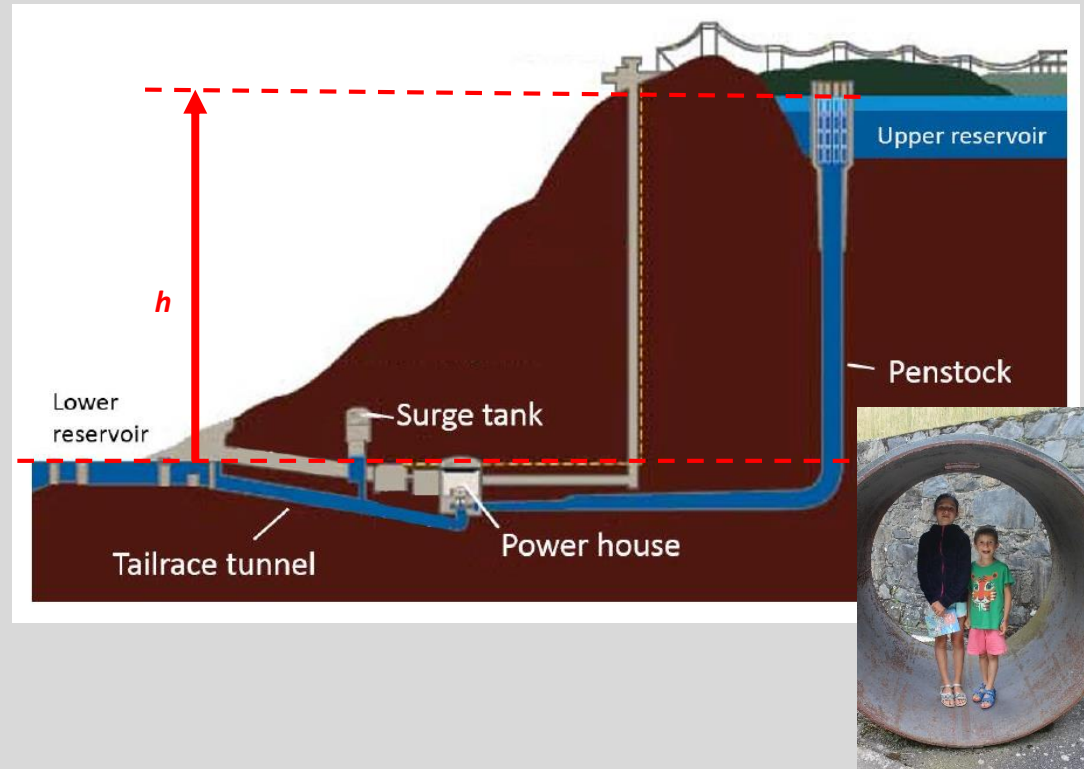
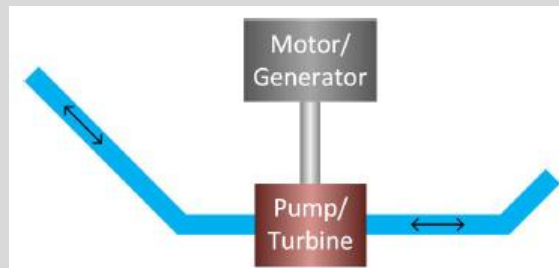
Main Components of a PHES Plant

➤ Power house

- Contains pump and turbines (Francis or Pelton)
- Below than the level of lower reservoir to avoid cavitation and provide the inlet required head for the pumps (tailrace tunnel)

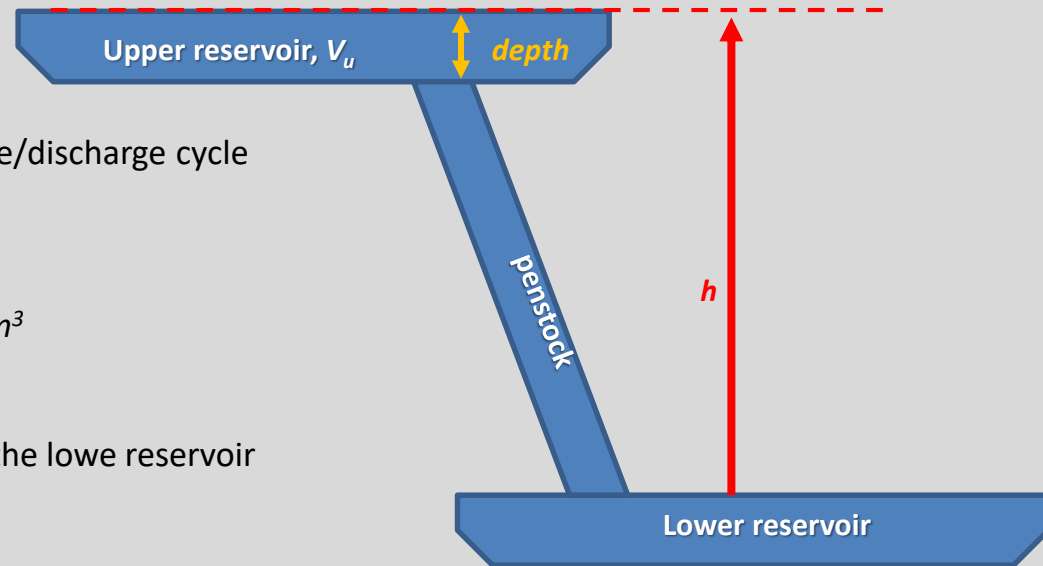
➤ Turbines

- High hydraulic head: Pelton wheel
- Up to $h \sim 700\text{m}$: Francis wheel, Francis is reversible: may be used as a turbine but also as a pump $\Rightarrow$ most common turbine for modern plants



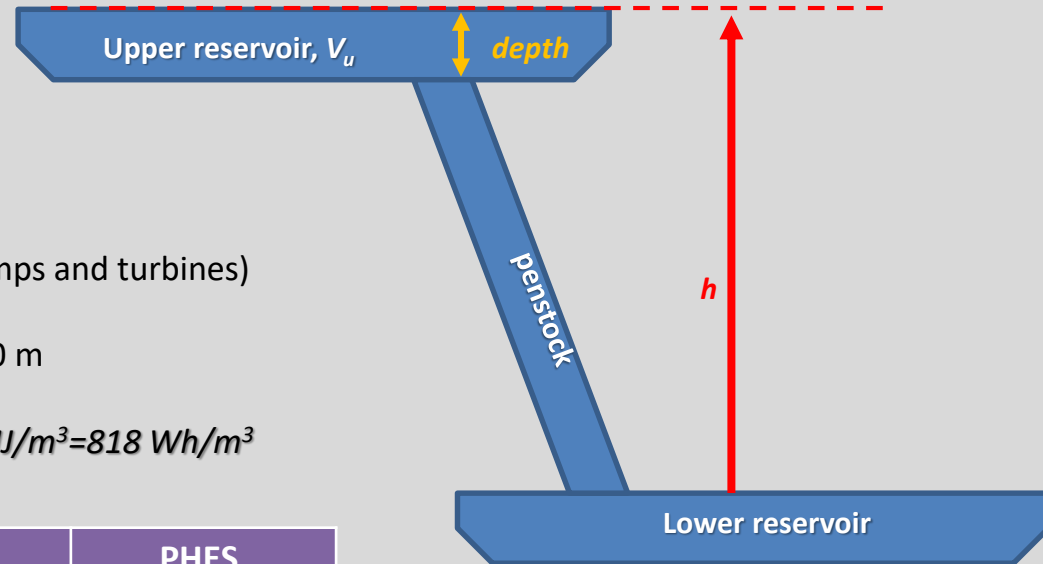
PHES Fundamentals

- Elevation difference = the hydraulic head h
- Generally $h \gg \text{depth} \Rightarrow h \sim \text{constante}$ during charge/discharge cycle
- Upper reservoir can store a volume of water V_u
- Total energy storage: $E_t = \rho V_u g h$, with $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
- Total energy density (per unit volume): $e_v = \rho g h$
 - Also the hydrostatic pressure p at the level of the low reservoir
 - The available energy density for the turbine
- Hydraulic power
 - $P = \rho g h Q$, where Q is the volumetric flow rate (m^3/s)
 - The minimal (due to losses) power required for pumping
 - The maximal (due to losses) power delivered by the turbines



PHES Fundamentals

- The hydraulic power, the total energy storage and the specific energy are all proportionnal to h
- Best suitable spots have large elevations
- But limited by both topography and equipments (pumps and turbines)
- Most of PHES plants have heads ranging in 100 - 1000 m
 - Example for $h = 300\text{m}$:
specific energy: $e_v = \rho gh = 1000 * 9.81 * 300 = 2.9 \text{ MJ/m}^3 = 818 \text{ Wh/m}^3$



	PHES, $h = 100 \text{ m}$	PHES, $h = 500 \text{ m}$	PHES, $h = 1000 \text{ m}$
specific energy (Wh/m ³)	273	1360	2730

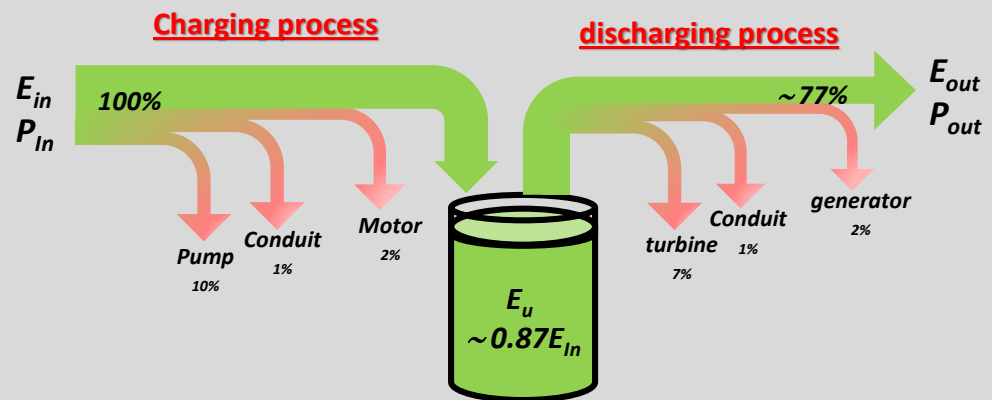
PHES Fundamentals

Efficiency

- Consider the following:
 - E_{in} : energy taken from the grid during the pumping mode (charging)
 - E_{out} : energy delivered to the grid during the generating mode (discharging)
- Main origin of the losses:
 - Motor/generator: $\eta_{mot,gen} \sim 2\%$ of E_{in}
 - Pump: $\eta_p \sim 10\%$ of E_{in}
 - turbine: $\eta_t \sim 7\%$ of E_{in}
 - Conduits/penstock: $\eta_{pipe} \sim 1\%$ of E_{in}
- Round trip PHES efficiency:
 - Derive for a full charging/discharging cycle

$$\eta_{rt} = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \eta_{charge} \cdot \eta_{discharge} = \eta_{mot} \cdot \eta_p \cdot \eta_{pipe} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_t \cdot \eta_{pipe}$$

⇒ on the order of ~ 70-80%



PHES Fundamentals

Charging/pumping and discharging/generating Times

➤ Pumping time:

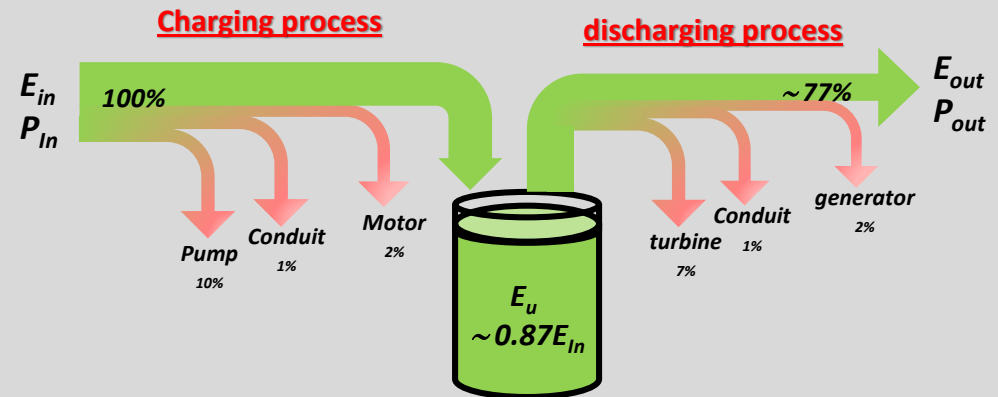
$$t_p = \frac{E_{in}}{P_{in}} = \frac{E_u}{\eta_{charge} P_{in}}$$

$$t_p = \frac{\rho g V_u h}{\eta_{charge} P_{in}}$$

➤ Generating time:

$$t_g = \frac{E_{out}}{P_{out}} = \frac{E_u \eta_{discharge}}{P_{out}}$$

$$t_g = \frac{\rho g V_u h \eta_{discharge}}{P_{out}}$$



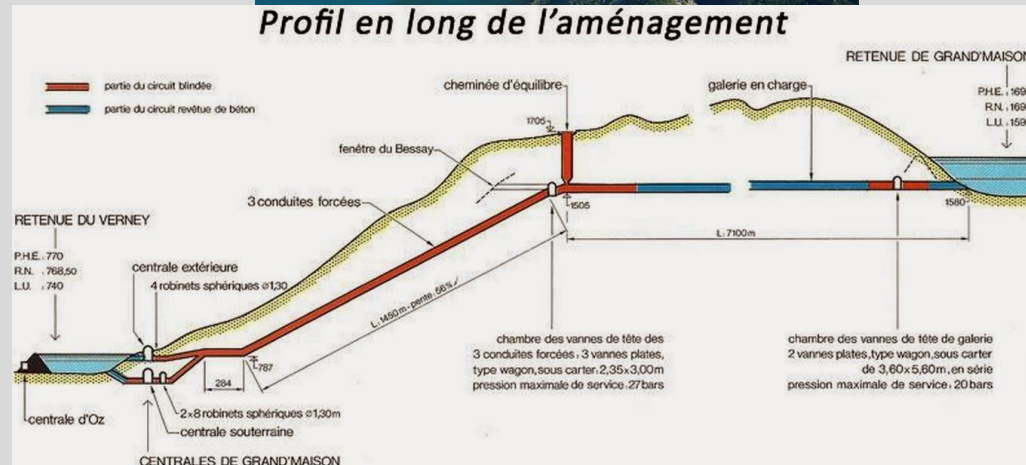
⇒ on the order of ~ 70-80%

Examples of PHES Plants

Grand Maison – Alpes mountains, France



- The french's largest PHES plant
- Open loop configuration
- Upper reservoir: $137 \times 10^6 \text{ m}^3$
- Lower reservoir: $14 \times 10^6 \text{ m}^3$
- Hydraulic head $h \sim 930 \text{ m}$
- Generating:
 - Four Pelton wheels, $P_{out} = 1200 \text{ MW}$
 - Above ground level power house
- Pumping:
 - Height Francis wheel, $P_{in} = 1800 \text{ MW}$
 - Below ground level power house
- Electrical energy (over a year): $E_{out} \sim 320 \text{ GWh}$



To Conclude

Some variants of PHES, the sea!

➤ Plant of la Rance – Brittany, France



- Using of the tide of the Atlantic ocean: average elevation of 8 m between high and low tide levels
- Seawater is stored during high tide with a 750 m length dam and electricity is produced during low tide
- Volume: $5 \times 10^6 \text{ m}^3$
- 24 Kaplan wheels: 10 MW each and total flow rate $6600 \text{ m}^3/\text{s}$
- Electrical energy (over a year): $E_{out} \sim 500 \text{ GWh}$



➤ Plant Yanbaru – Okinawa, Japan



- Pacific Ocean
- Hydraulic Head $h \sim 140 \text{ m}$
- Volume: $0.5 \times 10^6 \text{ m}^3$
- Francis wheel (?): 30 MW and 26
- Electrical energy (over a year): $E_{out} \sim ? \text{ GWh}$

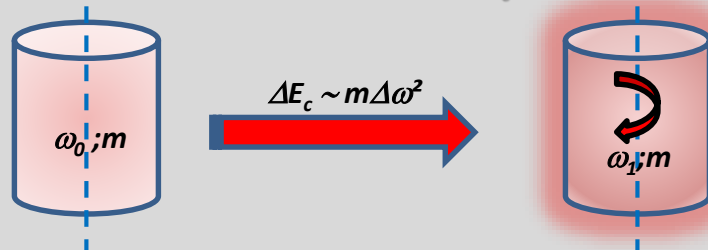


II.4 Les volants d'inertie

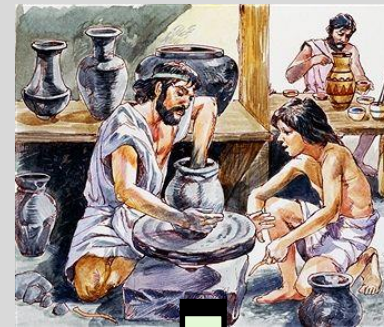
INTRODUCTION

Flywheel Energy Storage System (FES):

- Storage based on the kinetic energy E_c of a mobil due to its motion (rotational or translational)



- In Flywheel, energy is stored by rotating a mass m
- History: first rotating wheel in pottery (ancient mesopotamia)
- Main applications:
 - Transportation
 - Space craft (orientation control)
 - Electrical energy storage
- Important recent advances in material, bearings and power electronics



*From 3500
BC...*



...up to today

INTRODUCTION

Flywheel Energy Storage System (FES):

Always a strategy to improve RES penetration

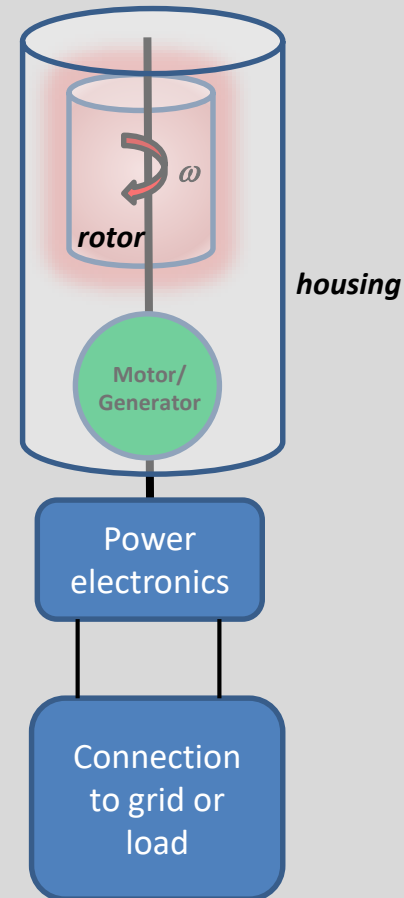
Coupling FES/solar PV systems



FES Principle and Structure

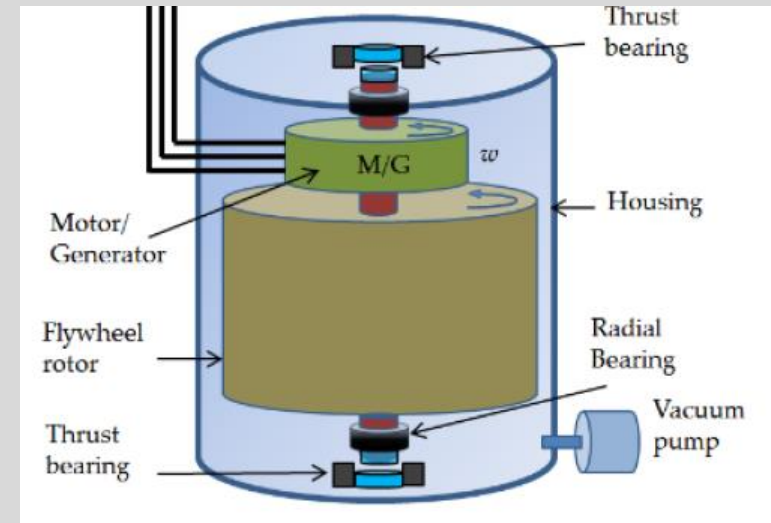
- Main idea: store electrical energy by means of a rotating mass
- Input energy E_{in} usually drawn from an electrical source as grid or RES
- Flywheel speeds up during charging process (Off-peak period)
 $\omega \sim 10^3 \text{ rpm}$
- Flywheel slows down during discharging process (Peak load)
⇒ *Motor/Generator*
- Main components
 - Flywheel rotor
 - housing
 - motor/generator: performs the interchange of electrical energy and kinetic energy
 - Power electronics
 - The cost of a FES governed by all the design of the system, not only the rotor

Main advantageous: fast response and high cycles/day



FES Components

- The flywheel rotor
 - Different shape and material
 - Shape → generally cylinders or discs: solid or hollow
 - Material: heavier metal (steel) or light composite (allowing obtain higher rotation speeds)
- Electric machine: Asynchronous and permanent magnets
- Housing = a vacuum enclosure
 - Decreasing gas drag and protecting in case of rotor failure
 - Need a pump and a cooler (FES induces heat!)
- Bearings
 - Keep the rotor in place with low friction
 - Mechanical (ball) : cheap but high friction
 - Magnetic: low friction but expensive, and need electricity if not permanent magnetic bearings



Fundamental of FES Systems

- The input energy E_{in} is the electrical energy needs to accelerate the rotor

- The stored energy E_u depends both the material and shape
→ *proportional to the inertia moment I and the square of angular velocity*

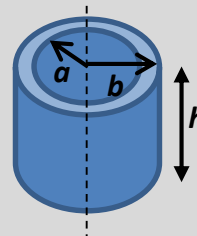
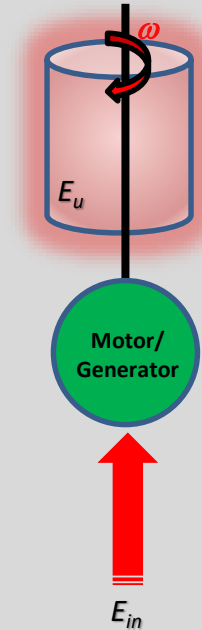
$$E_u = \frac{1}{2} I \omega^2$$

- For a solid cylinder or a disc having a radius r and a mass m :

$$I = \frac{1}{2} m r^2 \quad \Rightarrow \quad I = \frac{1}{2} \rho \pi h r^4 \quad \text{with } \rho \text{ the mass density and } h \text{ the rotor height}$$

- For a hollow cylinder of outer radius b and inner radius a :

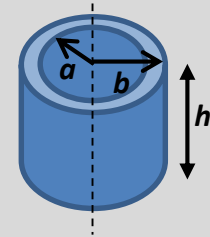
$$E_u = \frac{1}{2} \rho \pi h \omega^2 (b^4 - a^4)$$



Fundamental of FES Systems

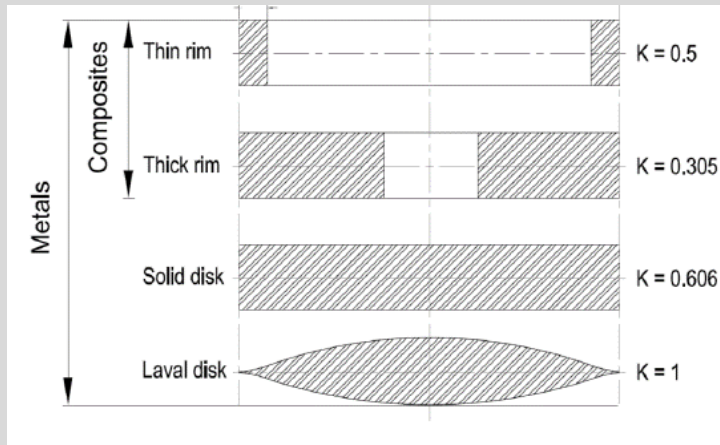
- Maximum speed → determined by the maximum tensile strength σ_{max} (Pa) of the rotor
 - For a cylinder

$$\sigma_{max} = \rho r^2 \omega^2$$
 - For other geometries, a shape factor K is introduced
- Maximum specific energy and energy density:



$$e_m = \frac{E_u}{m} = K \frac{\sigma_{max}}{\rho}$$

$$e_v = \frac{E_u}{V} = K \sigma_{max}$$



Material	Density [kg/m ³]	Tensile strength [GPa]	Specific energy [Wh/kg]
<i>Steel</i>			
4320 Steel	7700	1.52	50
AISI 4340	7800	1.80	64
<i>Alloy</i>			
AlMnMg	2700	0.60	62
<i>Titanium</i>			
TiAl6Zr	4500	1.20	74
<i>Composites</i>			
E-glass	200	0.10	14
S-Glass	1920	1.4	210
Carbon T-1000	1520	1.95	350
Projected composites	1780	10	780

Applications of FES Systems

- Three main applications:
 - Power system services (large-scale)
 - Transportation (small-scale)
 - Building services: Uninterrupted Power Supply (UPS)
- Other point of view for application :
 - Source of energy
 - or source of power
- Worldwilde numerous manufacturers
- Generally comparable to batteries

Applications of FES Systems

Power quality – source of Power

- Inject electrical power to the grid during high demand
- Arranging flywheels in banks for high capacity

- Stephentown (USA)
- 200 flywheels in buried silos
800 kg each
- Spinning speed : 8-16 000 rpm
- Total Rated output power
 $P_{out} = 200 * 100 \text{ kW}$
 $t_d \sim 15 \text{ mn}$



Beacon Power



- Hazle Township (USA)
- 200 flywheels in buried silos
1300 kg each
- Spinning speed : 8-16 000 rpm
- Rated output power
 $P_{out} = 20 \text{ MW}$
 $t_d \sim 15 \text{ mn}$

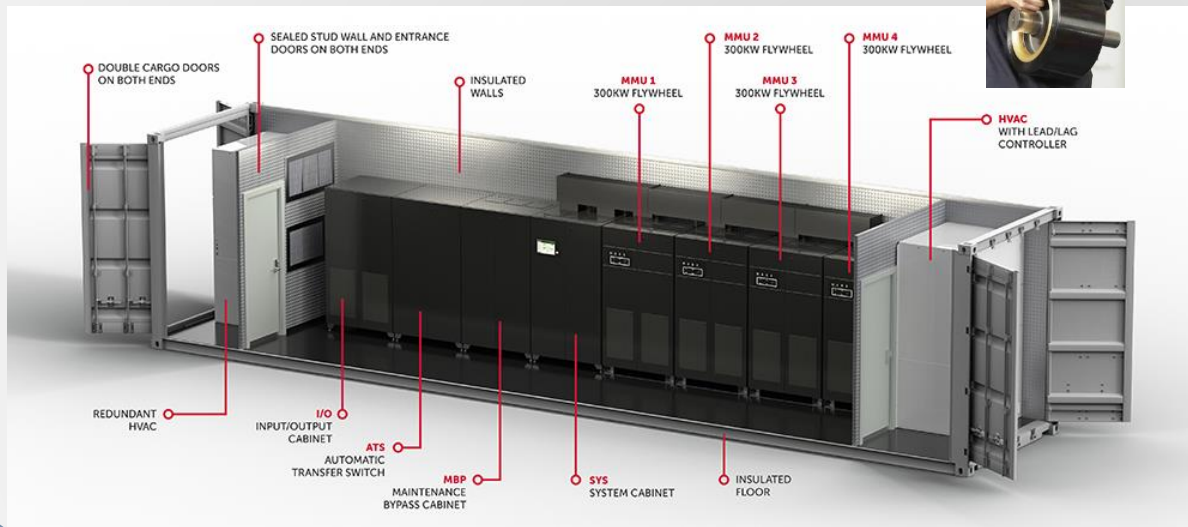


Applications of FES Systems

Building services, UPS – source of energy

- In sensible buildings (hospital): backup sources exist in case of a general power failure
- UPS as an electrical backup system to bridges the gap between the failure and the start of back up sources
- FES systems are suitable options for UPS and are an alternatives to batteries

Active Power Powerhouse



Main features

- A container with 4 flywheels
~ 500 kg each
- Spinning speed : 10 000 rpm
- Total Rated output power
300 kW to 2.4MW
 $t_d \sim 10-20$ s

Applications of FES Systems

Transportation – source of power

- In hybrid vehicles when harsh acceleration is required or to assist for climb an uphill
- Flywheels are accelerate during braking phases
- Available in cars, trains, tram (street car or trolley) and subways

Tram CITADIS of Rotterdam - Netherlands



Main features

- In « autonomy Mode » able to run 2000 m at 50 km/h
- Flywheels on the roof
 - 540 kg (carbon fiber)*
 - Accelerate at the stops*
- Spinning speed : 22 000 rpm
- Total rated output power
 - 200 kW
 - $t_d \sim 10-15$ s

III. L'ENERGIE SOLAIRE

III.1 Le Soleil

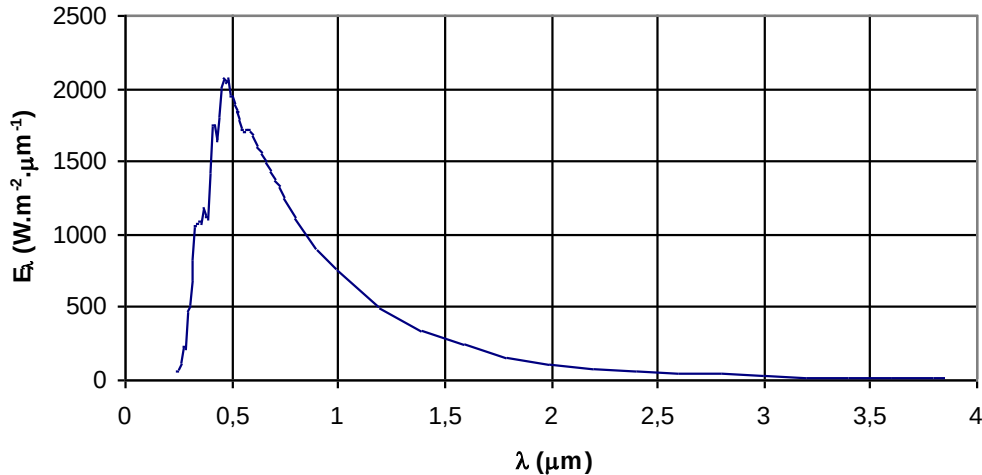
Le Soleil

***Pour l'Homme:
indispensable, fascinant mais préoccupant***

➤ Caractéristiques

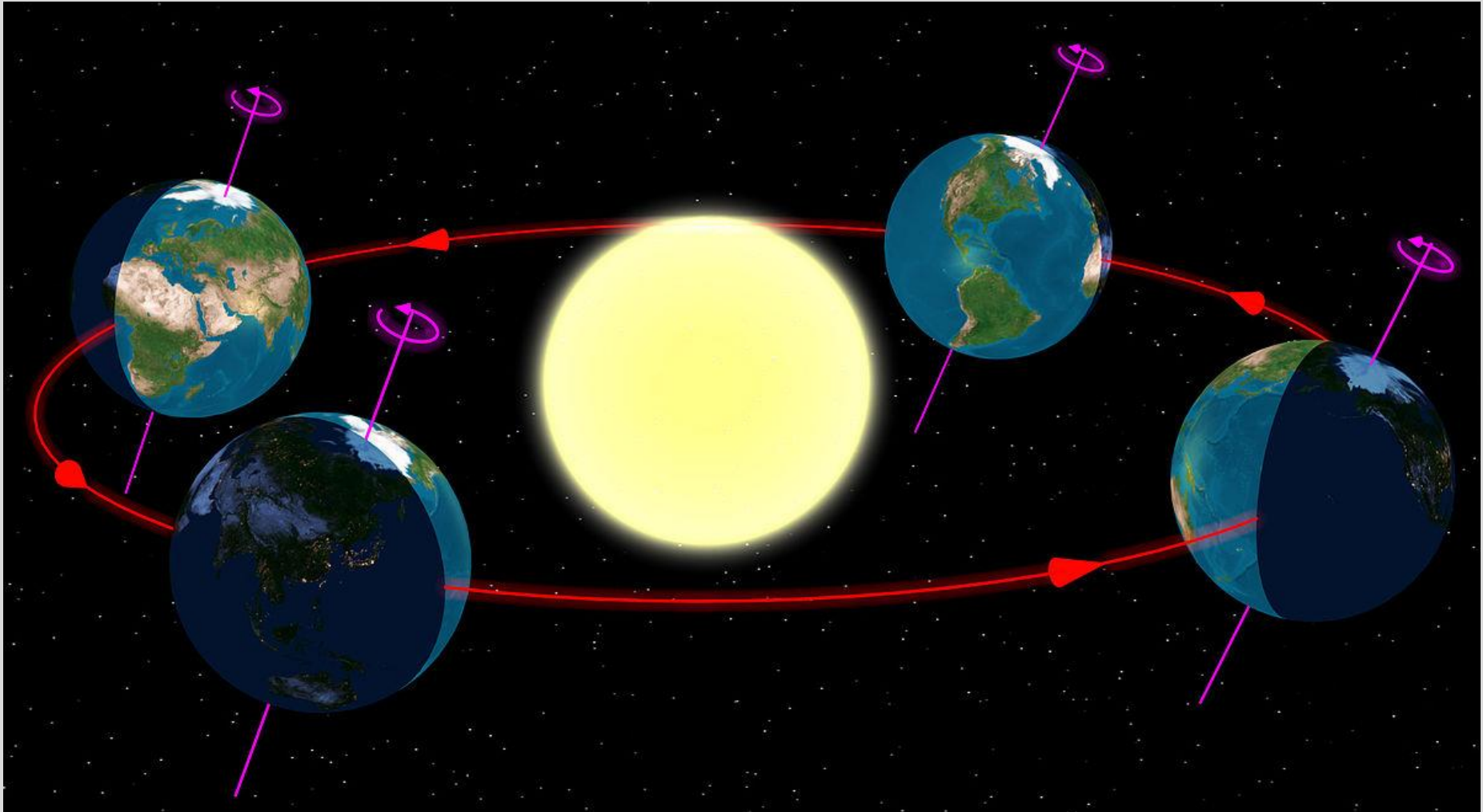
- ✓ Diamètre: $D = 1\,391\,000\text{ km}$
- ✓ Masse: $M = 2 \cdot 10^{27}\text{ T}$
- ✓ A chaque seconde (Réaction thermo-nucléaire)
 $564 \cdot 10^6\text{ T d}'H_2 \Rightarrow 564 \cdot 10^6\text{ T d}'He + 4 \cdot 10^6\text{ T sous forme d'énergie } (mc^2) \equiv \text{flux } \Phi = 36 \cdot 10^{22}\text{ kW}$

➤ Spectre du flux solaire



Le Soleil

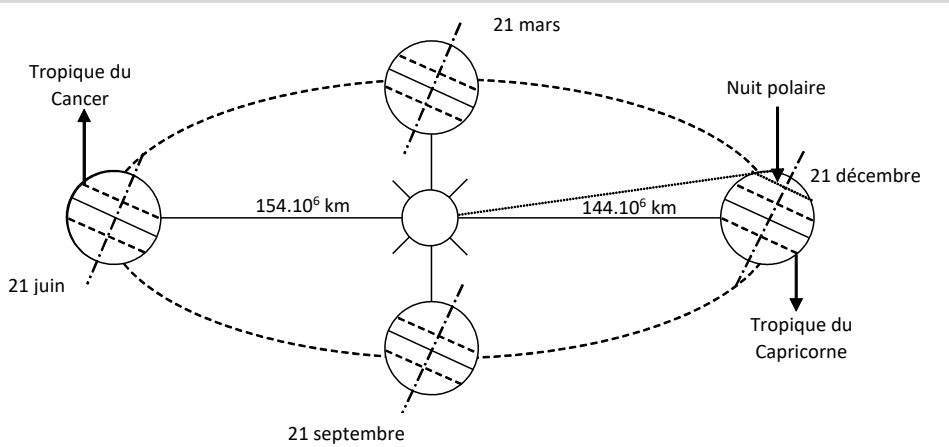
➤ Trajectoire autour du Soleil et orientation de la Terre



Le Soleil

➤ Part du flux du rayonnement solaire Φ_T reçu par la Terre

- Flux $\Phi = 36.10^{22}$ kW
- Distance moyenne $d \sim 150.10^9$ m
- Rayon terrestre $R_T = 6,4.10^6$ m

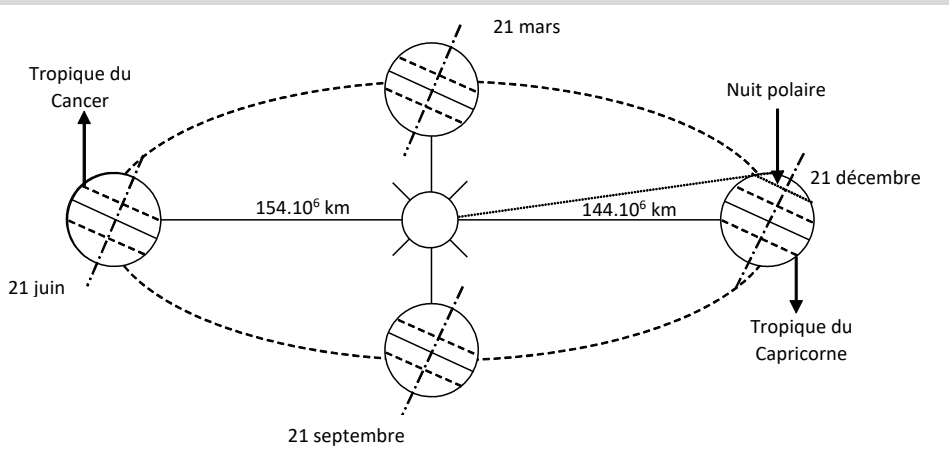


Que vaut le flux reçu sur Terre $\Phi_T = ?$

Le Soleil

➤ Part du flux du rayonnement solaire Φ_T reçu par la Terre

- Flux $\Phi = 36.10^{22}$ kW
- Distance moyenne $d \sim 150.10^9$ m
- Rayon terrestre $R_T = 6,4.10^6$ m



Flux Φ autour du soleil selon un angle solide de 4π stéradians

A la distance $d \rightarrow$ sphère de surface $4\pi d^2$

Si Terre vue comme un disque de surface πR_T^2

$$\Rightarrow \Phi_T = 1,8.10^{14} \text{ kW}$$

➤ Constante solaire E_0

- ✓ Flux moyen sur une année du rayonnement solaire reçu au niveau de l'équateur (perpendiculaire) et hors atmosphère (au moins 80 Km d'altitude):

$$E_0 = 1353 \text{ W.m}^{-2}$$

- ✓ Et en fonction du jour j :

$$E = E_0 [1 + 0.033 \cos(0.984j)]$$

La problématique du captage de l'énergie solaire

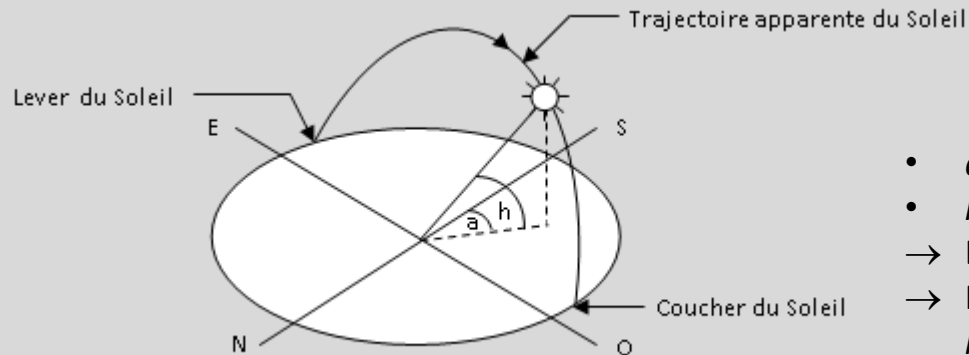
- Capturer l'énergie solaire et la transformer en une autre forme d'énergie utilisable
- Stocker cette énergie pour pallier au caractère intermittent de la source (nuit, temps couvert, etc...) + déphasage aux besoins/demandes
- Principal type de conversion : conversion thermique
 - Dès que le rayonnement solaire rencontre la matière, il y a création de chaleur
 - Mais si conversion « classique » type capteur plan: conversion à basse température ($< 100^{\circ}\text{C}$)
 - ⇒ Concentration indispensable pour des applications type centrales solaires

III.2 Bilan énergétique sur Terre

Etude de l'énergie solaire au sol

Aspects géométriques

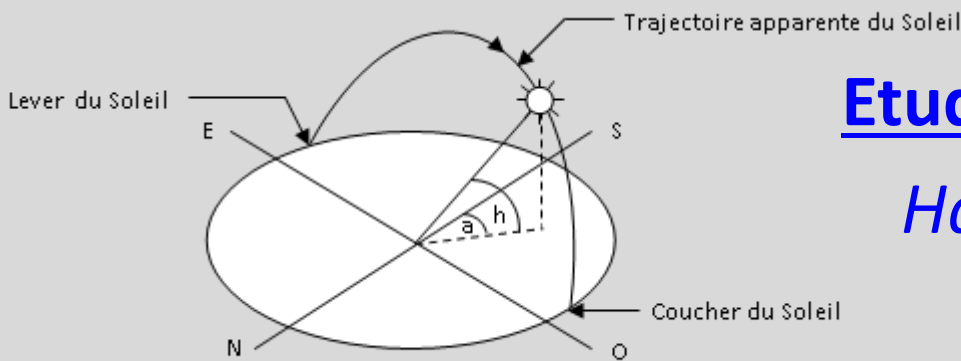
- ✓ Mouvement apparent du soleil: trajectoire du Soleil vu par un observateur fixe à une latitude L



- a : azimut
- h : hauteur (ou élévation) du soleil
 - Dépendent de L , du jour j et de l'heure solaire TS
 - Pour L donnée: existe des abaques pour avoir a et h en fonction de TS et moi de l'année

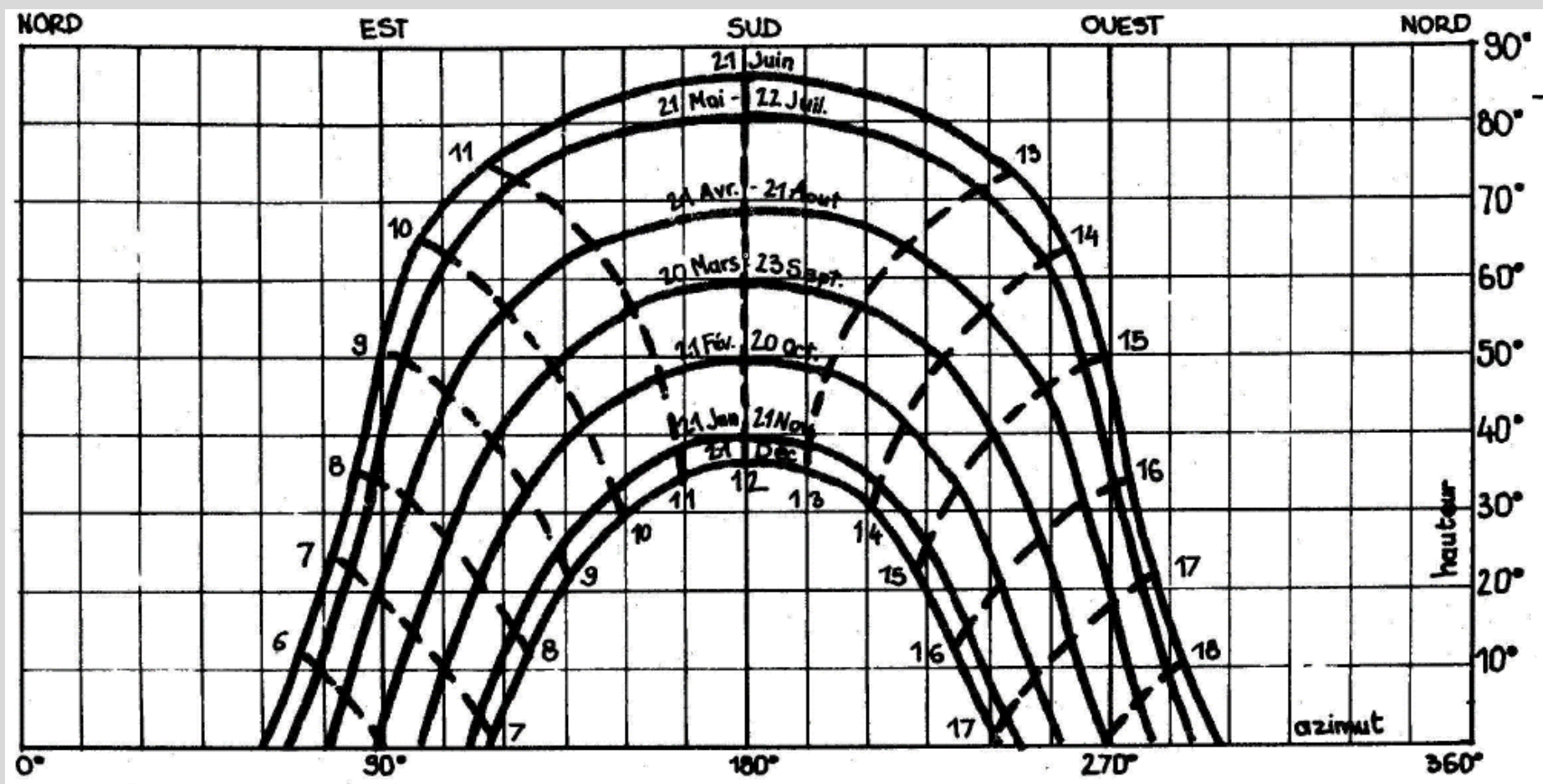
✓ Conséquences:

- Position du soleil (valeurs de a et h) influe sur S^* et D^*
- Durée d'ensoleillement influe sur S et D



Etude de l'énergie solaire au sol

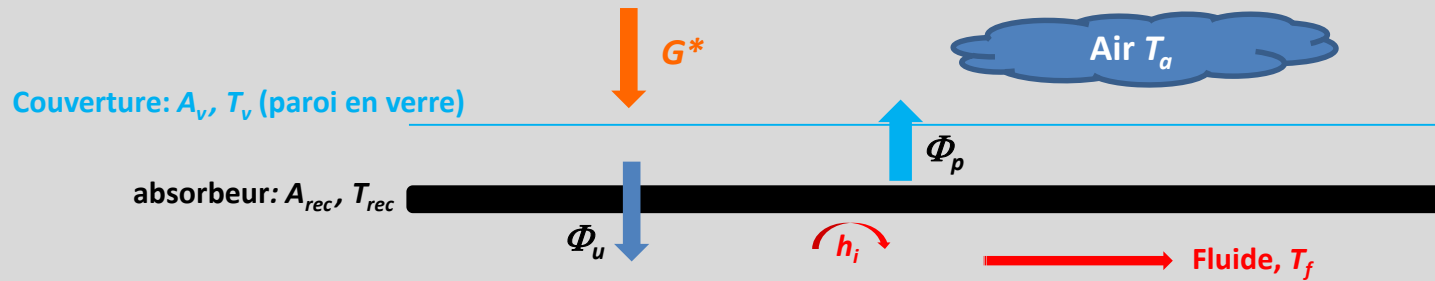
Hauteur du soleil dans le ciel



Petite question?

- Quel est la valeur de l'irradiation reçu par un mur orienté vers l'Est et à midi?

III.4 Capteur plan solaire



➤ Bilan des flux sur l'absorbeur

- ✓ Eclairement solaire incident: G^*
- ✓ Ensemble des pertes (rayonnement et convection): Φ_p
- ✓ Flux transmis au fluide : $\Phi_u = h_i A_{rec} (T_{rec} - T_f)$

$$m_{rec} c_{rec} \frac{dT_{rec}}{dt} = \alpha_{rec, soleil} \tau_{v, soleil} G^* A_{rec} - \Phi_u - \Phi_p \quad \text{on peut globaliser les pertes} \rightarrow \Phi_p = U_c (T_{rec} - T_a)$$

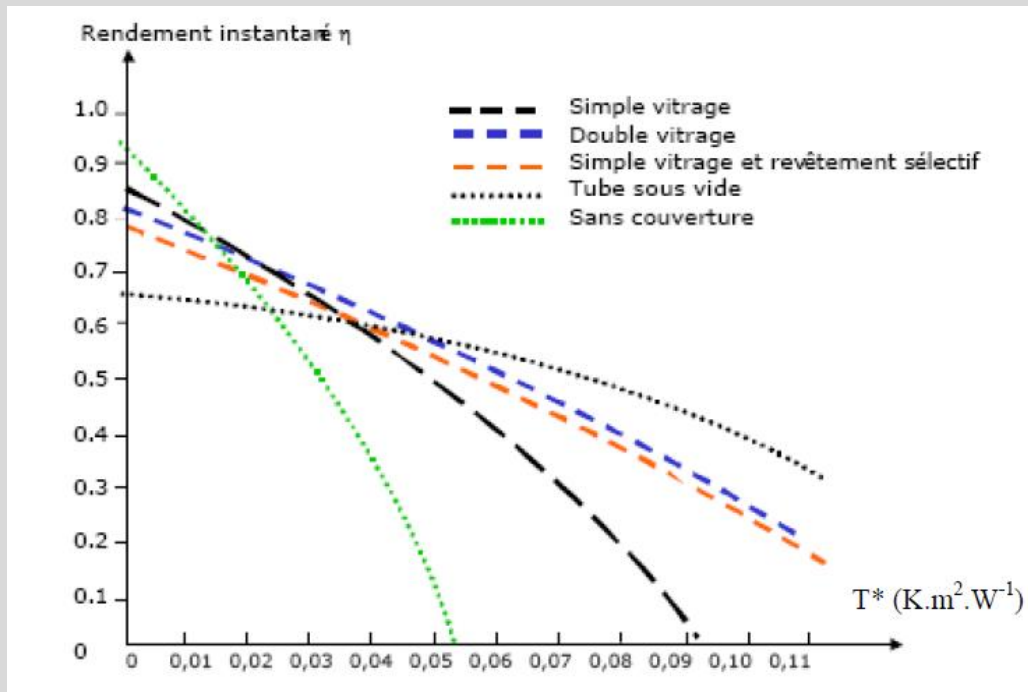
U_c conductance entre récepteur/ambient

➤ Rendement

$$\eta_{rec} = \frac{\Phi_u}{G^* A_{rec}}$$

➤ Plusieurs types de capteurs

- Avec couverture: simple, double,
- Sans couverture
- Avec et sans vide
- Etc...



Résultat calculs complets

$\Rightarrow T_{rec} \sim 35 \text{ à } 140^\circ\text{C}$

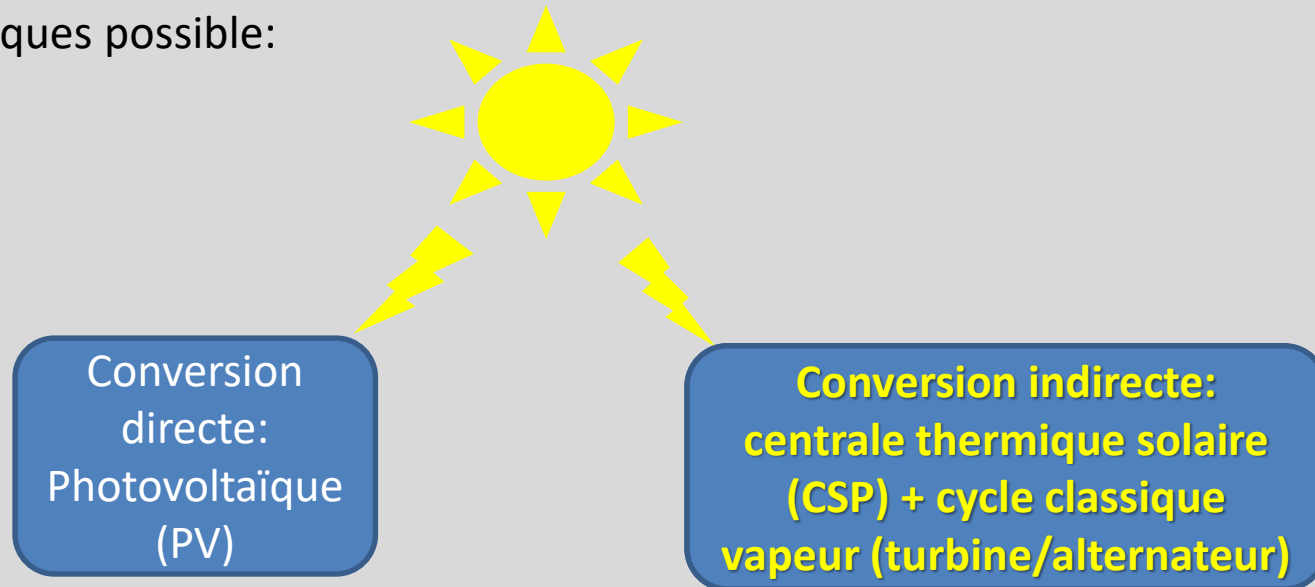
Selon les hypothèses

$$T^* = \frac{T_{rec} - T_a}{G^*}$$

IV. LES CENTRALES SOLAIRES **THERMODYNAMIQUES**

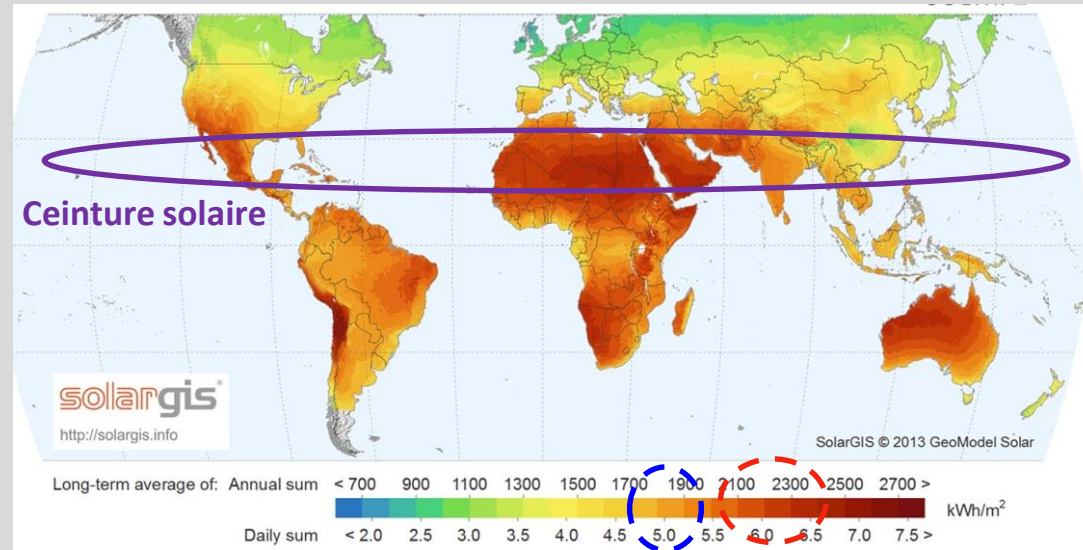
IV.1 Introduction

- On parle aussi de technologie CSP (Concentrating Solar Power Plant)
- Energie Renouvelable visée ou ciblée: **le soleil**
- Idée: utiliser cette énergie pour produire de l'énergie électrique
- 2 techniques possible:

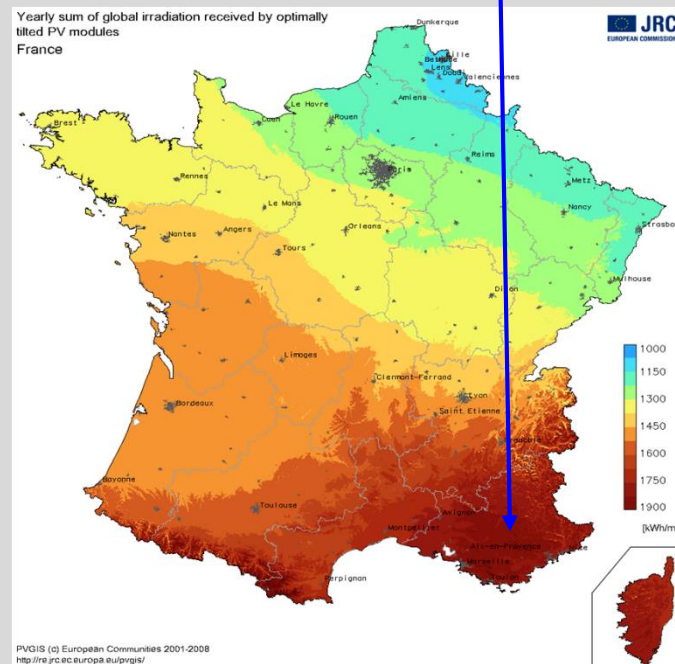


- Pour qu'une centrale solaire soit efficace, il est nécessaire d'avoir une irradiation d'au moins de l'ordre de 2000 kWh/m² par an.
⇒ **seul rayonnement directe est collecté**

Répartition flux solaire sur la surface du globe...



... et de la France

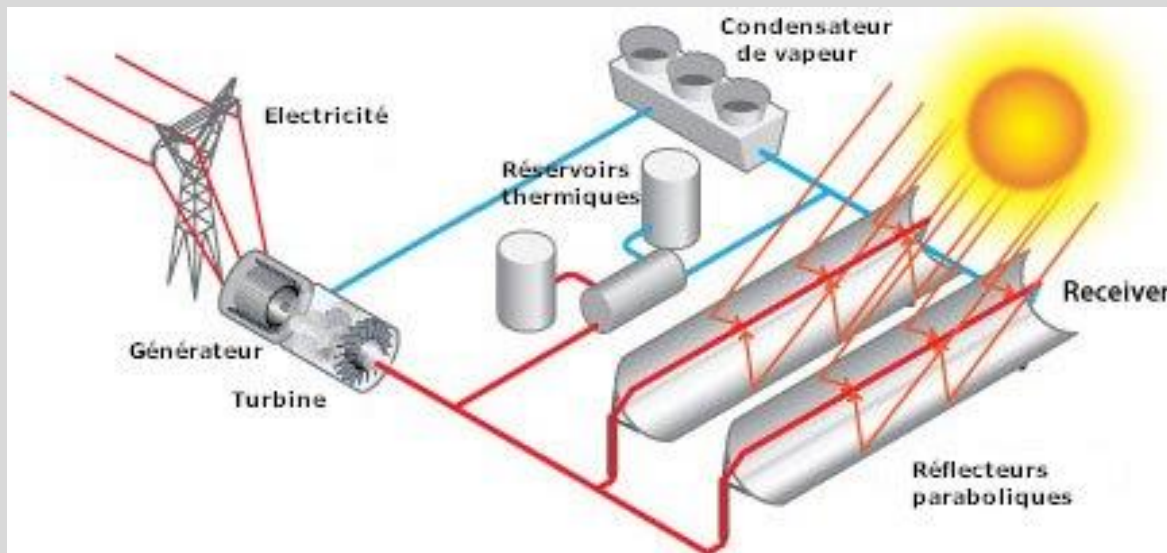


⇒ pas de sites propices en France

➤ Principe de fonctionnement:

Les rayons du soleil sont concentrés (concentrateur/champ solaire) pour chauffer un fluide caloporteur (huile, eau, air, etc...) qui va produire de la vapeur (via une chaudière) pour activer une turbine, et enfin une génératrice électrique (alternateur).

➤ Centrale type



➤ Principaux éléments
(sous-systèmes) étudiés
dans le cours:

- ✓ Concentrateur
- ✓ Récepteur (tube) ≡ *capteur solaire plan avec absorbeur*
- ✓ Fluide caloporteur
- ✓ Système de stockage thermique

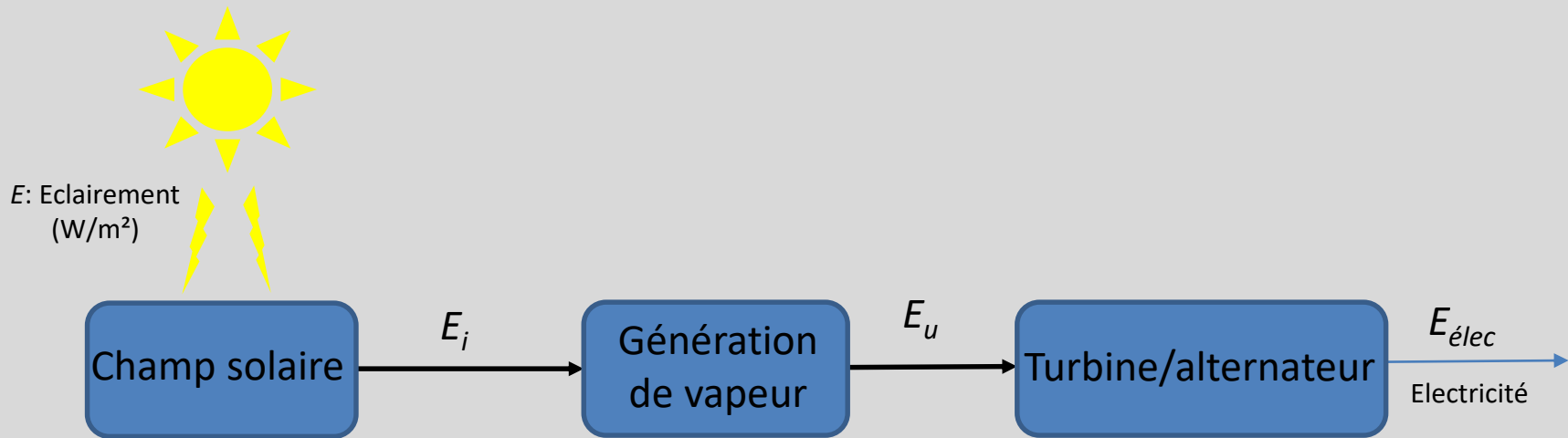
👉 max. on a 3 fluides:

- Caloporteur
- Stockage
- Travail (cycle) = eau

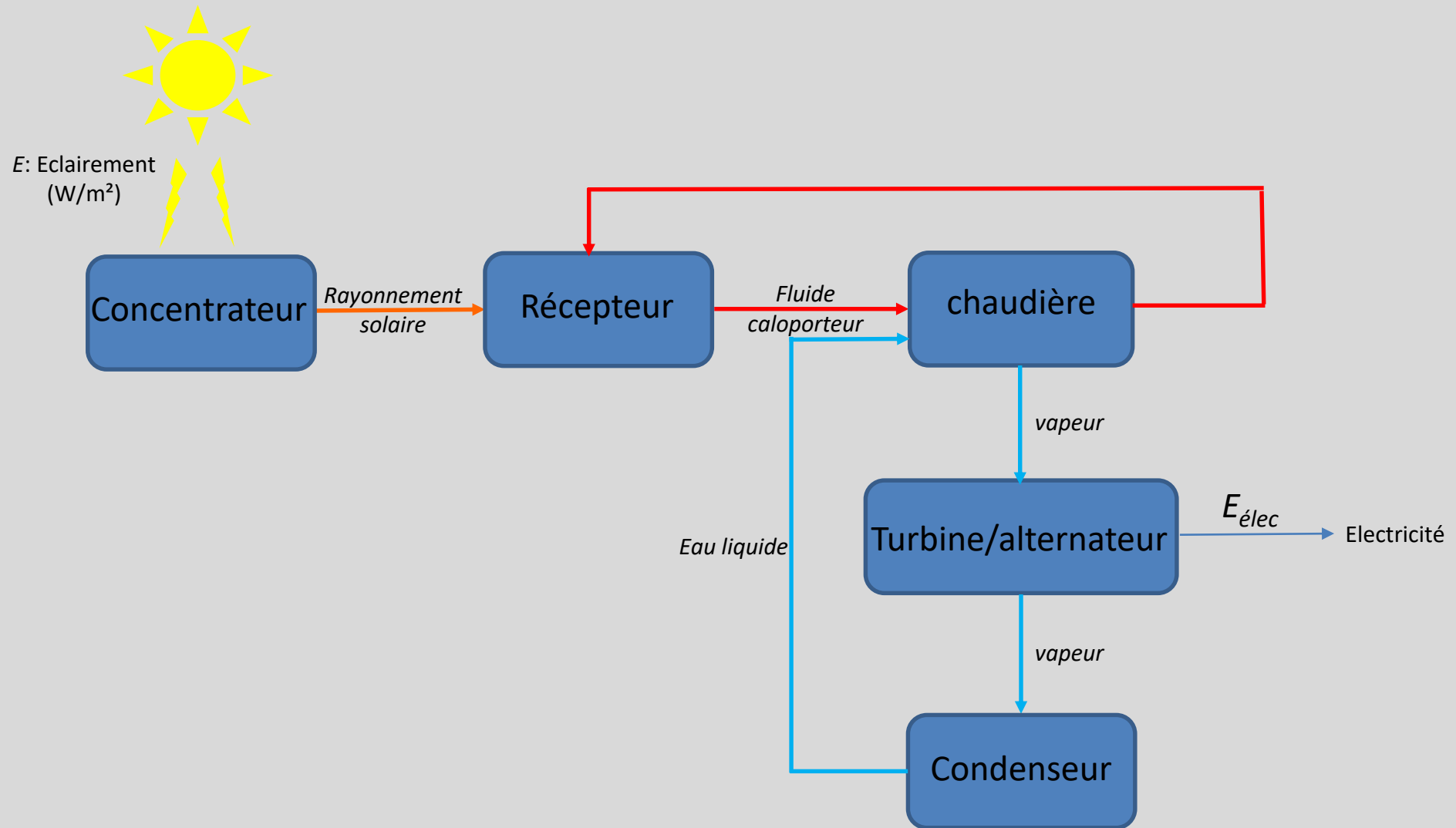
➤ Principe de fonctionnement:

Les rayons du soleil sont concentrés (concentrateur/champ solaire) pour chauffer un fluide caloporteur (huile, eau, air, etc...) qui va produire de la vapeur (via une chaudière) pour activer une turbine, et enfin une génératrice électrique (alternateur).

➤ Schéma de principe simplifié d'une centrale solaire



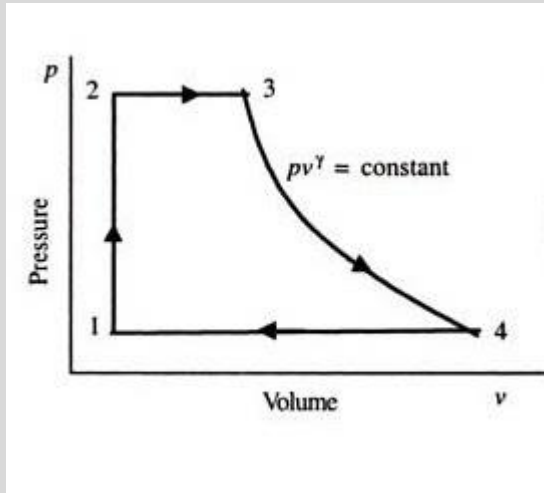
➤ Schéma de principe détaillé d'une centrale solaire



➤ Les principaux cycles thermodynamiques rencontrés

Dépendent du fluide de travail + température ciblée

- Rankine (idéal pour la production de vapeur; proche du Carnot)



Fluide de travail est l'eau

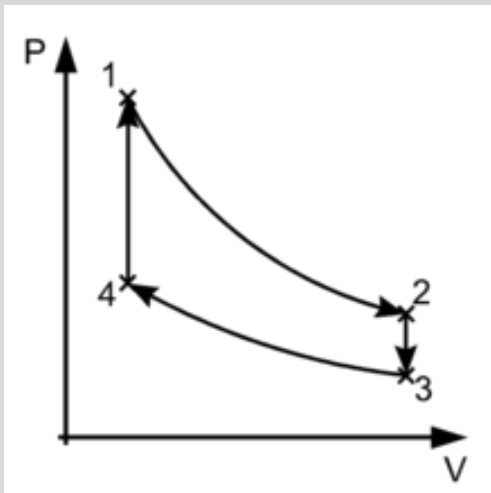
1→2 : Compression adiabatique et réversible (isentropique).

2→3 : Vaporisation isobare et irréversible (**soleil**).

3→4 : Détente adiabatique et réversible (**travail**).

4→1 : Liquéfaction isobare et irréversible

- Stirling (moteur fermé à air chaud)



Fluide de travail est un gaz (air)

1→2 : détente isotherme (**travail**)

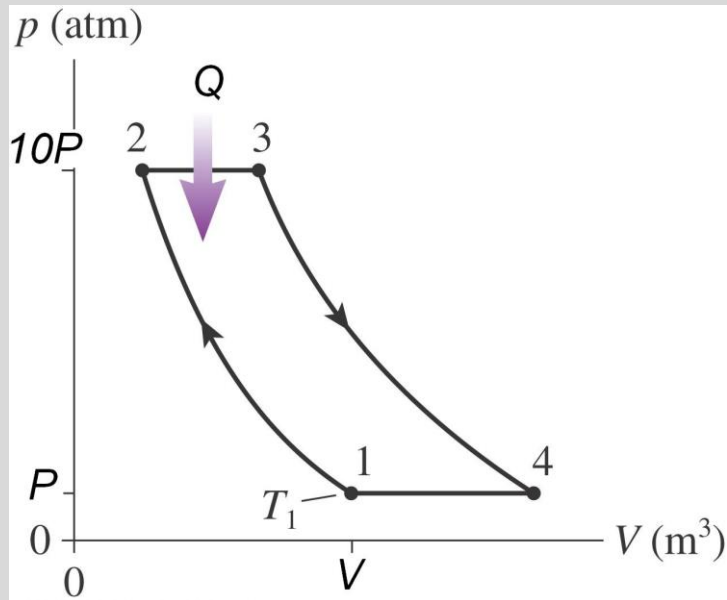
2→3 : refroidissement à volume constant (isochore).

3→4 : compression isotherme.

4→1 : chauffage isochore (**soleil**).

➤ Les principaux cycles thermodynamiques rencontrés
Dépendent du fluide de travail + température ciblée

- Brayton (turbine à gaz)



Fluide de travail est un gaz

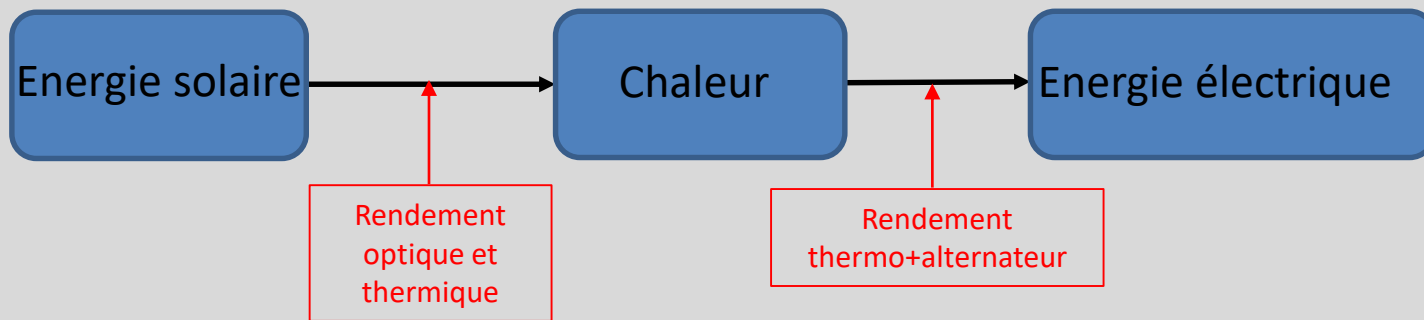
1→2 : Compression isentropique.

2→3 : apport de chaleur isobare (**soleil**).

3→4 : Détente isentropique.

4→1 : Rejet de chaleur isobare

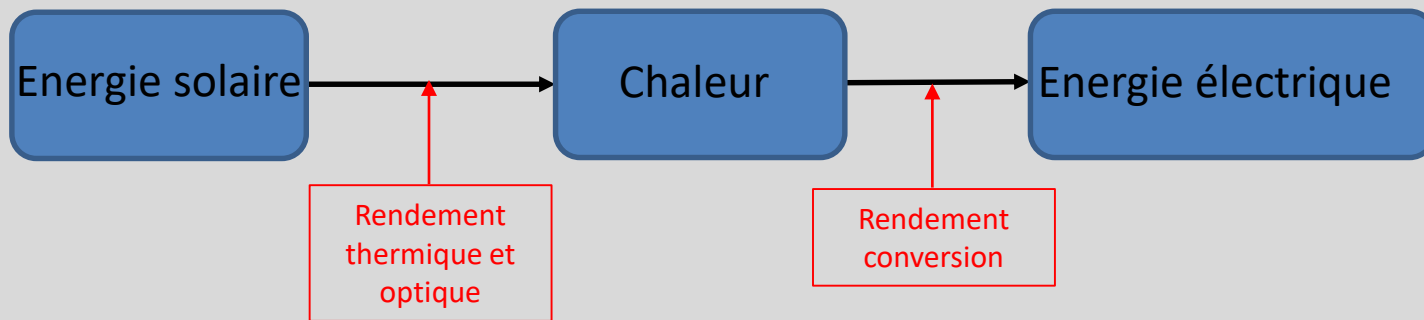
- Une centrale solaire est une chaîne de conversion de l'énergie



- Etape n°1:
Concentration des rayons solaires
- Etape n°2 ≡ Conversion n°1:
Energie solaire en énergie thermique
- Etape n°3 ≡ Conversion n°2:
Energie thermique (ou chaleur) en énergie mécanique → cycle thermodynamique
- Etape n°4 ≡ Conversion n°3:
Energie mécanique en énergie électrique (turbine+alternateur)

$$\eta_{\text{global}} = \eta_{\text{opt}} \eta_{\text{thermique}} \eta_{\text{thermo}} \eta_{\text{élec}} \approx 20\%$$

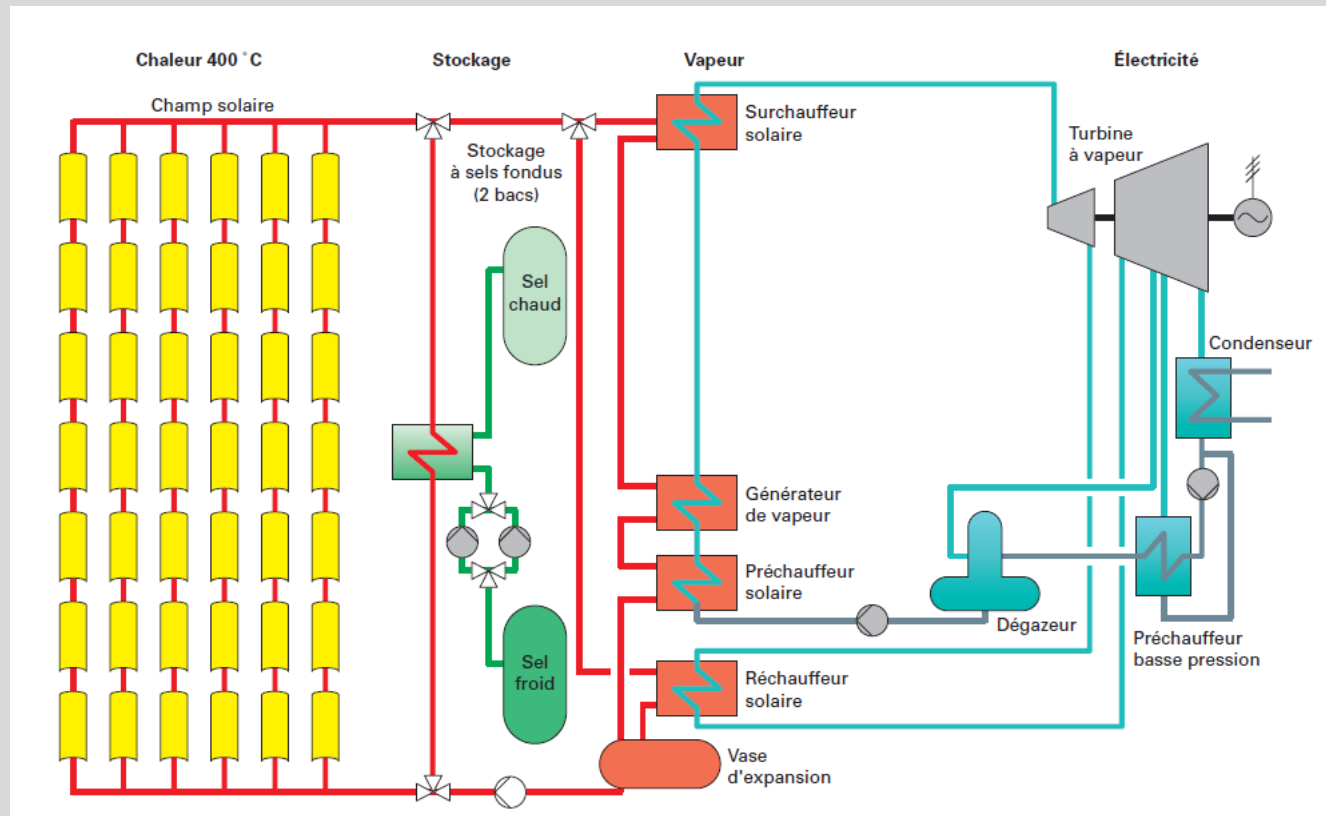
- Une centrale solaire est une chaîne de conversion de l'énergie



➤ Quelques chiffres clés:

- Durée de vie ~ 25 à 30 ans (estimation)
- Puissance électrique : quelques 100 MW
- Production électrique: quelques 100 GWh/an
- Cout investissement: 2 800 à 14 000€. kW⁻¹ (selon concentrateurs et puissance)
- Prix: 0,25 €. kWh⁻¹ (0,04 pour le nucléaire!!!)
- Impact environnemental: 20 kg CO₂/MWh (6 et 900 pour le nucléaire et charbon!!!)

Exemple d'une centrale solaire



Caractéristiques

- Concentrateur: cylindro-parabolique
- Récepteur: tube
- Fluide caloporteur: huile synthétique
- Stockage avec sels fondus
- Cycle thermodynamique de Rankine

IV.2 Concentrateurs, récepteurs et fluides caloporteurs

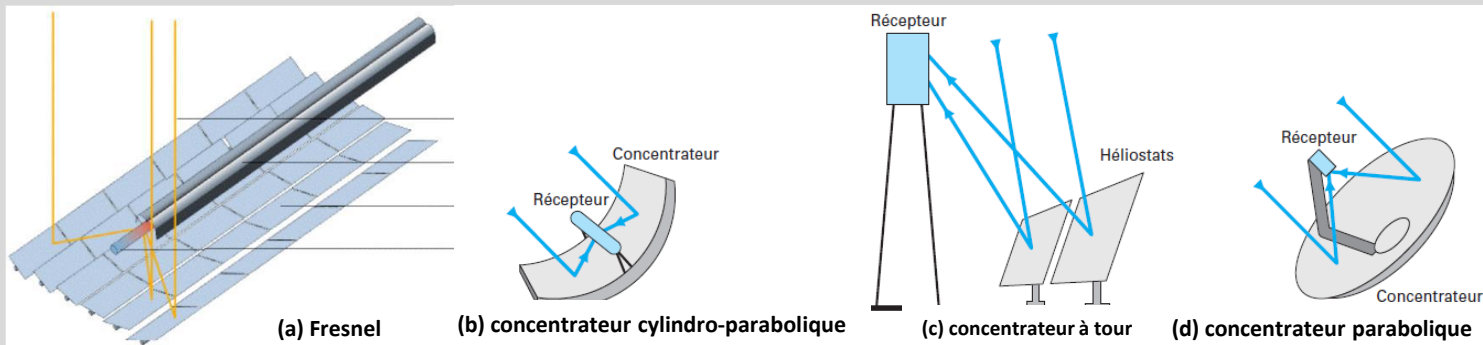
➤ Nécessité de concentrer?

- ✓ Rappel: sans concentration, un capteur solaire plan permet d'atteindre des températures ($T_{\text{récepteur}}$) de l'ordre de 50 à 140°C (cas idéal)
⇒ Bien trop faible pour produire de la vapeur
- ✓ Utilisation de miroirs (champ solaire) qui concentrent les rayons du soleil sur un absorbeur et donc augmenter davantage la température du fluide caloporteur (400 à 1000°C) → *cf Exergie*
- ✓ Les miroirs sont orientés en direction du soleil ⇒ augmenter la contribution du rayonnement direct I^*
- ✓ Définition du facteur de concentration géométrique C_g

$$C_g = \frac{A_{\text{miroirs}}}{A_{\text{absorbeur}}}$$

Les systèmes concentrateurs

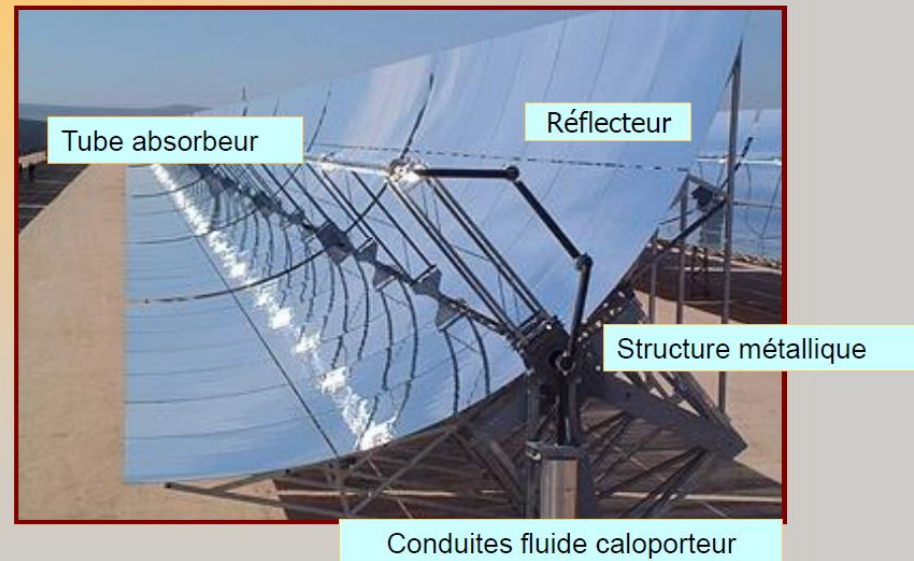
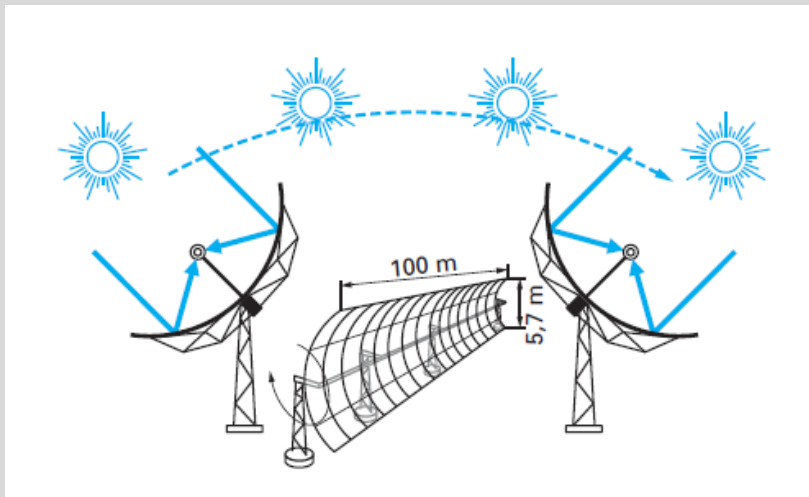
- Objectif: élever en température la température du fluide caloporteur
 - Il existe 4 technologies solaires à concentration $\equiv$ 4 familles de centrales solaires
Peut avoir plusieurs systèmes dans une même centrale
 - Linéaire:
 - a. Réflecteurs linéaires de Fresnels (pour préchauffage)
 - b. Concentrateur cylindro-parabolique (les plus répandu)
 - Ponctuelle (plus grand C_g):
 - c. Concentrateur à tour
 - d. Concentrateur parabolique
- Dimensionnement: Forme optimisée pour capter essentiellement le **rayonnement solaire direct** / *



Concentrateur cylindro-paraboliques

Linéaire

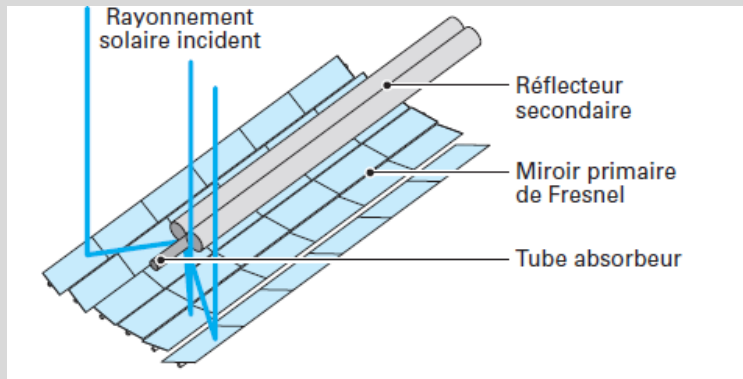
- Système le plus répandu: fiable + coûts modérés
- Miroirs concaves alignés selon axe Nord-Sud et rotation (tracking du soleil) d'Est en Ouest
- Concentration des rayons vers le récepteur $\equiv$ tube absorbeur
- Température du fluide caloporteur: $\sim 400^{\circ}\text{C}$



- Avantage majeur: un seul mécanisme de rotation
- Principaux inconvénients: plus faible concentration que système ponctuel $\Rightarrow$ plus faible température du fluide et baisse du rendement

Réflecteur linéaire de Fresnels

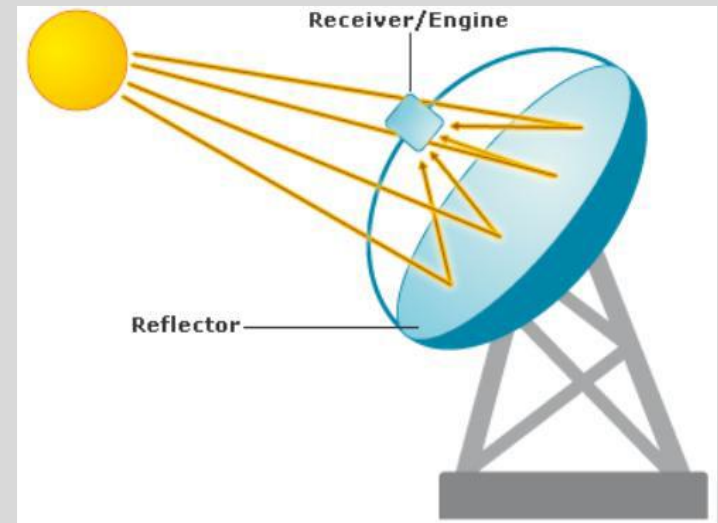
- Solution alternative aux cylindro-paraboliques
- Miroirs plans disposés en lames parallèles et inclinés vers le tube absorbeur
- Tube absorbeur fixe
- Température du fluide caloporteur: $\sim 300^{\circ}\text{C}$



- Avantage majeur: fabrication plus simple + frais de maintenance plus faibles que les cylindro-paraboliques
- Principaux inconvénients: encore plus faible concentration que les cylindro-paraboliques $\Rightarrow$ permet de pré-chauffer

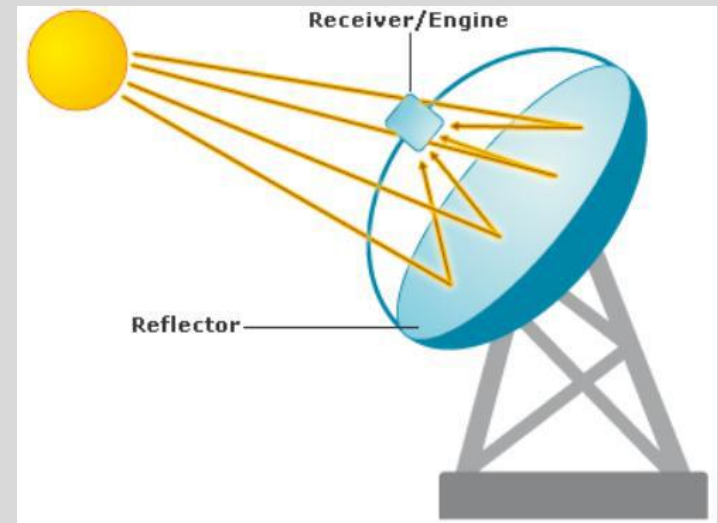
Concentrateur parabolique *ponctuelle*

- Un seul miroir parabolique (Dish)
- Energie concentrée en un seul point: **le foyer**
- Surface moyenne de 50 à 100 m²
- Mise en mouvement de la parabole autour de 2 axes
- Température du fluide caloporteur (750°C); généralement un gaz (H₂ ou hélium)
- Conversion en électricité dans un réacteur situé au foyer ➡ à très haut rendement thermique (75%)
- Rendement total ~ 24%
- Moteur de Stirling le plus adapté (10 à 25kW)



Concentrateur parabolique *ponctuelle*

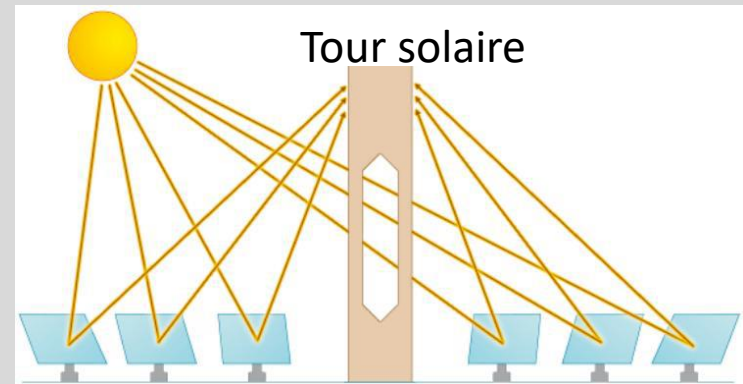
- Mais de nombreux inconvénients:
 - Pas de stockage $\Rightarrow$ arrêt immédiat de la production dès perte de rayonnement solaire
 - orienter en permanence la parabole
 - dimensions limitées par la double rotation
 - difficulté de fabrication
 - Cout d'investissement et de maintenance élevés (nombreux cycles de démarrages/arrêts + chocs thermiques violents)
- Surtout utilisés comme sources d'électricité délocalisées
- Pas de stockage associé



Concentrateur à tour

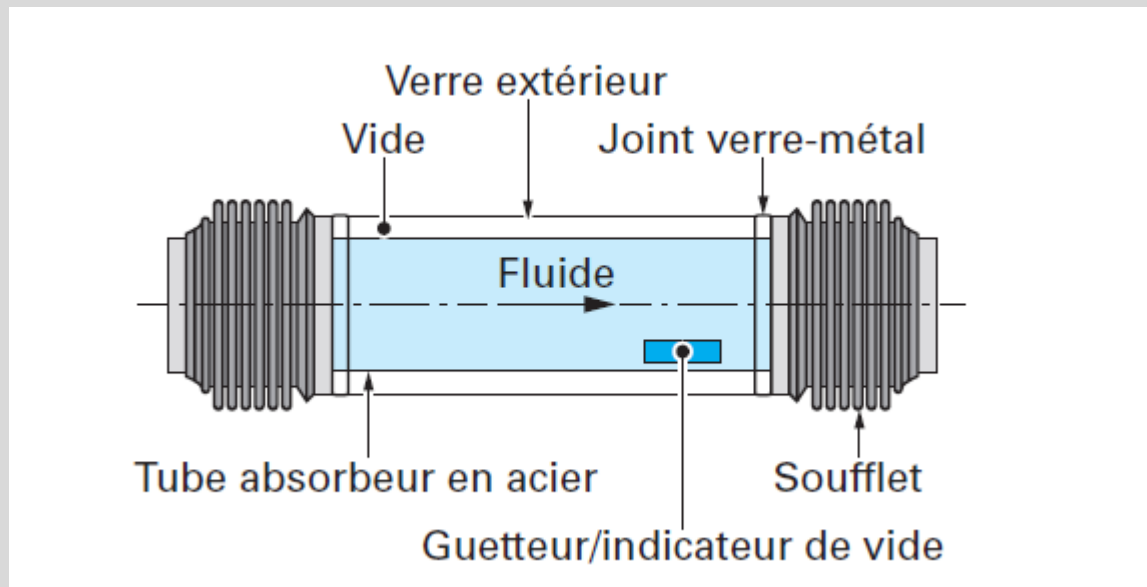
Ponctuelle

- Alternative aux paraboles (palier aux limitations de taille) avec presque mêmes C_g
- Concentrateurs:
 - Héliostats (plusieurs milliers) aussi en mouvement selon deux axes (azimut et élévation)
 - Surface d'un héliostat ~ 50 à 100 m^2
 - Concentrent les rayons ponctuellement au sommet d'une tour (récepteur)
 - Légèrement concaves $\rightarrow$ focale $\sim$ distance jusqu'au récepteur
- Champ solaire: plusieurs $100\,000 \text{ m}^2$
- Utilisation d'un fluide caloporteur (sels fondus ou air) qui s'échauffe en haut de la tour ($\sim 600^\circ\text{C}$)
- Production de vapeur (échangeur) et électricité (turbine)

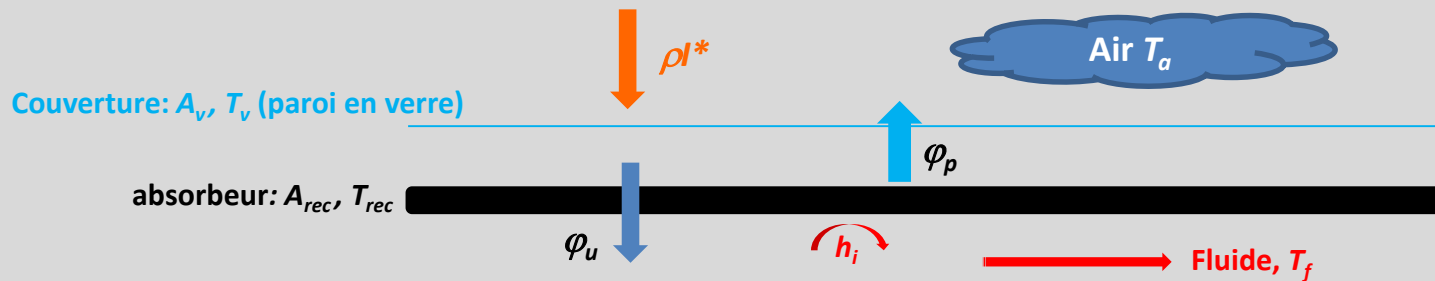


Récepteur

- Avec le fluide caloporteur → cœur de la centrale solaire
- On parle aussi de *convertisseur héliothermique*
- Rôle: absorber les rayons concentrés pour chauffer le fluide caloporteur
- Dispositif situé au plan focal des miroirs
- Dimensionnement: déterminer le bon coefficient d'échange h + *nature du matériau* (absorbeur) pour avoir la bonne température du fluide et ne pas dépasser la température de paroi limite
- Le plus répandu: récepteur à tube (basé sur les chaudières)



Bilan thermique d'un récepteur à tube



➤ Bilan des flux sur l'absorbeur

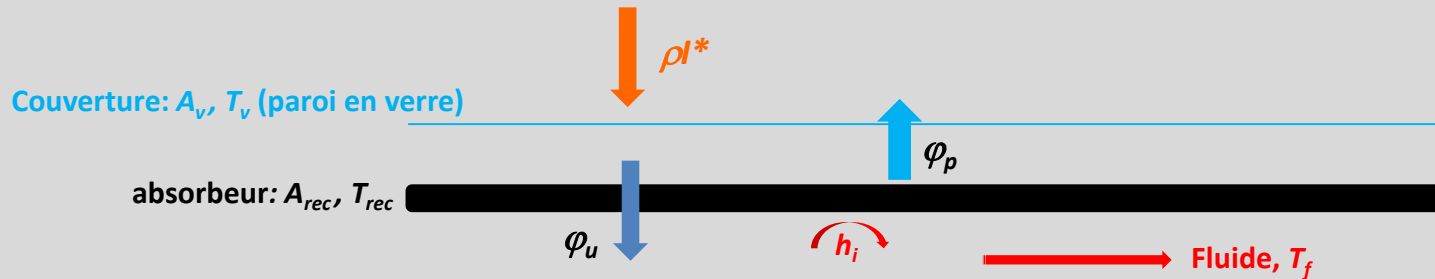
- ✓ Eclairement solaire (réfléchi sur les miroirs) absorbé : $\sim \rho_m I^*$
- ✓ Ensemble des pertes (rayonnement et convection): ϕ_p
- ✓ Flux transmis au fluide : ϕ_u

$$m_{\text{rec}} c_{\text{rec}} \frac{dT_{\text{rec}}}{dt} = \alpha_{\text{rec,soleil}} \tau_{\text{v,soleil}} \rho_{\text{m,soleil}} I^* A_{\text{m}} - \phi_u A_{\text{rec}} - \phi_p A_{\text{rec}}$$

➤ Rendement global: avec turbine (cas idéal de Carnot), concentrateur et génératrice électrique

$$\eta_{\text{global}} = \eta_{\text{opt}} \eta_{\text{élec}} \left(1 - \frac{T_{\text{air}}}{T_f} \right) \left(\alpha_{\text{rec,soleil}} \tau_{\text{v,soleil}} \rho_{\text{m,soleil}} - \frac{\phi_p}{I^* C_g} \right)$$

Température limite



➤ Idée:

Déterminer la température d'équilibre limite T_L du récepteur afin de déterminer la nature du matériau

➤ Bilan absorbeur

En tenant compte de l'éclairement globale

$$\alpha_{\text{rec,soleil}} \tau_{\text{v,soleil}} \rho_{\text{m,soleil}} I^*(t) + \alpha_{\text{rec,ambient}} \sigma T_a^4 = \varepsilon_{\text{rec}} \sigma T_{\text{rec}}^4 + \phi_p + \phi_u$$

Absorbeur $\equiv$ Corps Noir et maximum de température atteinte quand $\phi_p = 0$ et $\phi_u = 0$ (cas le plus limitant)

$$T_{\text{rec}} = T_L = \sqrt[4]{\frac{\alpha_{\text{rec,soleil}} \tau_{\text{v,soleil}} \rho_{\text{m,soleil}} I^*(t) + \sigma T_a^4}{\sigma}}$$

Fluides caloporteurs

- Fonction: fluide qui transporte la chaleur du soleil absorbée pour créer la vapeur
- Choix du fluide:
 - Détermine la température maximale admissible
 - Oriente le choix du concentrateur et matériaux récepteurs
 - Système de stockage
- Peut aussi être le fluide du cycle thermodynamique (gain d'un échangeur)
- Peut être fluide ou gazeux

Fluides caloporteurs

➤ Les huiles synthétiques

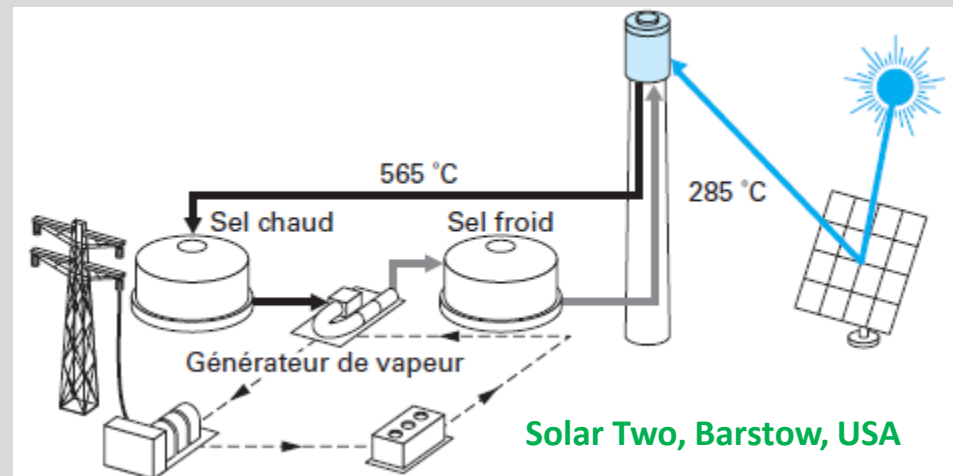
- Bon coefficient h
- Température max de l'ordre de 400°C
- Appropriées au cylindro-parabolique avec cycle de Rankine
- Inconvénients: polluant + haute pression phase vapeur (1MPa pour 400°C)

➤ Métaux liquides

- Comme le sodium liquide
- Vite abandonnés : environnemental et sécurité

➤ Sels fondus

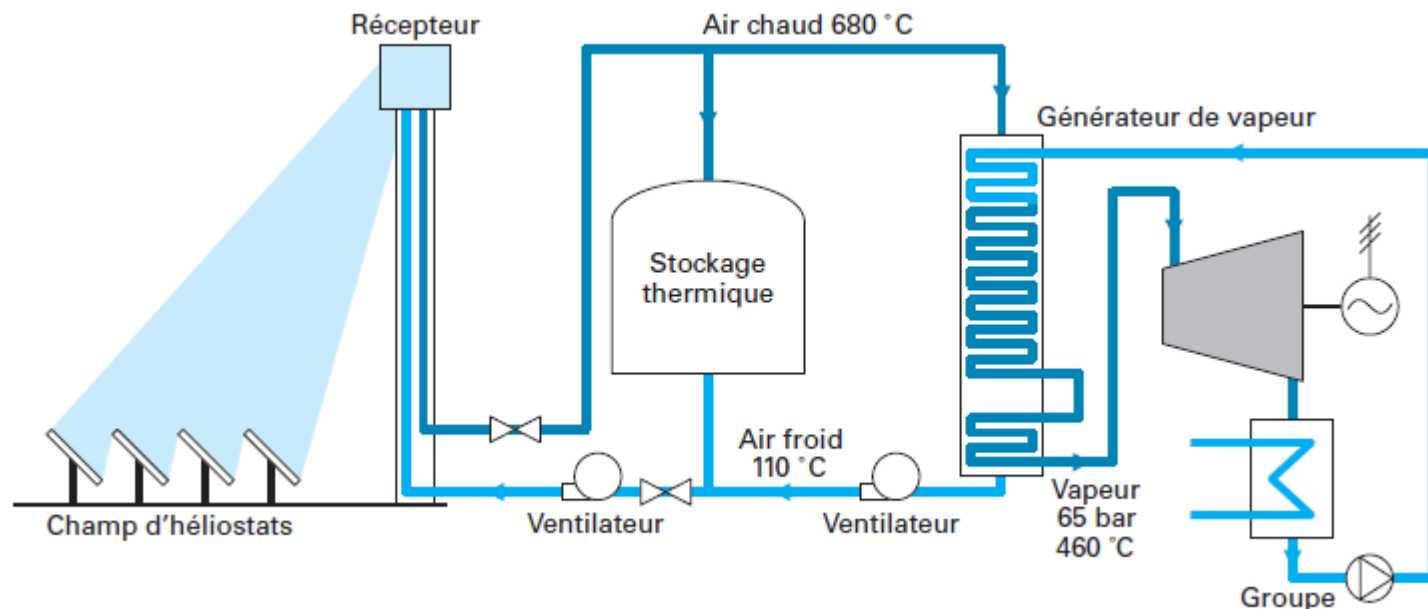
- A base de NaNO_3
- Température de l'ordre de 650°C
- Bon coefficient h + forte densité calorifique (bon candidat pour stockage)
- Inconvénient: solidification à température ambiante → préchauffage
- Filière *Tour+Rankine* bien éprouvée



Fluides caloporteurs

➤ Air

- Piètre performances à P_{atm} mais gestion et approvisionnement aisé
- Capable d'atteindre de hautes températures
- Bien adapté pour les concentrateurs à tours
- Récepteurs volumétriques
- Optimisation en fonctionnant en circuit d'air fermé
- Mais Couteux et gros débits d'air à véhiculer
- Solution hybride: peut apporter l'air chaud d'une turbine à gaz



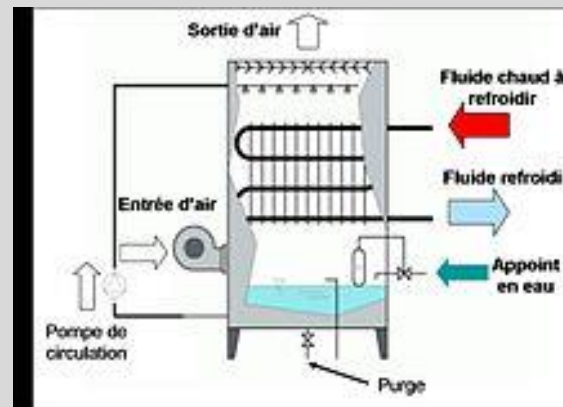
Gestion de l'eau

➤ Emploi:

- Alimentation du circuit génération de vapeur
- Refroidissement de la vapeur si méthode humide – condensation
- Nettoyage des miroirs

➤ Refroidissement du système de génération de chaleur

- Faible partie de la chaleur utilisée pour produire le travail mécanique
- Deux techniques:
 - i. Humide: tour de refroidissement ou aéro-réfrigérantes
 - ii. Sec: aéro-condenseurs; consomme une partie de l'électricité produite



IV.3 Le stockage thermique

Stockage de l'énergie solaire

Pourquoi stocker l'énergie solaire?

- Les performances des CSP dépendent de la constance du rayonnement solaire
- Problème de la gestion des fluctuations du rayonnement solaire et des pics de consommation
 - ⇒ Avantage et intérêt du stockage pour absorber ces fluctuations et lisser les pics
 - ⇒ Idée: inclure un système de stockage entre le champ solaire et le circuit de production d'électricité
- Durée fonctionnement passe de ~ 2000 à 4000 h/an

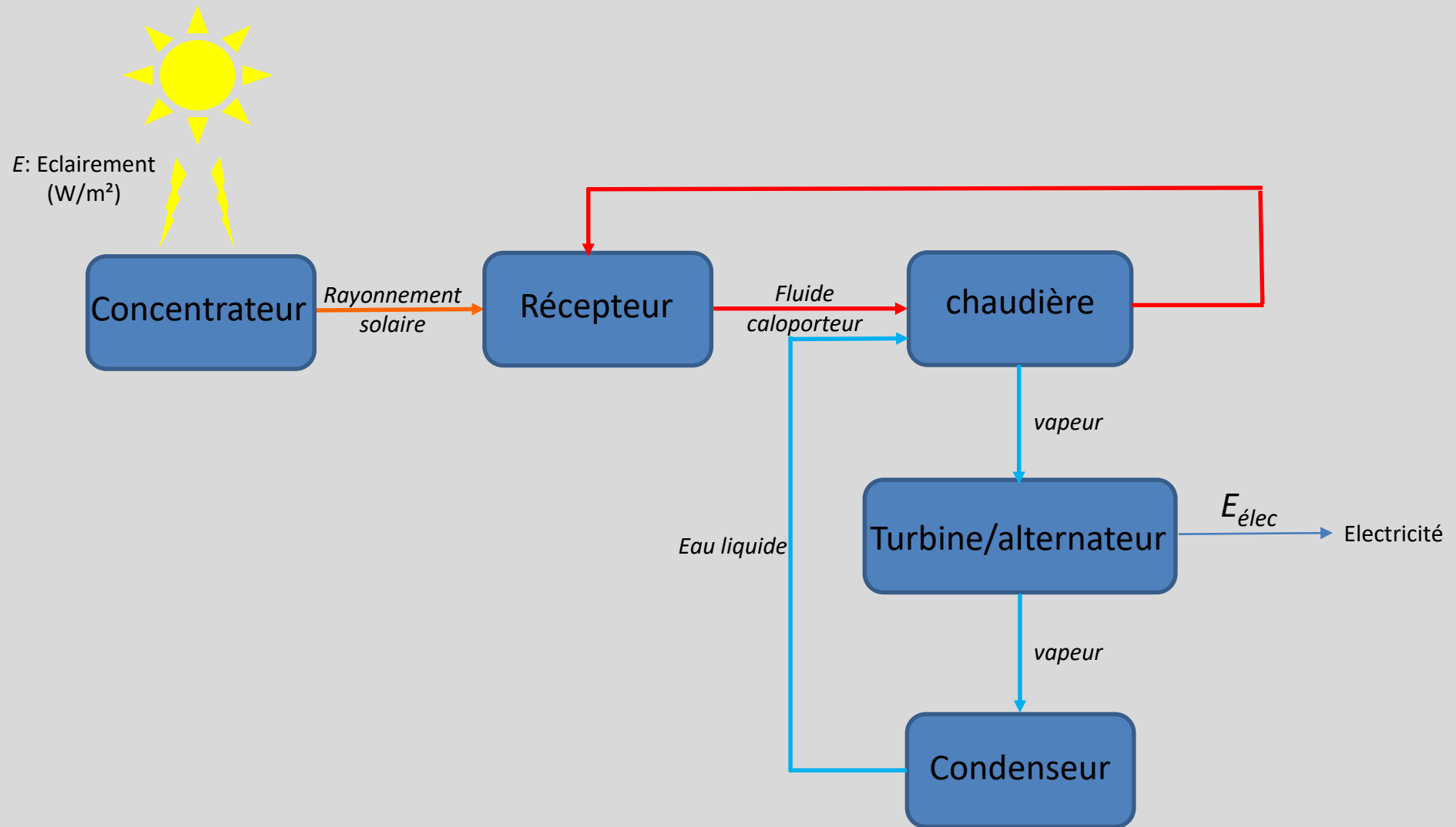
- Problème:

Selon la nature du fluide caloporteur et du type de concentrateur, on a une large gamme de température T et pression p de la vapeur disponible: $T \in [260 ; 1000^\circ\text{C}]$ et $p \in [1; 100 \text{ bars}]$

⇒ **Impossibilité de concevoir un système de stockage unique et adaptable à toutes les CSP**

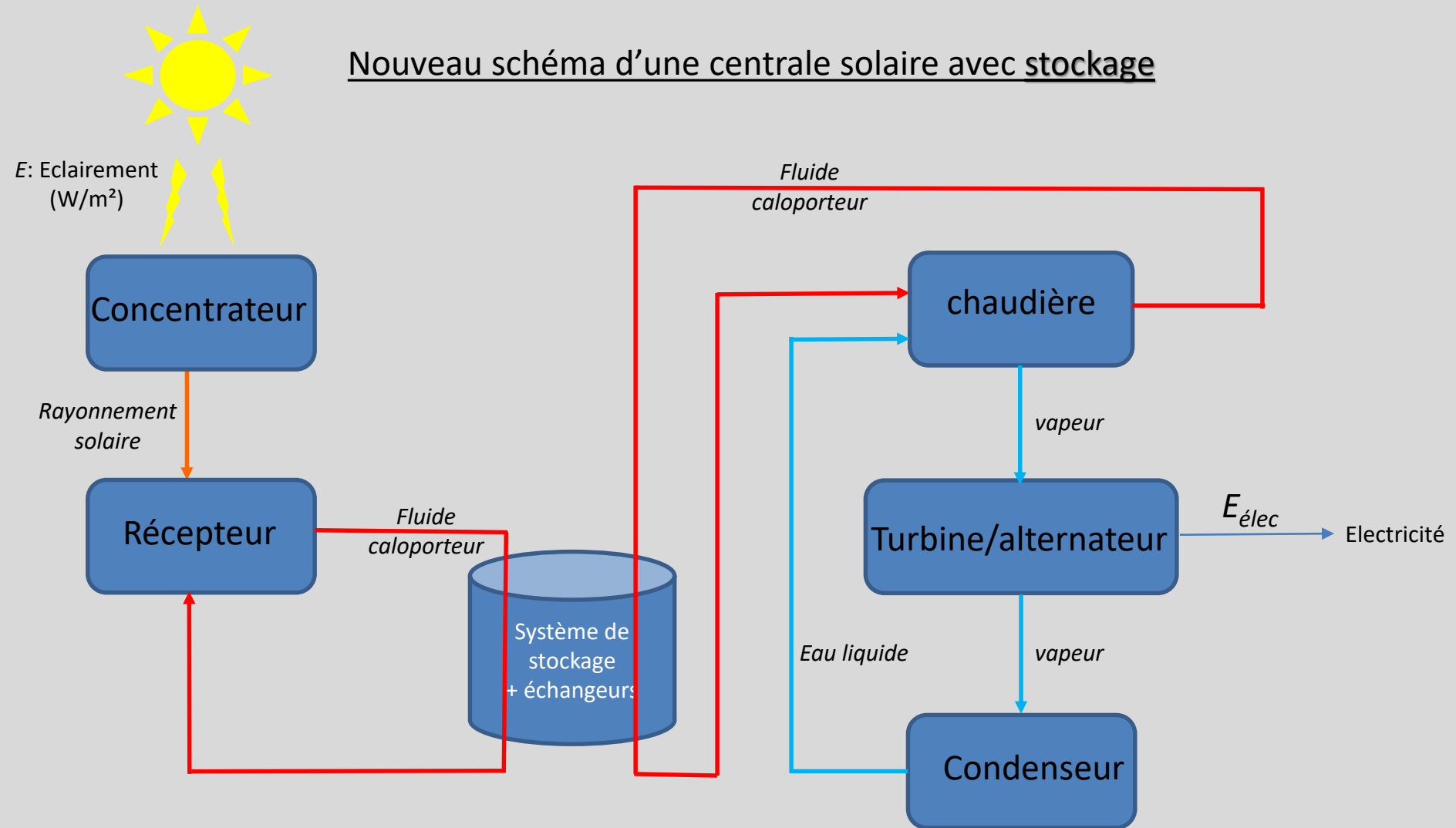
série pour élever la température du fluide caloporteur

➤ Schéma de principe détaillé d'une centrale solaire



Stockage de l'énergie solaire

Nouveau schéma d'une centrale solaire avec stockage



Stockage de l'énergie solaire

➤ Principes

- Utilisation d'un matériau qui va absorber la chaleur issue du concentrateur
- Le jour → stockage / la nuit → déstockage

➤ 2 méthodes possibles:

(1) Stockage par chaleur sensible

- Sans changement de phase
- Énergie potentiellement stockée : $E_{st} = mc_p \Delta T$
- Seule solution actuellement commercialisée: *sels fondus*
- Solution à l'étape d'étude et développement: *béton*

(2) Stockage par chaleur latente

- Changement de phase
- Énergie potentiellement stockée : $E_{st} = mL$
- Seule solution actuellement commercialisée: liquide/vapeur avec l'eau et $L = L_{vaporisation}$
- Solution à l'étape d'étude et développement: Solide/Liquide comme les paraffines et $L = L_{fusion}$

➤ Il existe une 3^{ième} méthode:

réactions chimiques + réacteurs (qu'à l'état de développement)

IV.4 Etat de l'art des centrales solaires

Deux catégories de centrales solaires

1. Centrales solaires de première génération

- ✓ Années 1975 à 1990
- ✓ Essentiellement aux USA et Espagne
- ✓ Prototypes de faible puissance: tester et valider les principaux choix technologiques
- ✓ On trouve 3 types de concentrateurs: à tour, cylindro-paraboliques et paraboliques (Stirling)

Installation	Lieu	Promoteur	Année	Capacité nette	Fluide caloporteur	Surface champ (m ²)	Nombre d'héliostats	Hauteur tour (m)	Stockage
CRTF	Albuquerque (NM, USA)	DOE	1980	5 MW _{th}	Sel fondu	8 261	222	61	Sel fondu
SSPS	Tabernas (Espagne)	AIE	1981	2,7 MW _{th}	Sodium liquide	4 616	111	43	Sodium
EURELIOS	Adrano (Sicile)	CEE	1981	1 MW _e	Vap _{sat}	4 193	182	55	Sel fondu
Sunshine	Nio (Japon)	-	1981	1 MW _e	Vap _{sat}	12 912	807	69	Sel fondu
Solar One	Barstow (Cal., USA)	DOE	1982	10 MW _e	Vap _{sur}	72 527	1 818	80	Huile
STEOR	Kern County (Cal., USA)	ARCO Power	1983	1 MW _{th}	Vap _{sat}	1 584	30	20	-
CESA-1	Tabernas (Espagne)	CIEMAT	1983	7 MW _{th}	Vap _{sat}	11 880	300	80	Sel fondu
Thémis	Targassonne (France)	EDF/AFME/CNRS	1983	2,5 MW _e	Sel Hitec	10 796	201	101,5	Sel fondu
Solar Two	Barstow (Cal., USA)	DOE	1995	12,4 MW _e	Sel fondu	75 527	1 818	54	Sel fondu

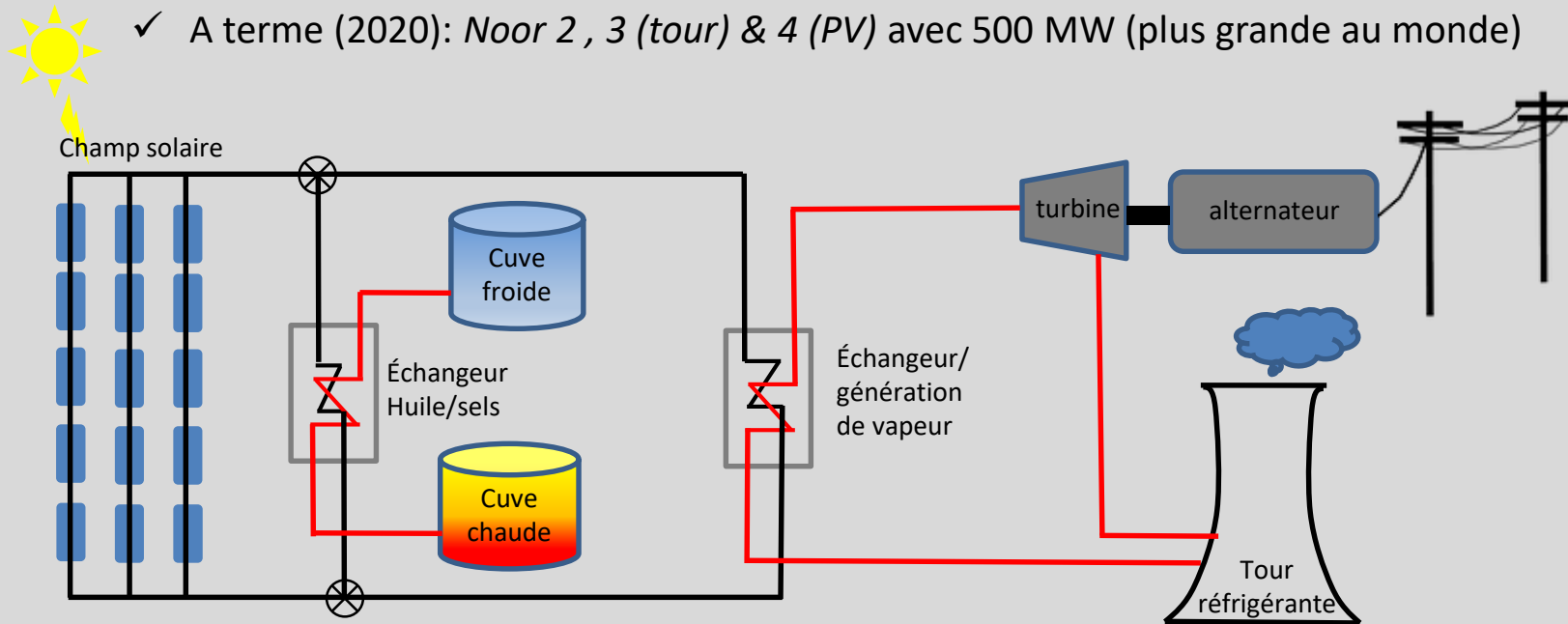
2. Centrales solaires de seconde génération

- ✓ A partir des années 2000
- ✓ Basées sur des concepts validés avec des améliorations/optimisations

Exemples de (CSP) avec stockage par chaleur sensible

Noor 1 Ouarzazatte (Maroc)

- ✓ Mise en service: février 2016
 - ✓ Concentration linéaire: 500 000 miroirs cylindro-paraboliques (4,8 Km²)
 - ✓ Matériau de stockage: sels fondus
 - ✓ Refroidissement humide
 - ✓ Puissance électrique crête: 160 MW
 - ✓ Production électrique (inconnue?)
- ⇒ possibilité d'actionner la turbine pendant $\tau_d = 3$ heures
- ✓ A terme (2020): Noor 2 , 3 (tour) & 4 (PV) avec 500 MW (plus grande au monde)

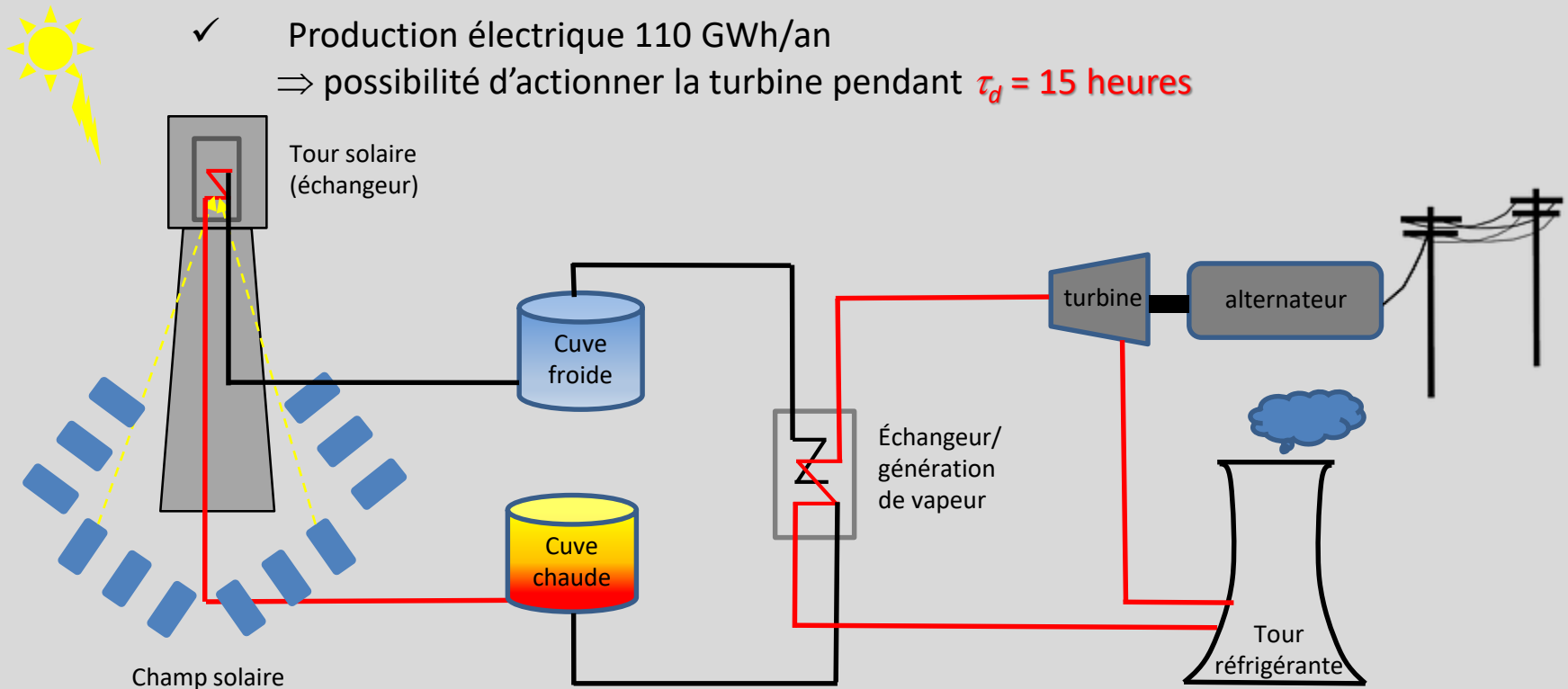


Exemples de (CSP) avec stockage par chaleur sensible

Gemasolar (Espagne)

- ✓ Mise en service: octobre 2011
- ✓ Fluide caloporteur = matériau de stockage: sels fondus à $\approx 560^\circ\text{C}$
- ✓ concentration ponctuelle (tour dans laquelle se situe l'échangeur huile/sels)
- ✓ Champ solaire: 2650 héliostats (190 hectares $\sim 2 \text{ km}^2$)
- ✓ Puissance électrique crête: 19.9 MW
- ✓ Production électrique 110 GWh/an

⇒ possibilité d'actionner la turbine pendant $\tau_d = 15$ heures



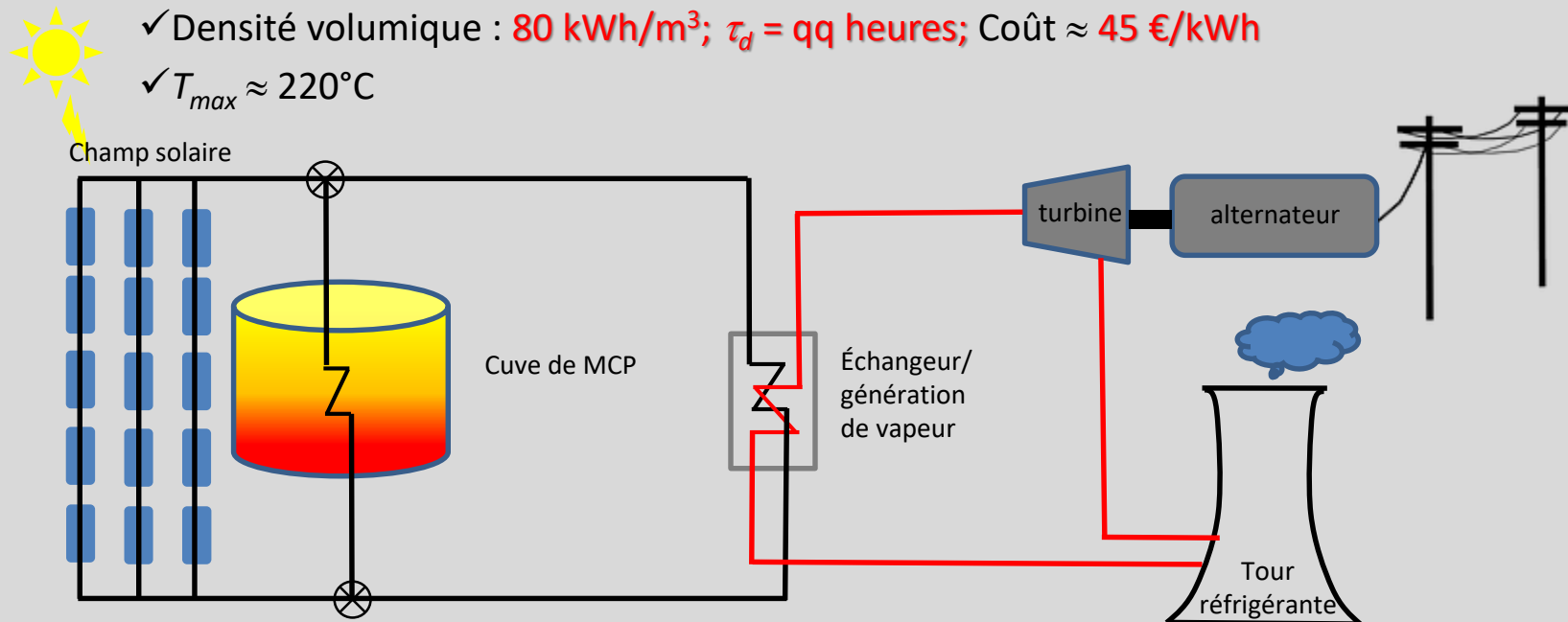
Exemple de (CSP) avec stockage par chaleur latente

■ Utilisation d'un MCP solide/liquide

- ✓ Technologie basée sur le stockage de la chaleur en utilisant l'enthalpie de changement d'état liquide-solide du matériau de stockage
- ✓ Remplacement des 2 cuves de sels fondus (chaleur sensible) par une seule contenant le MCP et un échangeur (fluide caloporteur)

■ Exemple

- ✓ Projet DISTOR (DLR en Allemagne) avec $KNO_3/NaNO_3$ comme MCP
- ✓ Densité volumique : 80 kWh/m^3 ; $\tau_d = \text{qq heures}$; Coût $\approx 45 \text{ €/kWh}$
- ✓ $T_{max} \approx 220^\circ\text{C}$

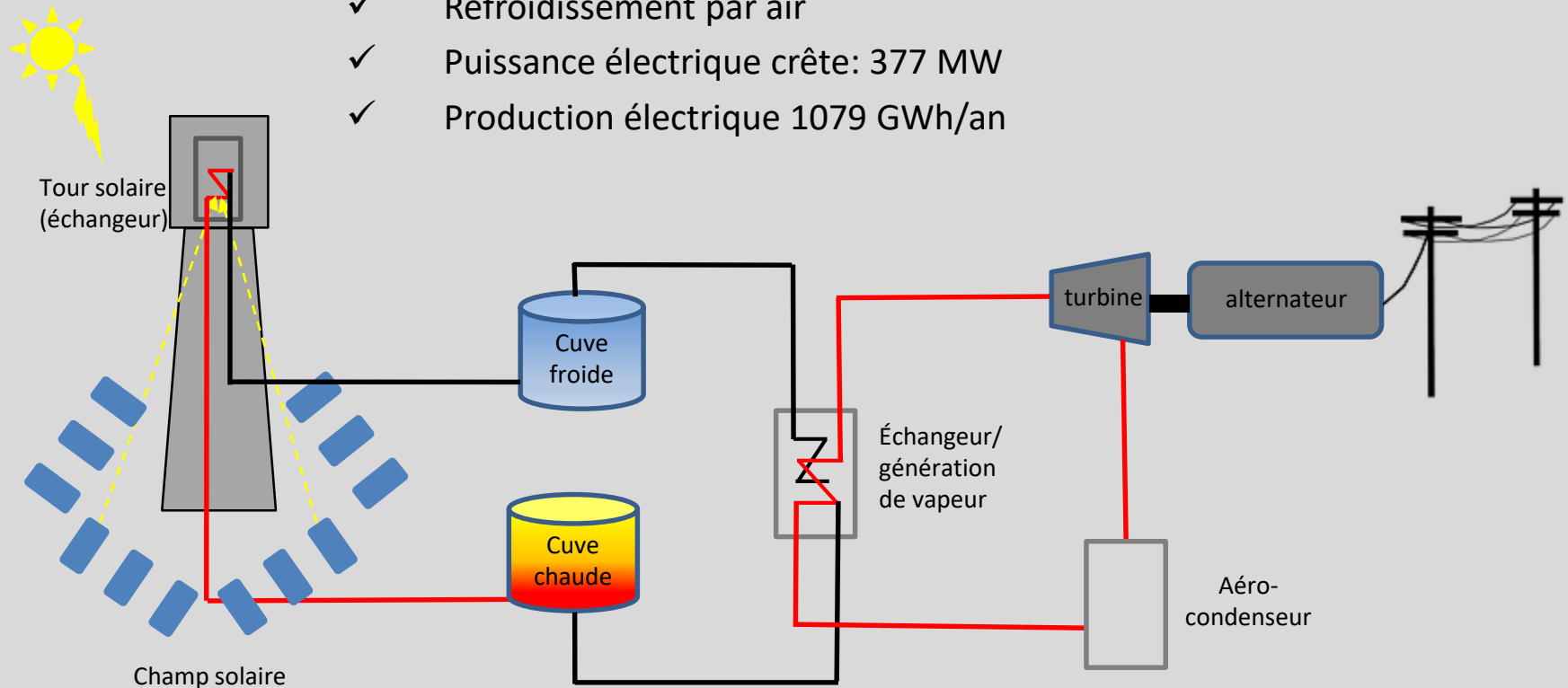


Exemple de (CSP) avec stockage par chaleur latente

Changement de phase liquide/gaz

Centrale d'*Ivanpah* en Californie (USA):

- ✓ Mise en service: février 2014; pour 140 000 habitants
- ✓ Concentration ponctuelles avec 3 tours et 173 500 heliostats (14 Km²)
- ✓ Fluide caloporteur (matériau de stockage): eau
- ✓ Refroidissement par air
- ✓ Puissance électrique crête: 377 MW
- ✓ Production électrique 1079 GWh/an



IV.5 En guise de conclusion

Perspectives

➤ Pénétration du marché

- ✓ Exploiter davantage les gîtes favorables (ceinture solaire)
- ✓ Mais : ressource solaire pas seul facteur déterminant:
 - Souvent des sites isolés ou faiblement peuplés
 - Raccordement réseau
 - Zones protégées
 - Cohabitation avec autres secteurs d'activités

➤ Principales activités de recherches

Composants	Innovations	Gains de performance / réduction de coût	Échéance
Concentrateurs	Taille 120 m ² à + 200 m ²	Investissement réduit	< 5 ans
	Verre mince / miroir face avant	Réfectivité plus grande 93,5 %	5 à 10 ans
	Miroirs anti-poussière	Entretien réduit	> 10 ans
	Héliostats autonomes	Investissement réduit	< 5 ans
Stockage	Sels fondus avec thermocline (1 bac)	Investissement réduit	5 – 10 ans
	Liquides ioniques à température ambiante	Réduction de la consommation parasite pour conditionnement	> 10 ans
	Béton avec structures modulaires	Charge/décharge rapide	5 – 10 ans
	Matériaux à changement de phase (DSG)	Faible encombrement	> 10 ans
	Lit fixe ou fluidisé (gaz/solide)	Stockage haute température (centrales à air, hybrides, cycles à gaz)	10 ans
	Réservoirs à vapeur	Stockage du fluide de travail du cycle	< 5 ans
Récepteurs / absorbeurs	Dépôts absorbants/sélectifs	Élévation de température	5 à 10 ans
	Contrôle des instabilités d'écoulement	Efficacité de transfert	-
	Diminution de pertes de charge		-
	Fenêtres, optiques secondaires	Augmentation du rendement	-

Aussi un élément de controverse

- Budget: énergie solaire → pas si gratuite que ça
- Problème d'ensablement des miroirs
- Nécessité de combustibles fossiles
- Fortes consommations en eau alors que situées dans des zones déjà arides (refroidissement + alimentation pour production vapeur)
- Risques de brûlures mortels des oiseaux (température air de 500°C proche des panneaux)

