



COLLÈGE
DE FRANCE
1530

Chaire **Développement durable**
Environnement, Énergie et Société
Chaire annuelle – Année académique 2010-2011



Autres systèmes pour le stockage et la conversion de l'Énergie : **Volants d'inertie, Solaire thermique, Redox flow ...**

23 Février 2011

Prof. Dominique Larcher

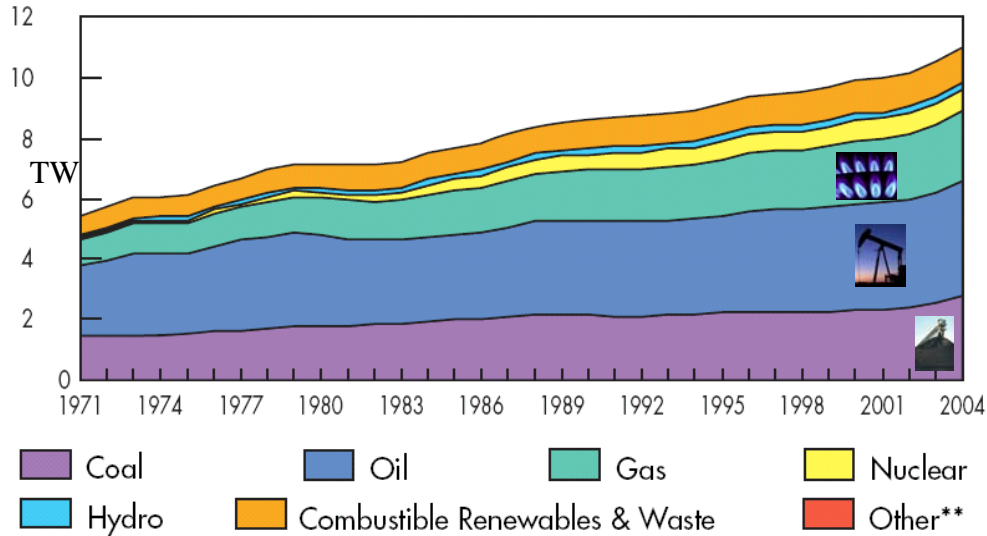


Amiens

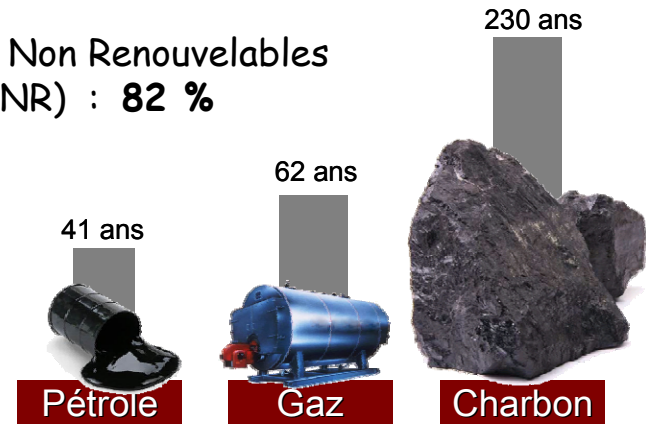




2010 : 17 TW> 2050 : 30 TW



Energies Non Renouvelables (ENR) : 82 %



World energy outlook (rapport de l'AIE) (2007)
L'énergie, chiffres clés, Observatoire de l'Energie (2008)

Malgré : Plusieurs chocs pétroliers successifs
Conséquences climatiques/écologiques
Crises géopolitiques



Pourquoi ? Sources **concentrées** (coal : 30 000 J/g)
et **faciles d'accès** donc **PEU CHERES**

Combustion → Energie (J) + PUISSANCE (W)



Consommation croissante, malgré des efforts technologiques importants

En 1 heure : 10^6 tep

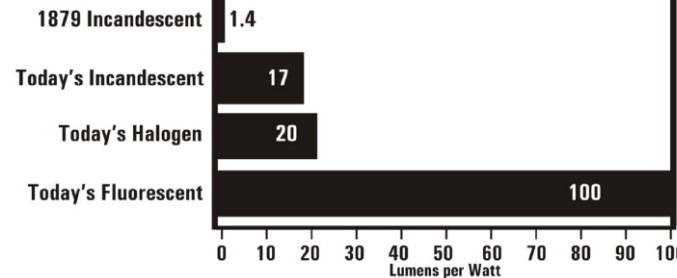
= 5 x



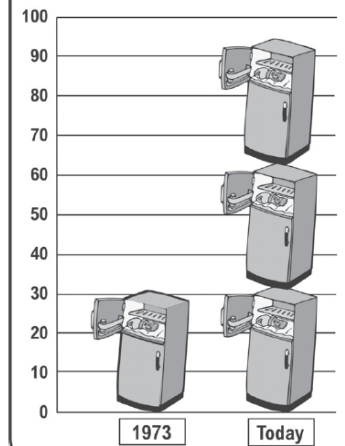
= 3 10^6 tonnes CO₂



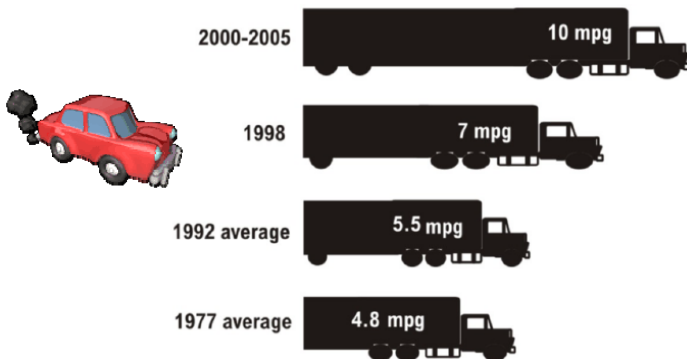
LIGHTING EFFICIENCY



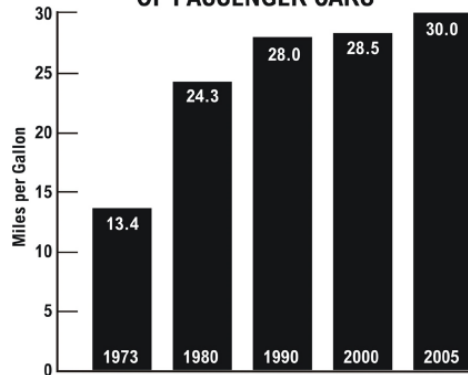
REFRIGERATOR EFFICIENCY



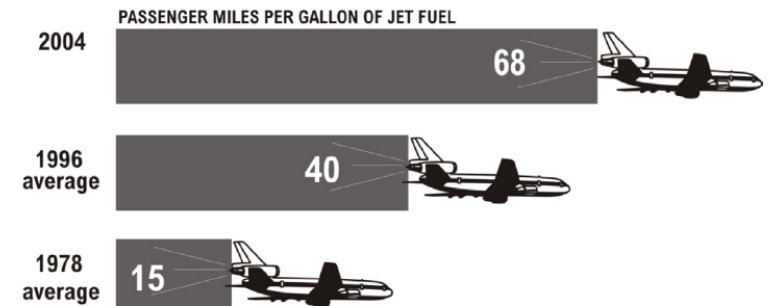
TRACTOR TRAILER TRUCK MILEAGE

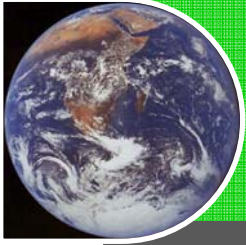


AVERAGE FUEL ECONOMY OF PASSENGER CARS



AIR TRANSPORTATION FUEL ECONOMY





Conditions pour une Transition : Fossiles → Renouvelables

Il devient nécessaire de trouver d'autres sources d'énergie, afin que la civilisation du monde ne s'effondre pas lorsque les combustibles fossiles seront sur le point d'être épuisés.

*S. Arrhénius,
Paris, 1922*

Elles ont le grand désavantage d'être à peu près également distribuées à la surface de la Terre, quand au contraire les combustibles fossiles et les chutes d'eau sont concentrés en quelques lieux assez restreints, ce qui leur donne leur grande valeur.



DIFFUSES

↓
Collecte
Concentration



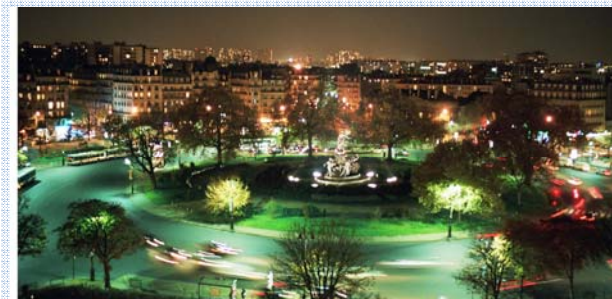
*Un problème
à 3 entrées*

« **VERT** »



INTERMITTENTES

↓
Stockage - Transport





Prospective - Perspectives

En l'état actuel, aucune des ressources renouvelables n'est en mesure de subvenir individuellement aux besoins de l'Humanité

Toutes les options à long terme sont dignes d'intérêt car leur coût est très difficile à extrapoler :

Substantial cost reductions in the past few decades have made a number of renewable energy technologies competitive.



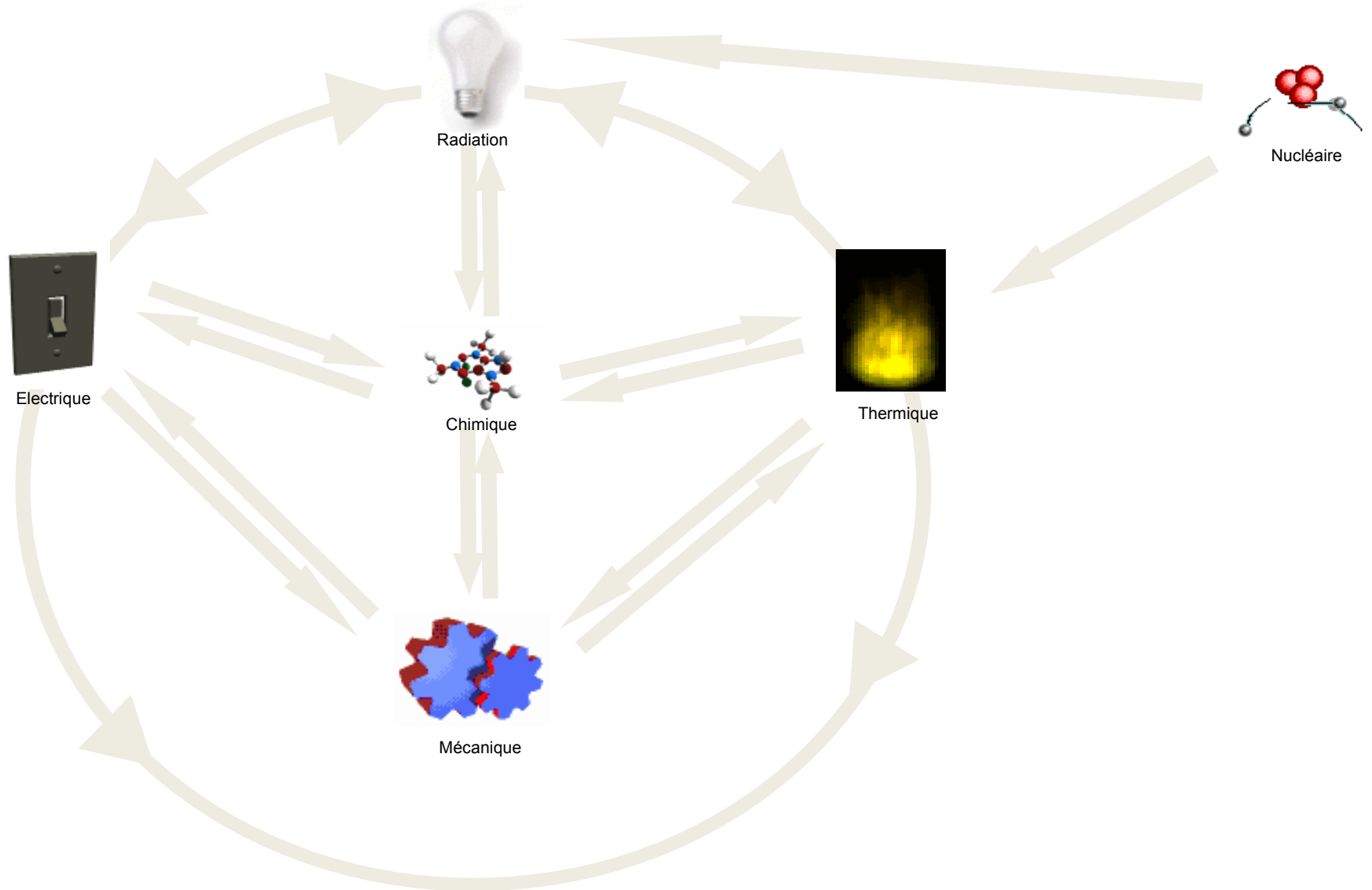
D'où une grande richesse dans les stratégies explorées au niveau Mondial, ici illustrée par trois exemples :

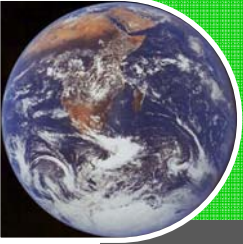
- Le Solaire et le **Stockage Thermique**
- Les Accumulateurs **Electrochimiques** à circulation (Redox Flow)
- Les volants d'Inertie = **Stockage Mécanique** (FlyWheel)

Source	Units	Current Energy Costs		Potential Future Energy Costs	
		Low	High	Low	High
Biomass-Ethanol	\$/GJ	8	25	6	10
Bio-diesel	\$/GJ	15	25	10	15
Geothermal-heat	c/kWh	0.5	5	0.5	5
Biomass-Heat	c/kWh	1	6	1	5
Geothermal-electricity	c/kWh	2	10	1	8
Large Hydro	c/kWh	2	10	2	10
Small Hydro	c/kWh	2	12	2	10
Solar low-temperature heat	c/kWh	2	25	2	10
Wind electricity	c/kWh	4	8	3	10
Biomass-Electricity	c/kWh	3	12	4	10
Marine-current	c/kWh	10	25	4	10
Solar Thermal Electricity	c/kWh	12	34	4	20
Marine-Wave	c/kWh	10	30	5	10
Solar PV electricity	c/kWh	25	160	5	25
Marine-ocean thermal	c/kWh	15	40	7	20
Marine-tidal	c/kWh	8	15	8	15

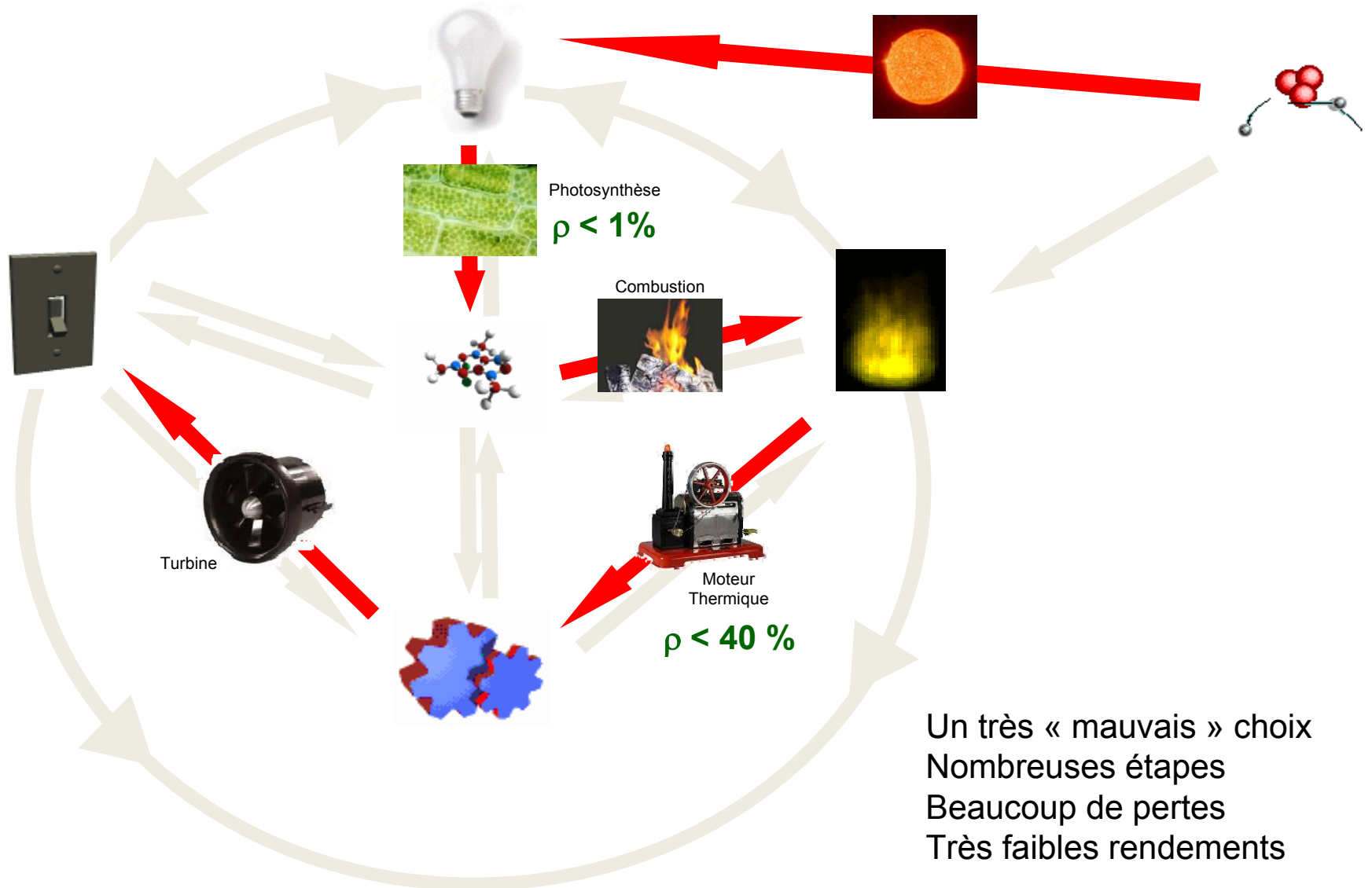


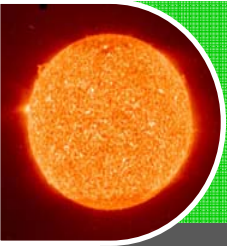
Positionnement : Stockage - Conversion



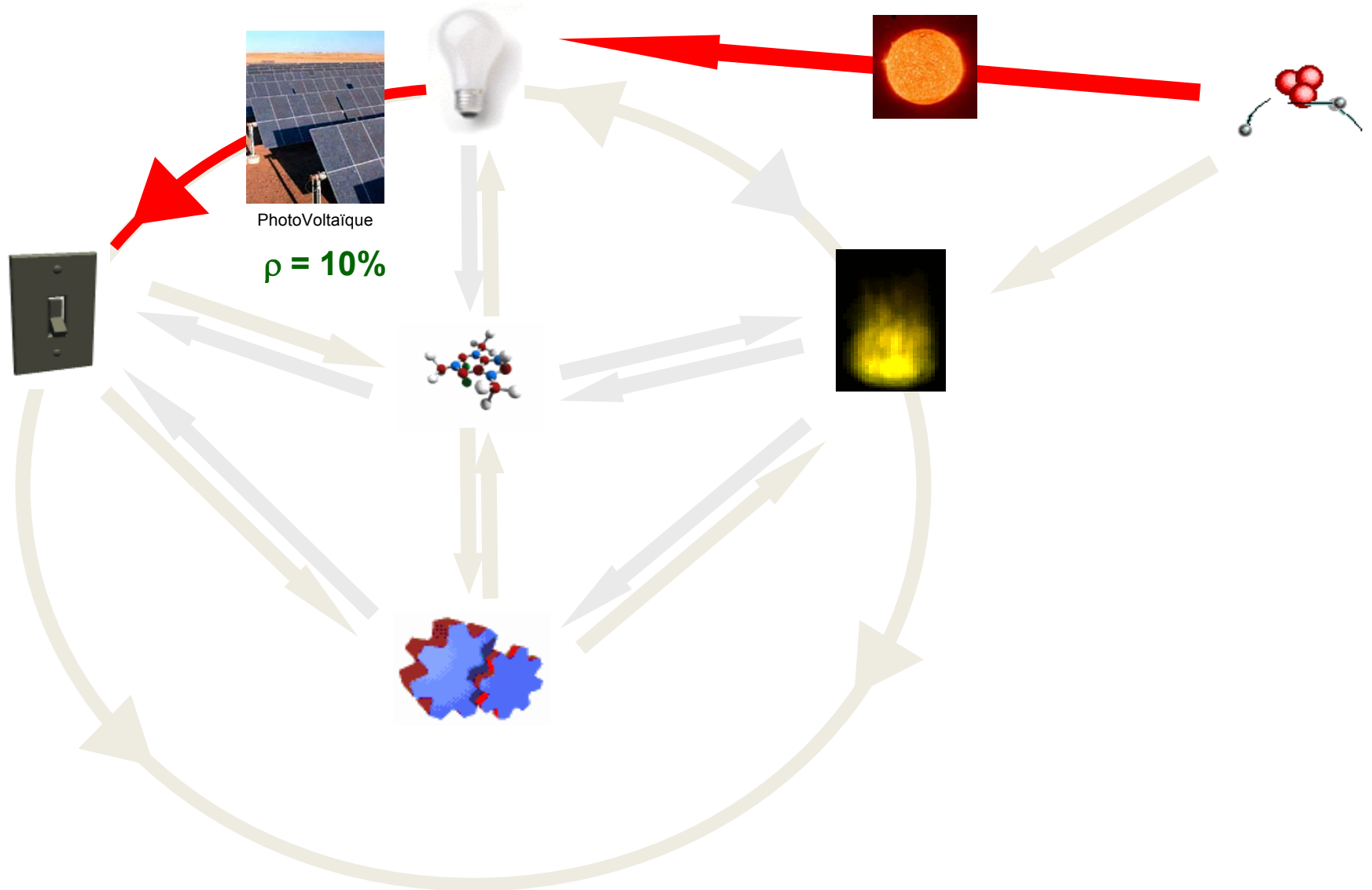


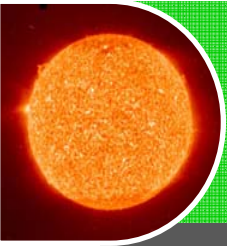
La chaîne de conversion « Fossile » et Biomasse



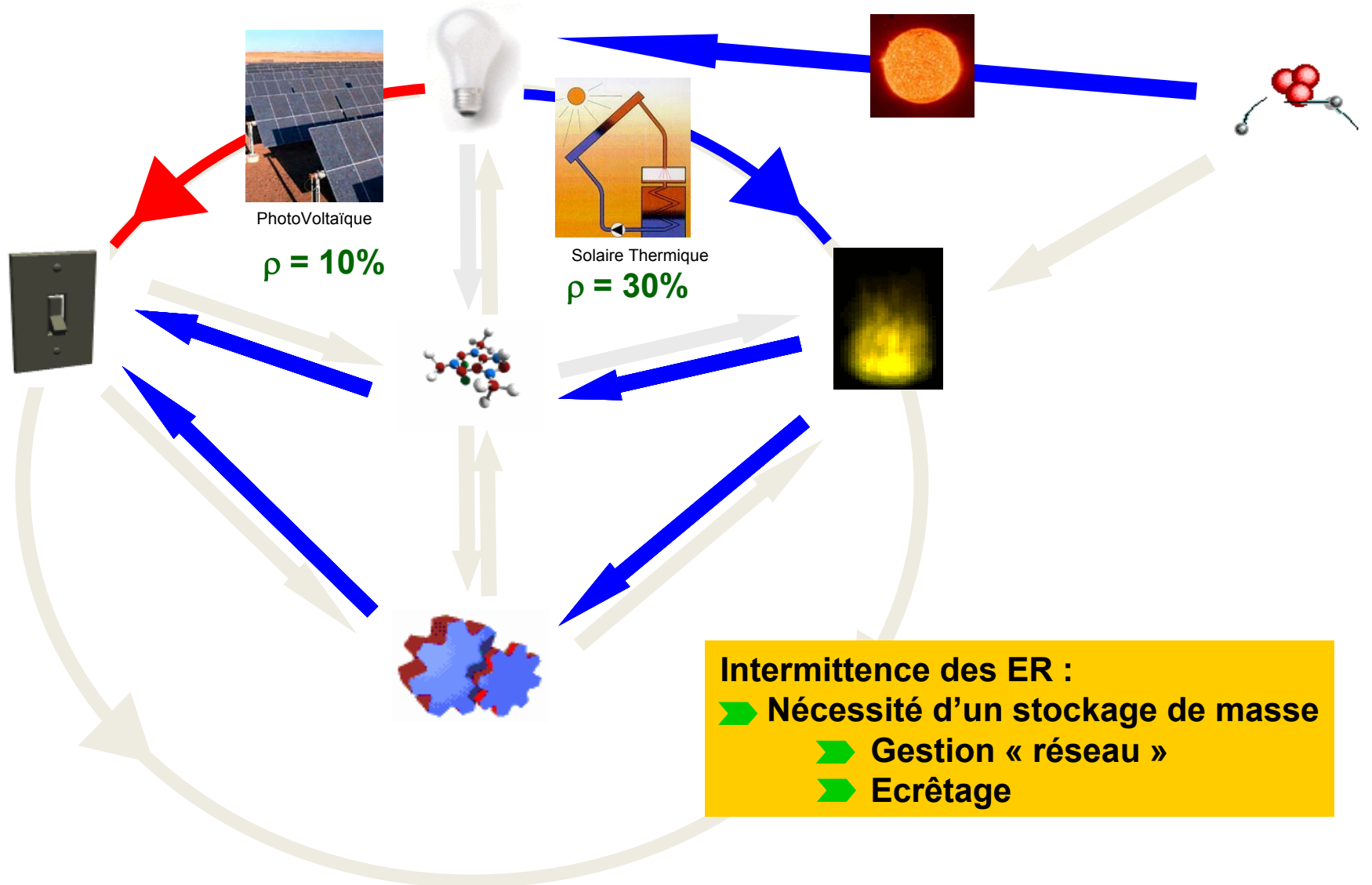


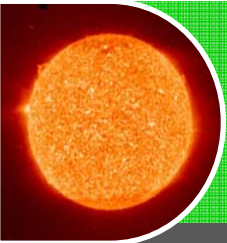
Les chaînes Renouvelables « Solaires »



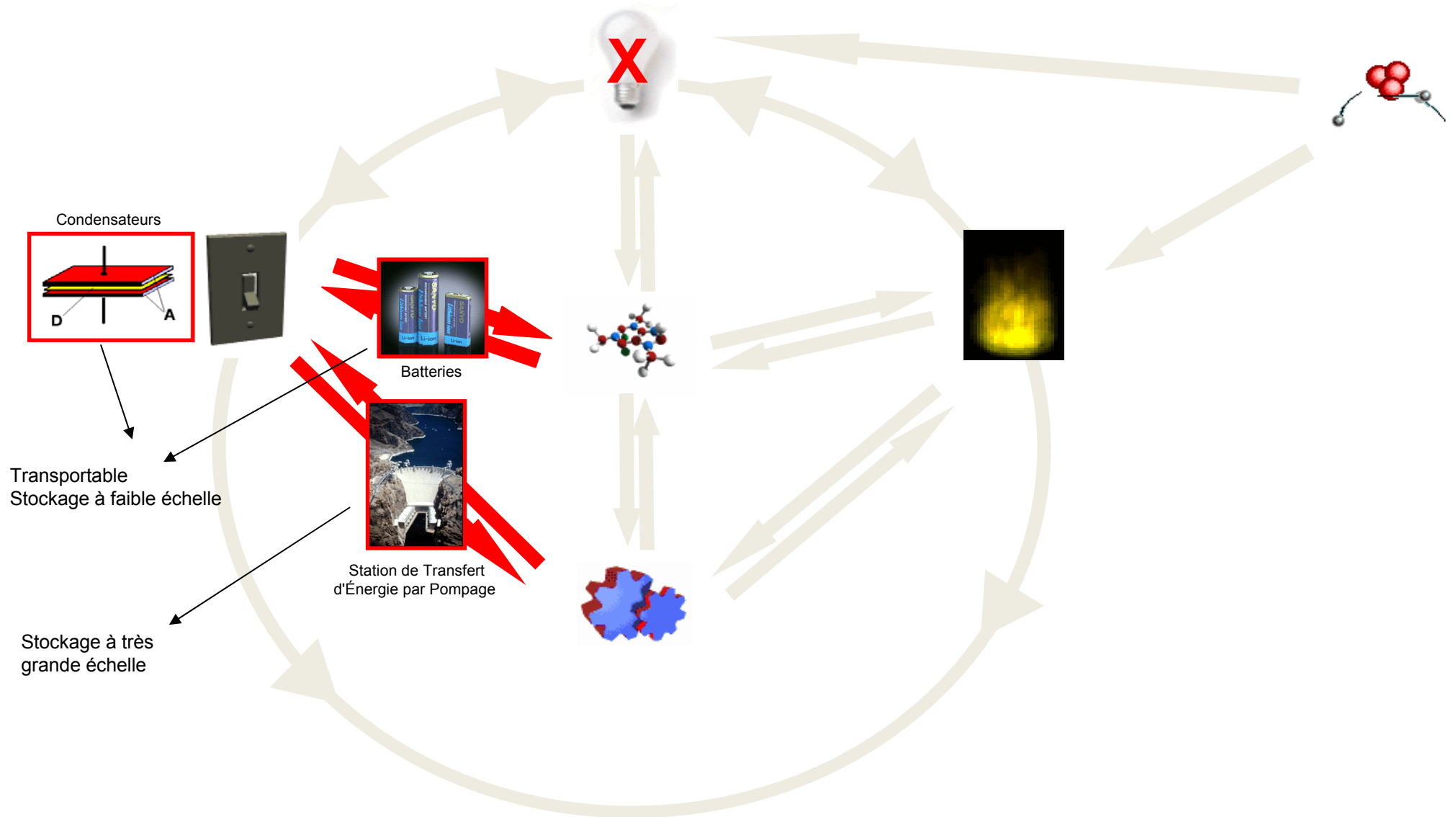


Les chaînes Renouvelables « Solaires »

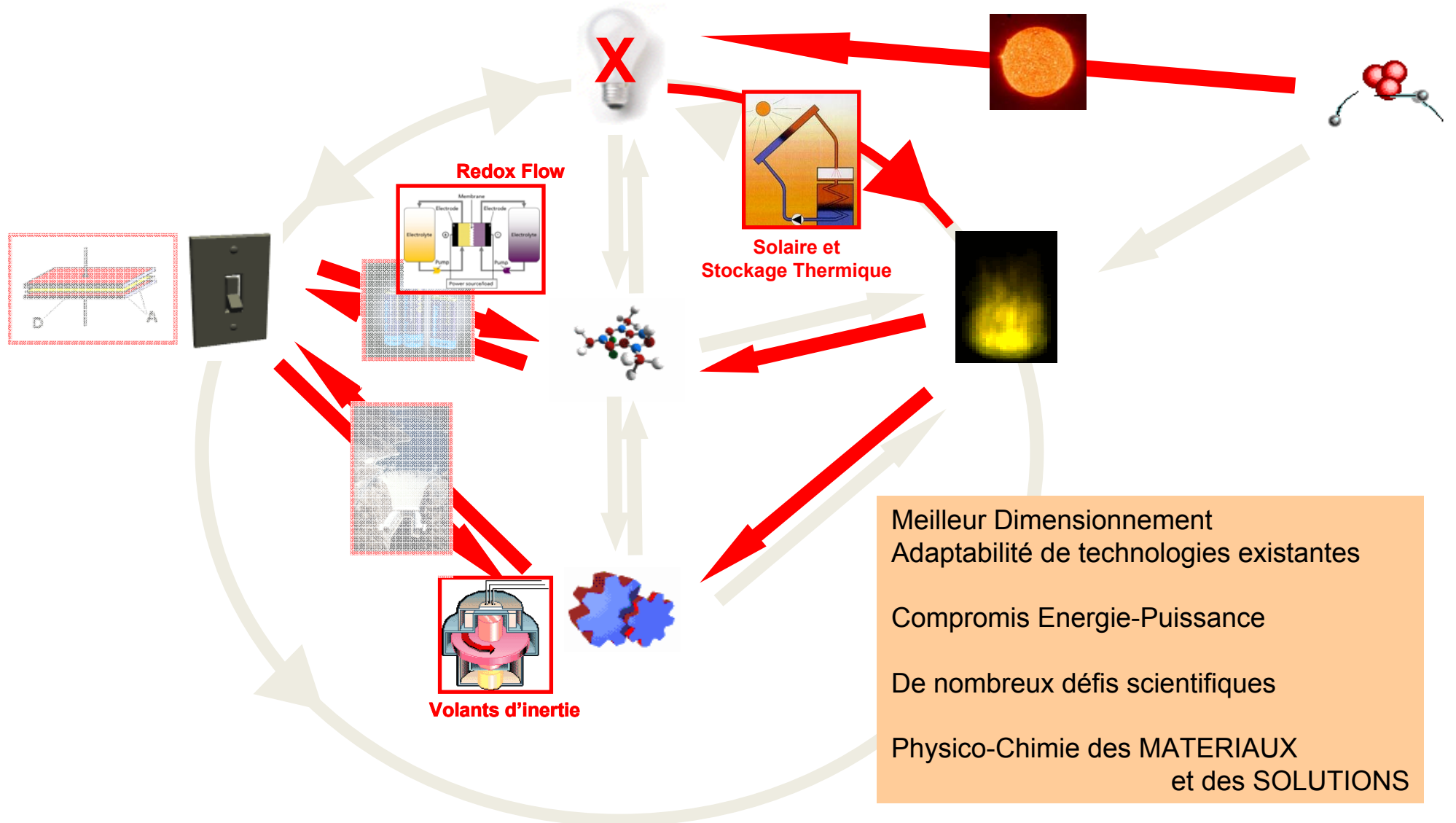


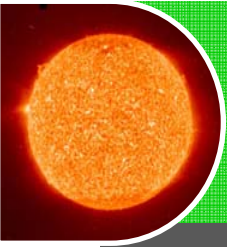


Stockage de l'Énergie : les Technologies matures

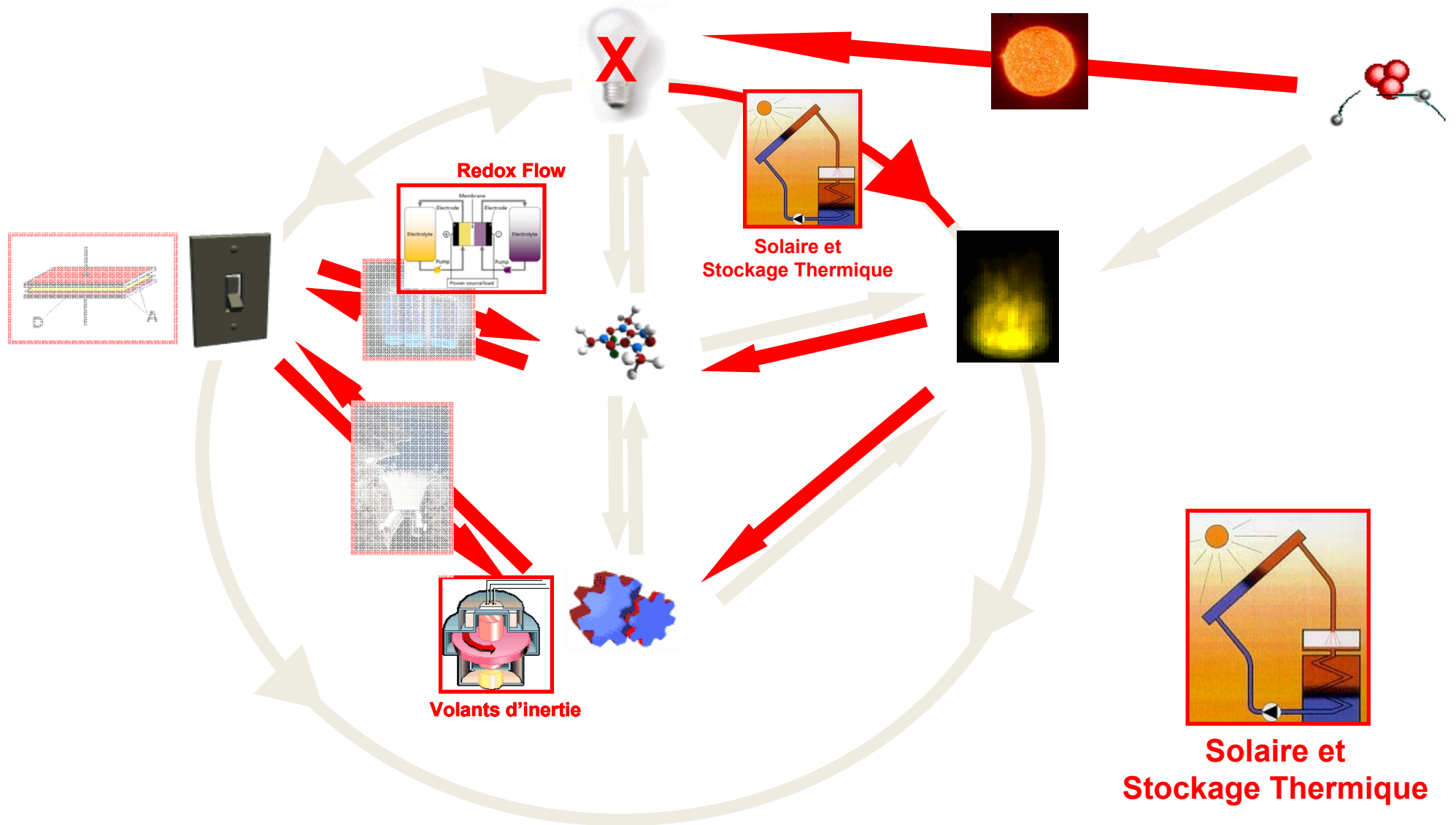


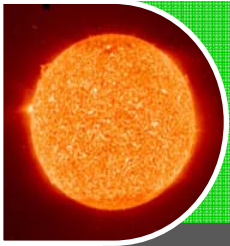
Plan





Plan

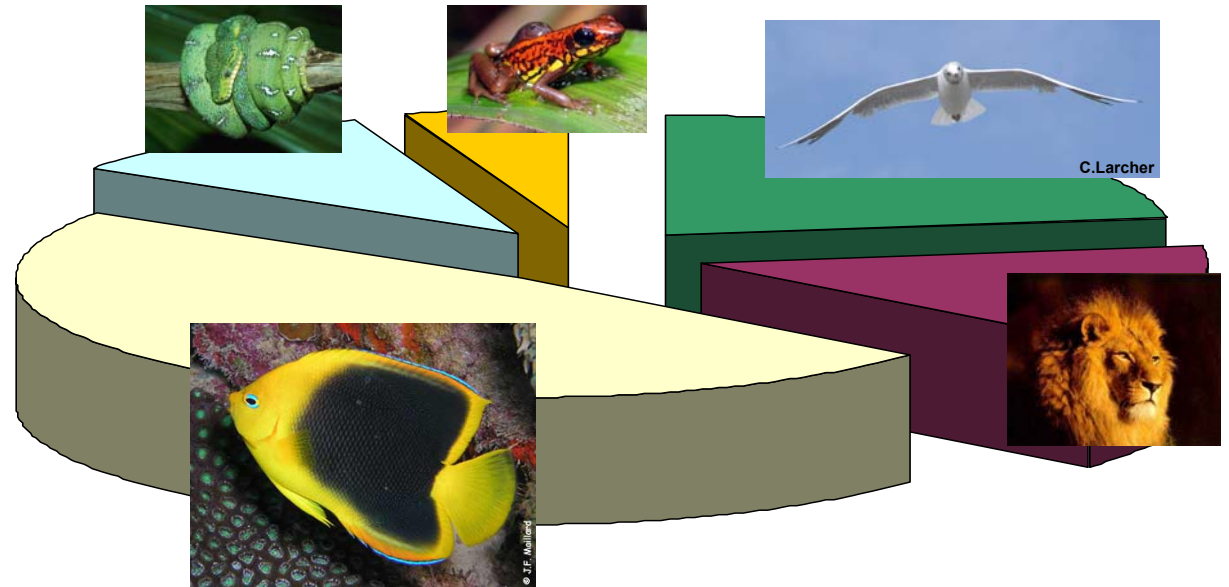




Le Solaire Thermique, l'exemple du Vivant

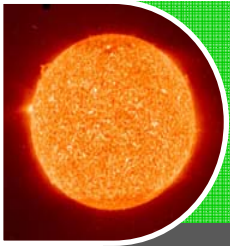
Contrôle de la température interne des Vertébrés : **Poikilothermie** vs. **Homéothermie**

Les 2/3 des vertébrés régulent leur métabolisme par exposition directe au Soleil ou à des milieux chauffés par le Soleil (**Exothermie**)



Moins de 1% des espèces animales sont « indépendantes » du solaire thermique (« sang chaud »)

Processus enzymatiques et de stockage chimique très complexes



Energie Solaire : Un problème de surface

1 h = 1 an

17 TW 200 W/m² 10% efficacité collecte → 850 000 km²

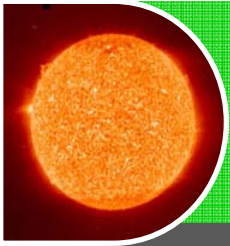


OU



Favoriser les lieux à fort ensoleillement et peu peuplés

Augmenter le rendement
Quels systèmes de collecte ?



Concentrer l'Énergie Solaire Thermique

Cette technologie a produit plus de MW que toutes les autres technologies solaires réunies

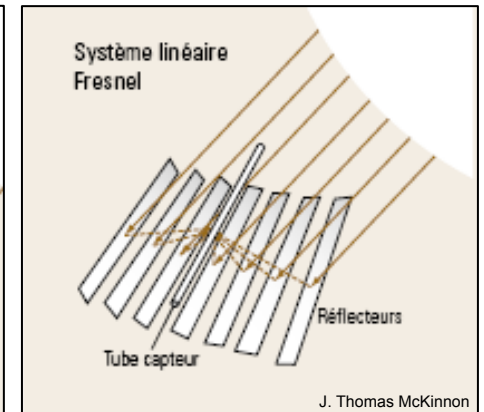
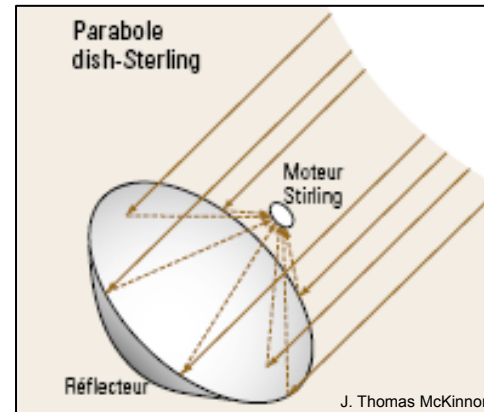
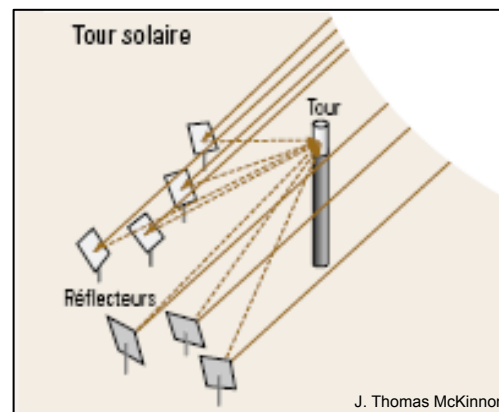
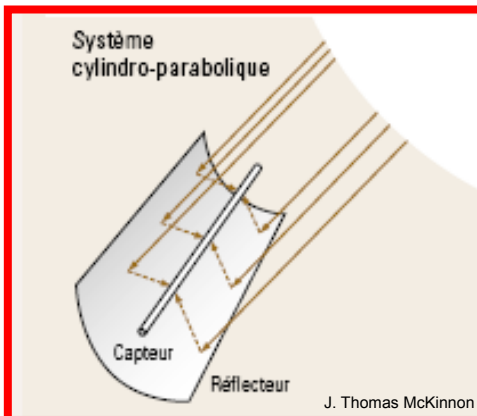
Désert Mojave, 350 MW, 40000 miroirs, 10 km²
Ivanpah, 400 MW (½ réacteur nucléaire)

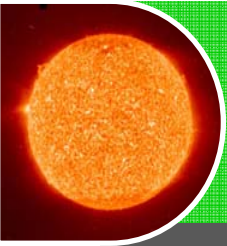


Kramer Junction, Californie, 150 MW



Pertes thermiques





Concentrer l'Energie Solaire Thermique

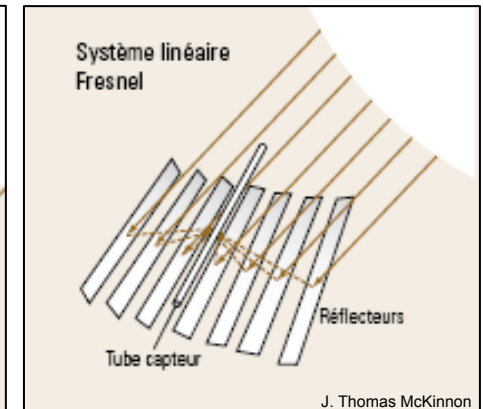
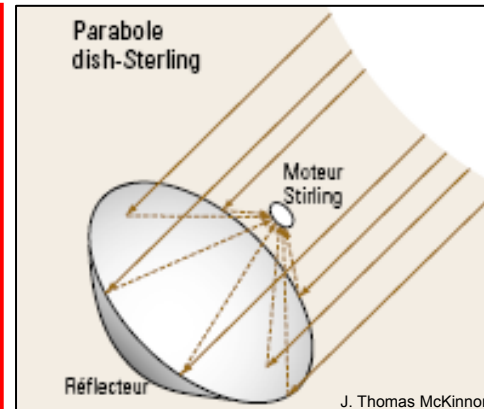
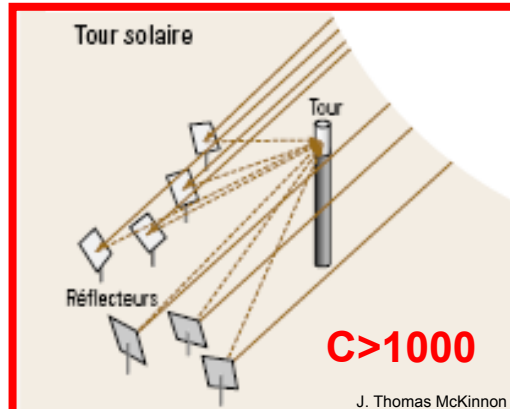
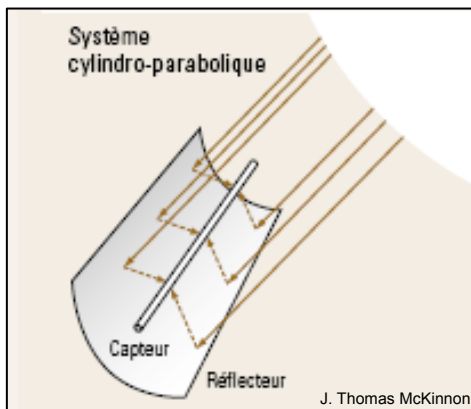
Abengoa - PS10, Sanlúcar, Espagne, 10 MW

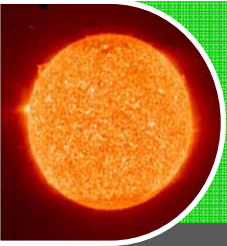


Solar 2, Californie, 10 MW



Peu de pertes thermiques





Concentrer l'Energie Solaire Thermique



Conversions
Solaire - Mécanique
- Electrique

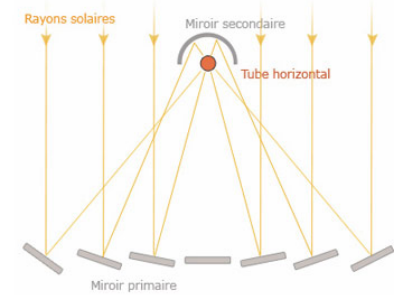
10-25 kW

Pas de
stockage thermique

$\rho \sim 30\%$

En développement

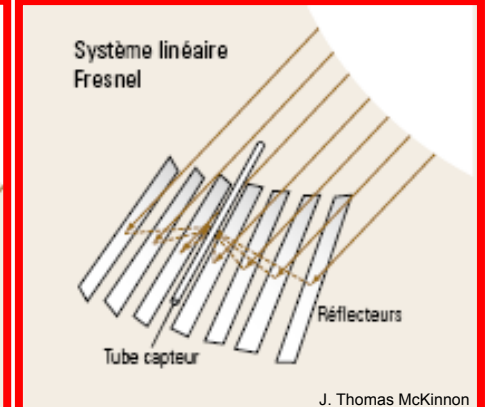
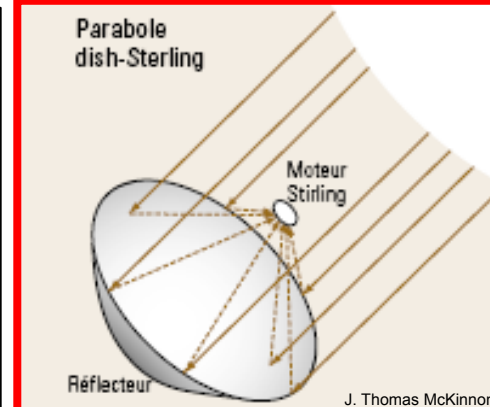
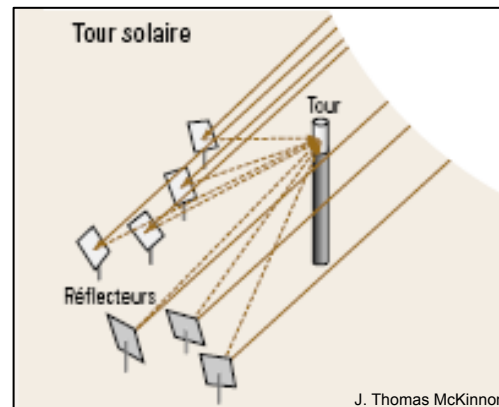
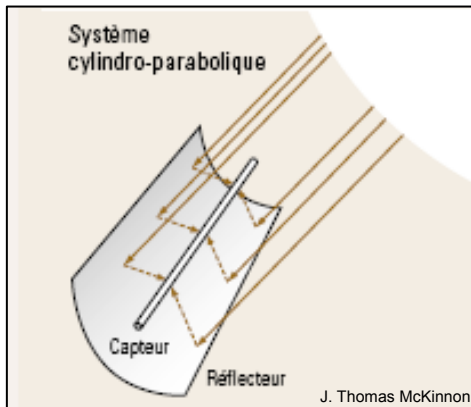
Moins de surface
de miroirs

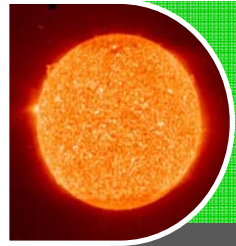


Crédit : Ecosources



crédit : Dlr





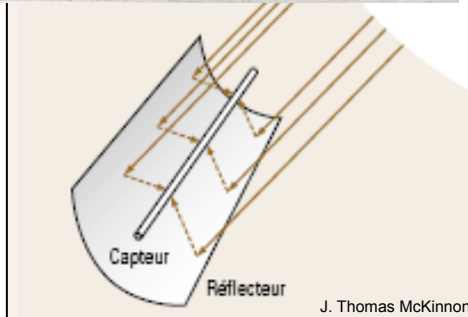
De profondes racines historiques

1913

F. Shuman / C.V. Boys

« One thing I know for sure. If mankind does not learn how to harness the power of the sun, he will ultimately fall back into barbarity »

50 CV pour 1200 m²
Irrigation : 270 000 L / min.
Mead, Egypte

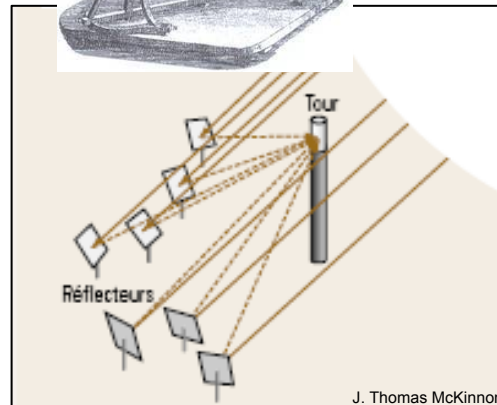


DES SCIENCES. 305
NOUVELLE INVENTION
DE
MIROIRS ARDENS*.
Par M. DE BUFFON.
PREMIERE ESPECE.
Miroirs d'Archimède.

J'ai fait construire en 1747 un miroir composé de 168
glaces planes de six pouces de largeur sur huit de hauteur,
avec lequel j'ai brûlé du bois jusqu'à 200 pieds de distance,
fondu l'étain à 150 pieds, le plomb à 130, l'argent à 60,
&c. & j'ai rendu compte de cette découverte dans le volume
des Mémoires de l'Académie pour l'année 1747.



1747

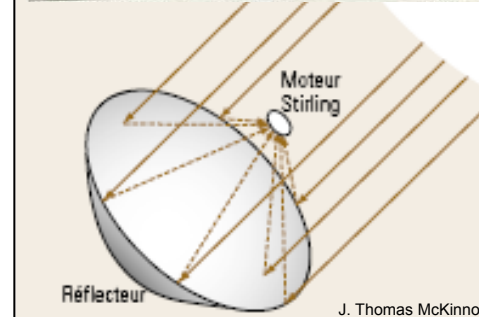
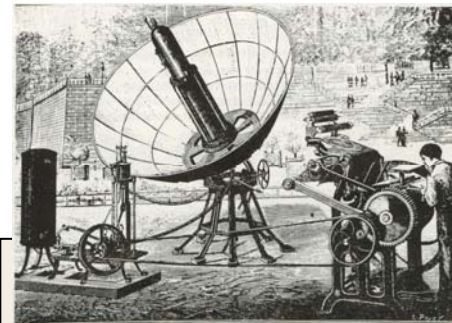


1868

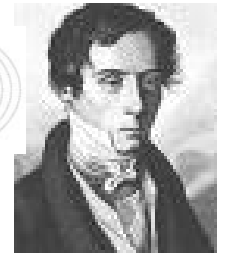
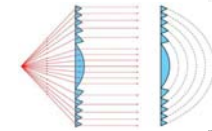
A. Mouchot

Qu'on y prenne garde d'ailleurs! Si dans nos climats
l'industrie peut se passer de l'emploi direct de la chaleur
solaire, il arrivera nécessairement un jour où, faute de
combustible, elle sera bien forcée de revenir au travail des
autres agents naturels.

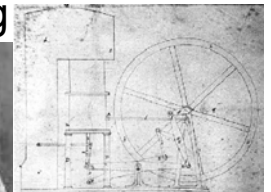
« Héliopompe »
1 CV / 20 m²
Huile / eau



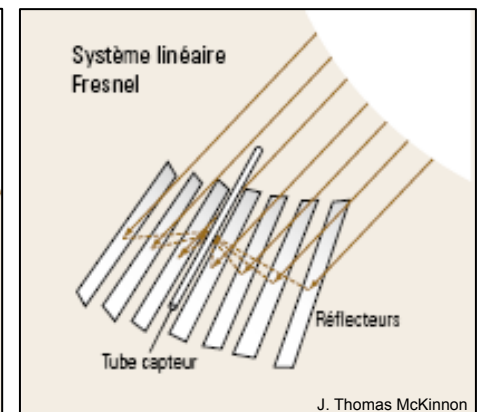
A. Fresnel

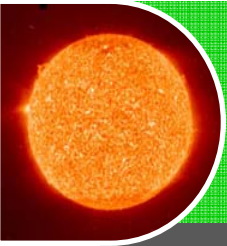


R. Stirling



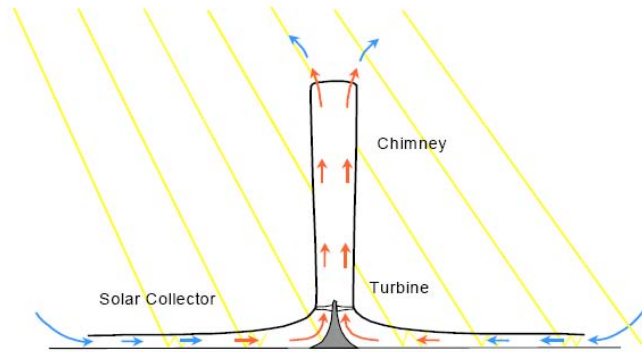
1816





Le Solaire Thermique : Un Problème de Stockage

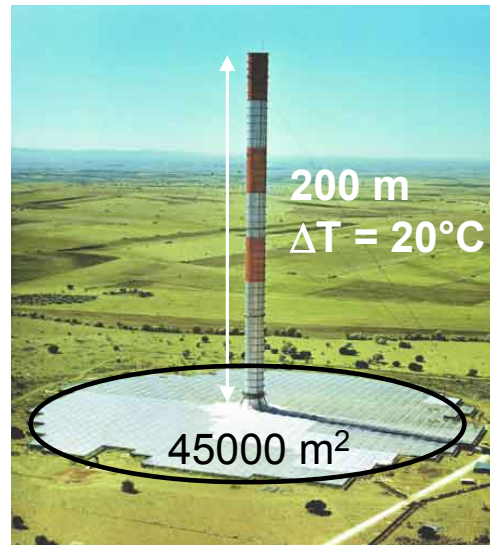
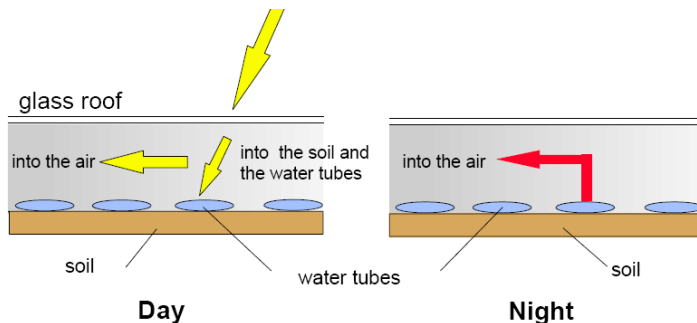
Une alternative au long terme : **La Cheminée Solaire** = Machine à vent + Effet de serre (**Brevet 1903**)



Energie = $f(\Delta T)$
 = $f(\text{hauteur, surface})$

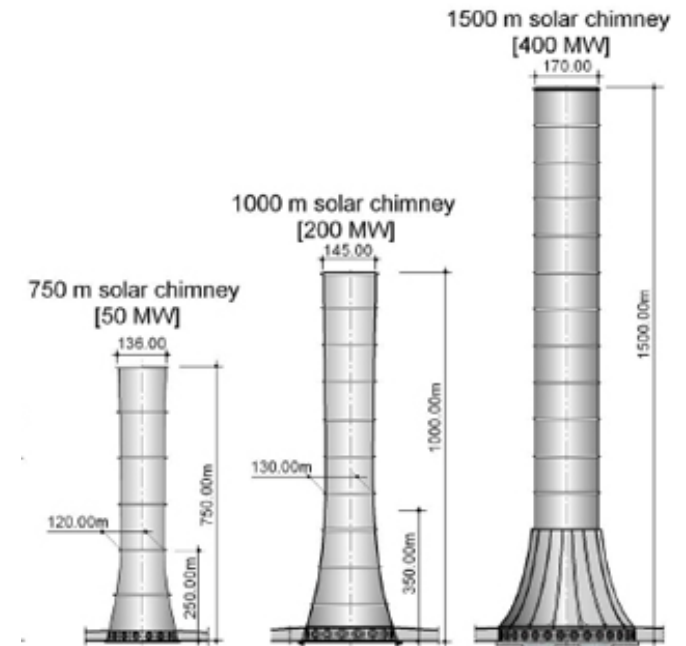
Fonctionnement **diurne + nocturne**

Stockage : eau ($4,2 \text{ J/}^\circ\text{g}$) +
 sols ($\sim 0,8 \text{ J/}^\circ\text{g}$)



Manzanares, Espagne, 50 kW

De très nombreux et grands projets à l'étude ou en construction



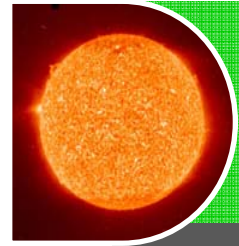
Ciudad Real
 3500 ha
 120000 h

Australie
 39 km²
 200000 logements

Namibie

Encyclopedia of Physical Science and Technology (2000) J. Schlaich, W.Schiel

D'ici la ...



Systemes de Stockage Thermique

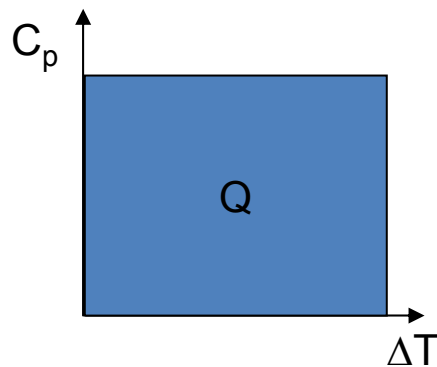
Options à court terme : Stockage par Accumulation de Chaleur

6 heures de stockage : +2% coût kWh

Par **Chaleur Sensible (SHS)**

On chauffe un corps sans le transformer

$$Q = m \cdot \int_{T_i}^{T_f} C_p \partial T$$

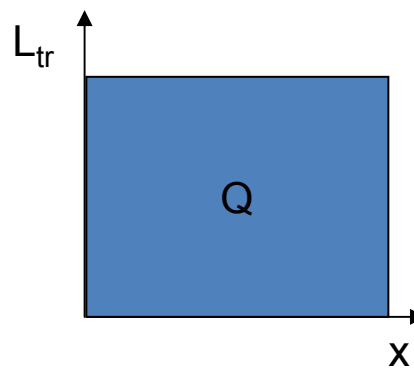


$H_2O_{(L)} \rightleftharpoons H_2O_{(L)}$
 $0^\circ C < T < 100^\circ C$

Par **Chaleur Latente (LHS)**
= Phase Change Material (PCM)

On provoque une transition de phase à T constante

$$Q = m \cdot \int_0^{0 < x < 1} L_{tr} \partial x$$



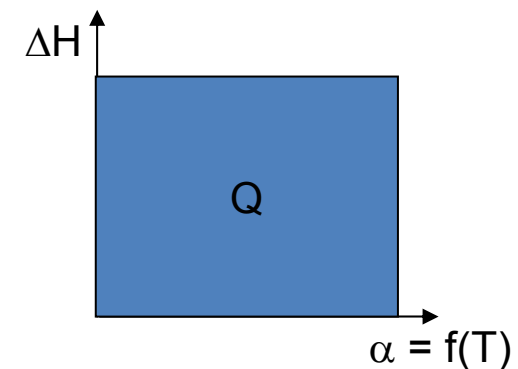
$0^\circ C : H_2O_{(S)} \rightleftharpoons H_2O_{(L)}$

Par **Réaction Chimique (BES)**
= stockage physico-chimique

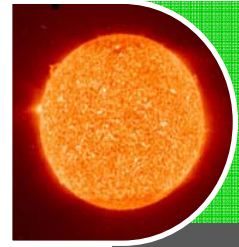
On déplace par un ΔT un équilibre chimique non athermique ($\Delta H^\circ \neq 0$)

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad T_{inv} = \Delta H / \Delta S$$

$$Q = m \cdot \int_{\alpha_{Ti}}^{\alpha_{Tf}} \Delta H \partial \alpha$$



$T > 2000^\circ C : H_2O \rightleftharpoons H_2 + \frac{1}{2} O_2$
Adsorption dans matériaux poreux



Systemes de Stockage Thermique

Options à court terme : Stockage par Accumulation de Chaleur

6 heures de stockage : +2% coût kWh

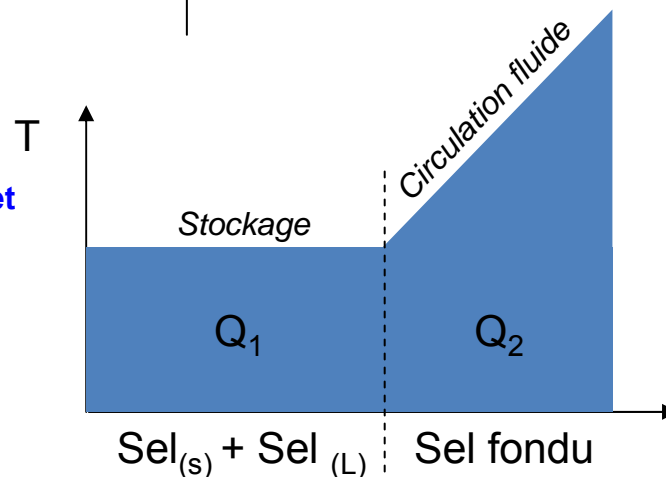
Par **Chaleur Sensible (SHS)**

On chauffe un corps sans le transformer

$$Q = m \cdot \int_{T_i}^{T_f} C_p \partial T$$

Chaleur Sensible (SHS) et Chaleur Latente (LHS) peuvent être associées

Sels Fondus



Par **Chaleur Latente (LHS)**
= Phase Change Material (PCM)

On provoque une transition de phase à T constante

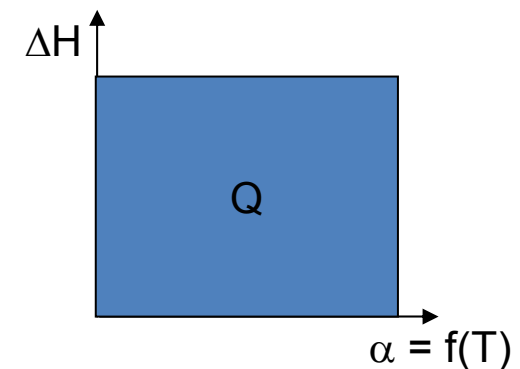
$$Q = m \cdot \int_0^{0 < x < 1} L_{tr} \partial x$$

Par **Réaction Chimique (BES)**
= stockage physico-chimique

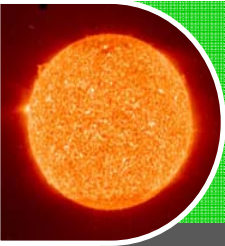
On déplace par un ΔT un équilibre chimique non athermique ($\Delta H^\circ \neq 0$)

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad T_{inv} = \Delta H / \Delta S$$

$$Q = m \cdot \int_{\alpha_{Ti}}^{\alpha_{Tf}} \Delta H \partial \alpha$$



$T > 2000^\circ\text{C} : \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$
Adsorption dans matériaux poreux



Stockage Thermique : Comparatif et Compromis

$$Q = m \cdot \int_{T_i}^{T_f} C_p \partial T$$

$$Q = m \cdot \int_0^{0 < x < 1} L_{tr} \partial x$$

$$Q = m \cdot \int_{\alpha_{T_i}}^{\alpha_{T_f}} \Delta H \partial \alpha$$

Haute/Moyenne/Basse TempératureVoltage
 Temps de stockageAutodécharge
 TailleCapacités volumiques et massiques
 Vitesse d'échangeRégime, puissance
 Conduction Thermique Conduction électr./ ionique
 RéversibilitéCyclabilité
 Faible réactivité vis-à-vis du système
 Faible toxicité
 Prix

$$E = F \int_0^{n_{max}} V \partial n$$



Chaleur Sensible (SHS)

Solides, Liquides

Faibles capacités

H₂O de 0 à 100°C : **420 J/g**

Très simple

Température variable

Pas d'activation

Pertes thermiques

Bon marché

Appliquée

Longue durée de vie

Chaleur Latente (LHS)

S-L, S-S (NaOH α-β à 297°C)

Fortes capacités

H₂O de L à G : **2200 J/g**

Simple

Température fixe

Faible Conduction - Surfusion

Pertes thermiques

Cher

Appliquée

Réaction Chimique (BES)

S-G, L-G, G-G

$$T_{inv} = \Delta H / \Delta S$$

Très fortes capacités

H₂O ⇌ H₂ + 1/2 O₂ : **13000 J/g**

Technologie complexe : Séparation des produits

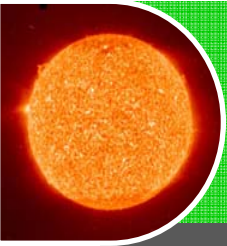
Température fixe

Fortes Energies d'activation

Aucune perte thermique

Très Cher

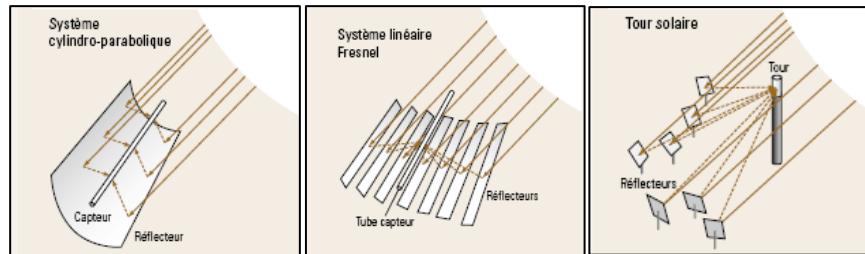
Expérimental (sera viable si ρ > 99.99%)



Stockage Thermique par Chaleur Sensible

Equipe la plupart des systèmes de collecte/stockage solaire et de grande taille

T souvent très élevée, jusqu'à 700°C



Circulation d'un fluide (L ou G) : pas de solides

H₂O, Sels/métaux fondus, liquides organiques, huiles

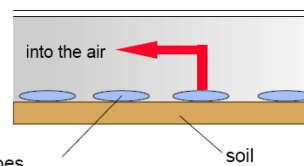


75-100 L eau par m²



water tubes

Eau-air-sol



Céramiques - béton, sels fondus, huiles ...

Project	Country	Power Output (MWe)	Heat Transfer Fluid	Storage Medium	Operation Began
SSPS	Spain	0.5	Liquid Sodium	Sodium	1981
EURELIOS	Italy	1	Steam	Nitrate Salt/Water	1981
SUNSHINE	Japan	1	Steam	Nitrate Salt/Water	1981
Solar One	USA	10	Steam	Oil/Rock	1982
CESA-1	Spain	1	Steam	Nitrate Salt	1983
MSEE/Cat B	USA	1	Molten Nitrate	Nitrate Salt	1984
THEMIS	France	2.5	Hi-Tec Salt	Hi-Tec Salt	1984
SPP-5	Russia	5	Steam	Water/ Steam	1986
TSA	Spain	1	Air	Ceramic	1993
Solar Two	USA	10	Molten Nitrate Salt	Nitrate Salt	1996



Solar 2, Californie
1400 tonnes
3 h d'autonomie



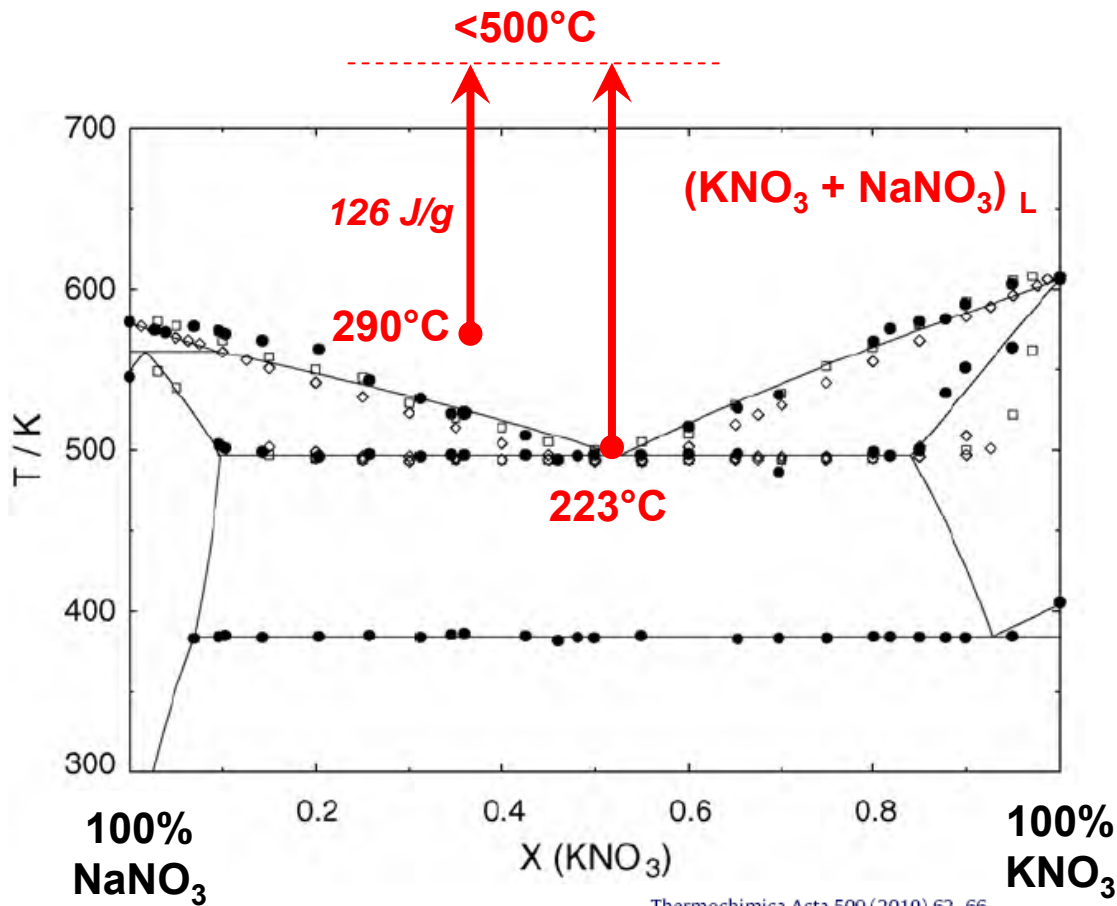
Andasol, Espagne
28500 tonnes
1000 MWh (7h)
Perte : 10% / mois

60% NaNO₃ + 40% KNO₃

35 Wh/kg = accumulateurs Pb
Règles de sélection des matériaux ??





Exemple du système $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$

$\Delta T \searrow \quad \eta = 1 - \frac{T_f}{T_c} \quad \Rightarrow \text{Energie} \searrow \quad \Rightarrow ???$

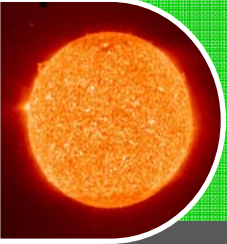


Thermochimica Acta 509 (2010) 62–66

Choix de la Composition

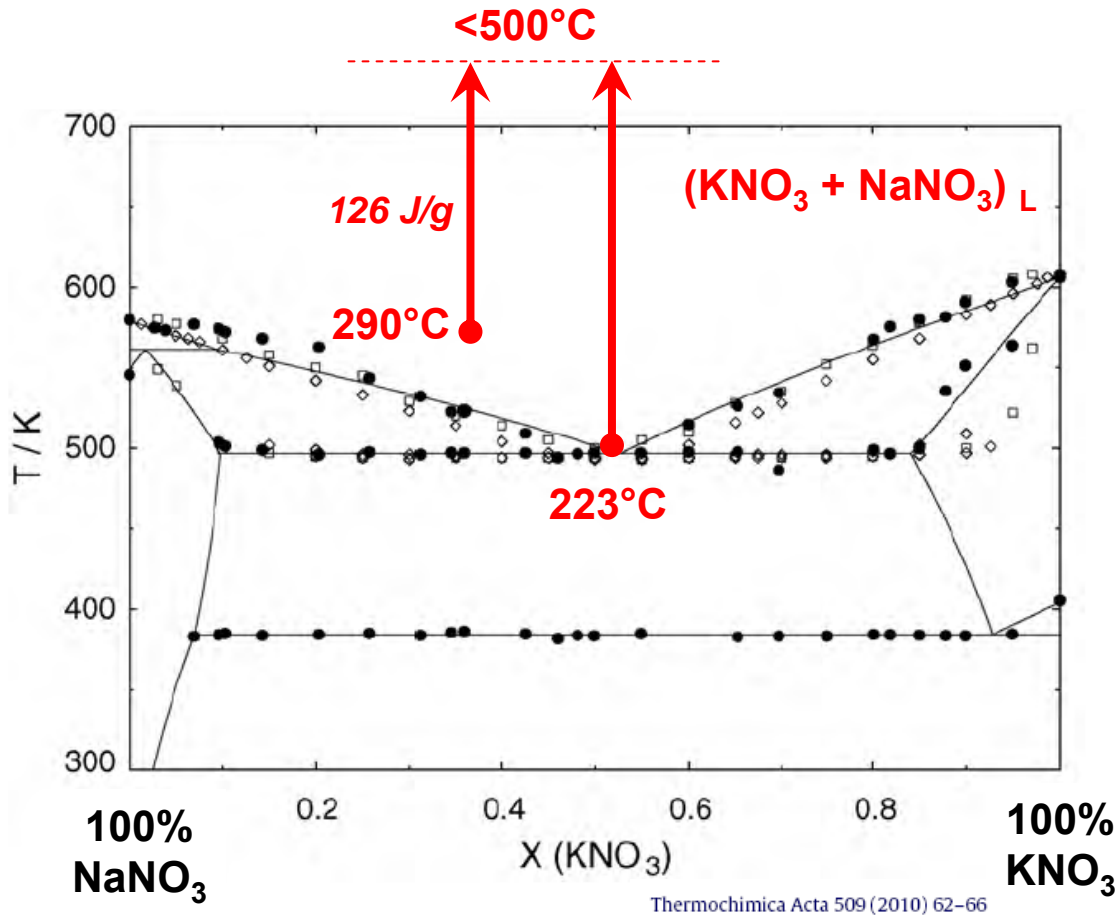
-  Coût
-  C_p : Chaleur Spécifique \rightarrow Energie
-  Corrosion
-  Stabilité Thermique

Exemple du système $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$



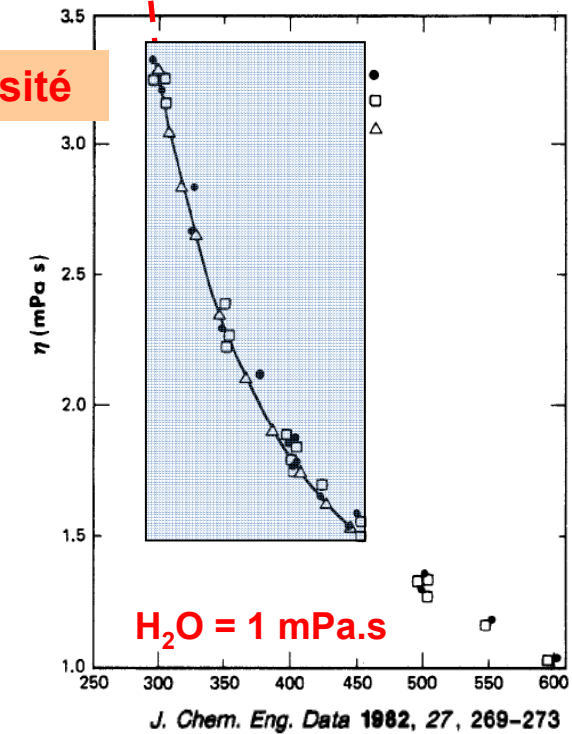
$$\Delta T \searrow \quad \eta = 1 - \frac{T_f}{T_c} \quad \Rightarrow \quad \text{Energie} \searrow \quad \Rightarrow \quad ???$$

Energie \neq Puissance

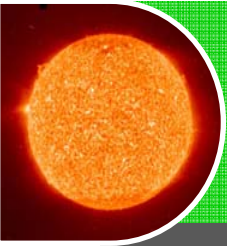


Viscosité

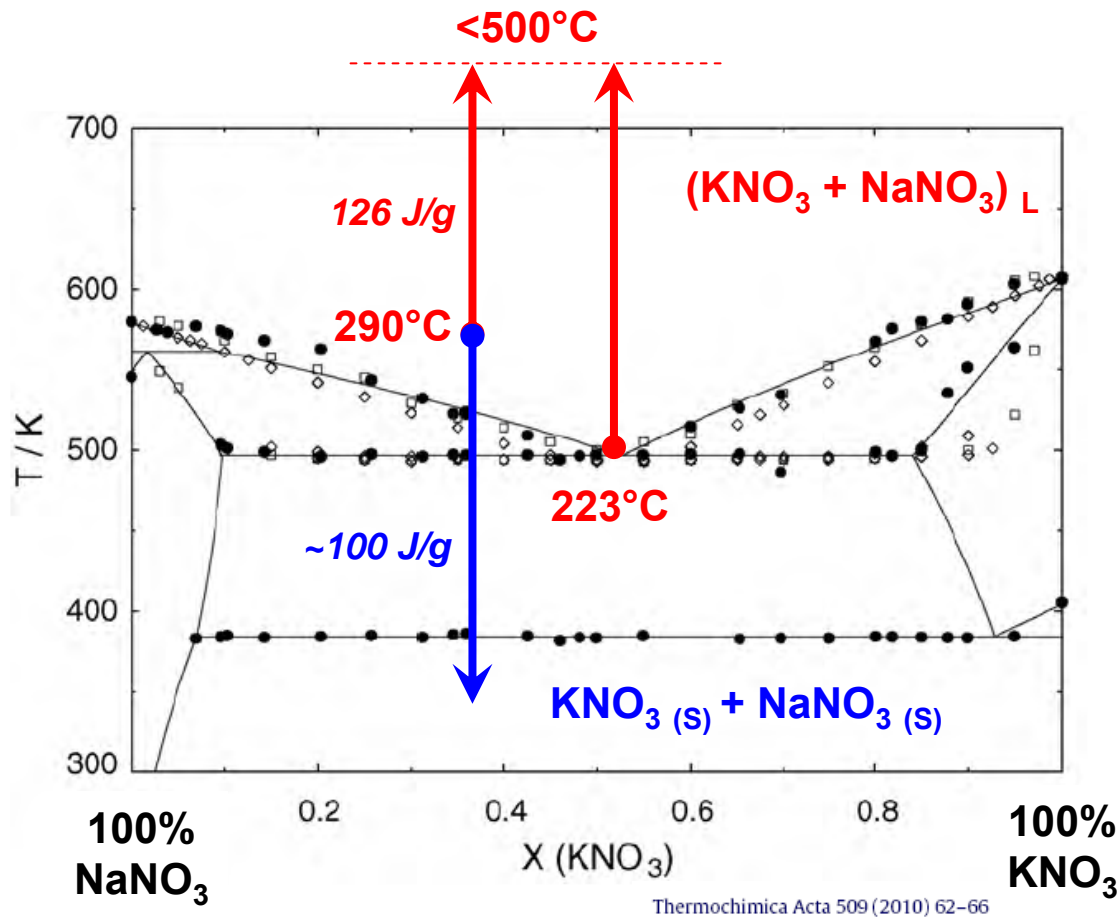
$\times 100 \text{ mPa}\cdot\text{s}$



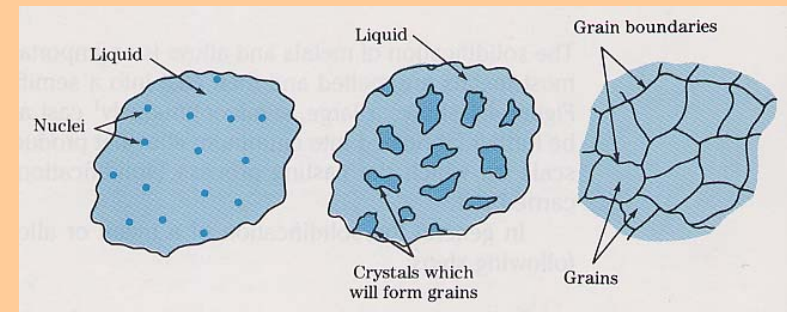
Conductivité Thermique
 ($\sim 0,5 \text{ W/K}\cdot\text{m}$)



Stockage Thermique par Chaleur Sensible



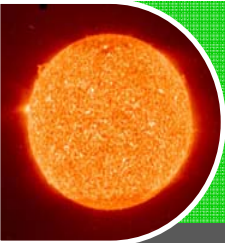
Transition Liquide → Solide



Cinétiques de Nucléation - Croissance
Création d'interfaces
Inhomogénéité - Surfusion
Cinétique des échanges thermiques

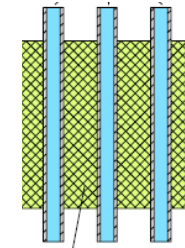
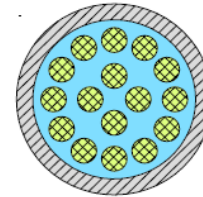
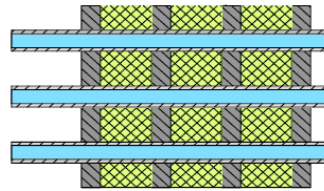
Energie \neq Puissance

Besoin de matériaux et design alternatifs



Stockage Thermique par Chaleur Sensible

➔ Design : Systèmes Composites

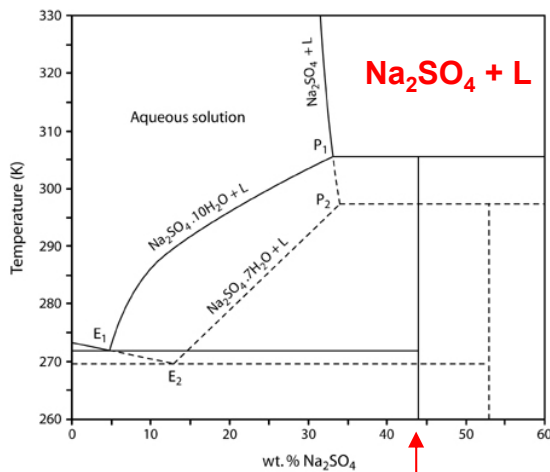


PCM - Composite Material



Graphite : Très stable thermiquement et Chimiquement
Très grande conductivité Thermique (>50 W/m.K)

➔ Autres / Nouveaux matériaux :



Na₂SO₄ · 10 H₂O

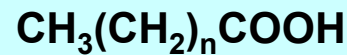
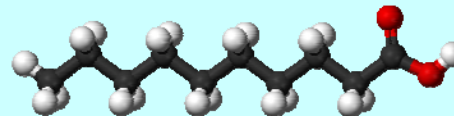
Sels Hydratés et mélanges

$\rho < 1$: Faible Capacité Volumique
Pas de Surfusion
Faibles C_p , Faibles conductivités
Faible P_{vap}
Bon marché - Mélanges possibles - Stabilité

$n = 6$
 $T_f = 16^\circ\text{C}$

➔

$n = 14$
 $T_f = 61^\circ\text{C}$

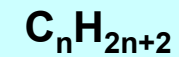
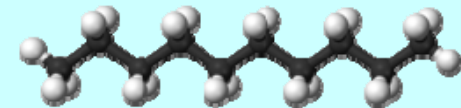


Acides gras

$n = 14$
 $T_f = 6^\circ\text{C}$

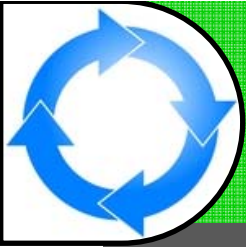
➔

$n = 50$
 $T_f = 95^\circ\text{C}$

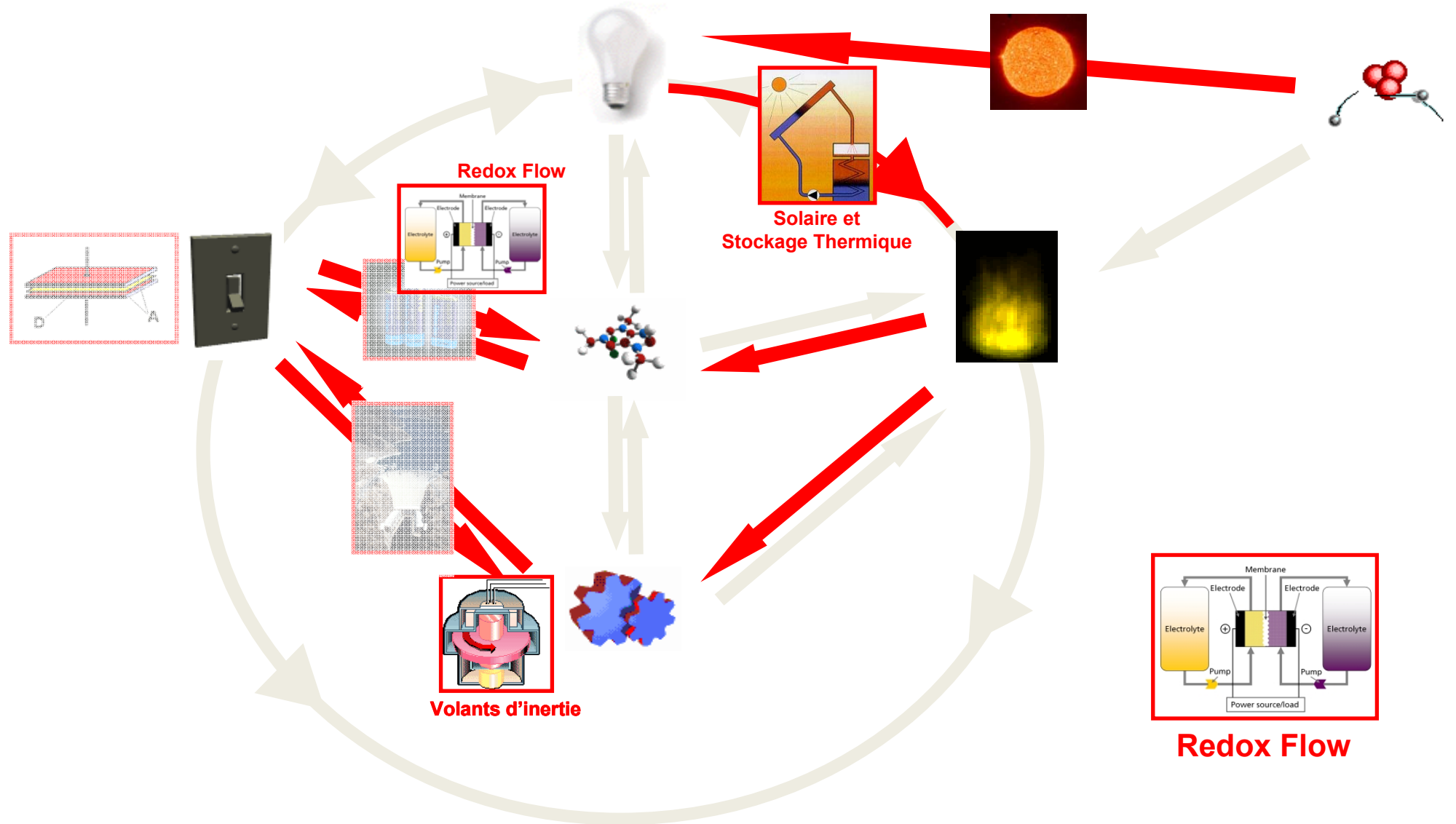


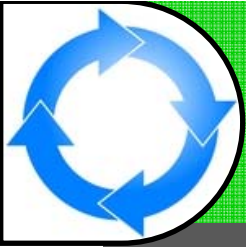
Paraffines



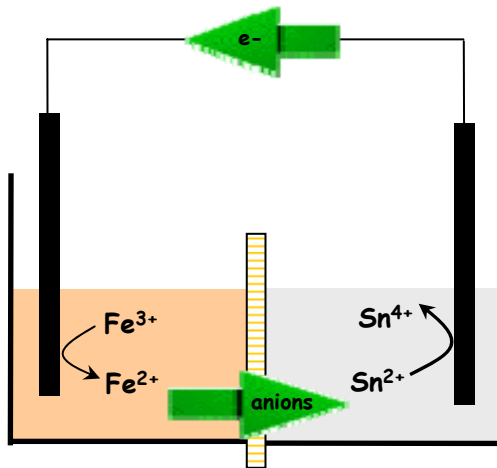


Plan – Batteries Redox Flow (RFB)





Piles/batteries : Energie vs. Puissance



Energie

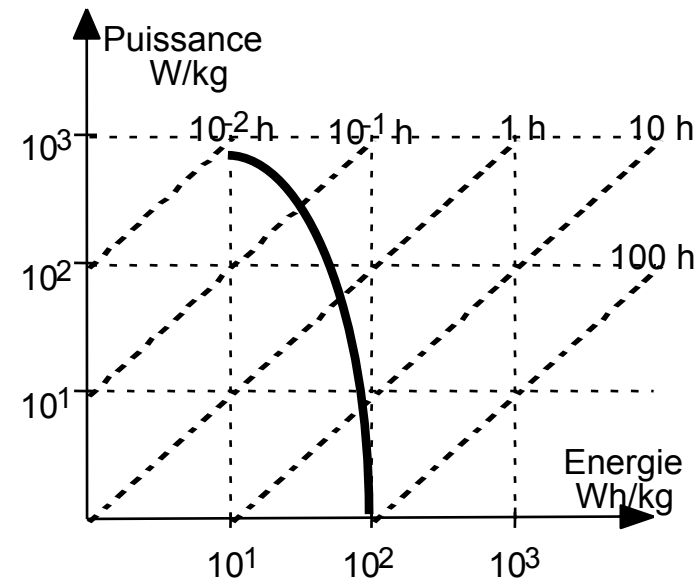
est fonction de la quantité de réactifs (n) et de ΔE :

$$Energie = F \int_0^{n_{max}} \Delta E \partial n$$

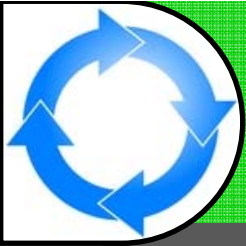
Puissance

est dictée par la vitesse de migration des ions et taille de la cellule

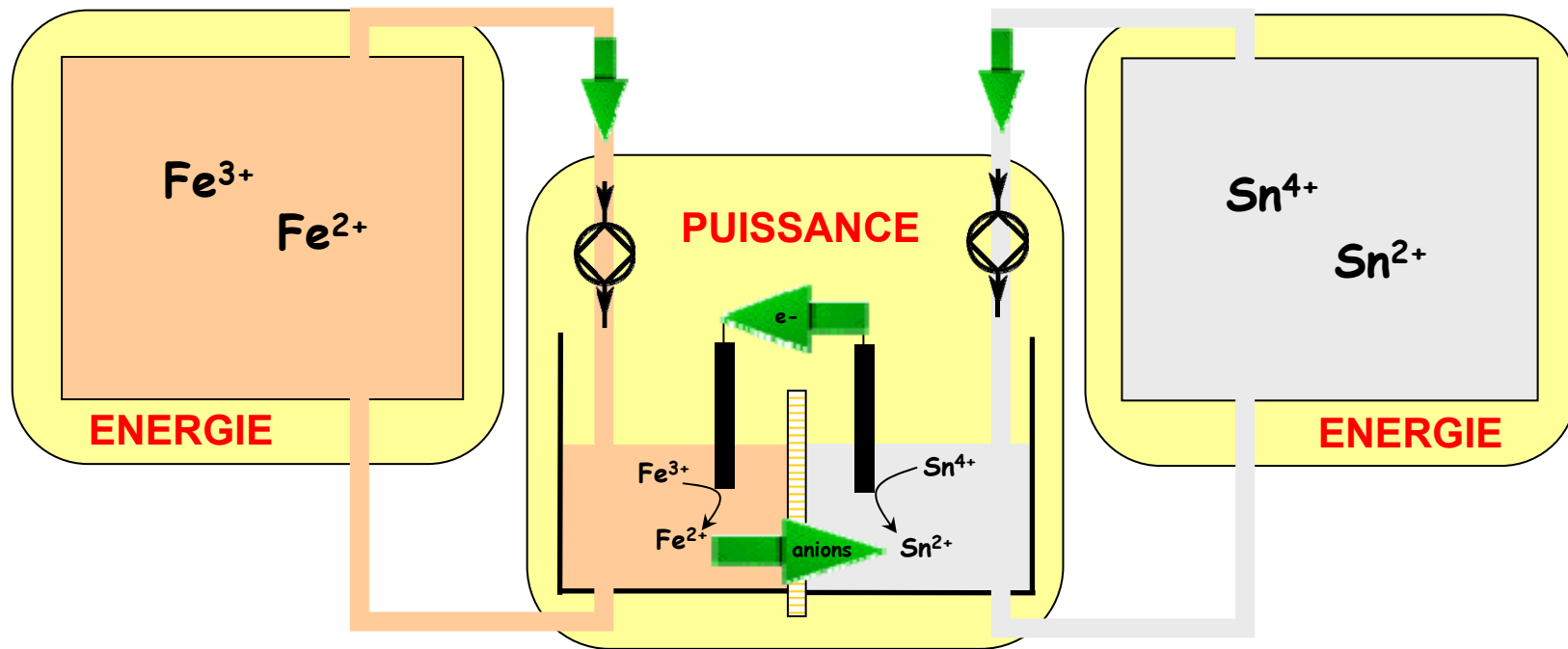
Energie et Puissance sont corrélées :



Comment découpler P et E ?

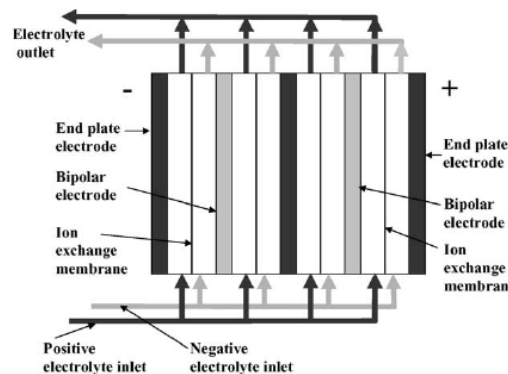


Cellules à circulation = Energie ET Puissance

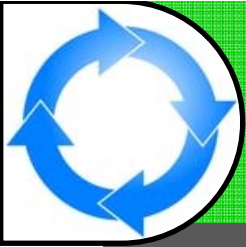


Possibilité de montage
multi-cellules

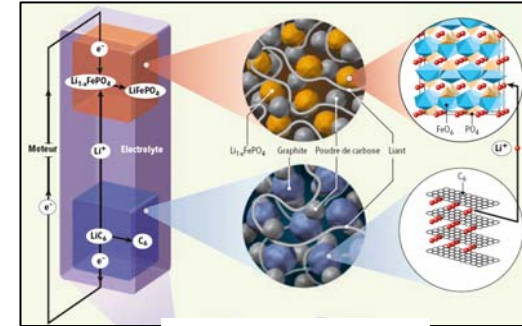
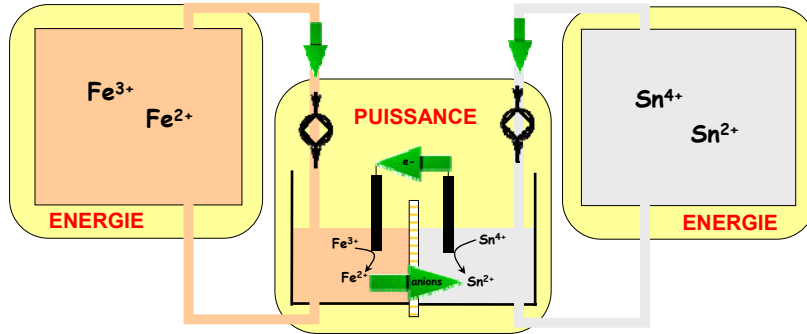
Parallèle vs. Série :
Voltage (300 V) vs. Intensité



Si solution très concentrée :
Limitation en Puissance due à
la viscosité



Comparaison avec autres accumulateurs



La Recherche n°435 (2009, Larcher / Tarascon)

Energie stockée dans 2 solutions liquides \equiv Pile à combustible « en solution »
Energie = f(Volume x concentration, Différence de potentiels, n) :

- Taille
- Choix des couples
- Chimie des Solutions

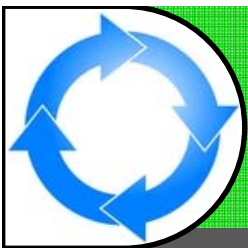
Energies spécifiques (Wh/kg , Wh/L) \longleftrightarrow Masses Molaires + Densité du Solvant

Recharge :

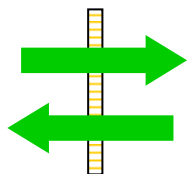
- Electrochimique
- Interne ou Externe
- Remplacement des réservoirs

Un seul électrolyte + cellules en parallèle \rightarrow toutes les cellules sont au même potentiel

Pompes



La Membrane – Un élément Clé



Anions
et/ou
Cations

Dans une cellule Li-ion : Séparation électrique entre 2 solides

Ici, la membrane sépare deux solutions :

- Membrane sélective (un seul ion circule)
- Membrane anio(catio)nique (un seul signe circule)

Si mélange des ions / solutions → retraitement des solutions, coût – Pas le cas pour des solides



(70's)

Br

Hybrides

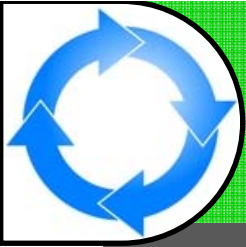


(1985)

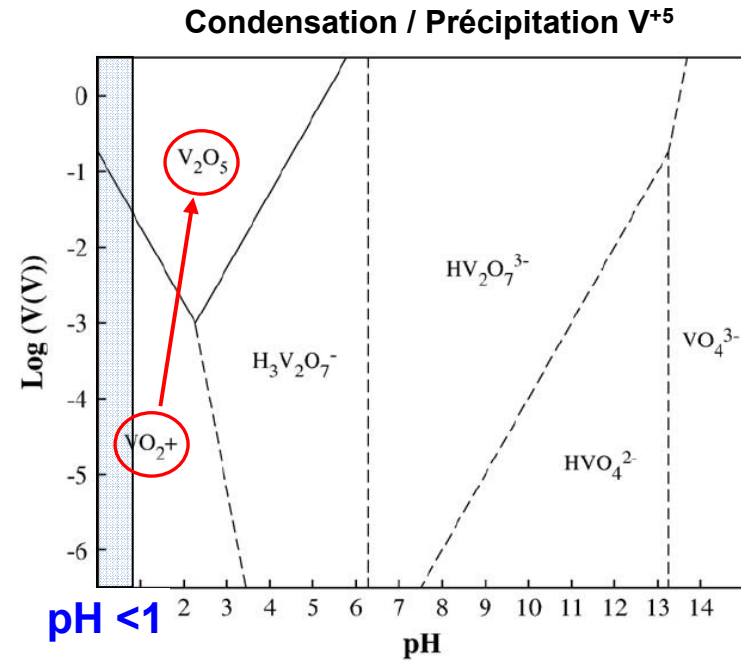
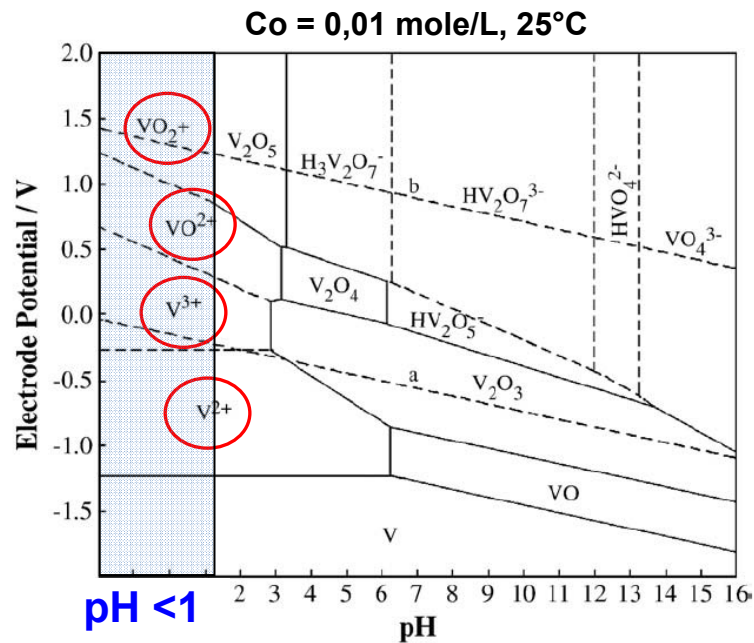
Type	ΔE° (V)	Ion mobile	Réaction (\rightarrow Décharge)	Solvant / Electrolyte	Membrane
Fer / Chrome	1,05	H ⁺ ou Cl ⁻	$Fe^{3+} + Cr^{2+} \rightleftharpoons Fe^{2+} + Cr^{3+}$	H ₂ O-HCl	Anionique-Cationique
Vanadium / Bromure	0,9	H ⁺	$ClBr_2^- + V^{2+} \rightleftharpoons V^{3+} + 2Br^- + Cl^-$	H ₂ O-H ₂ SO ₄	Nafion® 112 + Membrane poreuse
Poly-bromure / PolySulfure (PPS)	1,12	Na ⁺	$Br_3^- + 2S_2^{2-} \rightleftharpoons 3Br^- + S_4^{2-}$	H ₂ O	Nafion® 125 + Membrane poreuse
Zinc/Bromure	1,65	/	$Br_3^- + Zn \rightleftharpoons 3Br^- + Zn^{2+}$	H ₂ O-NaCl-KCl	polypropylène / Nafion® 125
Zinc/Cérium	2,77	H ⁺	$Zn + Ce^{4+} \rightleftharpoons Zn^{2+} + Ce^{3+}$	CH ₃ SO ₃ H	Nafion®
Pb-acide Soluble	1,55	/	$PbO_2 + Pb + 4H^+ \rightleftharpoons 2 Pb^{2+} + 2H_2O$	CH ₃ SO ₃ H	Aucune
Tout Vanadium (VRB)	1,26	H ⁺	$2 H^+ + VO_2^+ + V^{2+} \rightleftharpoons VO^{2+} + V^{3+} + H_2O$	H ₂ O-H ₂ SO ₄	H ⁺ sélective

30 wh/kg

- 4 ions du même élément à 4 degrés d'oxydation différents : V²⁺, V³⁺, V⁴⁺ et V⁵⁺
- Moins de problèmes si interdiffusion - mélange des solutions

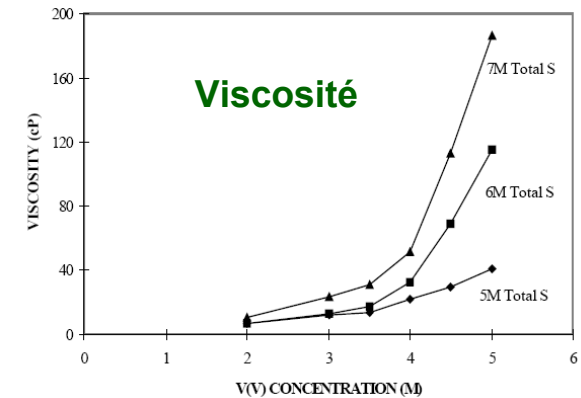
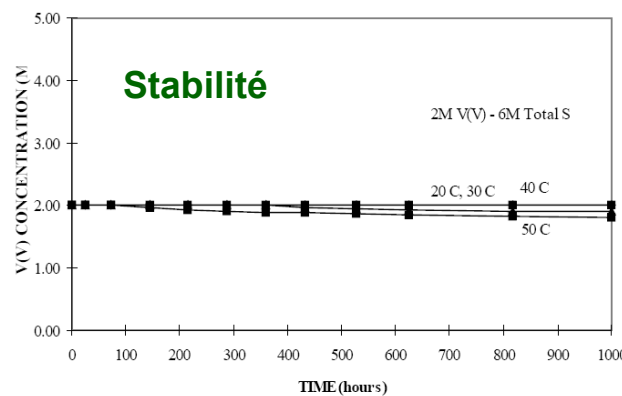


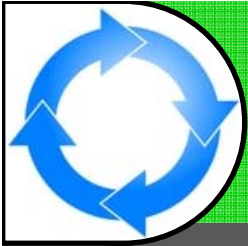
Un Problème de Chimie des Solutions



- Solutions Sursaturées
- Mélange d'acides ($H_2SO_4 + HCl$)
- Additifs - Complexants

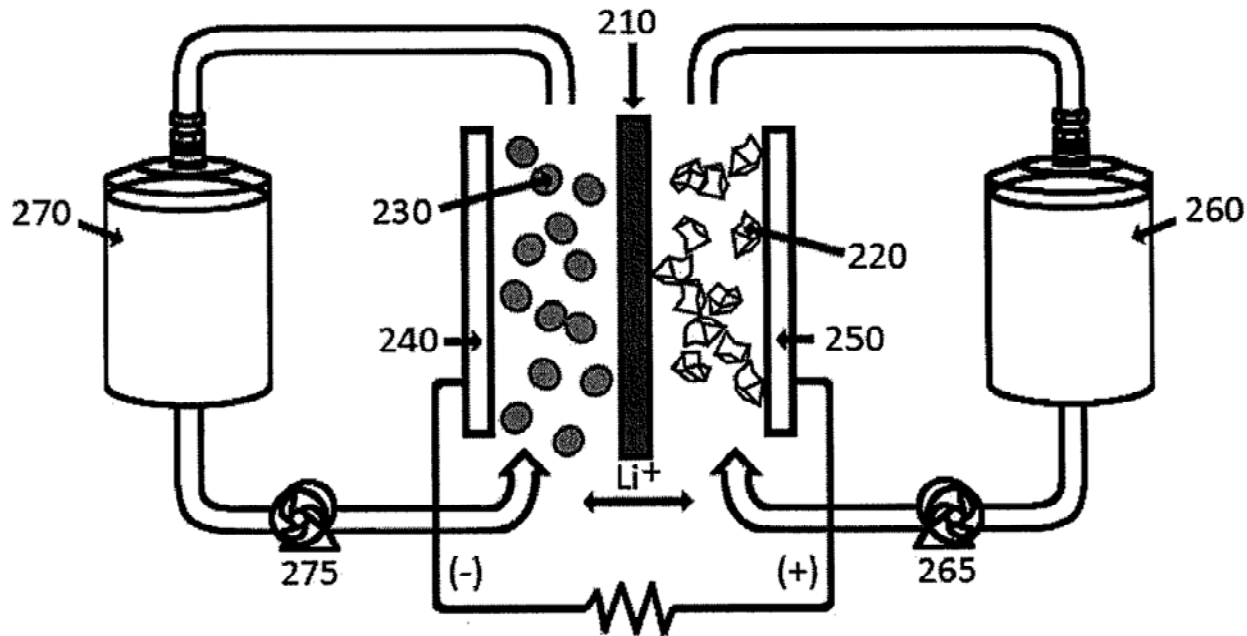
➤ $[V^{+5}] > 2M$





Faire circuler des solides ?

➤ Li-ion redox Flow : Circulation de Suspensions / Encres de Matériaux Redox



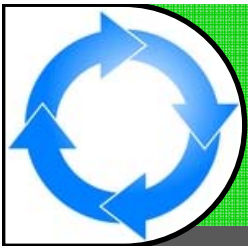
United States

Patent Application Publication

Chiang et al.

(10) Pub. No.: US 2010/0047671 A1

(43) Pub. Date: Feb. 25, 2010



Applications – Redox Flow

Hokkaido, Japan.
Modules de 250 kW . Total : 4 MW / 6 MWh (2005)

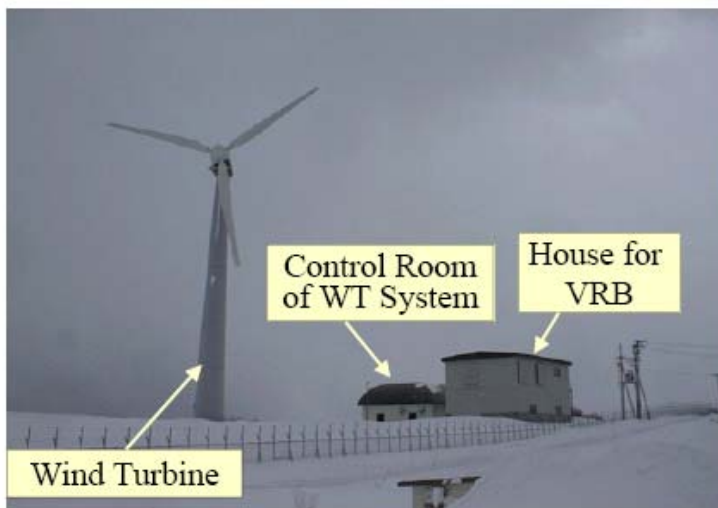
Battery Cubicle



Electrolyte Tank



 SUMITOMO ELECTRIC



King Island (Australia)
250 kW / 1 MWh (2003)



 Prudent Energy

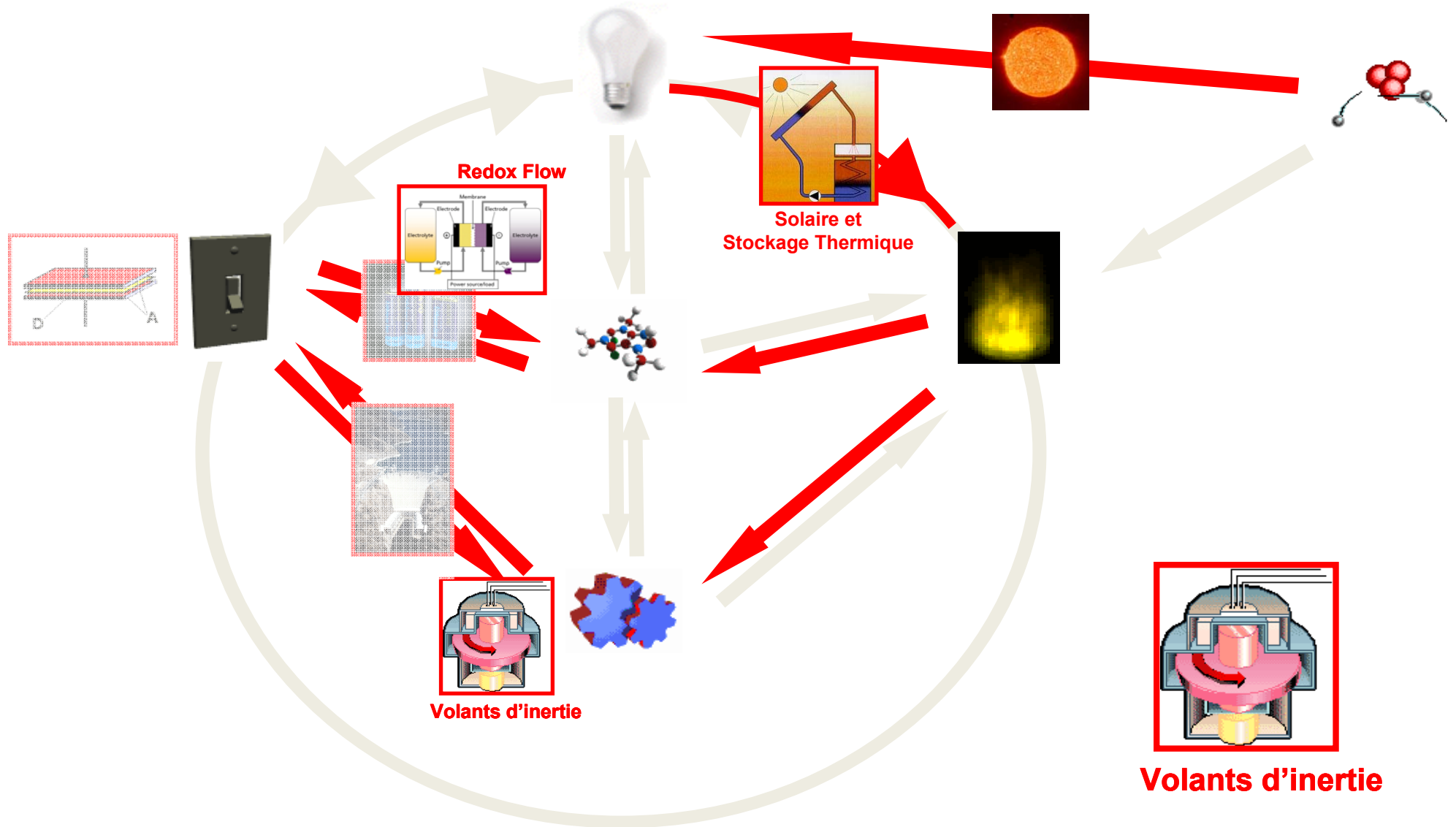


 VRB Power Systems
INCORPORATED

1800 habitants



Plan – Volants d’inertie

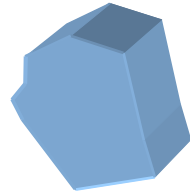




Volants d'inertie - Principes

≡ Batterie mécanique Toute masse en mouvement contient de l'Energie Cinétique

Mouvement Rectiligne :



$$E_c = 1/2 \cdot v^2 \cdot m$$

v = Constante

ω = vitesse angulaire (rad.s⁻¹) = Cste
v = vitesse tangentielle (m/s) = $\omega \cdot R$

$$E_c = \int_{\text{volume}} 1/2 \cdot v^2 \cdot \partial m$$

$$E_c = \int_{\text{volume}} 1/2 \cdot \omega^2 \cdot R^2 \cdot \partial m$$

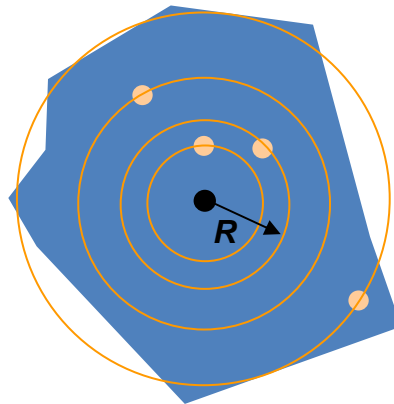
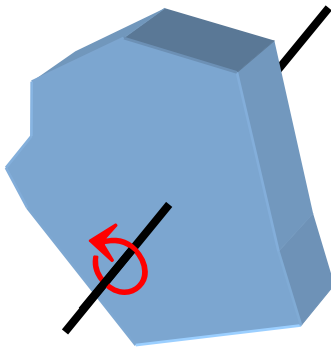
$$E_c = \underbrace{1/2 \cdot \omega^2}_{\text{Vitesse}} \underbrace{\int_{\text{volume}} R^2 \cdot \partial m}_{\text{Géométrie et Composition de l'objet en Rotation}}$$

Géométrie et Composition
de l'objet en Rotation

=

Moment d'Inertie J (kg.m²)

Rotation :



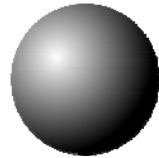
$$E_c = 1/2 \cdot \omega^2 \cdot J$$



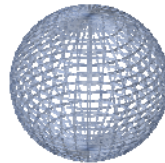
$$E_c = 1/2 \cdot \omega^2 \cdot J$$

$$J = k \cdot M \cdot R^2$$

↳ Constante d'inertie



$k = 2/5$



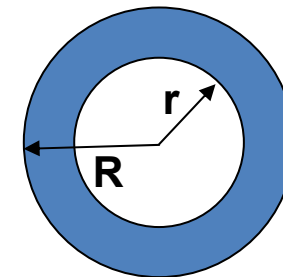
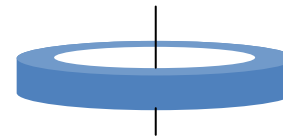
$k = 2/3$



$k = 1/2$

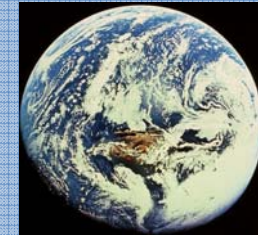


$k = 1$
 $R \sim r$



$$J = 1/2 \cdot M \cdot (r^2 + R^2)$$

$M = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
 $\omega = 1 \text{ tour / j}$
 $R = 6400 \text{ km}$



$E_c = 5,6 \cdot 10^{28} \text{ J} = 6,48 \cdot 10^{11} \text{ TW.an}$

40 milliards d'années
de consommation humaine



$$E_c = 1/4 \cdot \omega^2 \cdot M \cdot (r^2 + R^2)$$

Résistance Mécanique du Matériau

ω et R ne peuvent pas être choisis indépendamment

$$\omega \cdot R = v_{\max} = \sqrt{\frac{\sigma_{\max}}{\rho}}$$

Contrainte tangentielle = Résistance du matériau
Masse Volumique

Choix du Matériau → Max. Densité d'Energie massique = $\frac{E_{\max}}{m} = 1/2 \cdot v_{\max}^2 = 1/2 \frac{\sigma_{\max}}{\rho}$
= Energie de cohésion du Matériau

E_{\max} (Wh/kg) est atteinte avec des matériaux : Résistants aux fortes contraintes
A faible densité

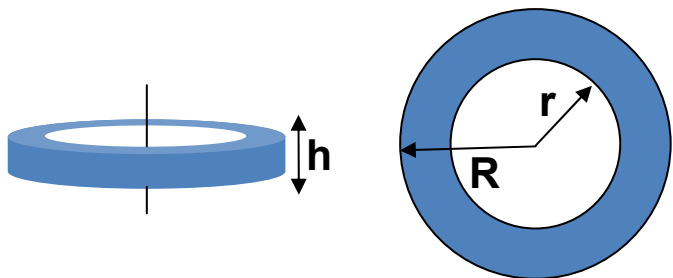
→ Matériaux composites (ρ : 1,3 à 2 g/cc)

$\omega=20000$ t/min R = 0,6m ➤ 200 Wh/kg ➤ Li-ion
 $\omega=10000$ t/min R = 0,5m ➤ 35 Wh/kg ➤ Pb-acide

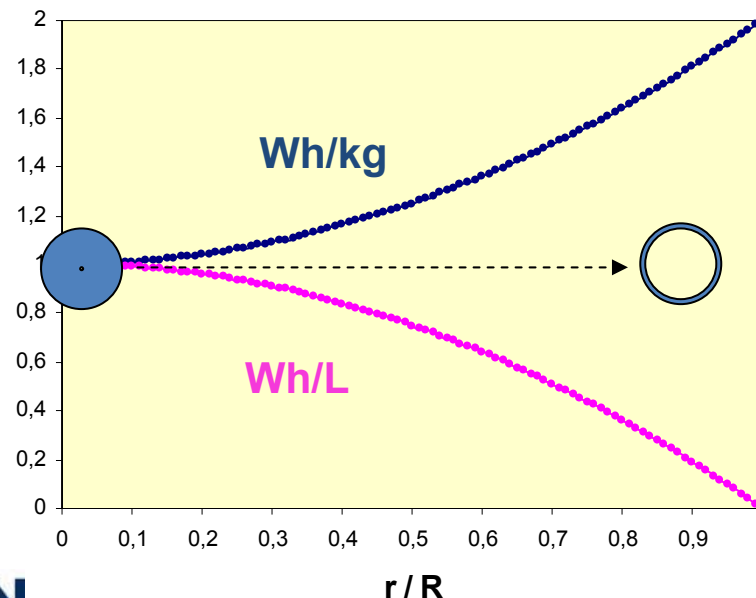


$$E_c = 1/4 \cdot \omega^2 \cdot M \cdot (r^2 + R^2)$$

Pour ω , R et ρ fixés



Taille
Energie
Wh/kg – Wh/L



25 kWh/100 kW

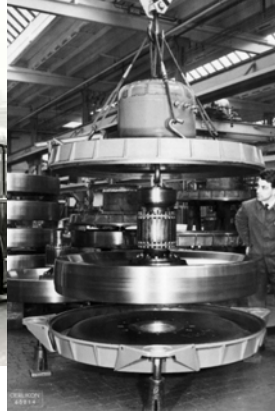


130 – 240 kW





Applications - Bilan



Gyrobus

Volant acier, 1500 kg, 1,6 m. de diamètre 3000 t/min, Autonomie 6 km

Années 50 : Suisse, Belgique, Zaïre



Prototype Chrysler Patriot (1993)

Effets Gyroscopiques

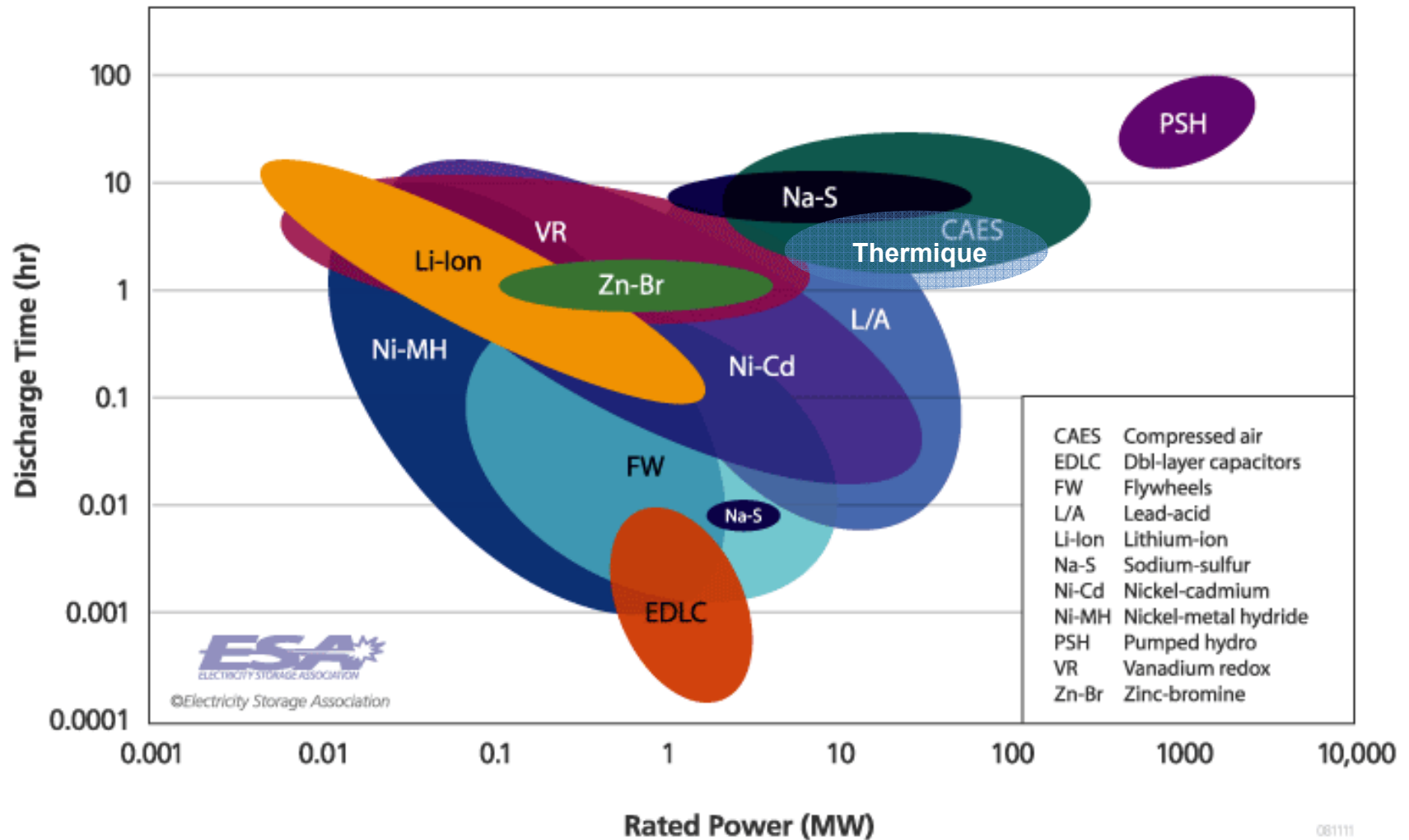


Station 8 MW (2011 : 20 MW) connecté au réseau (NY, Stephentown)

- Très Fortes puissances**
- Très longue durée de vie ~100000 cycles**
- Faible Maintenance**
- Non affecté par la température d'utilisation**
- Mécanique → pas de danger chimique**

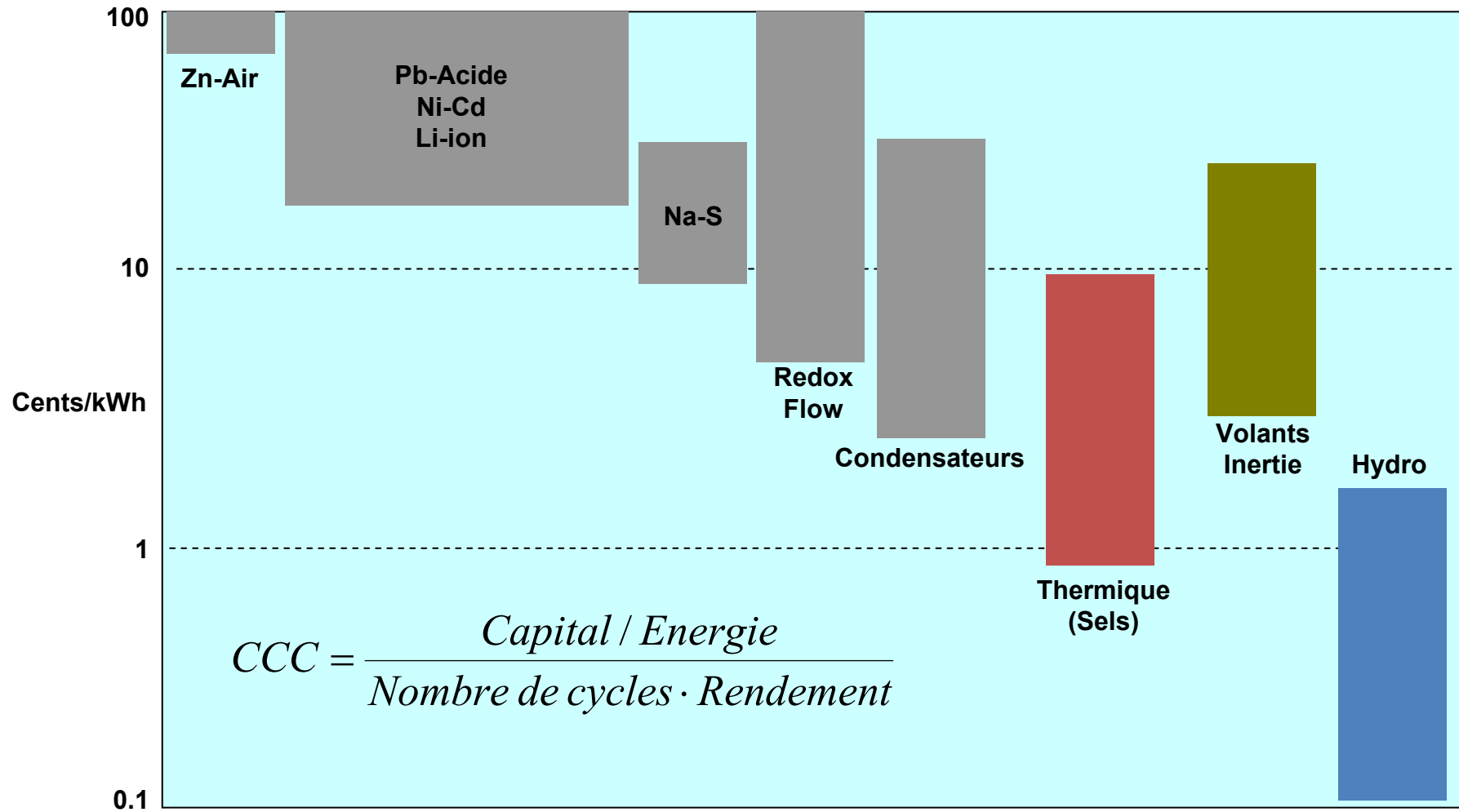
- Risques Mécaniques**
- Gestion complexe : Sustainement magnétique, vide**
- Faibles densités E**

Puissance et Energie / Site



Coût du Stockage par cycle

(CCC = Capital Cost per Cycle)



Adapted from www.electricitystorage.org



Conclusions

**La transition « Energies Fossiles » → « Energies Renouvelables »
sera longue et difficile**

Gestion Temporelle et Spatiale de l'Energie

De nombreuses Technologies matures ou en développement

Les marges de progrès potentielles sont importantes

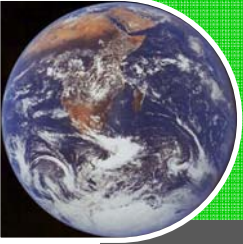
De nombreux défis scientifiques à relever

Développement Durable :

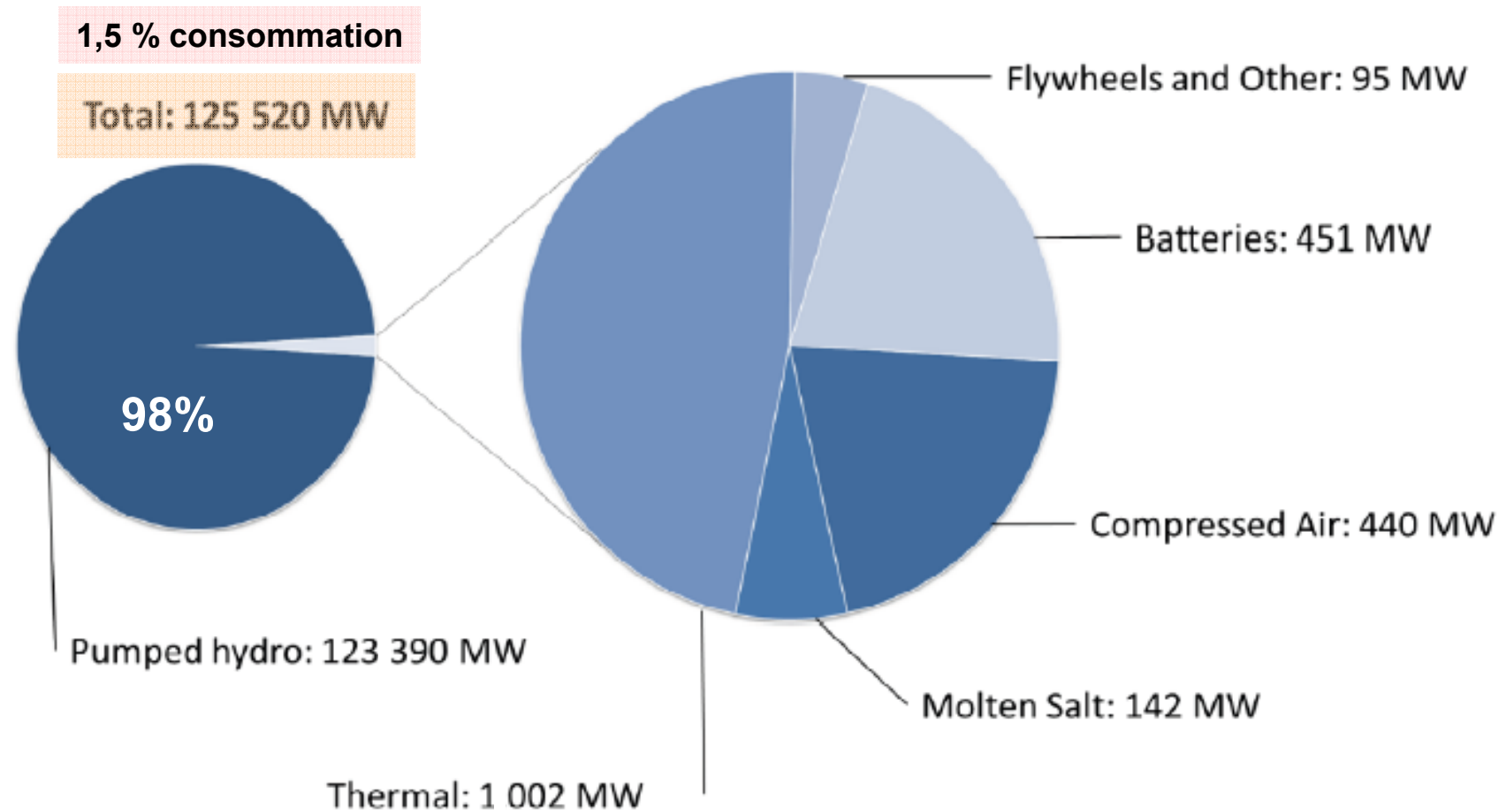
*« Un développement qui répond aux
besoins des générations du présent
sans compromettre la capacité des
générations futures à répondre aux
leurs »*

La Commission Brundtland (1987)





Le Stockage de l'Energie au niveau Mondial



Source : www.storagealliance.org