

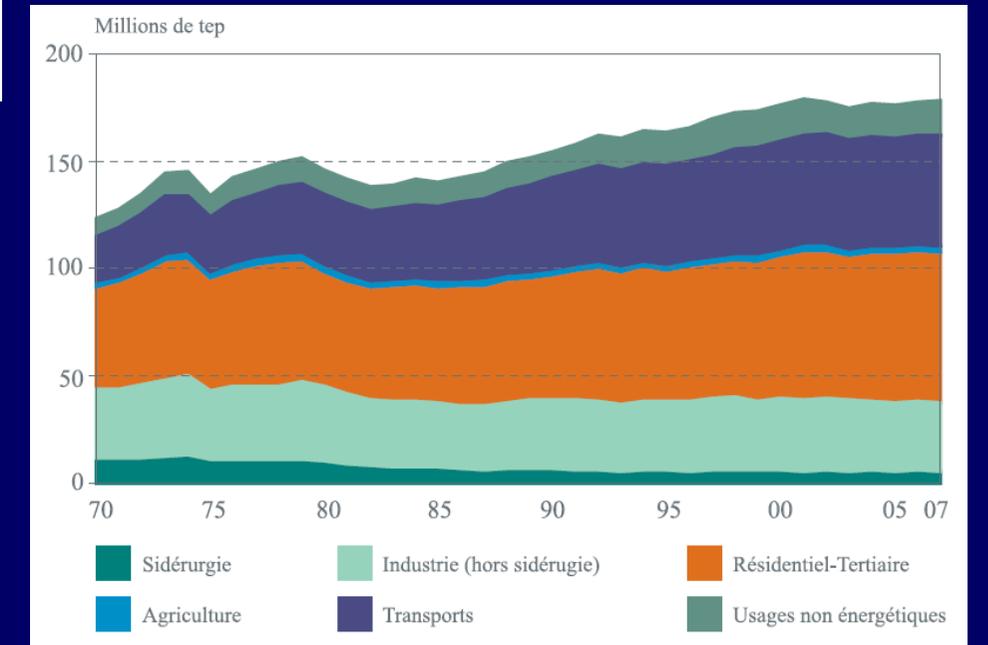
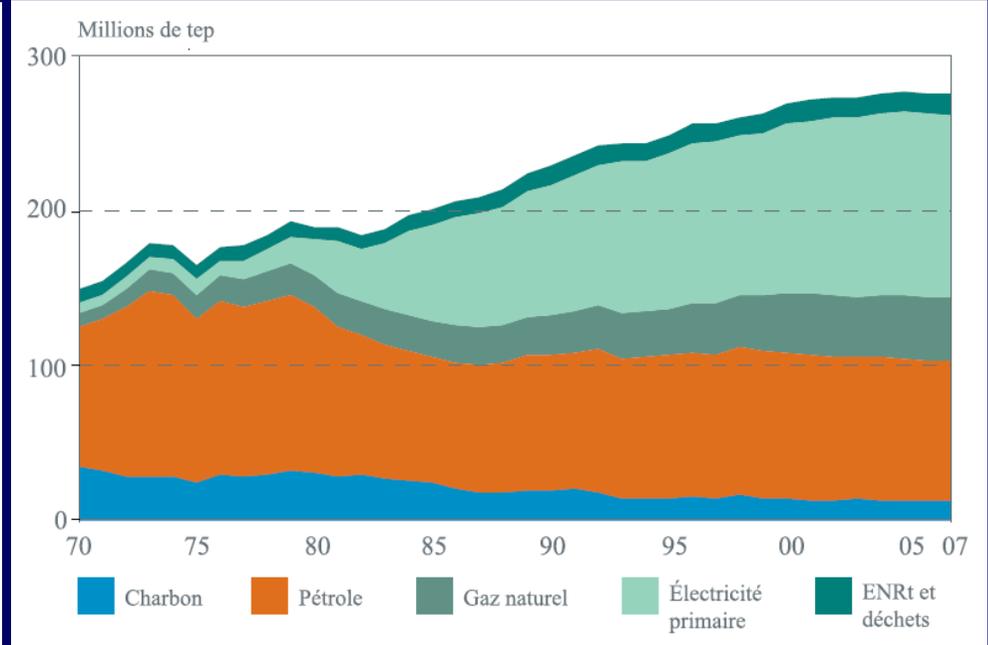
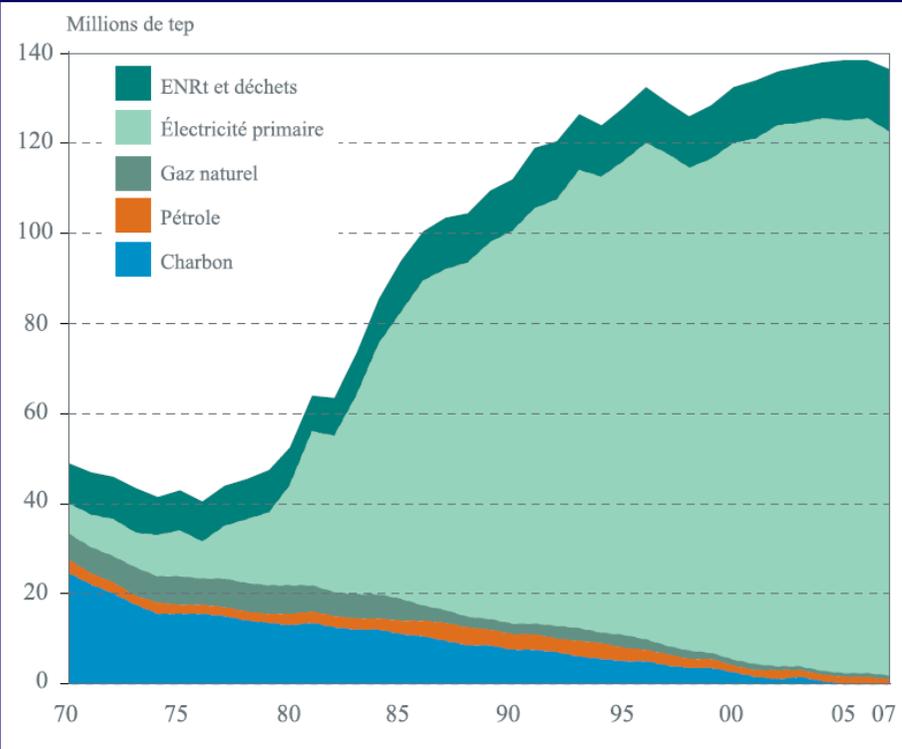
Energies Nouvelles et Renouvelables

STOCKAGE DE L'ENERGIE

STOCKAGE

- Energie : quelle production pour quelle consommation ?
- Electricité : quelle production pour quelle consommation ?
- Pourquoi stocker et à quelle échelle ?
- Les stockages à grande échelle (hydraulique, pneumatique, thermique, chimique)
- Les stockages à petite échelle (chimique, mécanique, pneumatique)

Energie : quelle production, quelle consommation ?



1 tep = 11628 kWh

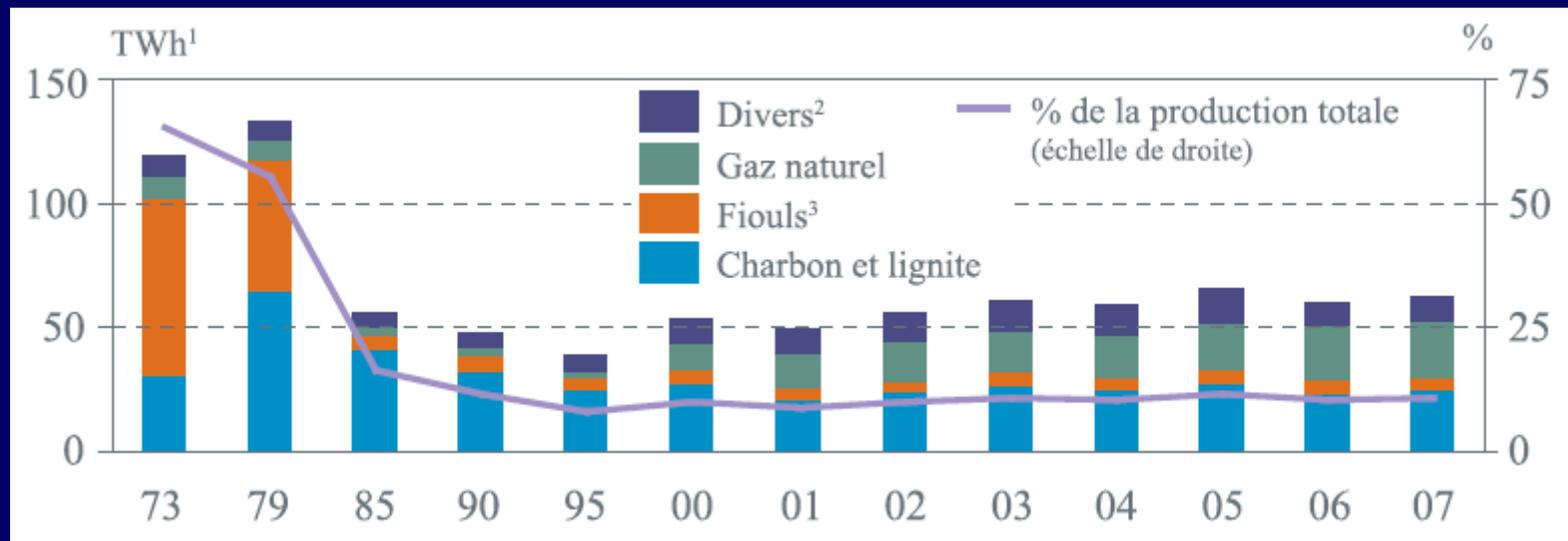
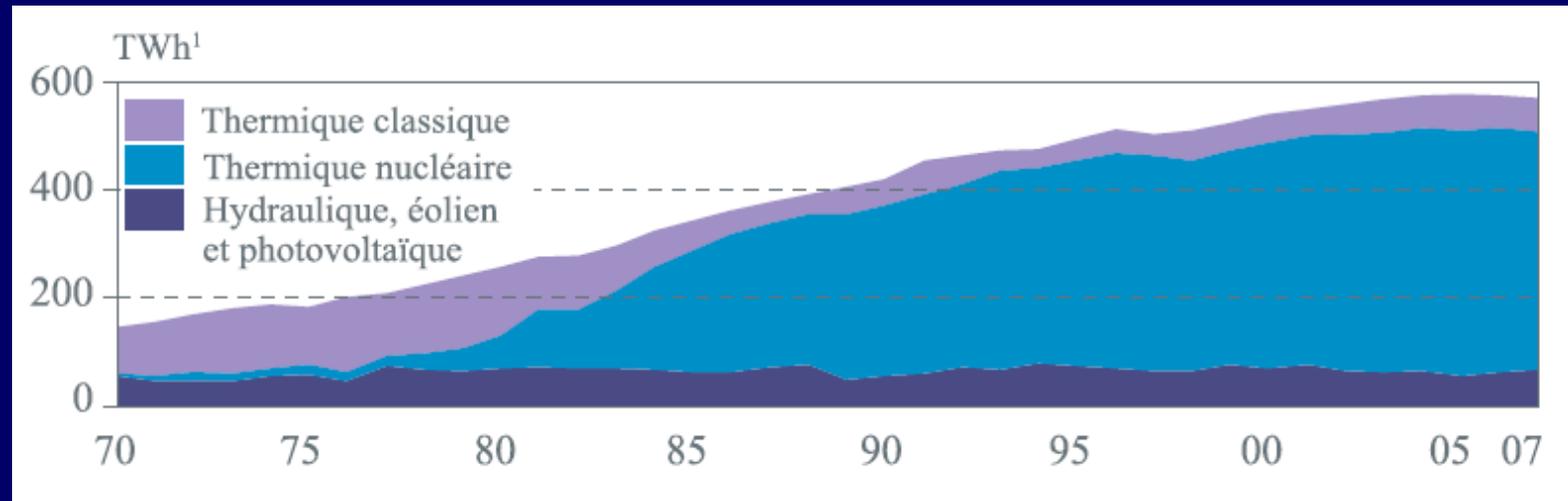
1973-2007

Industrie : 36% → 23%

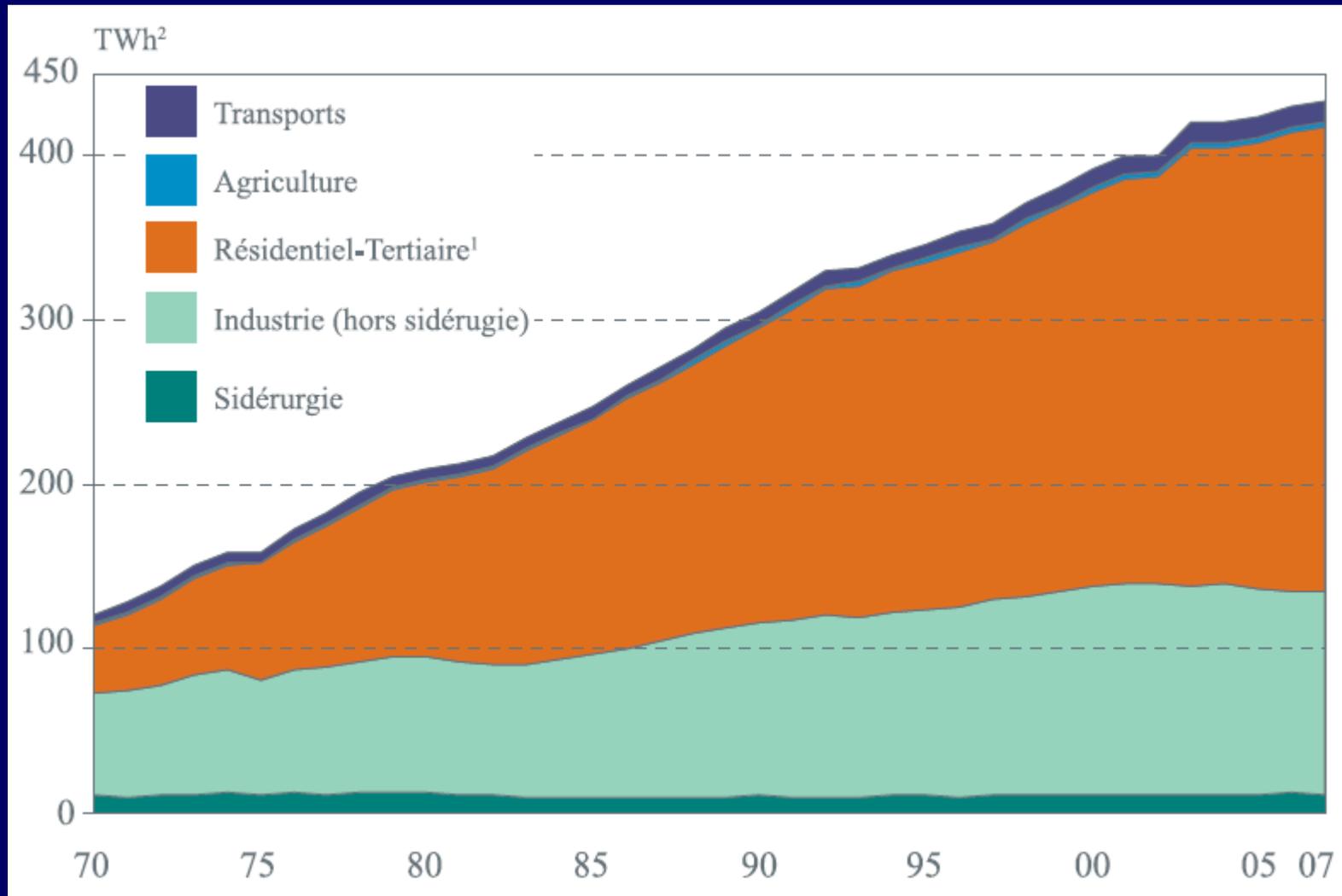
Résidentiel-Tertiaire : 42% → 44%

Transports : 20% → 32%

Electricité : quelle production ?

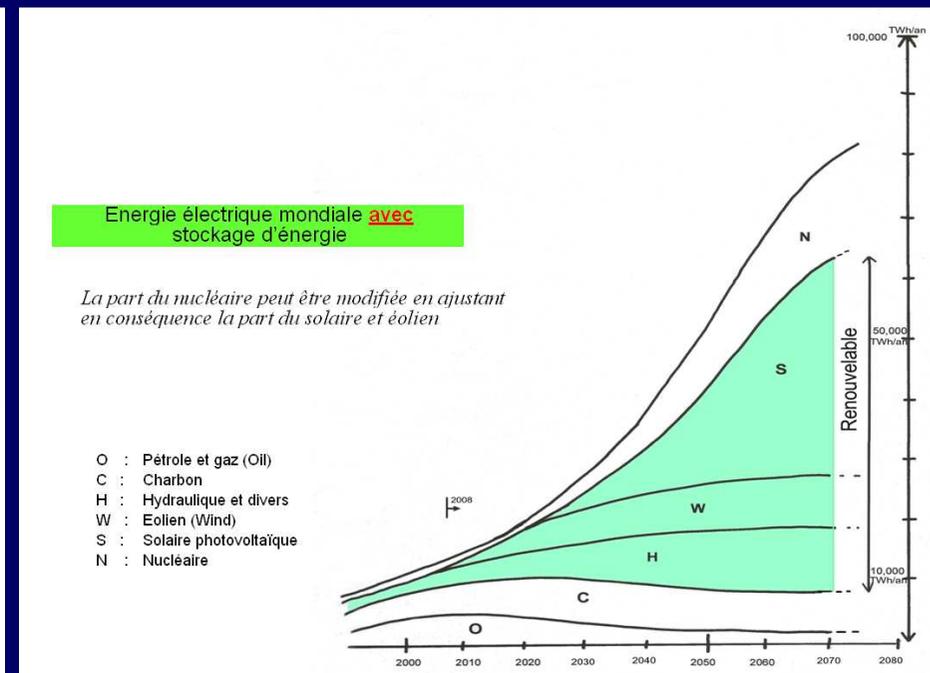
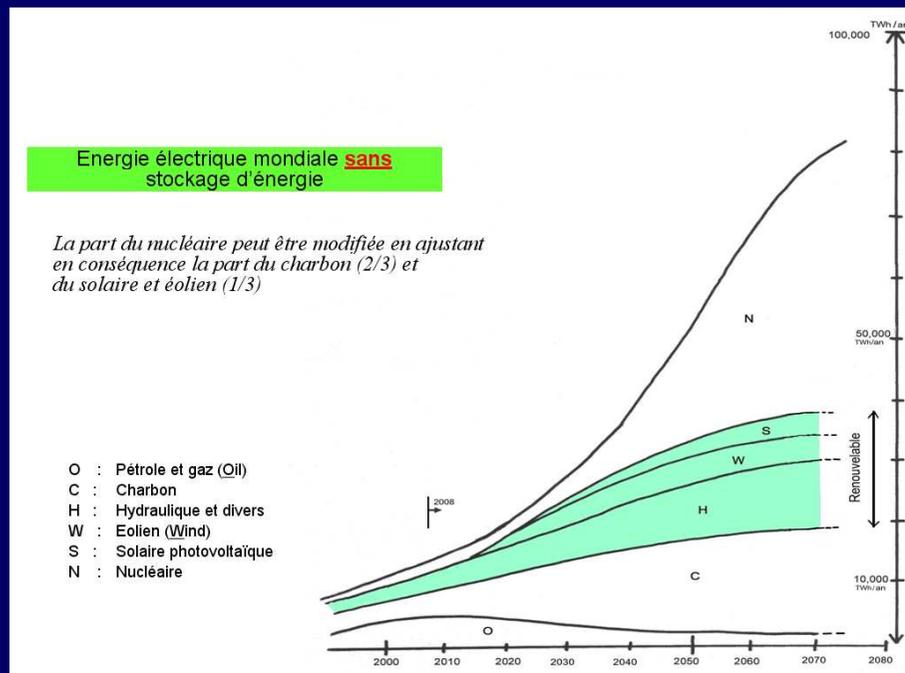


Electricité : quelle consommation ?



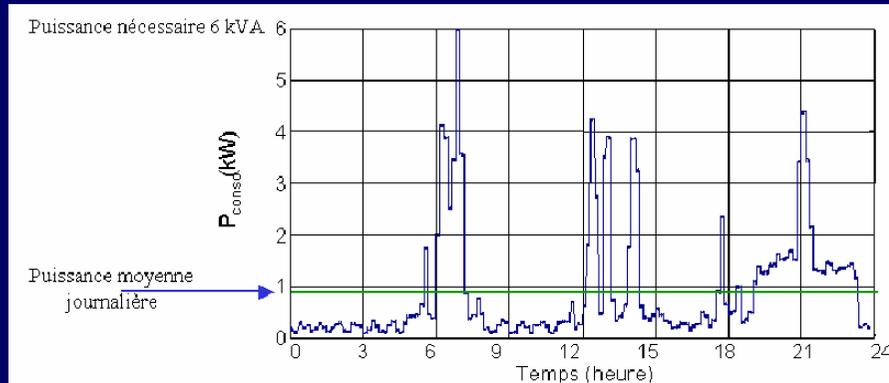
Pourquoi stocker l'électricité ?

- Actuellement, 80% de l'énergie produite vient de ressources stockables
 - pétrole, gaz, charbon, uranium (mais coûteux d'arrêter une tranche nucléaire)
- Problème des énergies renouvelables : elles ne sont pas stockées
 - nécessité de développer le stockage de ces énergies
- Prévisions de consommations énergétiques basées sur la croissance actuelle
- Les contraintes de viabilité de l'espèce humaine impose une décroissance énergétique
 - prévisions optimistes : triplement de la consommation d'ici 2050

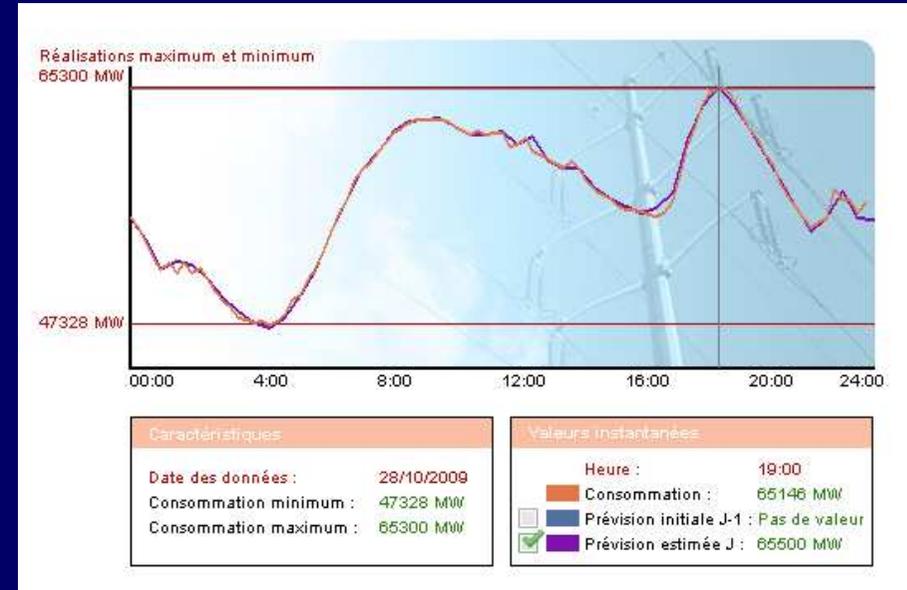


A quelle échelle ?

Consommation d'un foyer



Consommation nationale



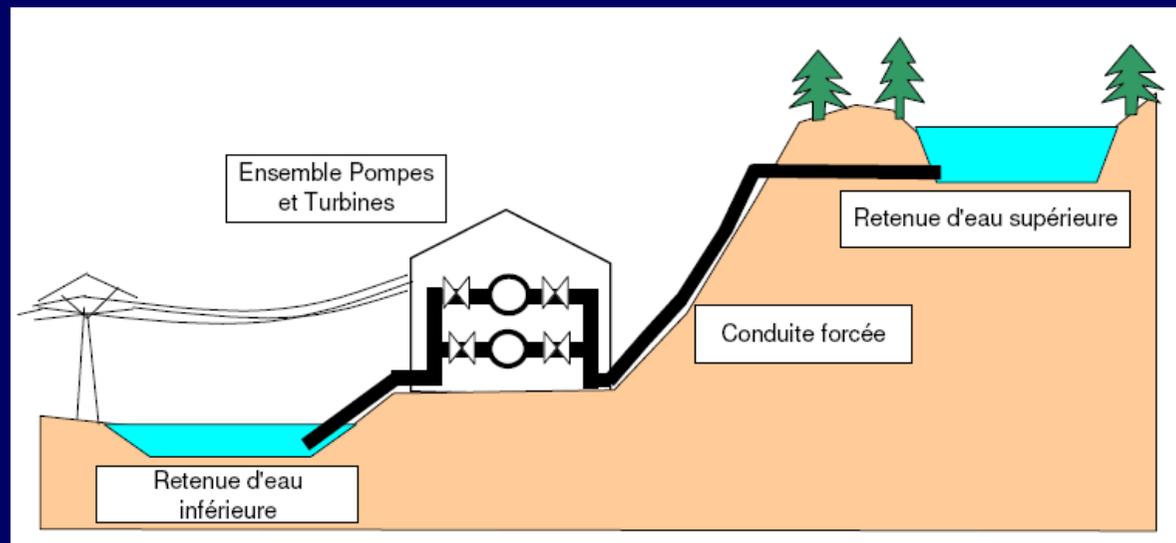
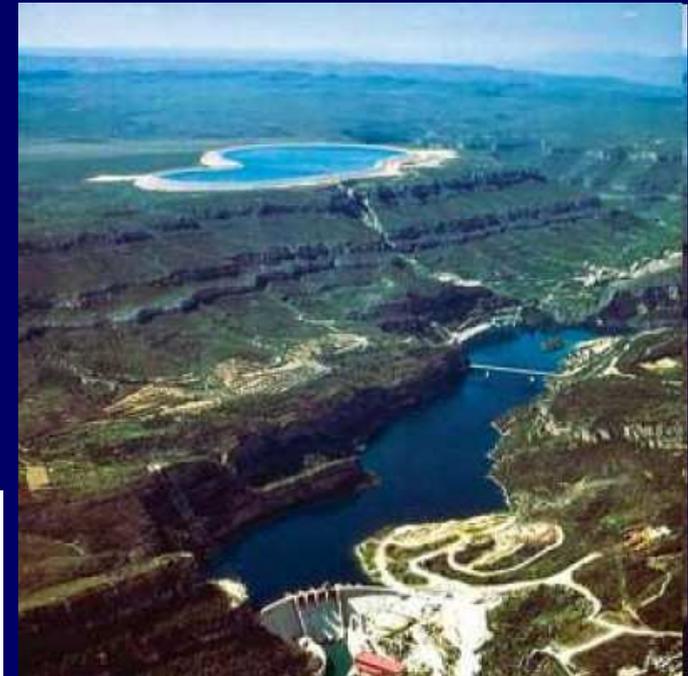
- Stockage à grande échelle : longue durée
 - Répondre aux appels de courant (fluctuations)
 - Autonomiser les zones isolées
- Stockage à petite échelle : courte durée
 - Lissage
 - Redistribution (avantages tarifaires jour / nuit)

Consommation moyenne : 57 GW

- max - moy = 6 tranches nucléaires

Stockage à grande échelle

- **Hydraulique gravitaire (pompage – turbinage)**
 - STEP : station d'énergie par pompage
 - France : 15% d'électricité hydraulique (réserve de production)
 - Rendement : 75% (dépend de la différence d'altitude)
 - Exemple : Grande maison (France) 1800 MW
 - Nécessite un site naturel
 - Possibilité d'utiliser l'eau de mer



Stockage à grande échelle

- **Hydraulique gravitaire**
 - Okinawa Seawater Pumped Storage Power Plant
 - Puissance : 30 MW – Capacité : 240 MWh - Hauteur : 136 m – Rendement : 80 %



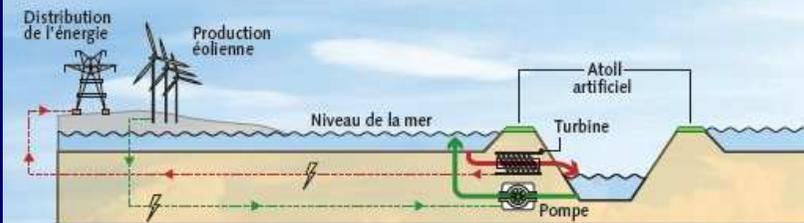
Stockage à grande échelle

- **Hydraulique gravitaire**
 - Projet d'atolls de stockage au Danemark
 - Rendement prévu : 80 %
 - Projet également en France
 - Technologie de l'usine de la Rance
 - Digues de 50 m au-dessus du niveau de l'eau
 - Superficie : 23 km²
 - Puissance : 5 GW – Stockage : 160 GWh
 - Coût : 6 G€ (= 1 centrale nucléaire)



Le principe des barrages appliqué en mer

Production : en période de forte demande d'énergie, l'eau de mer remplit l'atoll en passant par des turbines qui produisent de l'électricité.

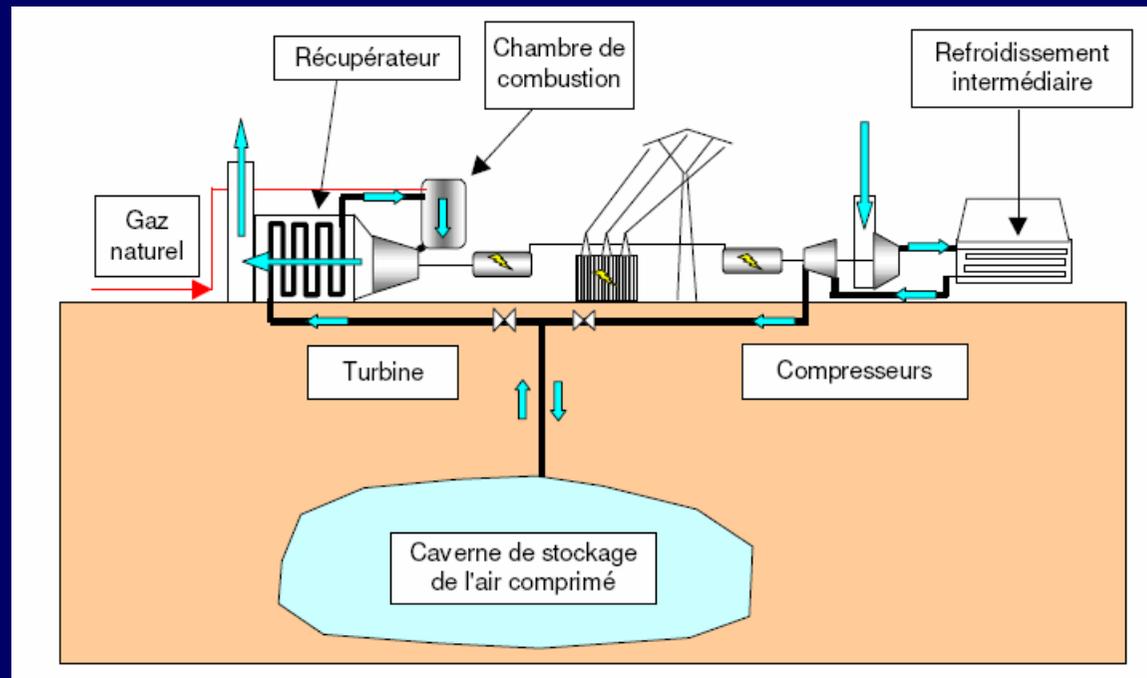


Stockage : en période de forte production des éoliennes et de faible demande, l'électricité sert à alimenter des pompes qui vident le réservoir de l'atoll artificiel.



Stockage à grande échelle

- Air comprimé
 - Technologie maîtrisée
 - 40 à 70 bars
 - Rendement : 50-70% (attention : rendement de stockage \neq rendement de turbine)
 - Restitution par turbinage après chauffage (1kWh \Leftrightarrow 1,25 kWh gaz + 0,75 kWh comp.)
 - Nécessité d'un site géologique (caverne étanche, mine de sel)
 - Exemple : Hundorf en Allemagne, P=290 MW, T=3 h, 310000 m³, 70 bars



Stockage à grande échelle

• Thermique 1

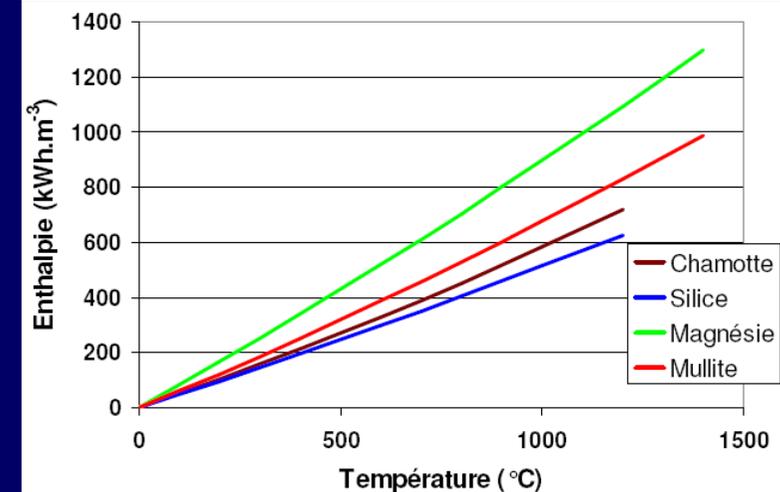
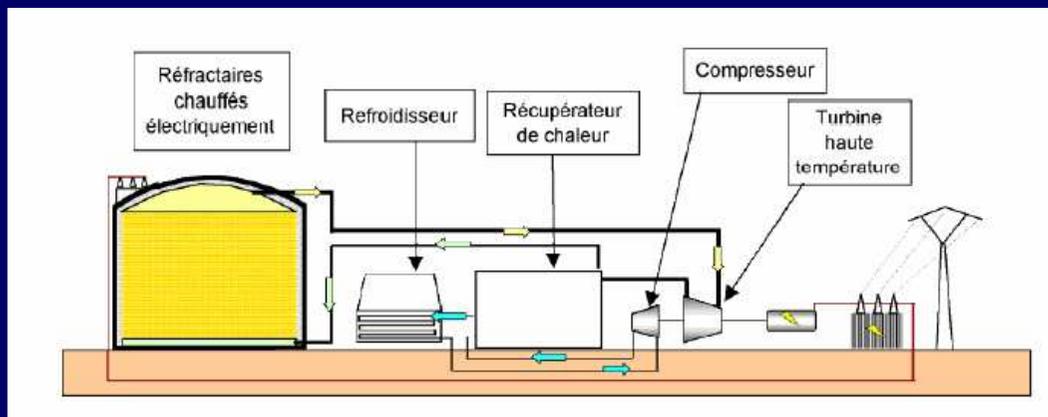
- Chauffage de réfractaires par résistances électriques (sidérurgie)
- Chauffage de sels fondus (centrale Thémis)
 - Nitrate de potassium et de sodium
- Stockage sous forme de chaleur latente (changement de phase)
 - NaOH, LiF/NaF/MgF₂, Na₂SO₄(10H₂O)
- Restitution par turbinage à haute température (1400°C)
- Rendement : 60%

Chamotte : argile

Silice : SiO₂

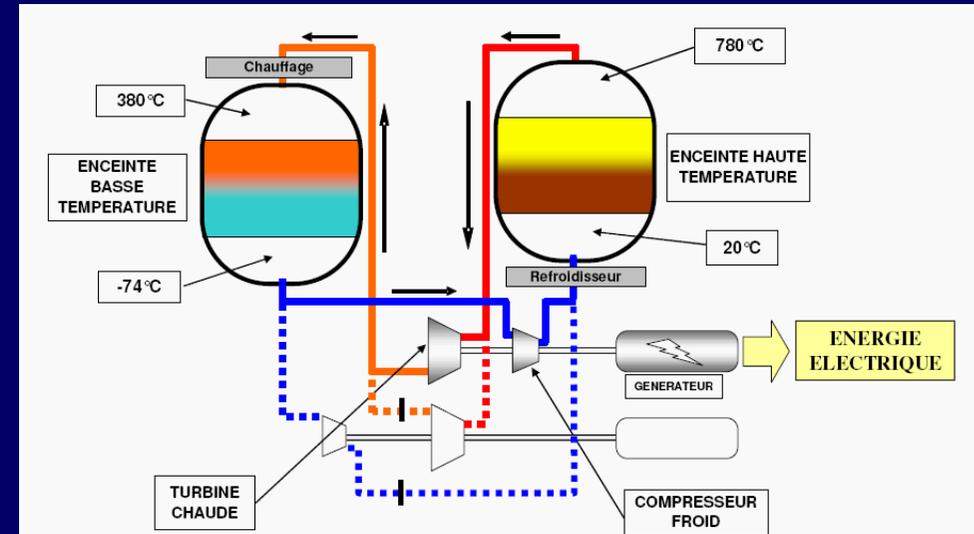
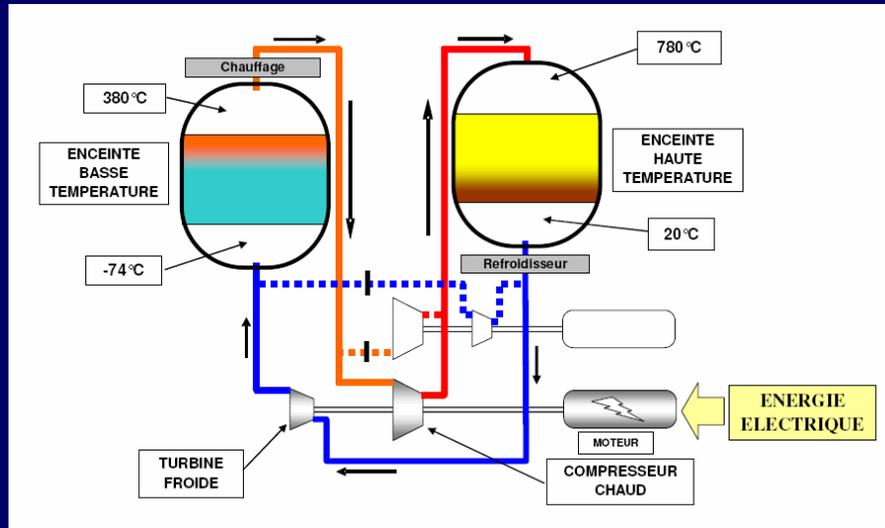
Magnésie : MgO

Mullite : 3Al₂O₃2SiO₂ et 2Al₂O₃SiO₂



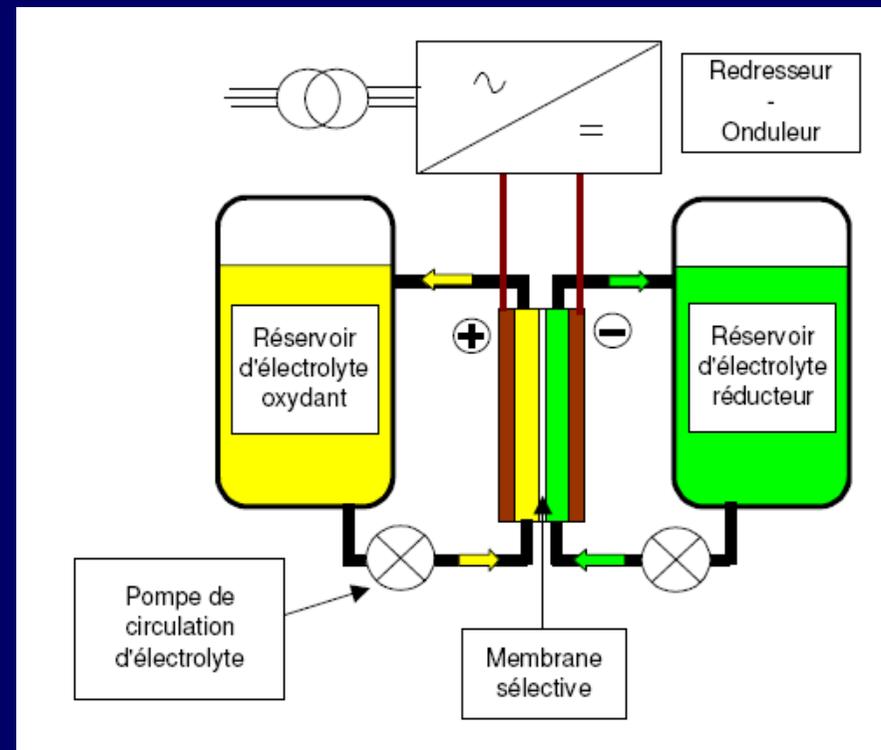
Stockage à grande échelle

- Thermique 2
 - Utilisation d'une pompe à chaleur
 - Déstockage par turbine à gaz
 - Rendement : 75%



Stockage à grande échelle

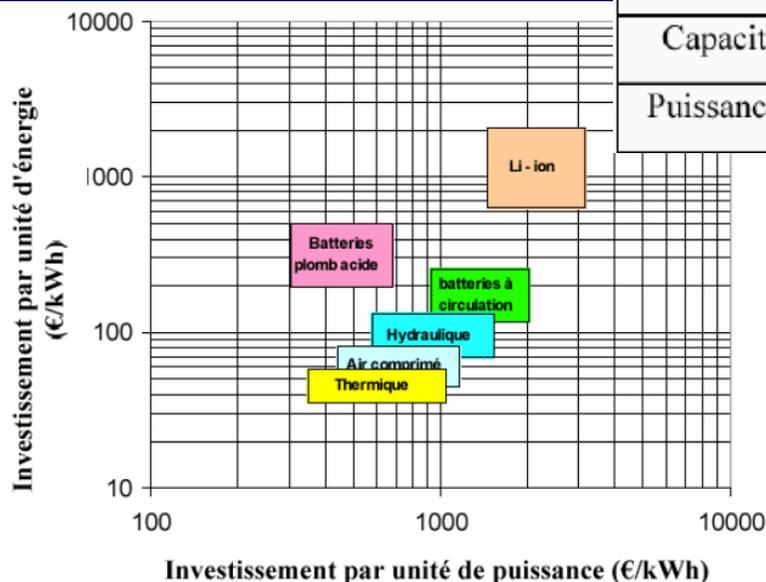
- **Batteries à circulation**
 - L'énergie stockée dépend de la taille des réservoirs (\neq batteries classiques)
 - Exemple : Little Bardford (UK), 15 MW, 8h, volume : 2 x 1800 m³
 - Electrolytes : ZnBr, NaBr, VBr
 - Risque en cas de fuite : électrolyte très réactifs
 - Rendement : 70 %



Stockage à grande échelle : bilan

| | |
|--------------------------------|---|
| Batterie au plomb | 30 kWh/t (batterie complète) |
| Batterie Li-ion | 200 kWh/t (batterie complète) |
| Batterie à circulation | 33 kWh/t (masse d'électrolyte) |
| Eau pompée à 360m de hauteur | 1 kWh/t |
| Air comprimé à 100 bars | 12 kWh/m ³ (volume du réservoir) |
| Volant d'inertie à 300m/s | 12 kWh/t |
| Hydrogène stocké à 300 bars | 900 kWh/m ³ (volume du réservoir) |
| Eau chauffée à 100°C | 116 kWh/t |
| Réfractaires chauffés à 1000°C | 600 kWh/m ³ (volume de solides chauds) |

| | Hydraulique | Air comprimé | Batteries | Batteries à circulation | Thermique |
|----------------------|--|---|---|-------------------------|------------------------|
| Forme d'énergie | gravitaire | air comprimé | chimique | chimique | chaleur |
| Densité d'énergie | 1 kWh/m ³ pour une chute de 360 m | 12 kWh par m ³ de caverne à 100 bars | Batterie au plomb : 33 kWh/t Batterie Li-ion : 100 kWh/t | 33 kWh/m ³ | 200 kWh/m ³ |
| Capacité réalisable | 1000 – 100000 MWh | 100 – 10000 MWh | 0,1 – 10 MWh | 10 – 100 MWh | 1000 – 100000 MWh |
| Puissance réalisable | 100 – 1000 MW | 100 – 1000 MW | 0,1 – 10 MW | 1 – 10 MW | 10 – 100 MW |



- Thermique

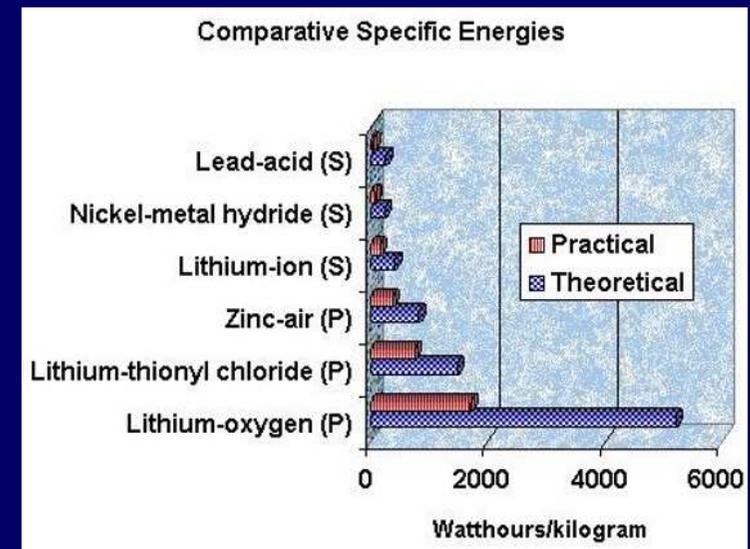
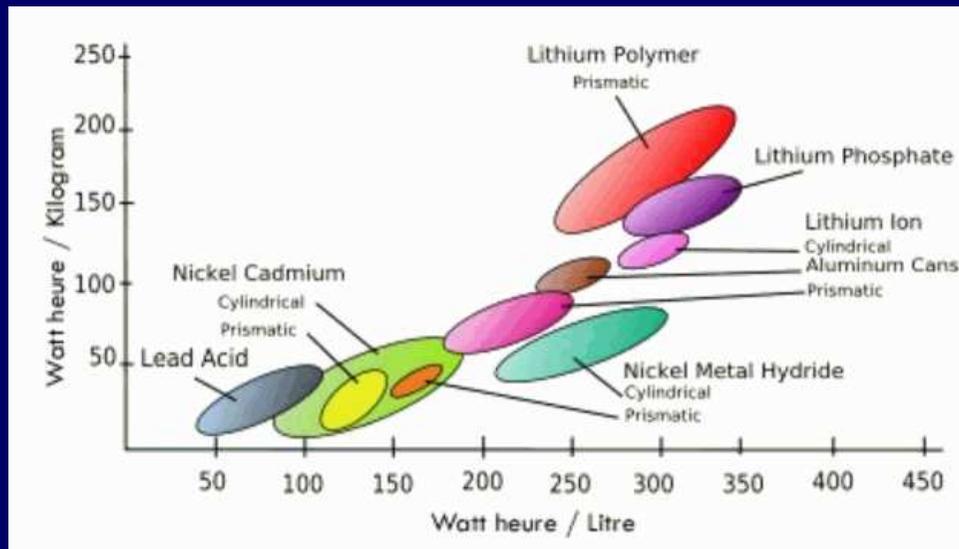
Stockage à petite et moyenne échelle

• Accumulateurs électrochimiques

- Compromis Energie – Puissance, problème de température
- Plomb-Acide : lourdes, mauvais cyclage (max 300), nouvelle génération : 3 fois plus durable, bon marché, essais à grande échelle (40 MWh – 10MW, Californie)
- Ni-Cd, Ni-métal-hydrure (NiMH), Ni-Fe : légères, effet mémoire
- Li-C, LiCoO₂, Li-ion : très léger, très performant, cher, dernière génération : bon cyclage (1000 cycles)
- LiFePo₄ : peu toxique, très bon cyclage (3000 cycles), fonctionnement à haute températures (>200°C), très peu d'autodécharge
- Li-oxygène : très efficace mais problème des filtres à air
- Zn-oxygène : cyclage à améliorer (apport d'électrolyte)

☹ Attention au lithium ☹

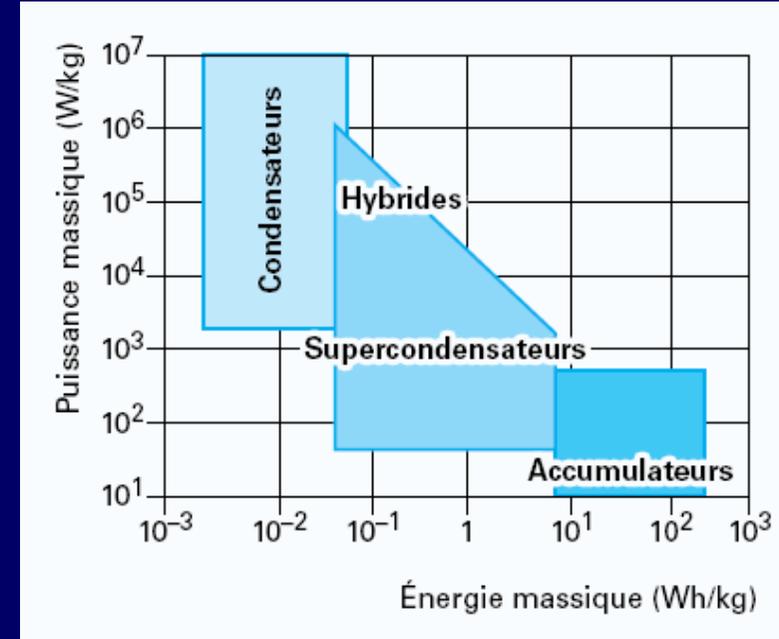
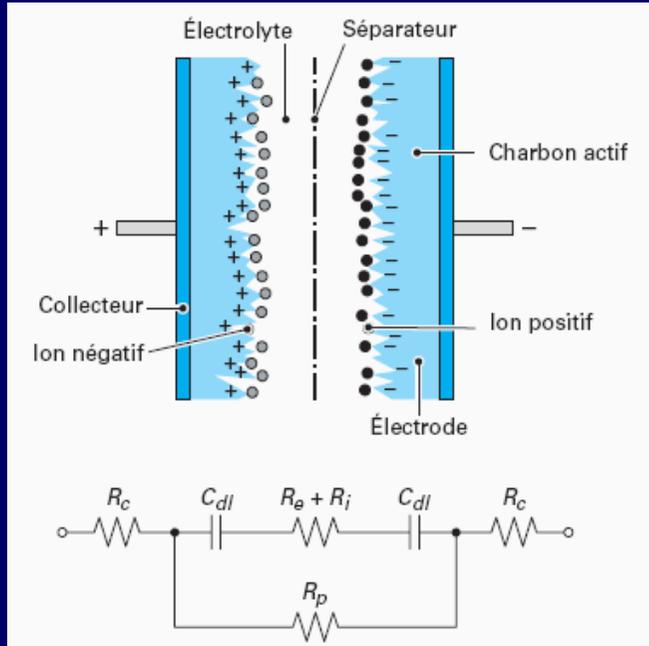
Son exploitation est très polluante !!!



Stockage à petite et moyenne échelle

• Supercondensateur

- Très grande surface spécifique (1200 m²/g)
- Equivalent à 100 condensateurs
- Augmentation de la charge et faible décharge
- Coût élevé (en forte baisse)
- Forte puissance
- 20 à 50 fois moins d'énergie qu'un accu Li-ion



Application des supercondensateurs aux transports en commun

- Rechargement très rapide durant les arrêts
- Rechargement partiel durant le freinage
- Autonomie : 5 à 7 km (en hausse)
- Gain par rapport à un trolley classique : 40 %
- Gain par rapport à un bus diesel : 90 %
- Défaux
 - Faible accélération
 - Consommations annexes limitées



Stockage à petite et moyenne échelle

- **Batterie à nanotubes**
 - Supercondensateurs à nanotubes (fleur de nanotubes)
 - Cyclabilité excellente : > 5000 (3% de perte sur 20000 ch.)
 - Temps de charge de l'ordre de quelques secondes
 - Faible capacité pour le moment
- **Batterie biologique**
 - Des champignons remplacent les catalyseurs
 - les enzymes laccases (Cu) remplacent les métaux nobles (Pt) comme catalyseurs
 - technologie au point vers 2020, mûre vers 2030
- **Batterie microscopiques**
 - Les électrodes sont assemblées par des virus génétiquement modifiés
 - utilisation de nanotubes de carbone
 - batterie complète présentée en mars 2009

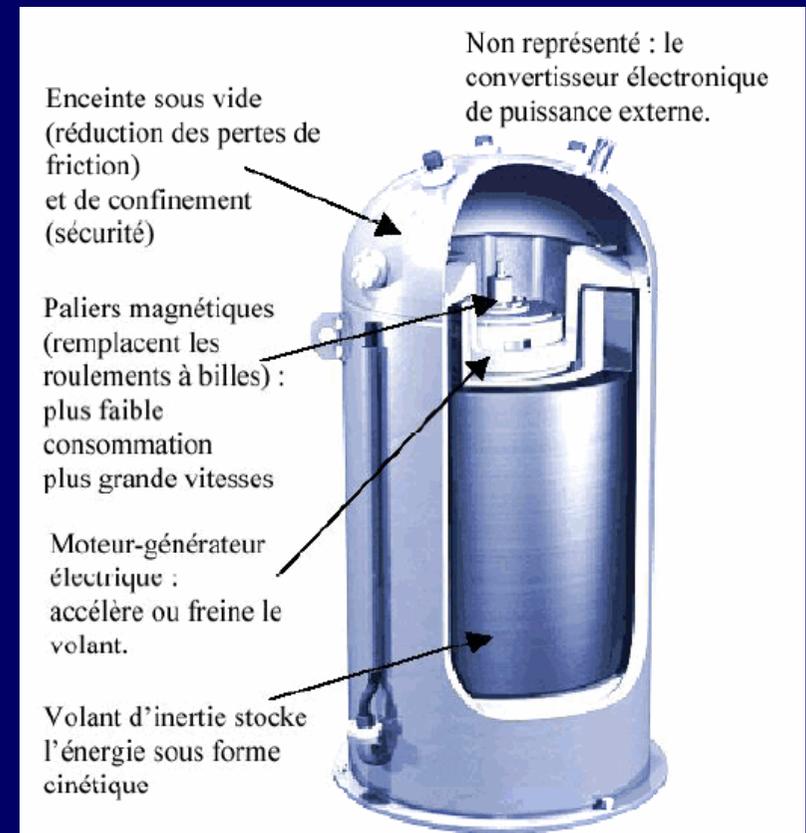
Stockage à petite et moyenne échelle

- **Inductance supraconductrice**

- SMES : Superconducting Magnetic Energy Storage
- Le courant circule sans résistance dans un tore
- Très basse température (NbTi, Nb₃Sn : 4,2 K, futur : céramique : 30 K)
- Très forte puissance
- Solution effective sous forme de semi-remorque

- **Volant d'inertie**

- $E = 1/2 \cdot J \cdot \Omega^2$ (J : moment d'inertie)
- $E/V = K \cdot \sigma_{\max}$ et $E/M = K \cdot \sigma_{\max} / \rho$
- σ_{\max} : résistance à la traction
- Fibre de carbone ($v=1500$ m/s) : cher
- Exemple : Beacon Power System
 - ◆ 2 kW pendant 3h
 - ◆ 22500 tr/mn, $D=68$ cm, $m=800$ kg
 - ◆ Durée de vie : 20 ans

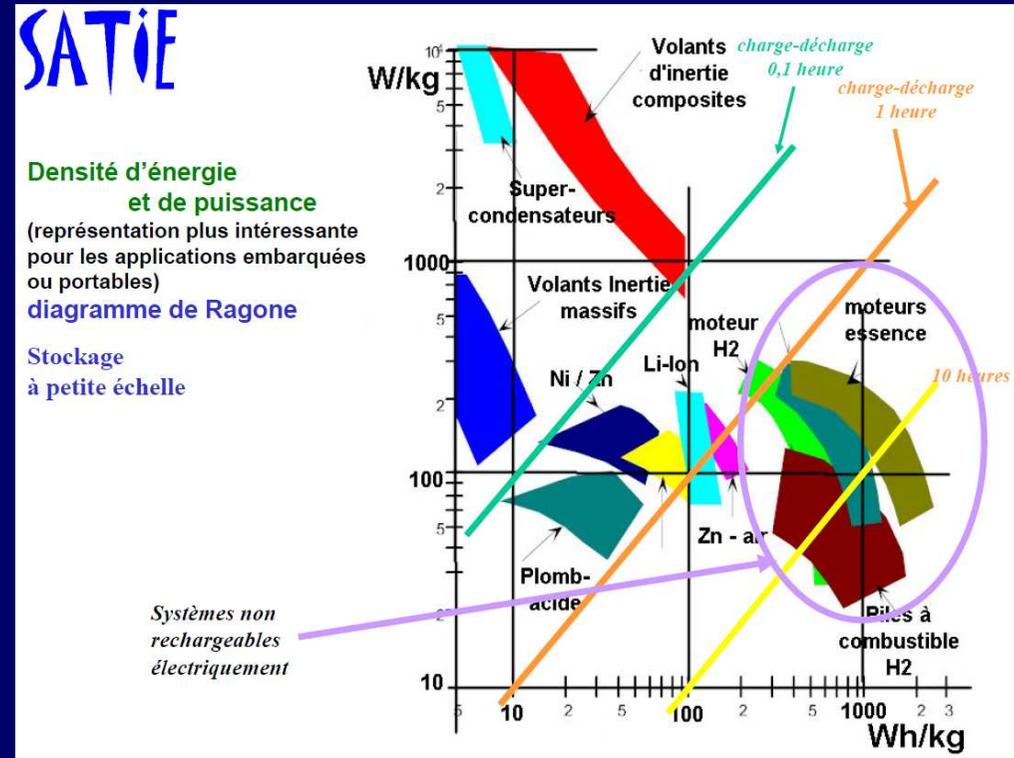


Stockage à petite et moyenne échelle

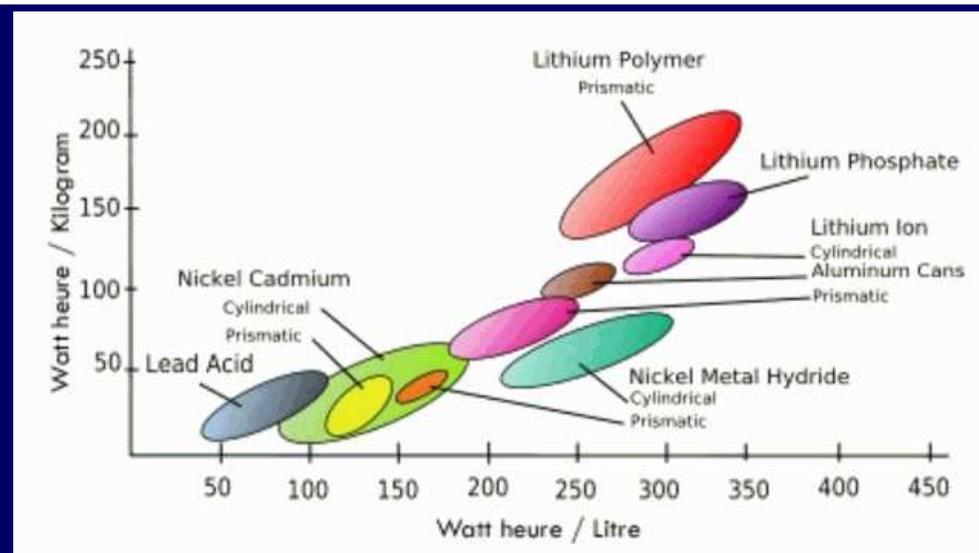
- **Compression d'air en bouteille**
 - 200 bars, 140 litres : 800 Wh
 - Rendement assez faible < 50 %
 - Fatigue du matériau du réservoir (10000 cycles)
- **Pile à combustible**
 - 200 bars, 2kg H₂, 140 litres : 68 kWh
 - 350 bars, 2kg H₂, 75 litres : 68 kWh
 - Rendement assez faible < 50%

Stockage à petite et moyenne échelle : bilan

- Diagramme de Ragone

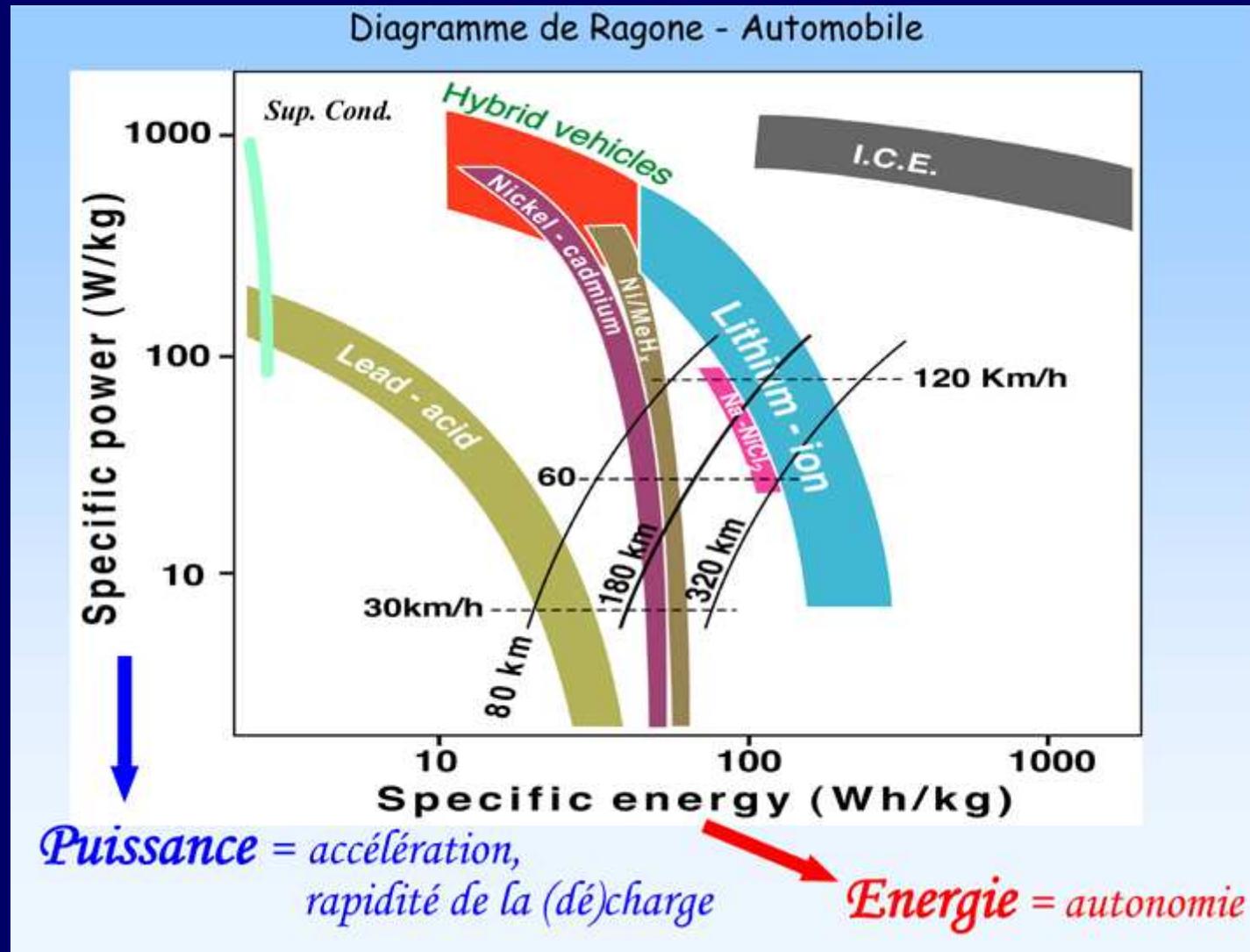


- Diagramme de d'encubrement



Stockage à petite et moyenne échelle : bilan

- Diagramme de Ragone



Stockage à petite et moyenne échelle : bilan

| | Electro- chimique | Volant Inertie | Inductif supraconducteur | Super condensateurs | Air comprimé | Hydrogène PAC |
|--|---|--|-----------------------------|------------------------------------|--|---|
| Forme d'énergie | chimique | mécanique | magnétique | électrostatique | air comprimé | carburant |
| Densité d'énergie (accumulateur seul, hors équipements annexes) | 20 à 120 Wh/kg | 1 à 5 Wh/kg | 1 à 5 Wh/kg | 6 Wh/kg | 8 Wh/kg (200 bars) | 300 à 600 Wh/kg (200 à 350 bars) hors PAC |
| Capacité réalisable ou réalisée | qq Wh à qq MWh | qq kWh à qq 10 kWh | | | ? | ? |
| Puissance réalisable | qq W à qq MW | qq kW à qq MW | | | | qq 10 W à qq MW |
| Rendement électrique | 0,7 à 0,8 | 0,8 à 0,9 | | | | 0,3 à 0,5 |
| Connaissance de l'état de charge | Difficile Paramètres variables | aisé | aisé | aisé | aisé | aisé |
| Coût en €/kWh | Pb-acide : 50 à 150 Lithium : 700 à 1000 | 150 à 2000 (selon techno et performances) | ? | 50 000 à 150 000 (n puissance : | ? | ? |
| Remarques | Faible cyclabilité : qq 1000 au mieux | Sécurité ? Gde cyclabilité | cryogénie | Grande cyclabilité | Rendement en fonction de l'état de charge ? | Probablement intéressant dans un contexte de réseau de distribution d'hydrogène |