



RÉGION
**Nouvelle-
Aquitaine**

Introduction au stockage électrochimique de
l'énergie
Batteries et Hydrogène ou les enjeux du stockage de
l'énergie

Conférence donnée au Tiers-Lieu La Grenote le
3 mars 2023 par

Manuel Legrée

Docteur en physico-chimie de la matière condensée de l'université de Bordeaux (ICMCB)
Ingénieur Matériaux de l'université de Nantes (Polytech)

Cycle de conférence soutenue par le Programme d'Animation d'Initiatives de culture scientifique en Nouvelle-Aquitaine

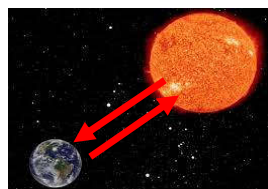
Électricité, chiffres et comparaisons douteuses



Énergie consommée (2020) : 26 000 TWh



= 65 000 milliards d'années



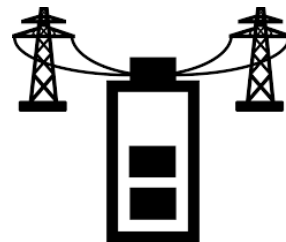
= 1 milliard d'aller-retours



Production : 6000 GW

Stockage : 180 GW

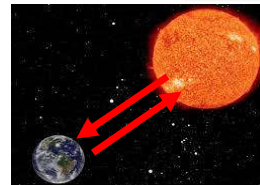
(3 %)



Énergie consommée (2020) : 460 TWh



= 1 150 milliards d'années



= 18 millions d'aller-retours



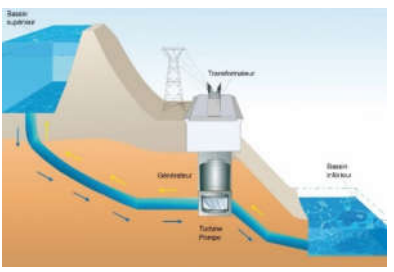
Production : 136 GW

Stockage : 4,8 GW

(3,5 %)

Les systèmes de stockage d'électricité

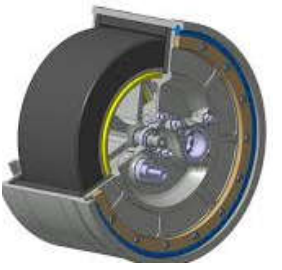
Stockage mécanique (stationnaire)



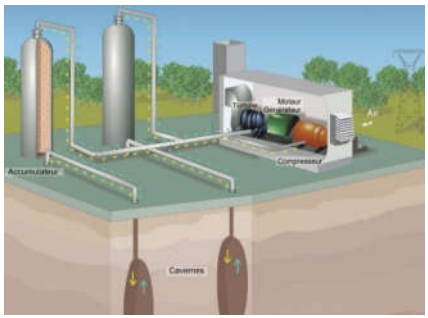
Pompage d'eau



Grues

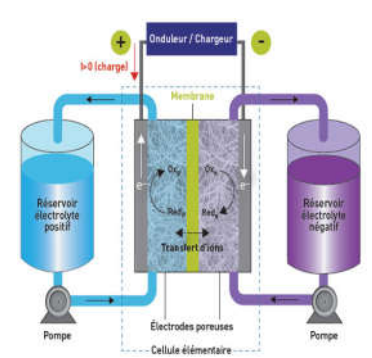


Volants d'inertie

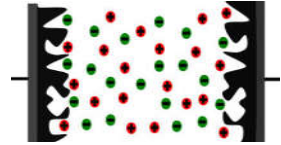


Air comprimé

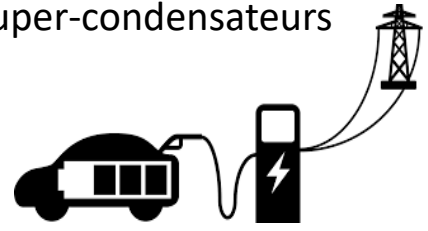
Stockage électrochimique (stationnaire / embarqué)



Batteries

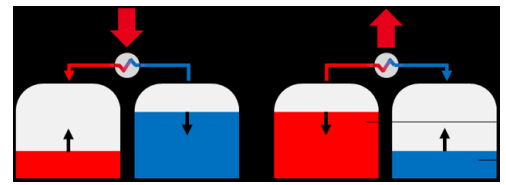


Super-condensateurs



Smart-grid

Stockage thermique (stationnaire)



Stockage chimique (stationnaire / embarqué)

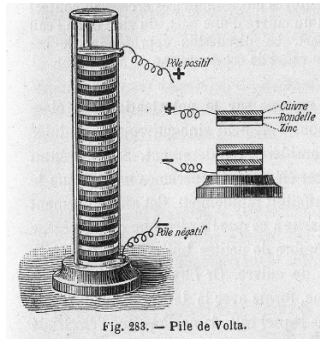


Dihydrogène

Partie I - Batteries

Énergie électrique stockée dans des matériaux solides

Stockage électrochimique



Piles



Batteries

- I- Qu'est-ce que l'électrochimie ?
- II- Fonctionnement d'une pile
- III- Fonctionnement d'une batterie
- IV- Évolution des technologies
- V- Choix de matériaux pour les futures batteries

Partie II - Hydrogène

Stockage chimique



Qu'est-ce que l'électrochimie ?

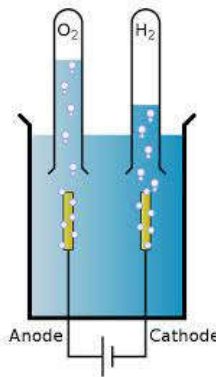
La relation entre réactions chimiques et électricité



⇒ Certaines réactions chimiques peuvent générer de l'électricité
⇒ *Piles et batteries, partie I*

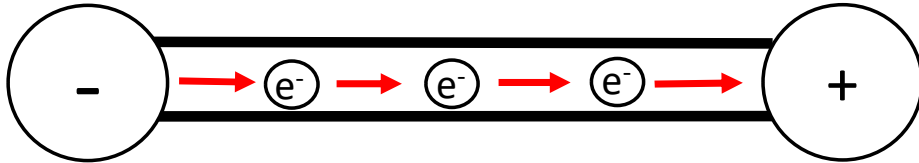
⇒ L'électricité peut forcer certaines réactions chimiques qui n'ont pas lieu spontanément
⇒ *Production de dihydrogène, partie II*

Implique souvent une interface solide/liquide
(électrode/électrolyte)

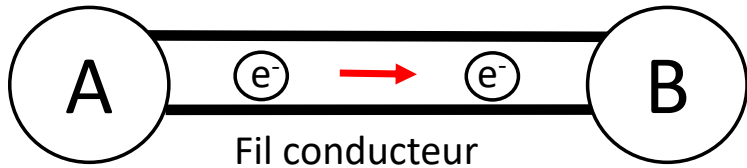


Qu'est-ce que l'électrochimie ?

Électricité = mouvement d'électrons



« Certaines réactions chimiques peuvent générer de l'électricité. »



Chimie = réactions d'oxydoréduction

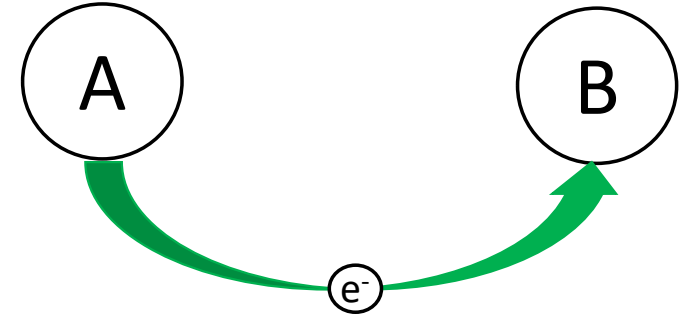
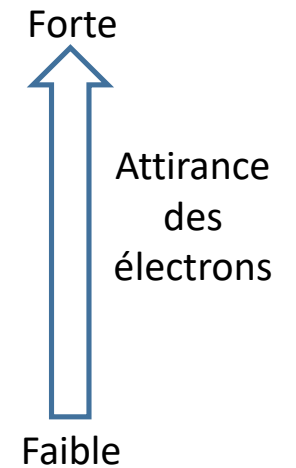
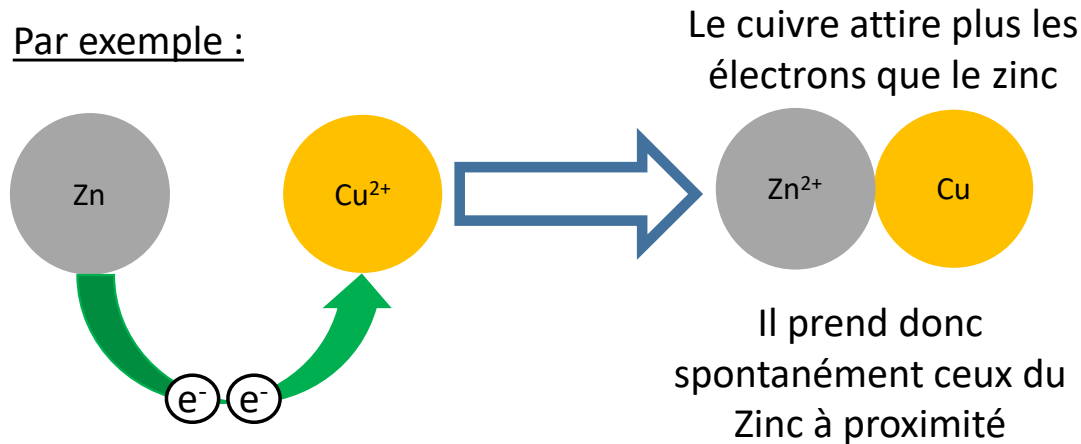


Table des potentiels de réduction (V/ENH)

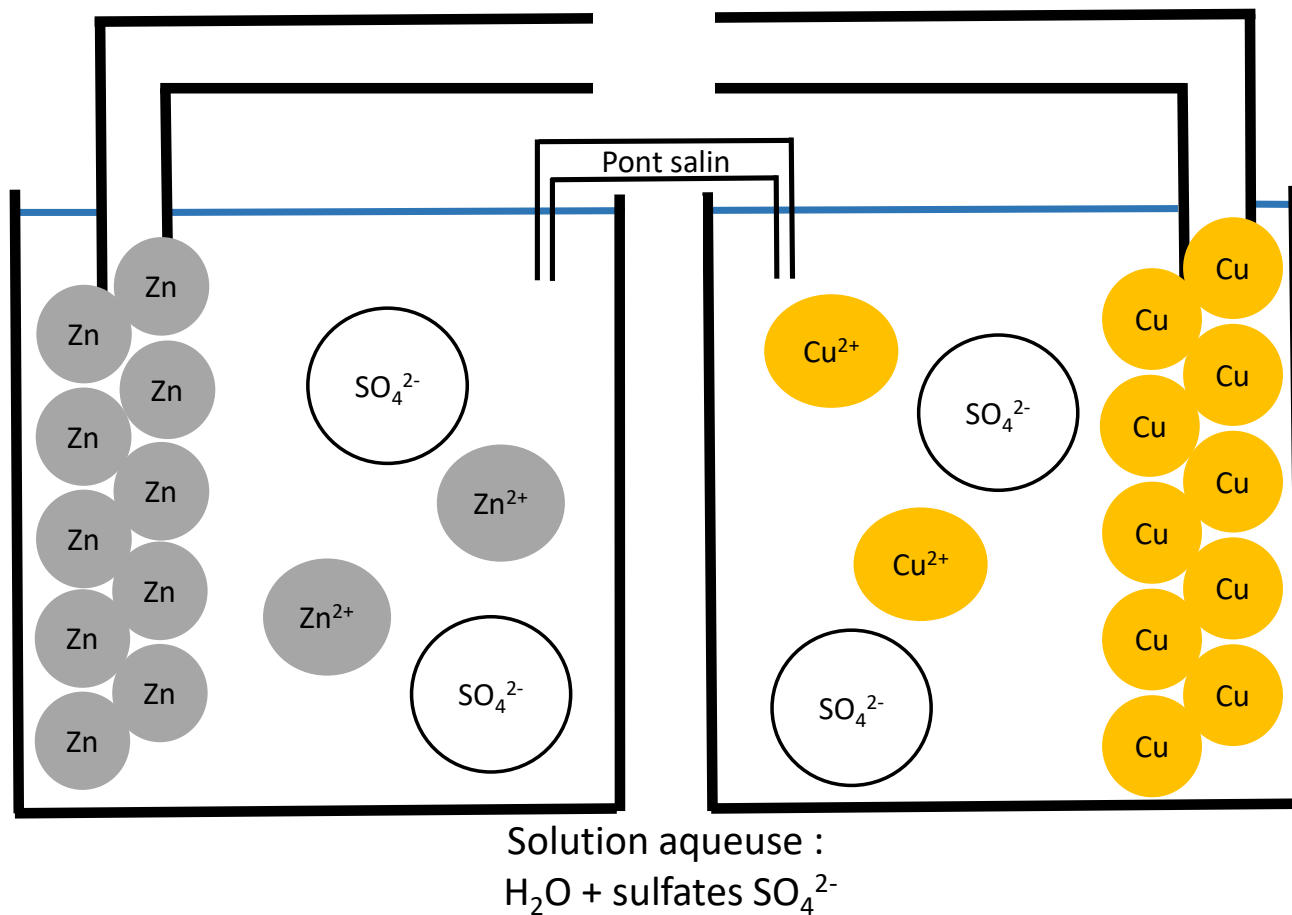
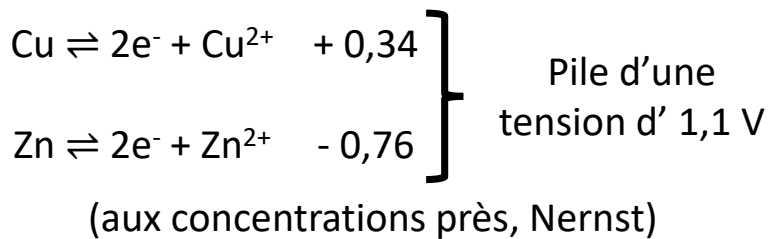
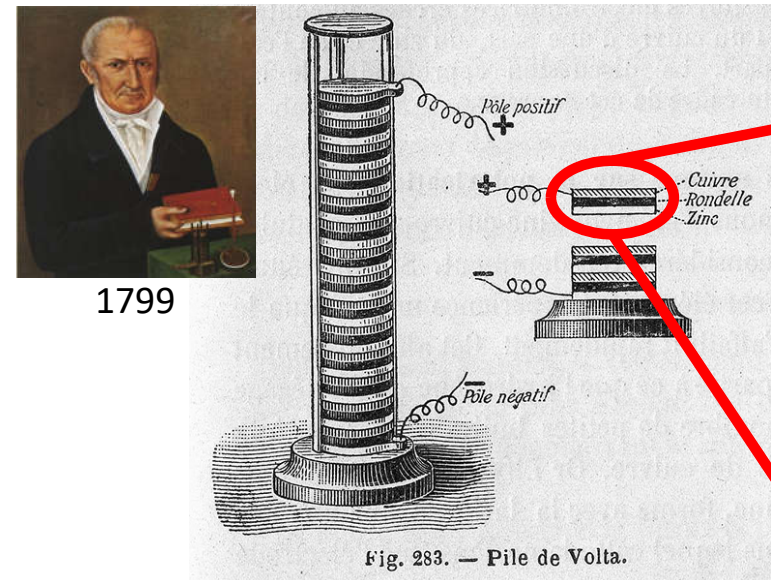
$F_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2F^-$	+ 2,87
$Cu \rightleftharpoons 2e^- + Cu^{2+}$	+ 0,34
$Zn \rightleftharpoons 2e^- + Zn^{2+}$	- 0,76
$Li \rightleftharpoons e^- + Li^+$	- 3,04



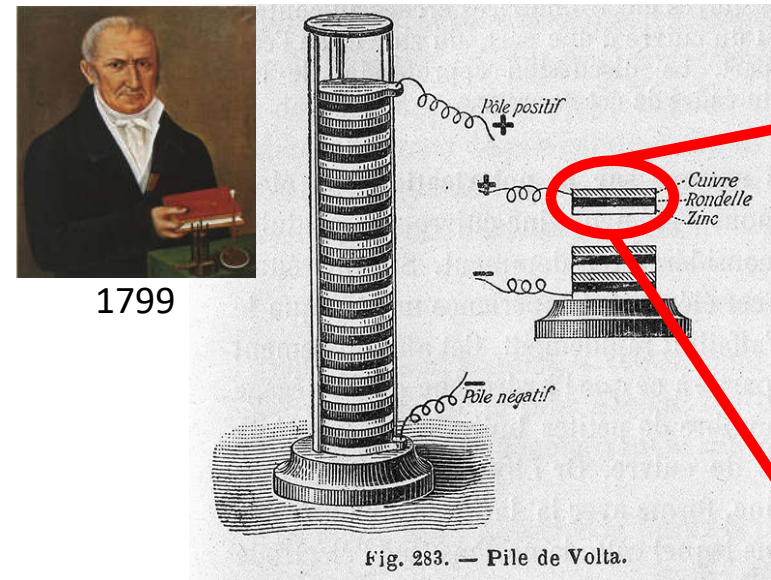
Par exemple :



Que se passe-t-il dans une pile ?



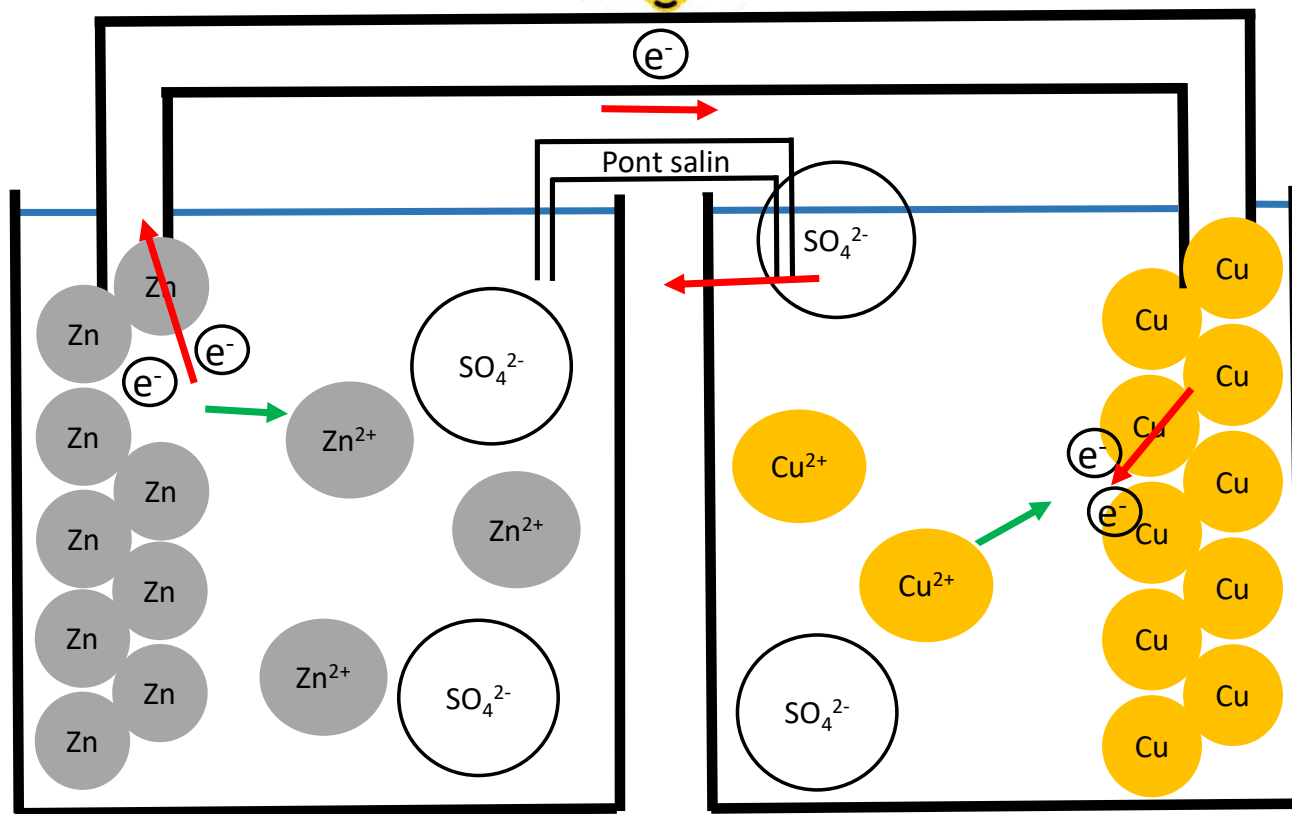
Que se passe-t-il dans une pile ?



Anode (-) :
 $\text{Zn} \rightarrow 2\text{e}^- + \text{Zn}^{2+}$



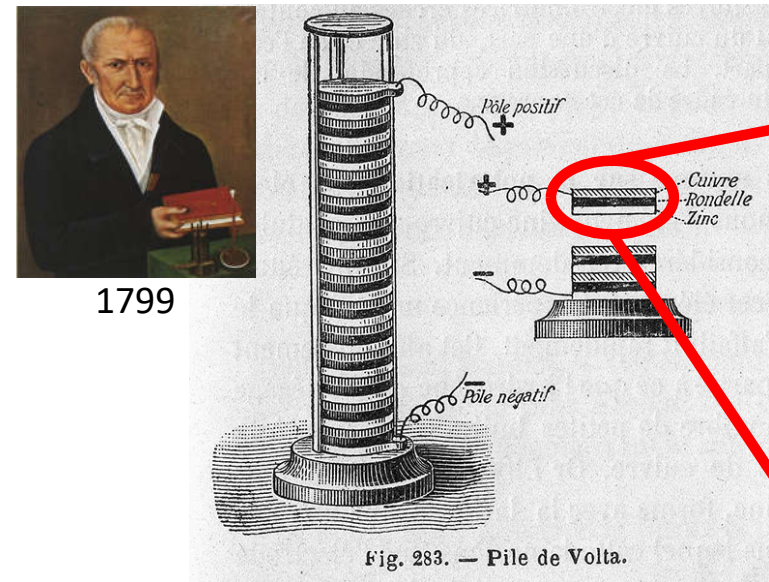
Cathode (+) :
 $2\text{e}^- + \text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Cu}$



- Les atomes neutres (Zn, Cu) forment un métal solide.
- Les ions chargés (Zn²⁺, Cu²⁺) sont dissous dans l'eau.

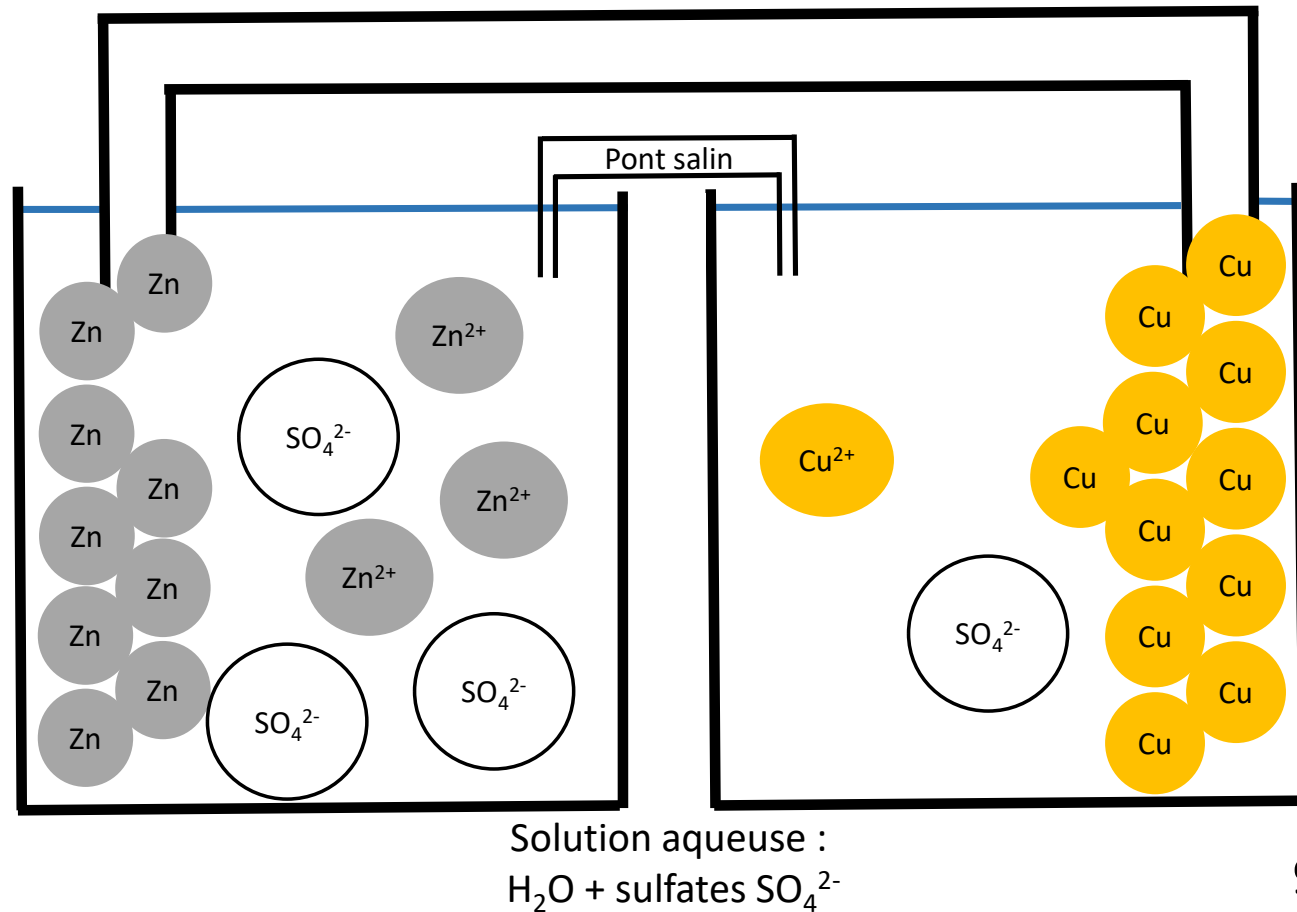
Solution aqueuse :
H₂O + sulfates SO₄²⁻

Que se passe-t-il dans une pile ?



Anode (-) :
 $\text{Zn} \rightarrow 2\text{e}^- + \text{Zn}^{2+}$

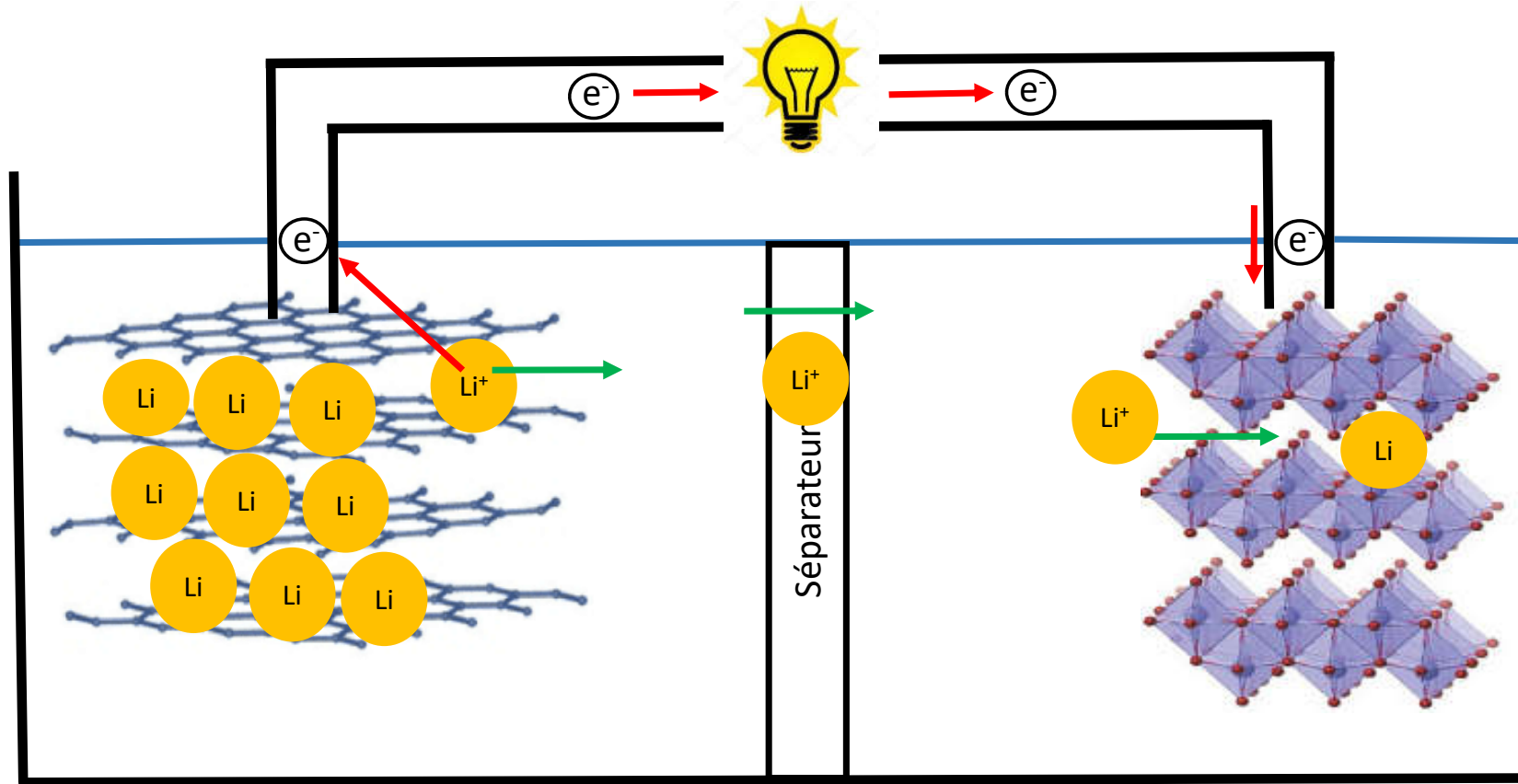
Cathode (+) :
 $2\text{e}^- + \text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Cu}$



- Consommation de l'anode (Zn) et du Cu^{2+}
- Pas de réversibilité
- Batterie primaire (pile)

Que se passe-t-il dans une batterie ?

Batterie lithium-ion en décharge



Anode (-) en graphite
 $\text{LiC}_6 \rightarrow \text{C}_6 + \text{e}^- + \text{Li}^+$
Potentiel $\sim -3 \text{ V/ENH}$

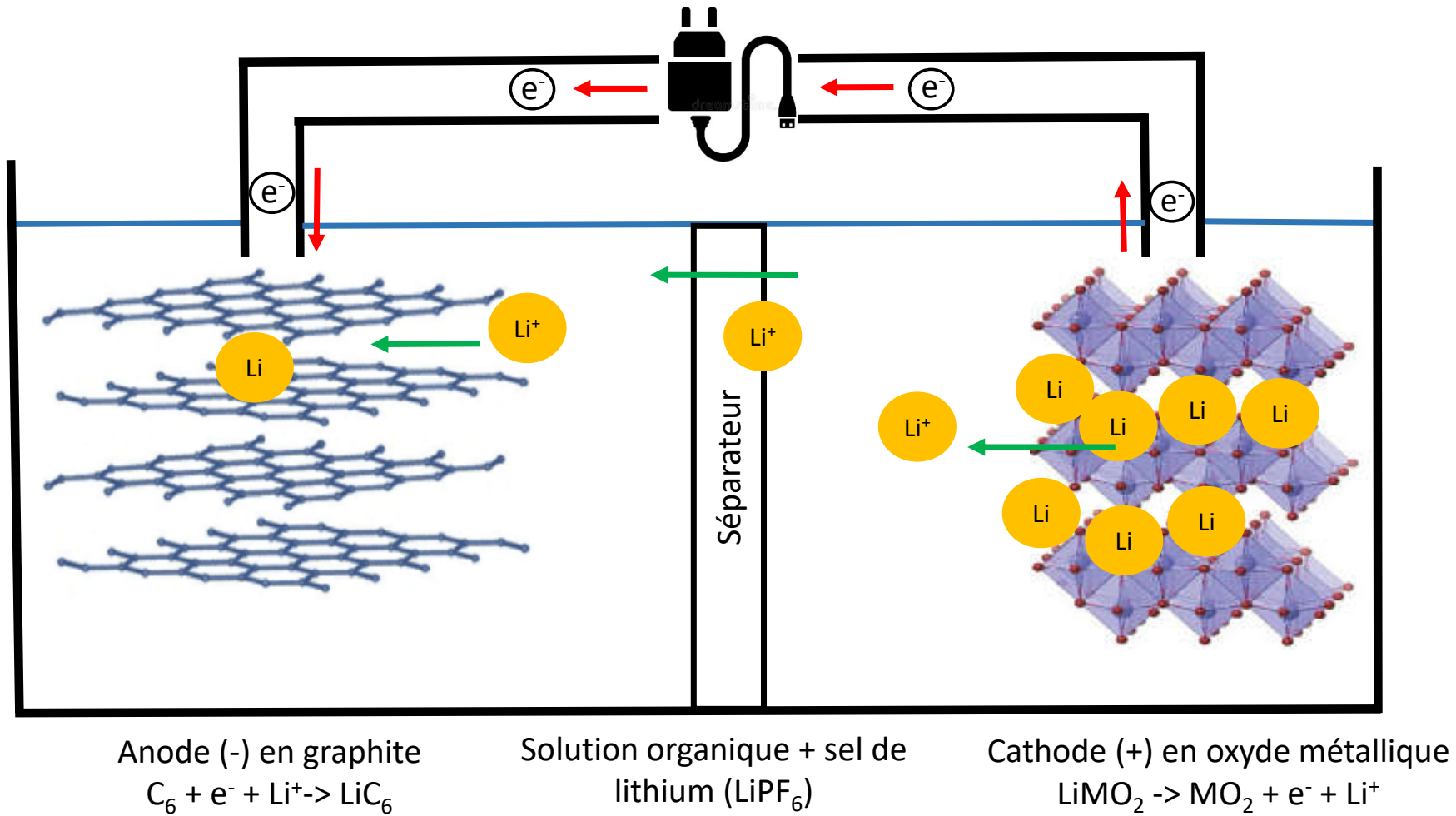
Solution organique + sel de
lithium (LiPF_6)

Cathode (+) en oxyde métallique
 $\text{MO}_2 + \text{e}^- + \text{Li}^+ \rightarrow \text{LiMO}_2$
Potentiel $\sim +1 \text{ V/ENH}$

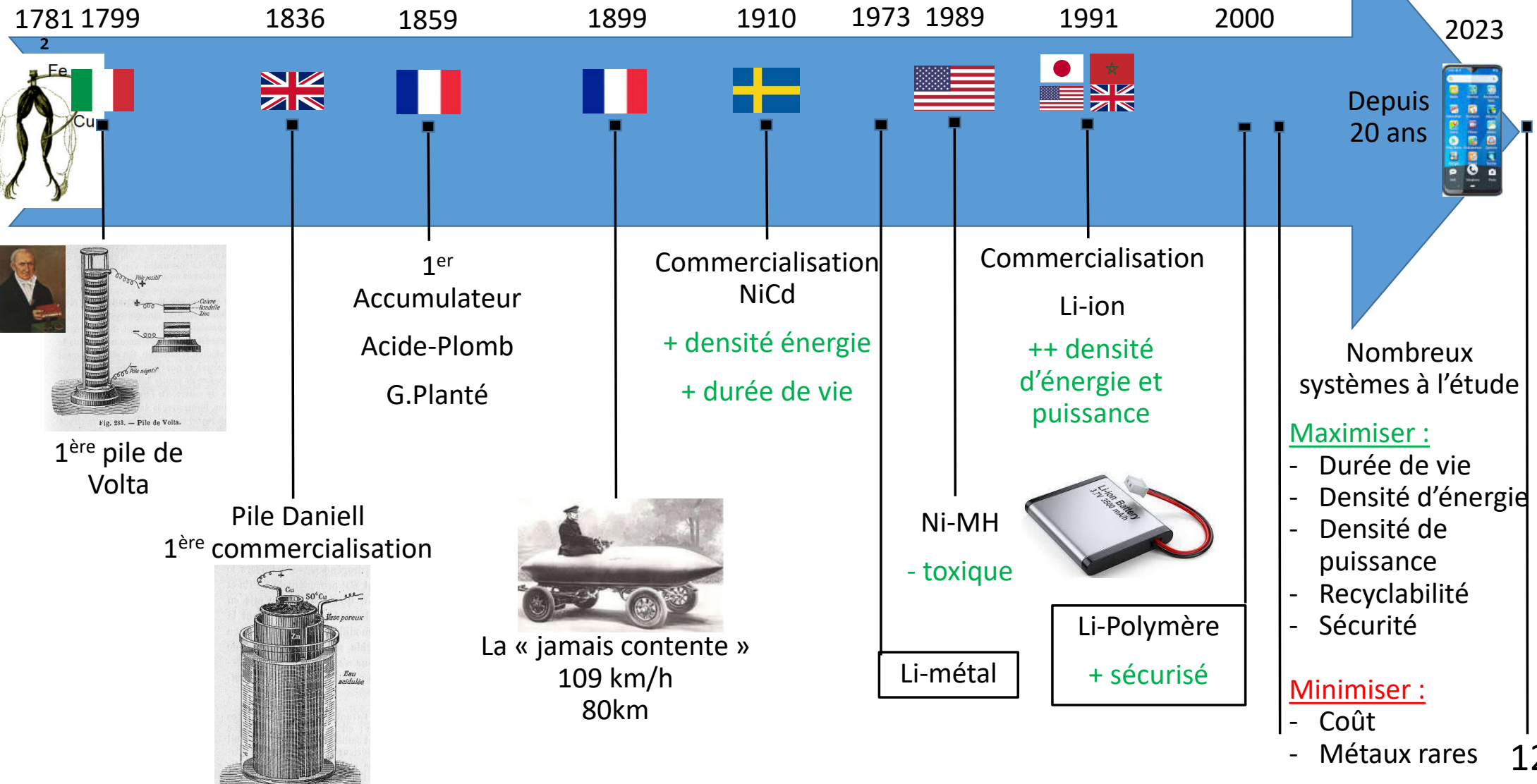
Tension de 4 V
délivrée
En réalité $\sim 3,5 \text{ V}$

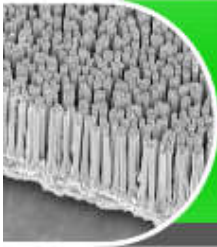
Que se passe-t-il dans une batterie ?

Batterie lithium-ion en charge



Évolution des technologies de batteries





avec assistance électrique ?

➤ Quelle batterie pour parcourir 40 à 50 kms?
Energie nécessaire: 300 à 360 Wh (36 V, 8 à 10 Ah)

1859

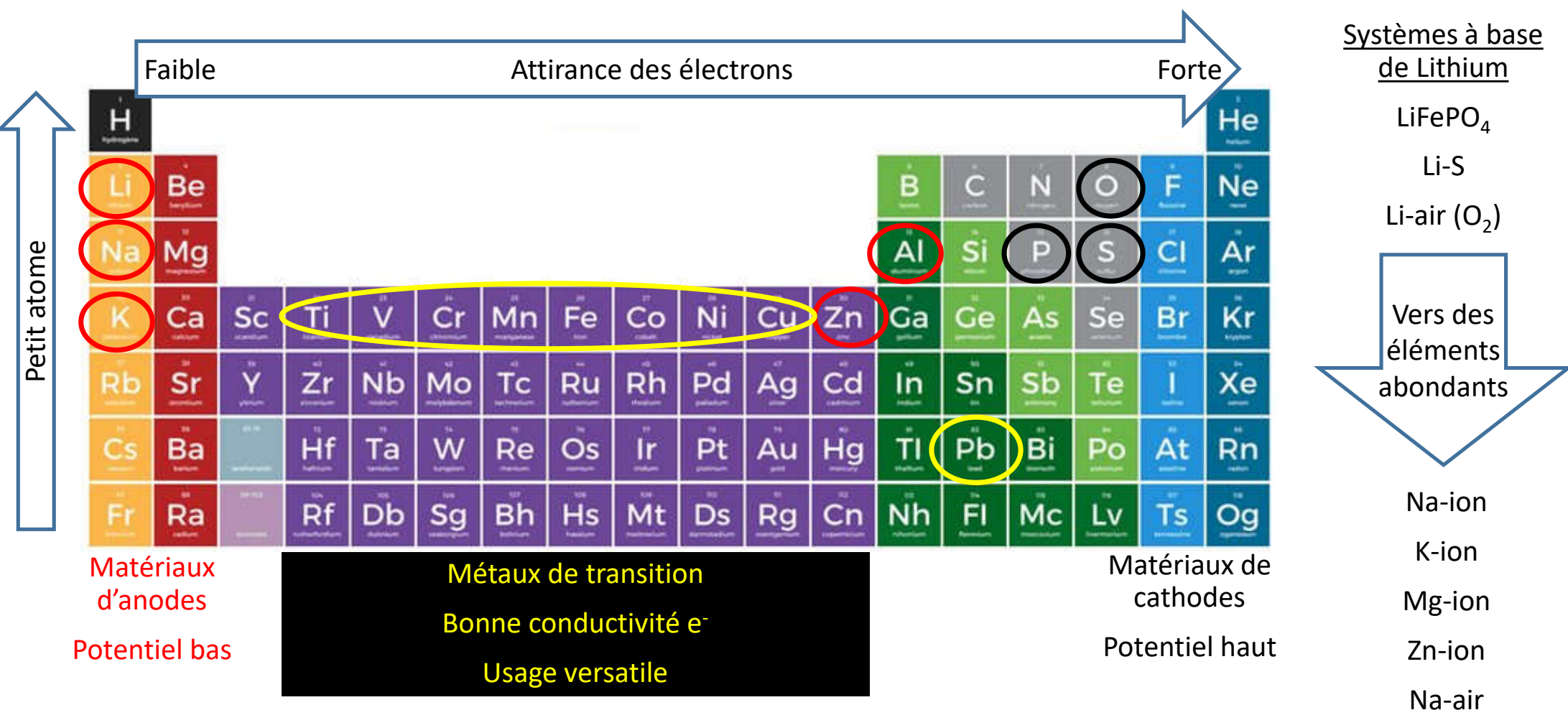
1910

1989

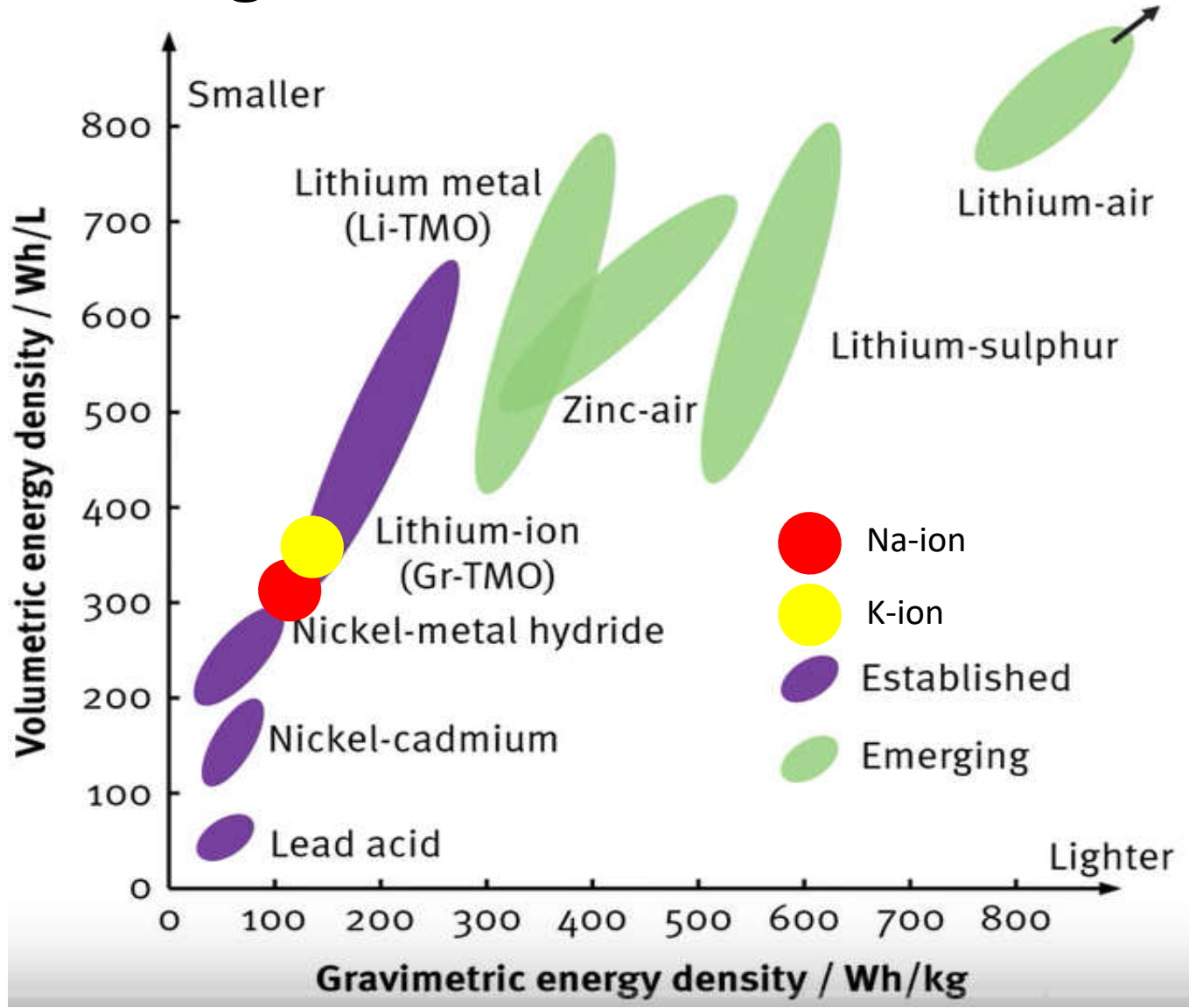
1991



Technologies de batteries : diverses chimies

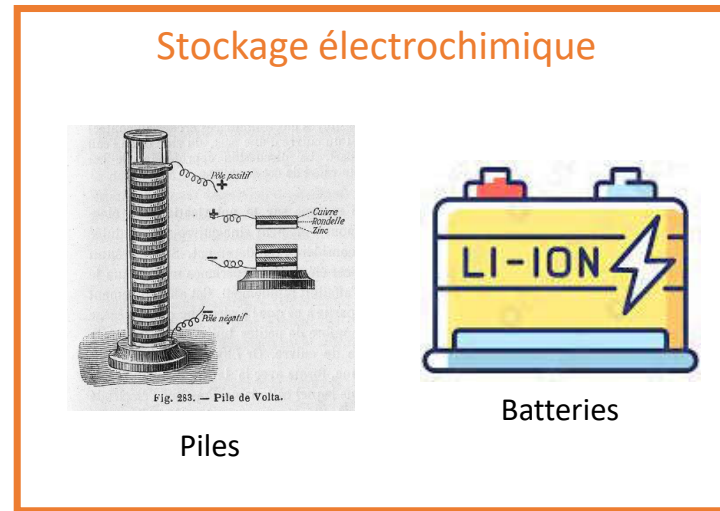


Densités d'énergie



Partie I - Batteries

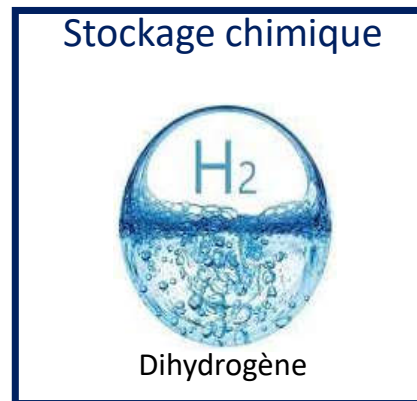
- Énergie électrique stockée dans des matériaux solides (électrodes).
- Enjeux: capacité, durée de vie et coût.



- Nombreux éléments envisageables.
- Recherche de solutions plus durables et moins coûteuses en minerais rares.

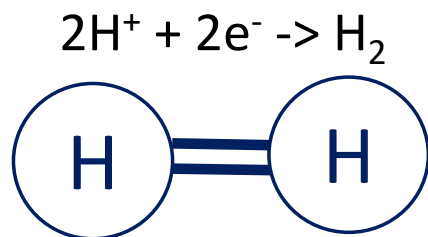
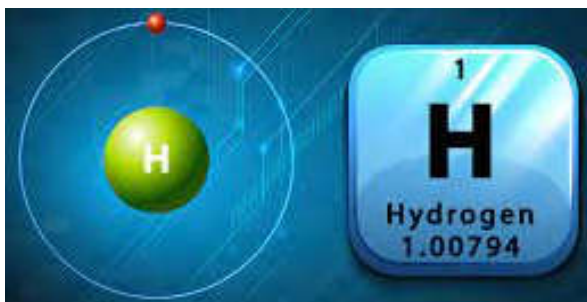
Partie II - Hydrogène

- Énergie stockée dans une molécule (gaz).

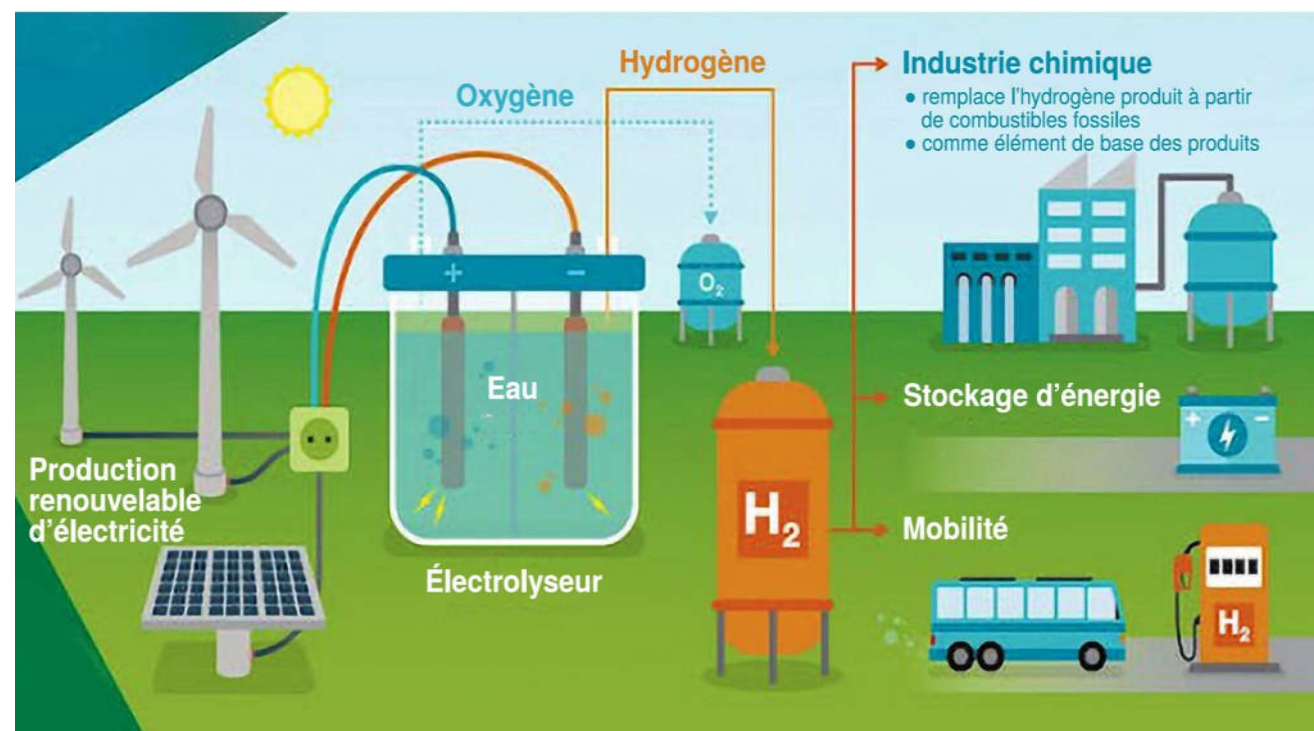


- I- Principe de l'économie hydrogène
- II- Méthodes de production
- III- Stockage
- IV- Utilisation
- V- Cas de l'hydrolyse

Le dihydrogène comme vecteur d'énergie



33,3 kWh*/Kg H₂
3× plus dense que le pétrole
Combustion sans CO₂



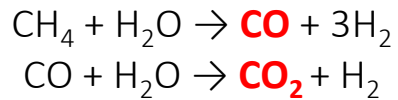
3 kWh/m³
3 000× moins dense que le pétrole
Inflammable et explosif
Fragilise les métaux

<https://www.batirama.com/article/40937-produire-de-l-hydrogene-decarbone-enjeu-industriel-ou-veritable-leurre.html>

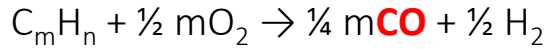
* ~3 jours de consommation d'un foyer moyen 17

La production du dihydrogène

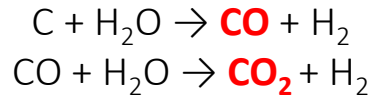
Vaporeformage de méthane (49 %)



Oxydation partielle de pétrole (29 %)



Gazéification de charbon (18 %)



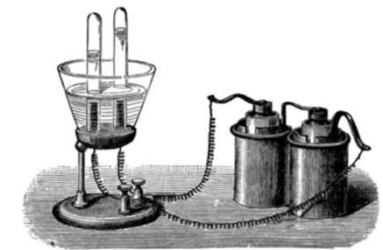
96% de la production mondiale à partir d'hydrocarbures

Autres méthodes

Cycles thermo-chimiques



Hydrolyse

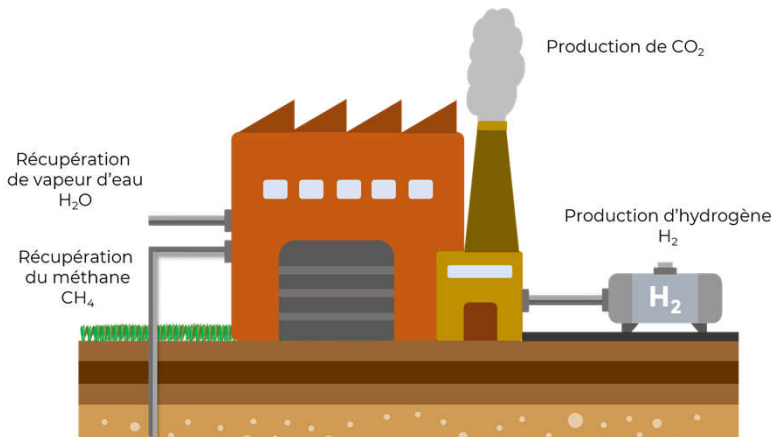
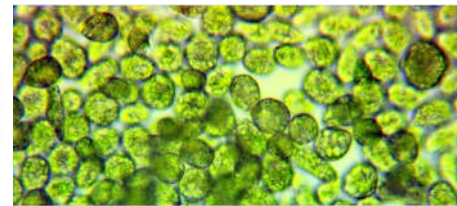


Électrolyse

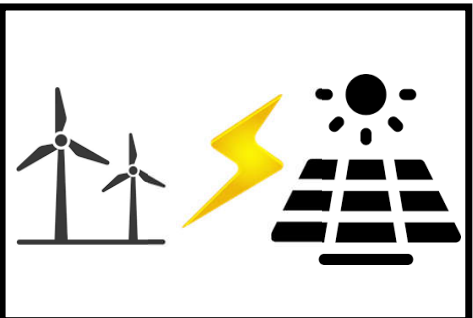
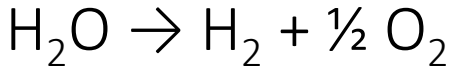
Biomasse



Vivant (photolyse)



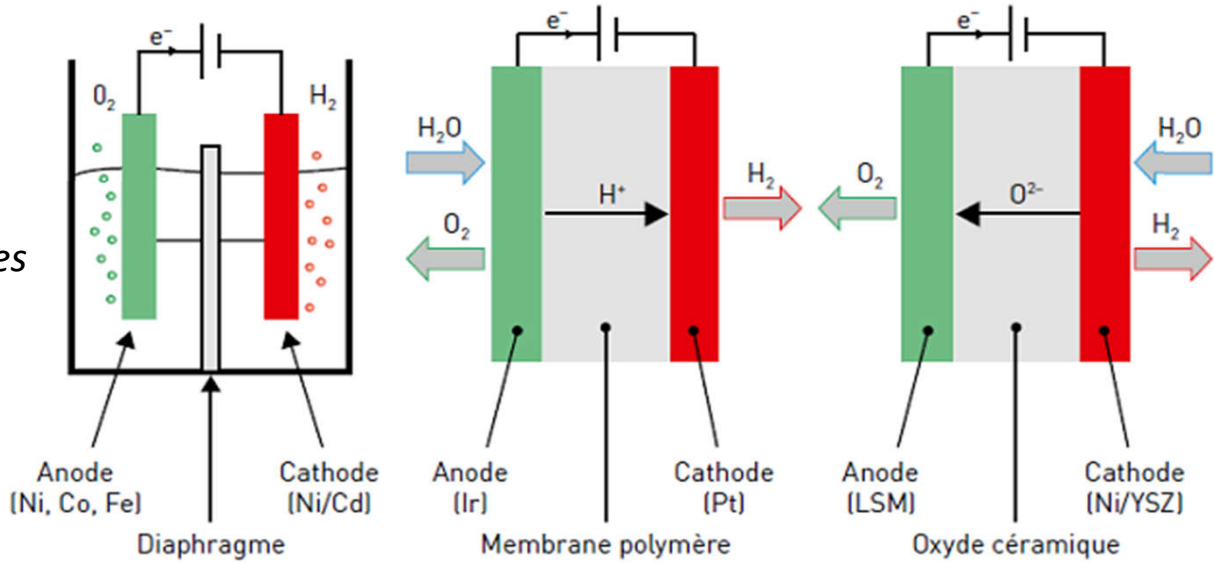
Électrolyse, « la manière verte »



Électrolyse alcaline

Électrolyse avec membrane échangeuse de protons

Électrolyse à oxyde solide



Anode	$4OH^- \rightarrow 2H_2O + 4e^- + O_2$	$2H_2O \rightarrow 4H^+ + 4e^- + O_2$	$O^{2-} \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$
Cathode	$4H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- + 2H_2$	$4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2$	$H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-}$

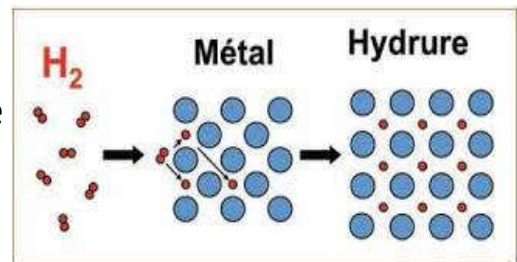
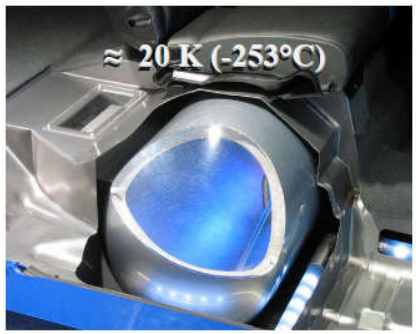
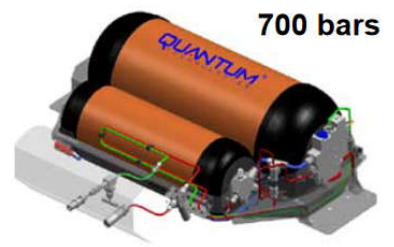
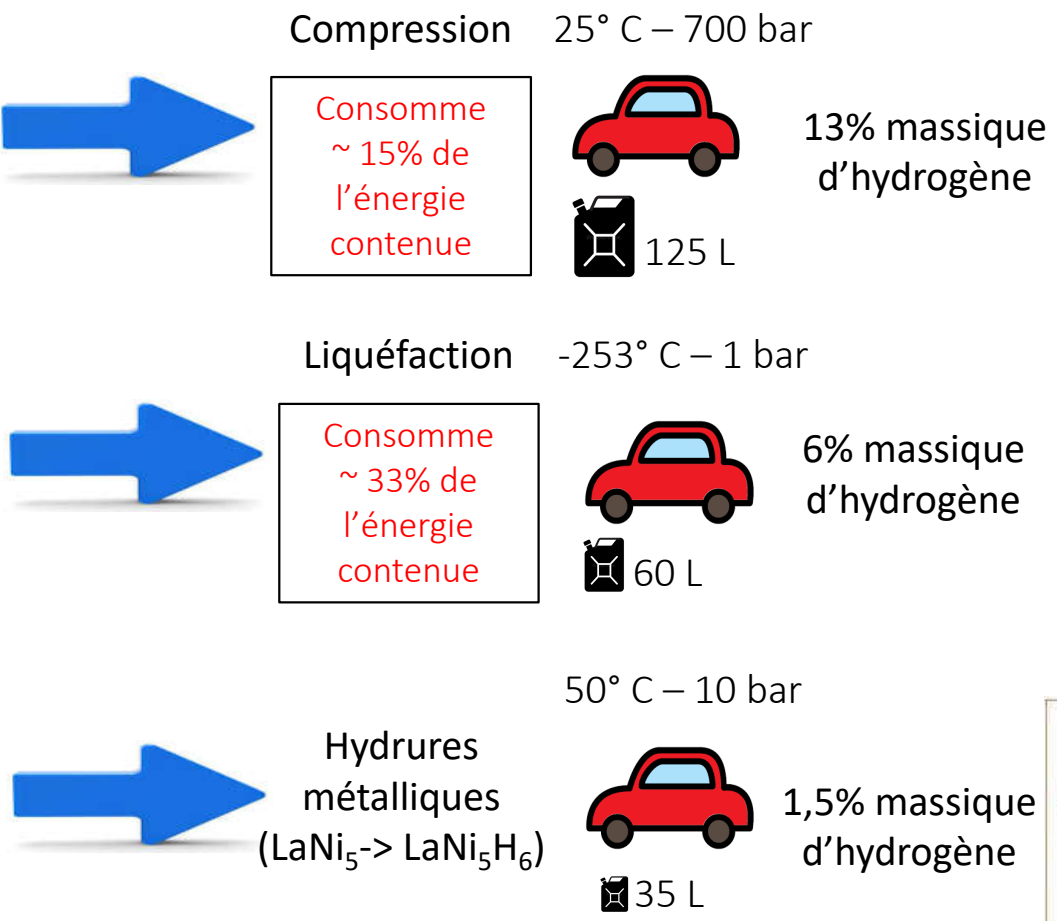
« L'électricité peut forcer certaines réactions chimiques qui n'ont pas lieu spontanément. »

Rendements :

- Alcaline : 75 – 90 %
- PEMFC : 90%
- SOFC : 80 – 90%

Le stockage du dihydrogène

Autonomie de 500 km :



H₂ à 1 bar : 0,09kg/m³

Stockage embarqué
 Stockage stationnaire : réserves souterraines, caves salines

L'utilisation du dihydrogène

Usages aujourd'hui

Industrie chimique

- Ammoniac
- Méthanol



- Raffinage du pétrole



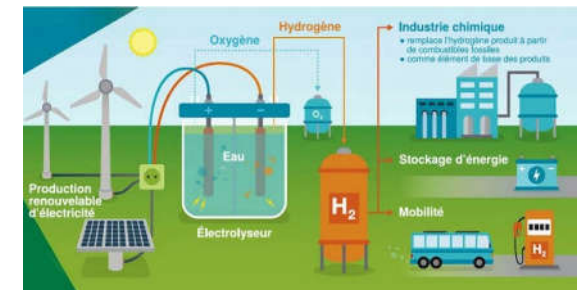
Usages pour la décarbonation :

- Réduction des minerais
- Combustible pour le transport
- Stockage de l'électricité



Défis majeurs du déploiement H₂

- Moyens de stockage / transport performants et sécurisés
- Coût des infrastructures

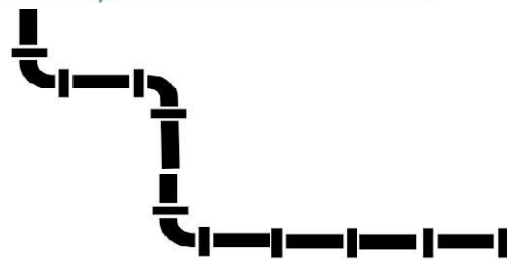


Le transport du dihydrogène

Gazoduc H₂ 2023 : 2000 km



Air Liquide



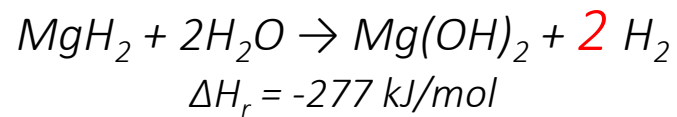
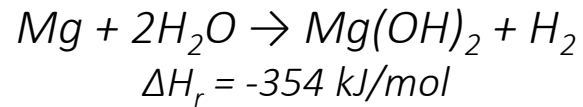
Proposition 2040



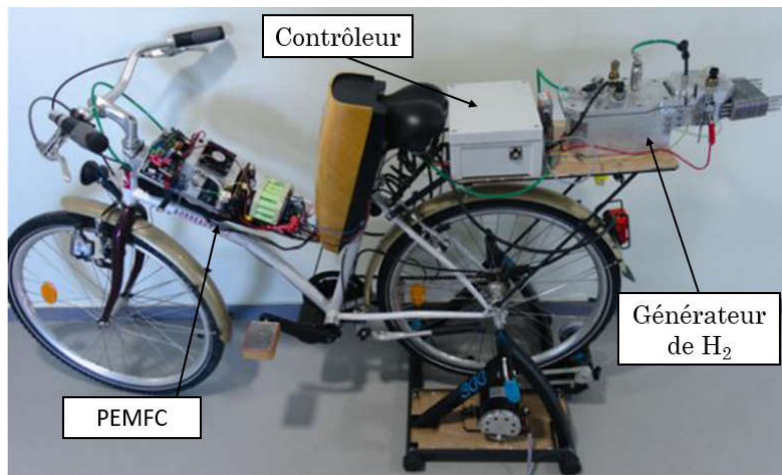
European Backbone Hydrogen Institute

Hydrolyse avec du magnésium, « *la manière notre* »

Hydrolyse de l'eau :



Exemple d'application: Mobilité légère



Intérêts du Magnésium :

- Abondance
- Faible coût
- Revalorisation d'alliages en fin de vie
- Propre et sûr pour le vivant

En comparaison d'autres technologies H₂ :



Hydrolyse avec du magnésium, « *la manière notre* »

Intérêt des alliages de Magnésium

Légèreté

Faible coût

Propriétés mécaniques spécifiques

Bonne coulabilité

Applications

Transports

Électronique

Équipements industriels

Outils portatifs

Safran Landing Systems



Elektron 21

96%



3%



1%



Résistance à la corrosion



Tenue mécanique

Site de production de Bidos : 20 kg de rebuts *Elektron21* / jour



Hydrolyse



1,6 Kg H₂ / jour

=

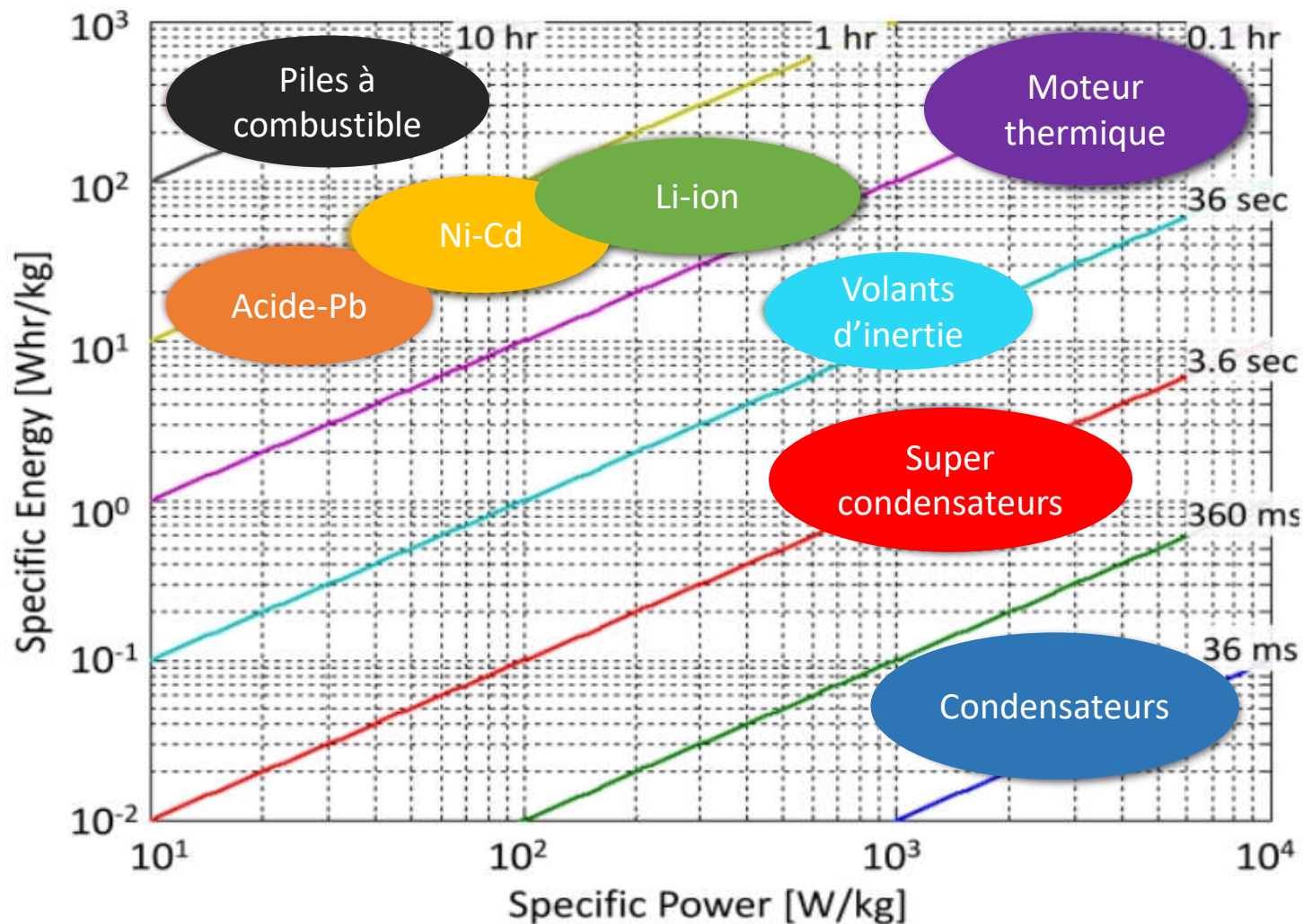
53 KWh / jour



81 KWh de chaleur dégagee

Stockage d'énergie, vers un écosystème de solutions

Conclusion



- Nombreuses technologies de stockage
- Applications variées (transport, réseau, domicile, industrie, portatif)
- Voie électrochimique très riche en solutions :
 - Domaines de puissance/énergie
 - Synthèse de combustibles (H₂, CH₄)
 - Capture de CO₂
- Souvent coûteuse en minerais
- Grands enjeux de recyclage

Sources intéressantes

- batteryuniversity.com
 - <https://culturesciences.chimie.ens.fr>
 - <https://renseigner.com/technologie/energie-electrique/batteries>
 - Jean-Marie Tarascon, collègue de France
 - <https://www.youtube.com/@tdewitt451>
 - <https://www.youtube.com/@BillyWu>
- Slides : 24/25

Objectifs

- Compréhension du principe de base du stockage électrochimique de l'énergie
- Panorama des technologies existantes et applications correspondantes
- Enjeux du développement de batteries

- Principe d'une « économie hydrogène »
- Connaissance des moyens de production, de stockage et d'utilisation de l'hydrogène
- Problématiques liées à l'utilisation d'H₂ et voies de résolution explorées