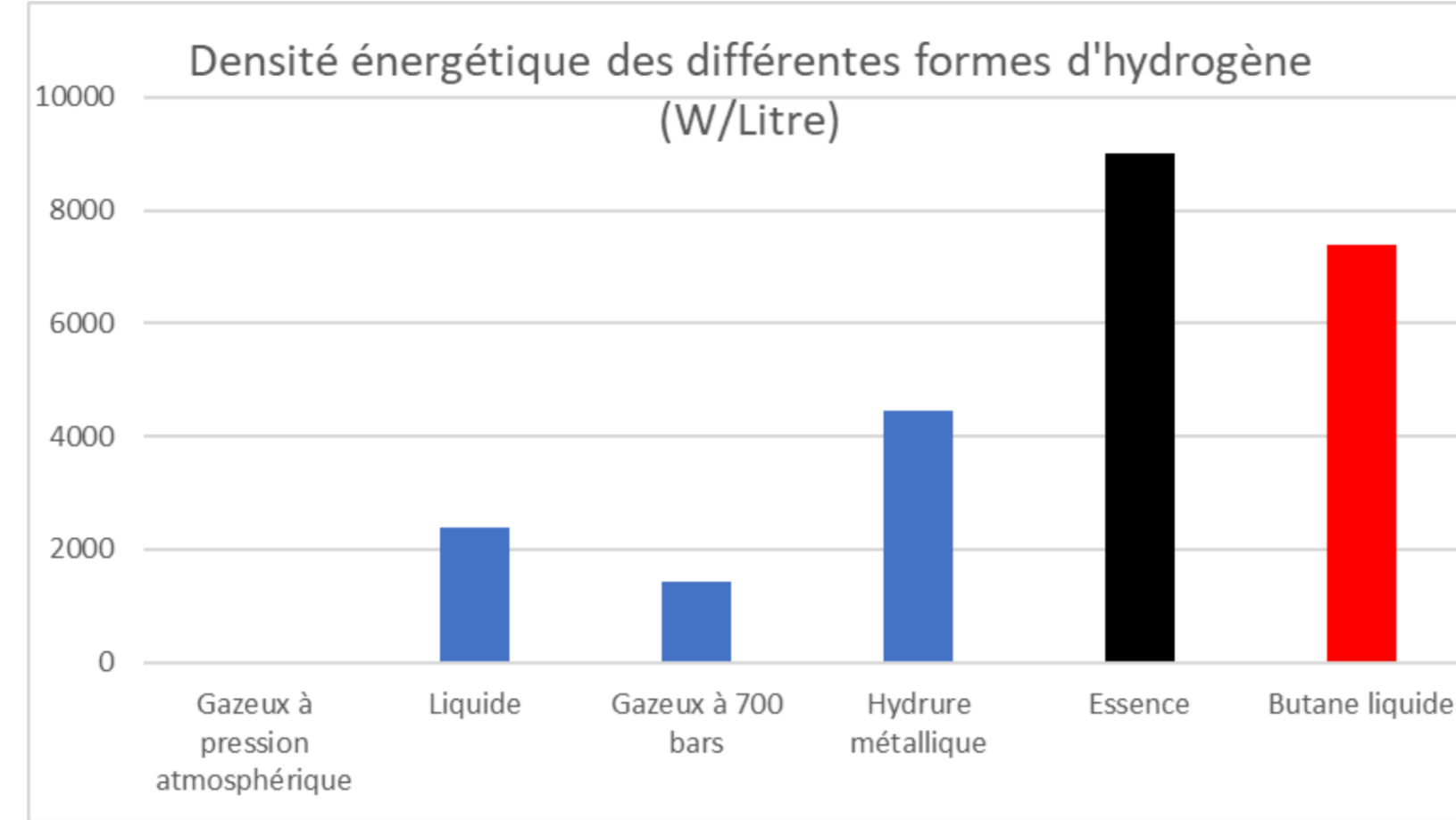


Hydrogène

Introduction : La filière de l'hydrogène se présente comme une alternative à la filière du pétrole et du charbon. Elle suscite beaucoup d'espoirs, car l'hydrogène est simple à produire et n'émet pas de CO2 lors de la combustion.

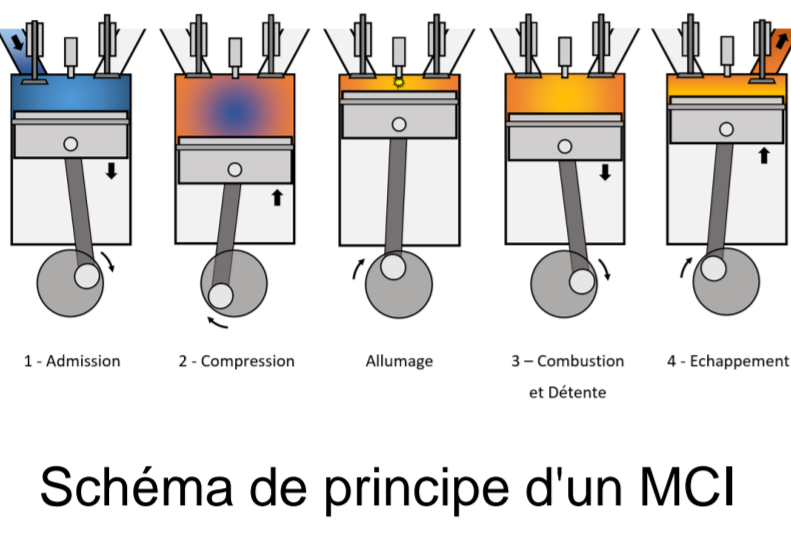
Problématique du stockage : L'hydrogène gazeux est très peu dense énergétiquement, et doit donc être comprimé pour stocker efficacement de l'énergie.

Plusieurs méthodes de stockage : Hydrogène liquide à -253°C, hydrogène comprimé jusqu'à 700 bars, hydrogène sous forme d'hydrures métalliques, huile hydrogénée.



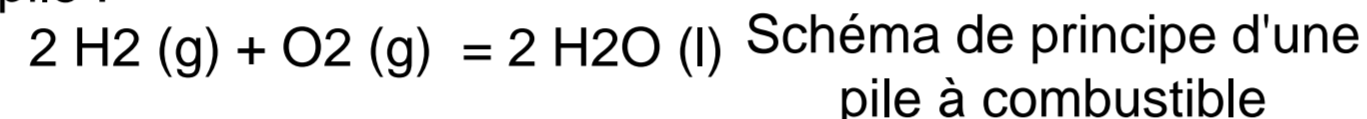
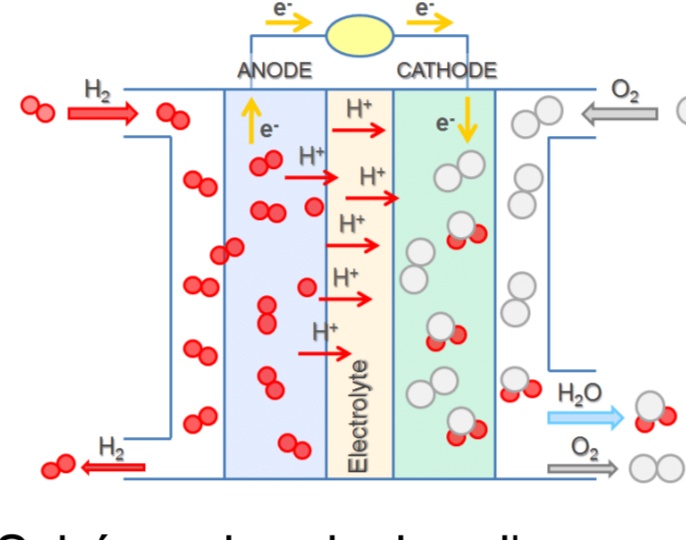
Le Moteur à Combustion Interne (MCI)

Un moteur à combustion interne (MCI) est un type de moteur à combustion dans lequel l'énergie thermique dégagée par la combustion du H2 et du O2 est convertie en énergie mécanique à l'intérieur du moteur.



La Pile à Combustible (PAC)

La pile à hydrogène utilise le dihydrogène et le dioxygène. Il s'agit d'une oxydation contrôlée de H2 et de O2 avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon la réaction chimique de fonctionnement de la pile :



Quelques remarques sur l'hydrogène

- **90% de la production de H2 :** Reformage du méthane. Cette méthode consiste à extraire l'hydrogène contenu dans le méthane en le faisant réagir avec de l'eau, à haute pression, et à haute température.

- Une méthode **plus écologique** est celle de l'électrolyse haute température, utilisant les ENR.

- Conserver l'H2 liquide à -253° ne s'effectue pas sans **pertes**. Il faut un réservoir de type « thermos ». Malgré son enveloppe isotherme, il **s'évapore continuellement** en bouillant.

- Avec un MCI, le rendement est de 25%, contre 50% avec une PAC, mais la PAC basse température est fabriquée avec des **matériaux chers et rares**, ce qui peut limiter la production sur le plan économique.



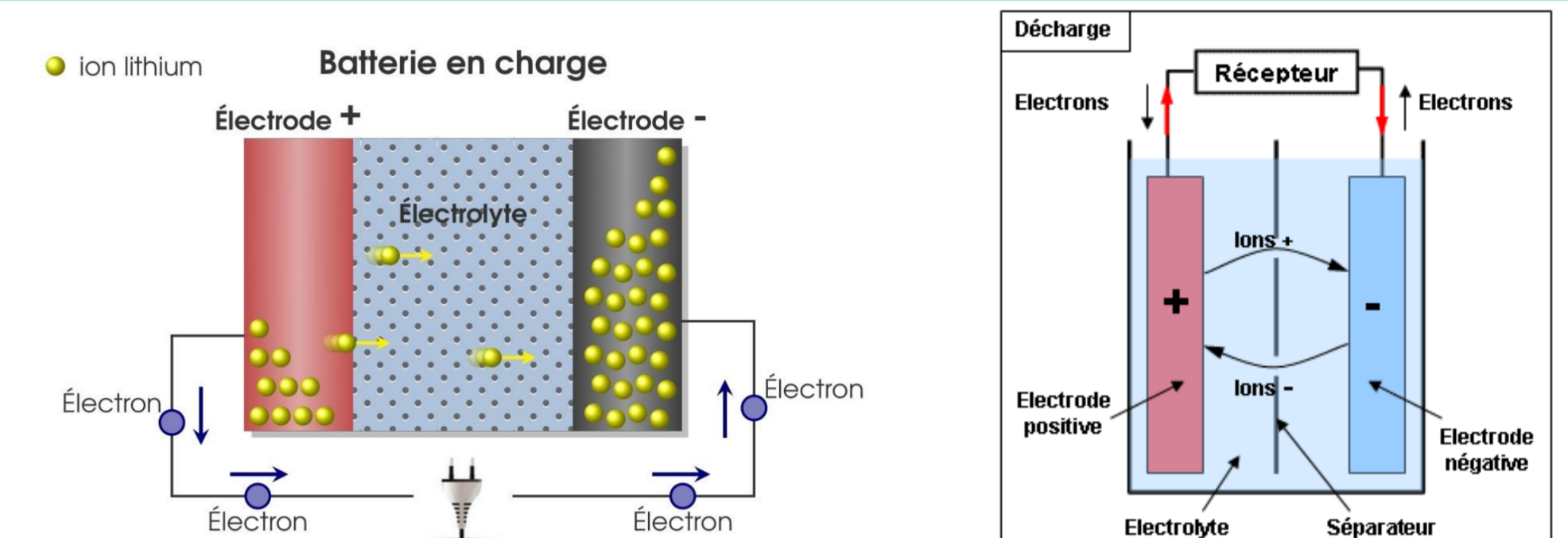
Batteries

Une première solution potentielle à la problématique de stockage et de combustion est la **production massive de batteries**. Leur avènement ne date pas d'hier, mais de presque deux siècles, pourtant, celles-ci sont encore omniprésentes dans des domaines très variés.

Batterie	+	-
Plomb	- Robustesse - Faible coût	- Densité énergétique - Toxicité et bilan environnemental
Lithium-ion	- Densité énergétique - Fort potentiel d'amélioration	- Dangerosité - Nombreuses normes - Coût important
NiMH	- Viable également en condition hostile - Bilan environnemental	- Auto-décharge

Avantages et inconvénients de certaines batteries

Fonctionnement de la charge et de la décharge



Le recyclage des batteries

La présence de ressources clés (terres rares, lithium, ...) dans les batteries pose le problème de la gestion du stock des constituants stratégiques des batteries actuelles.

Quelques remarques sur le recyclage de batteries

- Il est impossible de créer une **économie circulaire du lithium**, pour cause de contraintes de pureté non respectées après recyclage des batteries.

- Il faut maximiser le recyclage des véhicules thermiques : Le recyclage des ressources est deux fois moins énergivore que leur extraction.

- La durée de vie moyenne est à considérer avec précaution : celle de la batterie au Plomb est **deux fois supérieure** à celle de la batterie Lithium-ion ou NiMH par exemple.

- **46 % des batteries Li-ion** seulement sont actuellement recyclées.

Voiture

Comment utiliser l'H2 dans une voiture

- MCI : +++ : technologie éprouvée
- PAC + Moteur électrique : +++ : rendement (50%)
- Rendement (25%), bruit
- Fiabilité, coût

Comment stocker l'H2 dans une voiture

- sous forme liquide : +++ : plus grande densité énergétique
- à 700 bars : --- : 1 à 5% de pertes / jour, nécessité de maintenir à -250°
- Moins cher
- Moins dense

➔ **A moyen terme, le stockage à 700 bars est la solution la plus réaliste.**

	H2 700 bars	Batterie
Rendement (de la pompe aux roues)	25%	80%
Capacité et Volume	2,1 kWh / kg de réservoir (0,66 à rendement équivalent) 1,2 kWh / L (0,4 à rendement équivalent)	0,2 Wh / kg 0,6 kWh / L
Temps de recharge	3 à 5 min	40 min (recharge rapide) >10h (recharge sur secteur)
Recyclage	A priori possible	Possible pour la majorité des composants mais peu rentable
Ressources	Platine	Lithium
€€€	PAC à 500€/ kW de puissance	400€ / kWh
Pour une autonomie de 100km	H2	H2
Prix	12,5 k€ (PAC) / 10 k€ (batterie)	Prix 42,5 k€ (PAC) / 35k€ (batterie)
Réservoir	20 kg // 40 L / 200 kg // 40 L	Réservoir 120 kg // 400 L / 500 kg // 140 L

Quelle recharge ?

Filière Hydrogène

Coût de l'installation d'une pompe estimé à **plusieurs millions d'euros**
Réseau de recharge peu voire pas développé et coûteux et compliqué à mettre en place

Filière électrique

Pas besoin d'infrastructure supplémentaire pour une recharge simple (>10h) ou **2000€** (dont 1000€ d'installation) pour une borne de recharge en 3 à 5h

Conclusion

- Nombre de voitures à H2 : **6500** (dont 0 appartenant à des particuliers en France)
- Nombre de voitures électriques : **2 millions**

La filière hydrogène est beaucoup moins mature que l'électrique dans le domaine de la voiture individuelle, ce qui fait qu'à moyen terme **la voiture électrique restera plus fiable et moins chère**, bien que la voiture à hydrogène promette une plus grande autonomie.

Des travaux sont également en cours sur l'huile hydrogénée : liquide, plus énergétique, et moins dangereuse que l'H2 à 700 bars.

Stockage

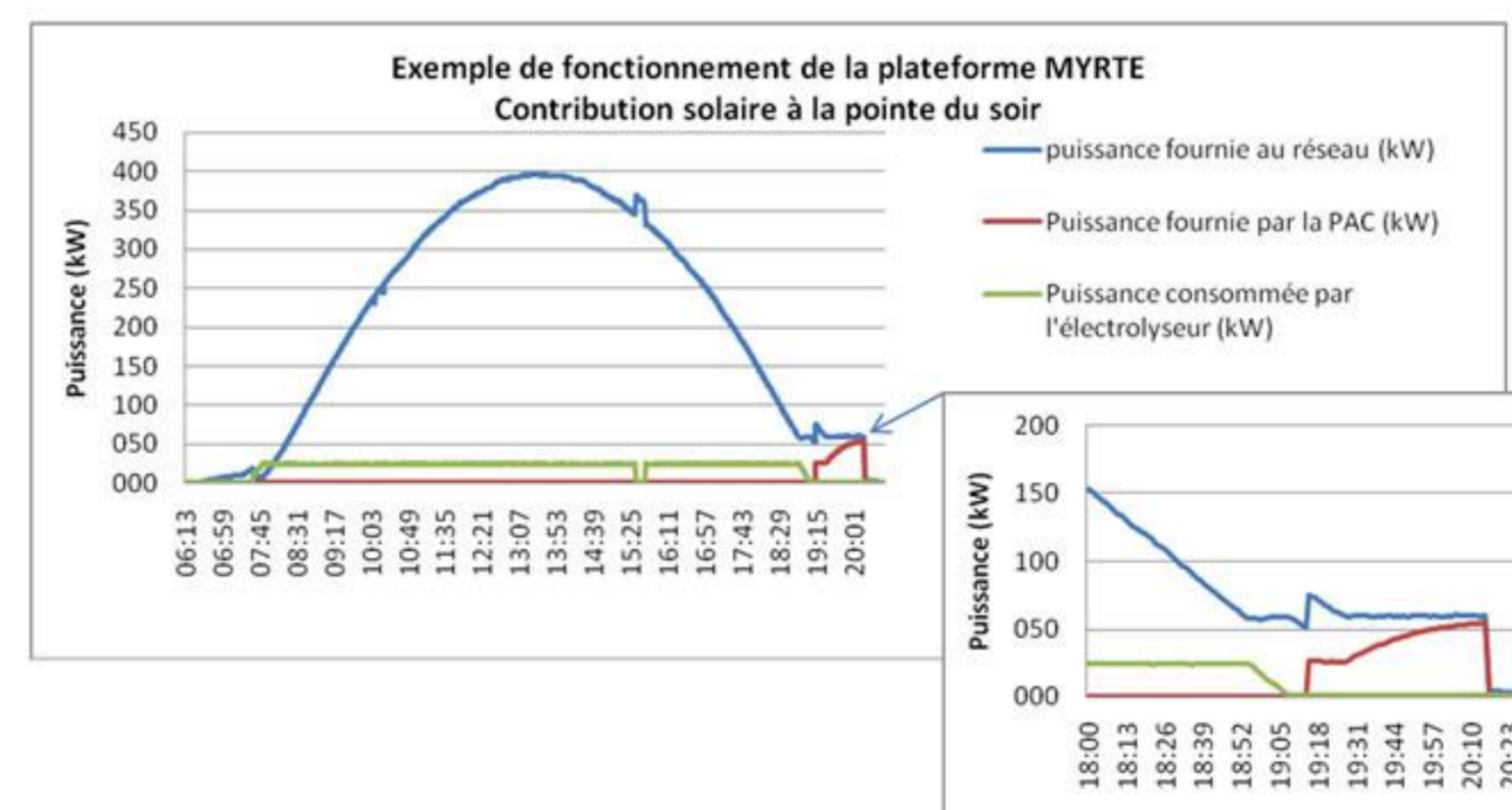
Principe :

Le développement des énergies renouvelables, nécessite un système de **lissage de la production**, qui ne peut être constante et ne peut s'adapter à la demande, à cause de **l'intermittence** du vent et de l'ensoleillement, journalière et saisonnière. Une solution est alors le stockage de l'énergie en période de forte production ou de faible demande, sur des échelles de temps variables. Le stockage, aujourd'hui effectué à 99% par des systèmes de pompage-turbine d'eau, est envisagé par batterie ou sous forme d'hydrogène.

Systèmes existants

Stockage centralisé

Aujourd'hui essentiellement utilisé en milieu isolé, sans possibilité de régulation par un réseau voisin, le stockage va être amené à équiper les centrales ENR pour le lissage de la production.



Stockage délocalisé

Le stockage délocalisé chez le consommateur est encore peu développé et est plutôt aujourd'hui envisagé pour stocker la production des panneaux PV.



	Batterie (Lithium-Ion)	Hydrogène
Capacité	1Wh à 10MWh	10kWh à 10GWh
Réactivité (délai de réaction)	Forte (1 ms)	Moyenne (100 ms)
Rendement	Proche de 100%	Electrique : 35% (45% dans le futur) Electrique + Thermique (valorisable) : 80%
Prix (€/kW)	300 à 3000	3000 à 5000
Durée de stockage	Court terme	Court, moyen et long terme
Durée de vie (un cycle par jour)	1 à 10 ans	25 ans
Eco-conception spécifique au stockage	+ : Projet ELSA de réutilisation des batteries de voitures obsolètes (capacité de stockage inférieure à 75% de la capacité initiale) permettra de réduire l'empreinte carbone et le prix.	+ : Recyclage des cuves de stockage en métal possible.

Conclusion

Les stockages par hydrogène et par batterie ont chacun leurs avantages pour permettre de réguler la production des ENR. Il n'y a pas de solution parfaitement adaptée à la demande, mais une hybridation du stockage par batterie et par hydrogène permet à une centrale d'atteindre un taux de disponibilité comparable aux centrales thermiques et nucléaires : un projet de 2018 pour la Guyane de centrale PV à stockage (120 MW hydrogène et 20 MW de batterie) estimait un taux de disponibilité de 85%, supérieur aux 83% des centrales thermiques, 82% des centrales nucléaires et 20% des centrales PV.

