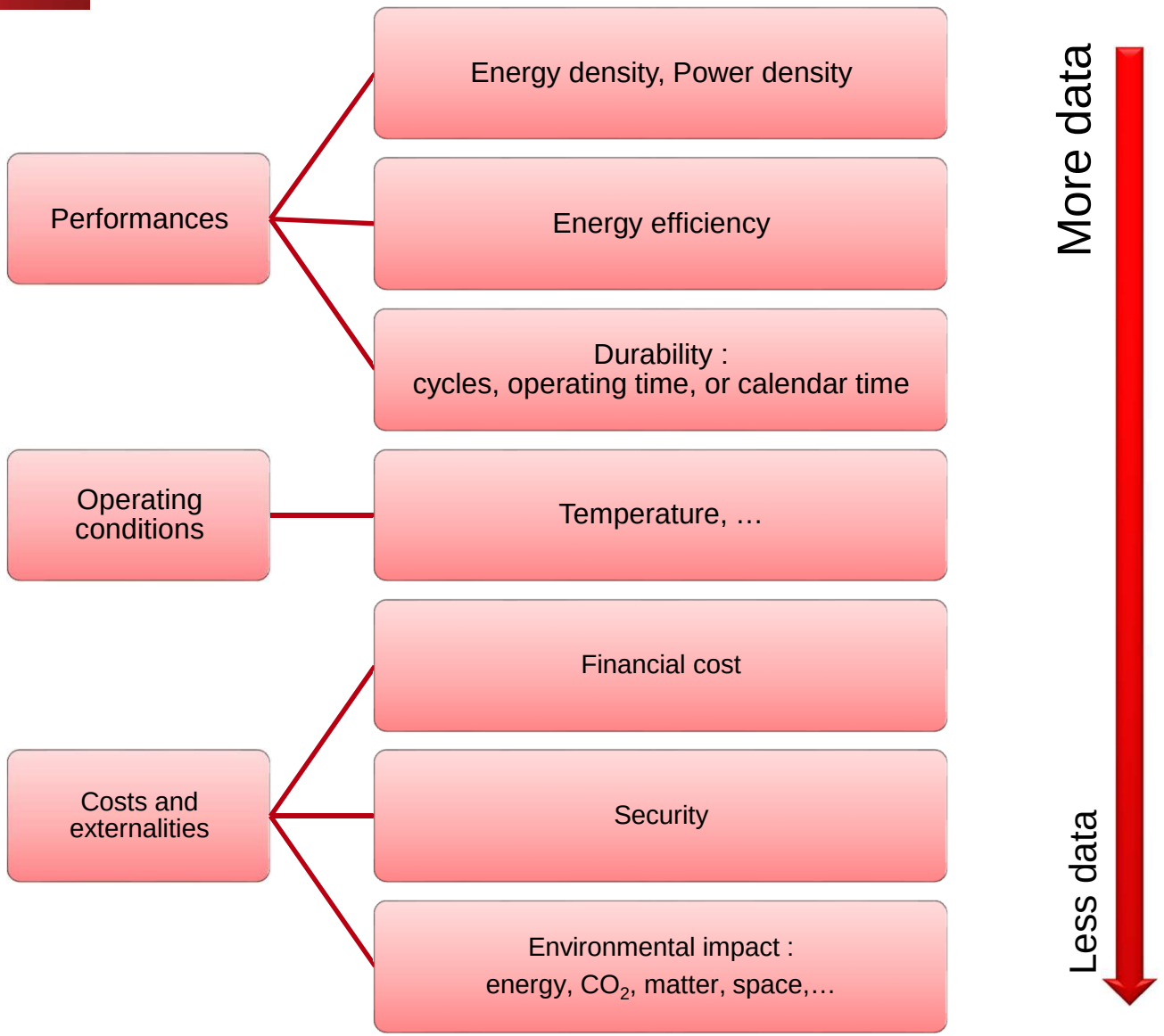
LES BATTERIES ET LEUR UTILISATION EN VEHICULE ELECTRIQUE

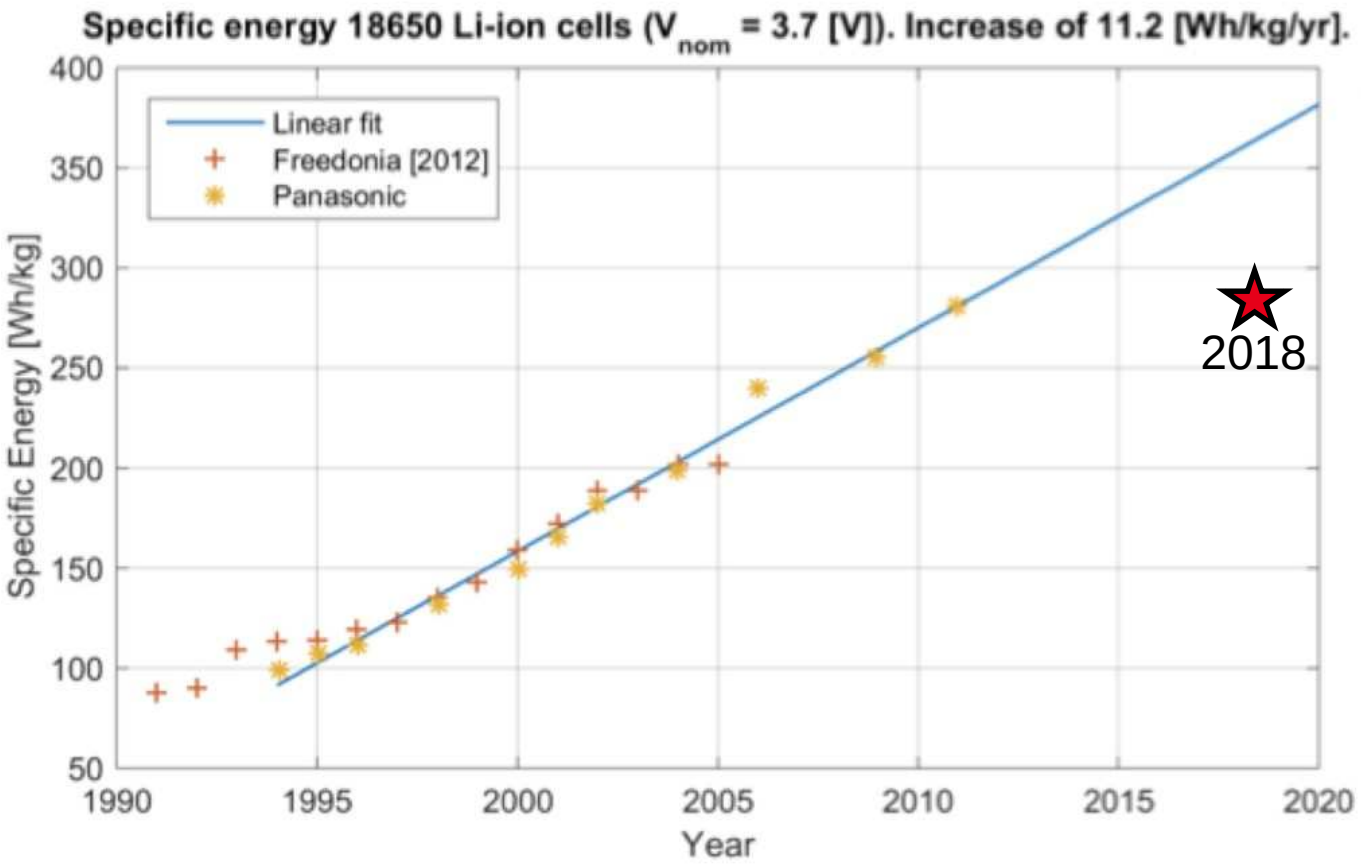
Université d'été Sauvons Le Climat 14/09/2018 Fabien Perdu (DEHT)

CARACTÉRISTIQUES D'UN STOCKAGE



CRITÈRES D'ÉVALUATION DES BATTERIES

Battery capacity



Prof Maarten Steinbuch, Director Graduate Program Automotive Systems, Eindhoven University of Technology

CRITÈRES D'ÉVALUATION DES BATTERIES

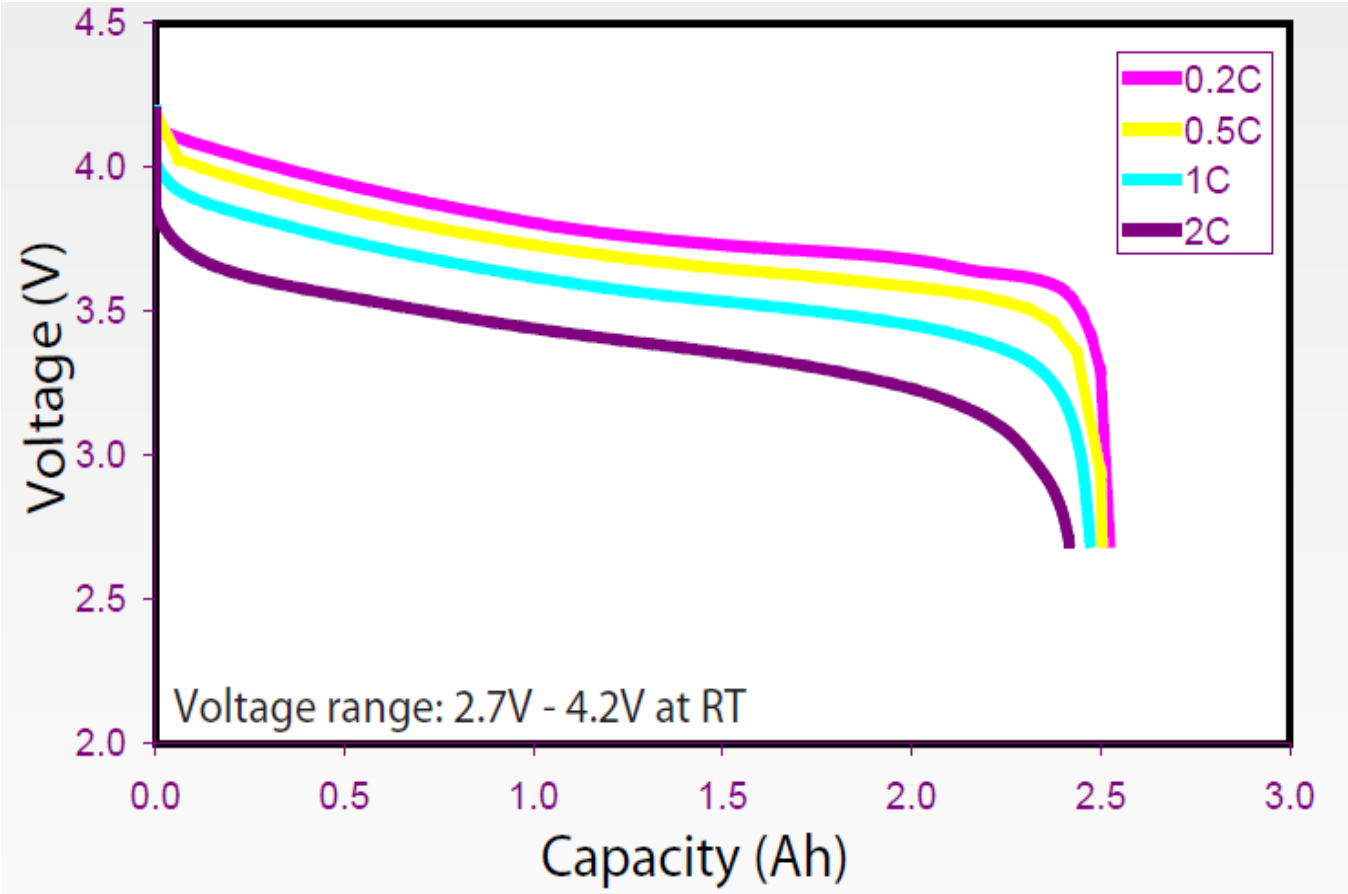
- **La densité d'énergie commence à stagner**
  - Jusqu'à aujourd'hui , toujours la même chimie utilisée (ou des variantes)
  - Gains sur les process, la finesse des éléments,…
  - Aller un peu trop loin a de grosses implications sur la sécurité

Besoin d'une réelle rupture sur la chimie pour aller plus loin :
tout solide
lithium-soufre
lithium-air?

Avec rupture, on peut raisonnablement espérer un doublement de la densité d'énergie, pas tellement plus.

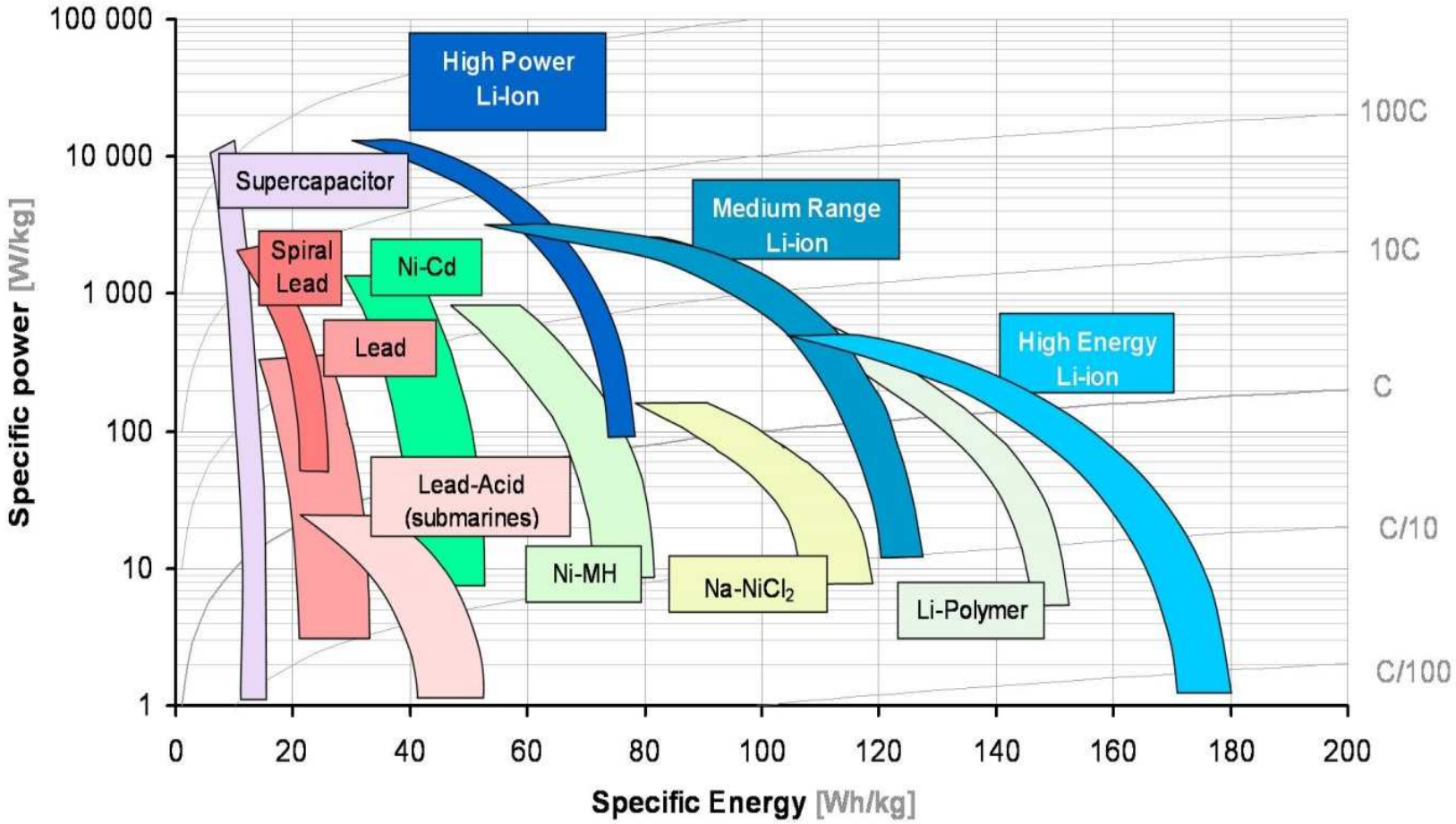
CRITÈRES D'ÉVALUATION DES BATTERIES

- **Compromis Energie / Puissance**
  - Pour une même cellule, plus je tire fort, moins je vais loin



CRITÈRES D'ÉVALUATION DES BATTERIES

- **Compromis Energie / Puissance : Diagramme de Ragone**
  - Plus d'énergie : électrodes épaisses, collecteurs de courant fins,…

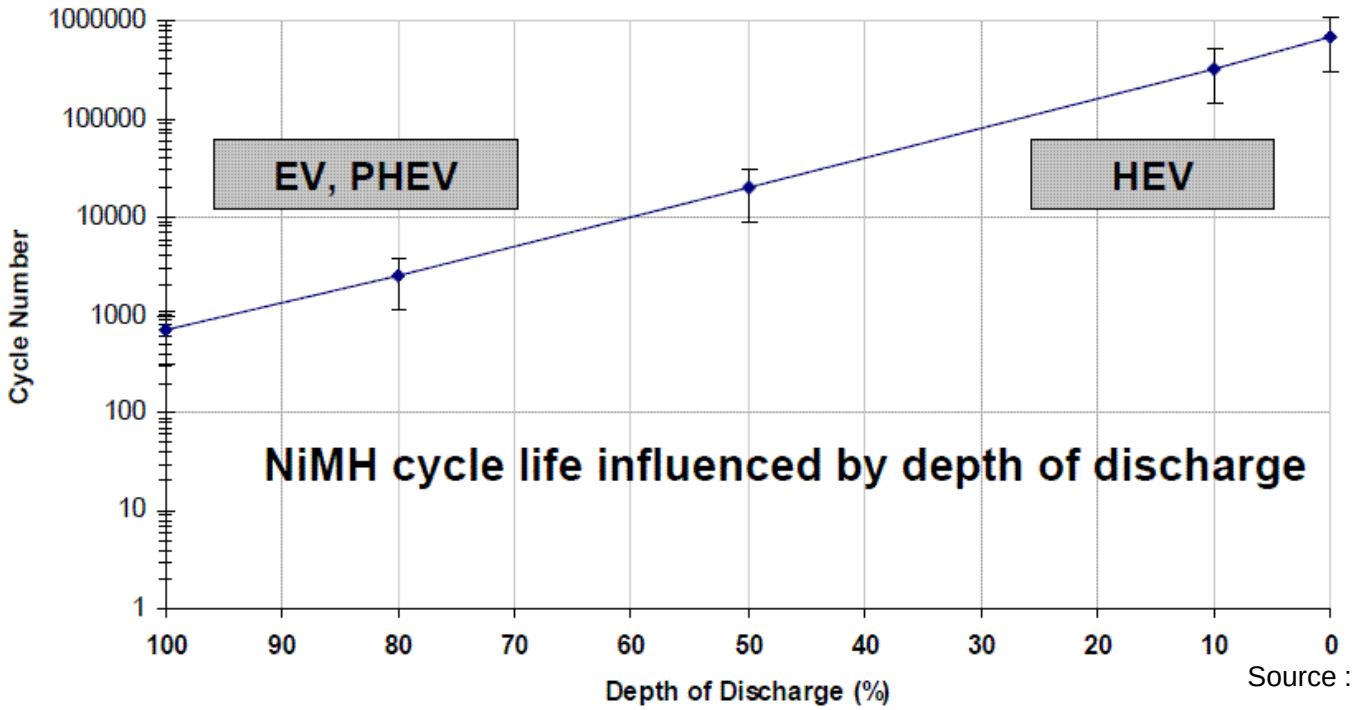


CRITÈRES D'ÉVALUATION DES BATTERIES

- **Compromis Energie / Cyclabilité**
  - Profondeur de charge/décharge plus faible

    ⇔ Investissement plus lourd, mais meilleur retour sur investissement.

Limite liée à la vie calendaire : 1 cycle/jour sur 20 ans = 7300 cycles



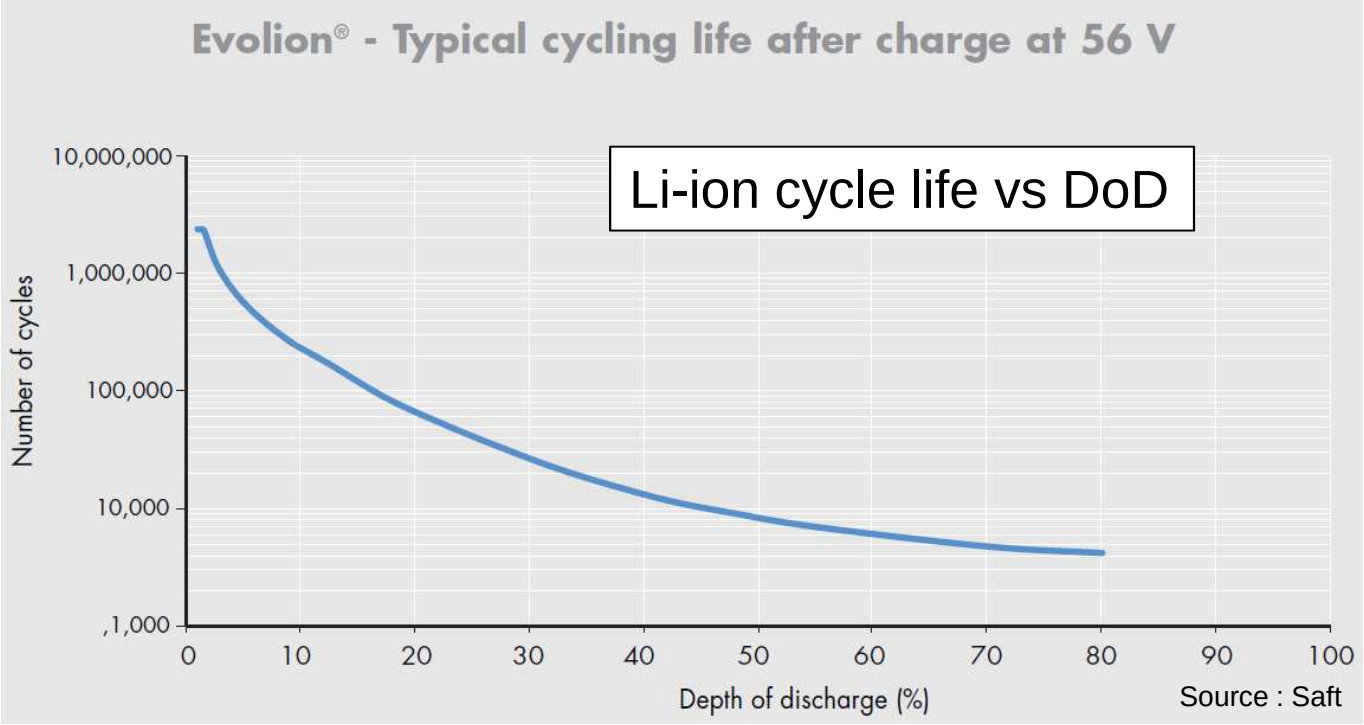
Source : Ovonik

CRITÈRES D'ÉVALUATION DES BATTERIES

- **Compromis Energie / Cyclabilité**
  - Profondeur de charge/décharge plus faible

    ⇔ Investissement plus lourd, mais meilleur retour sur investissement.

  Limite liée à la vie calendaire : 1 cycle/jour sur 20 ans = 7300 cycles

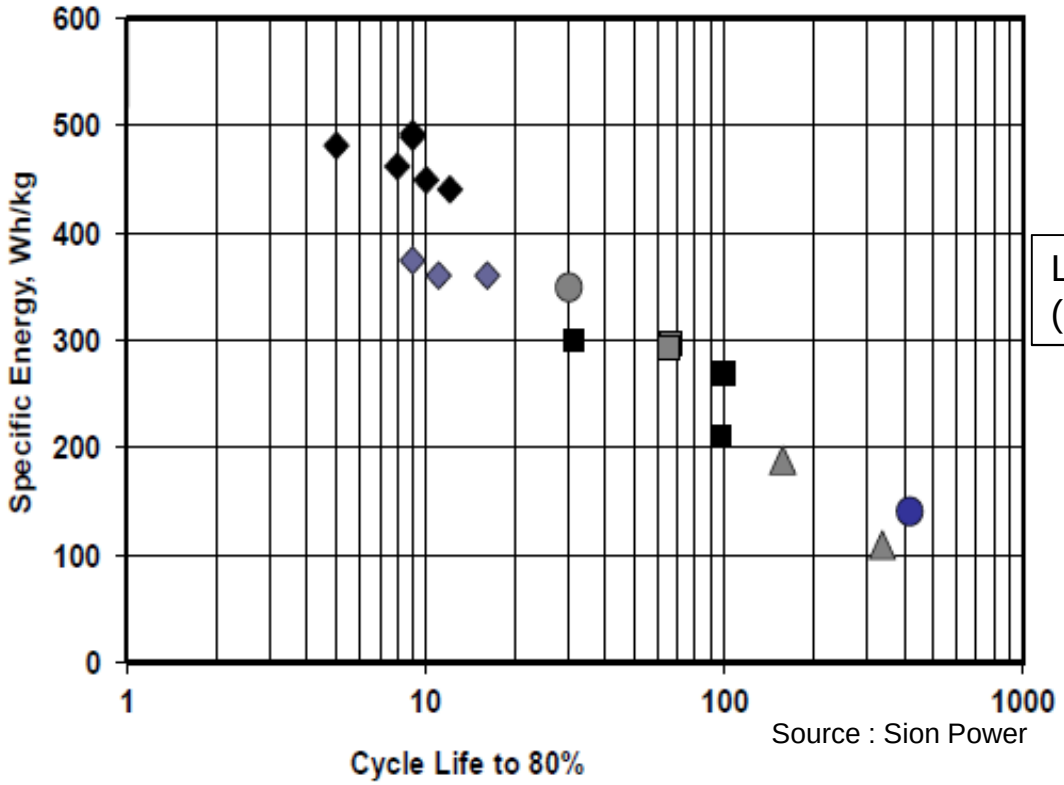


Li-ion véhicule
500-1000 cycles

Li-ion stationnaire
5000-10000 cycles

CRITÈRES D'ÉVALUATION DES BATTERIES

- **Compromis Energie / Cyclabilité**
  - Moins d'électrolyte
    => meilleure densité d'énergie mais durée de vie moins bonne

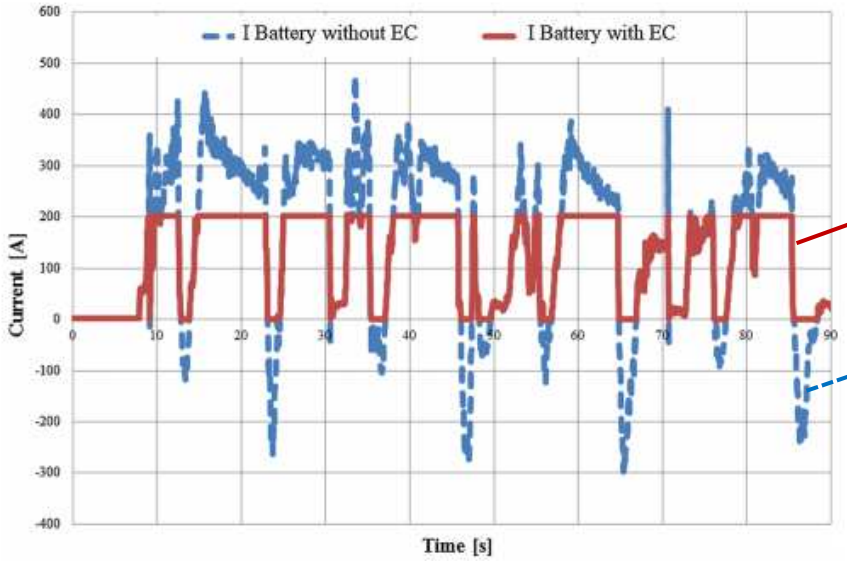


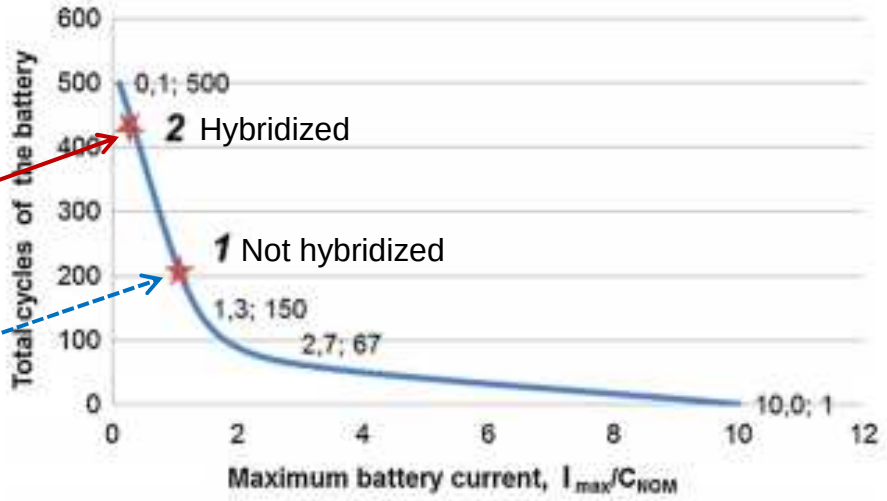
Li-S cycle life vs energy density (effect of electrolyte amount)

Source : Sion Power

CRITÈRES D'ÉVALUATION DES BATTERIES

- **Compromis Puissance / Cyclabilité**
  - Une batterie sollicitée à forte puissance vivra moins longtemps
  - **L'hybridation** avec des systèmes de puissance (ex. supercondensateurs) permet d'améliorer la durée de vie



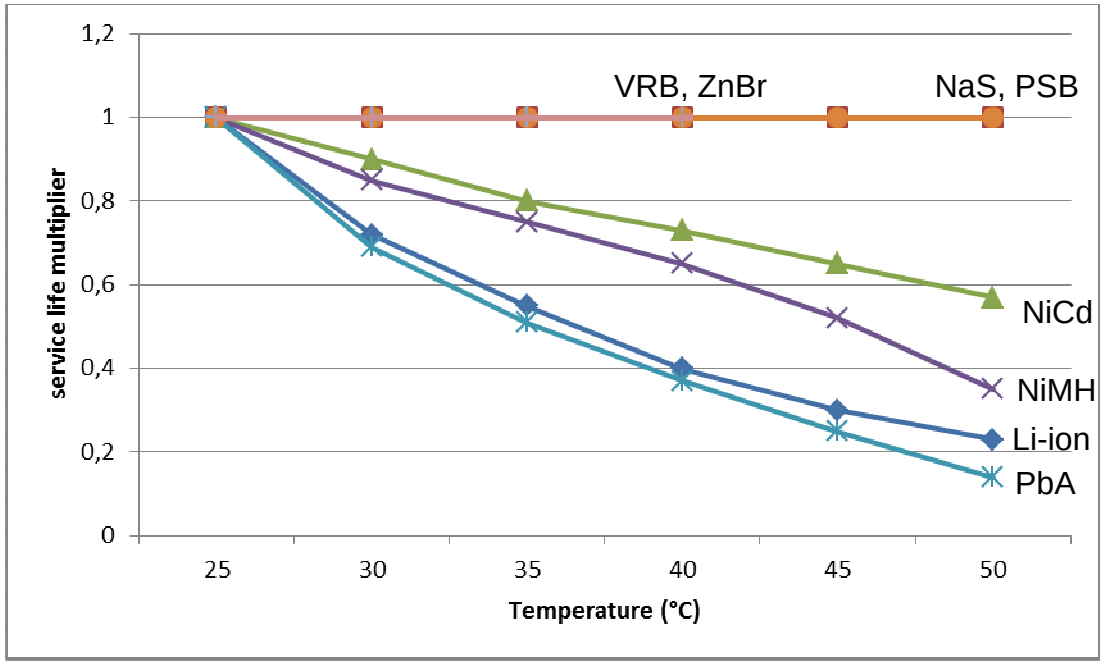


PbA cycle life vs C-rate

Source : ENEA

CRITÈRES D'ÉVALUATION DES BATTERIES

- **Effet de la température sur la durée de vie**
  - Les températures extrêmes réduisent la durée de vie
  - Exceptions : batterie haute température (NaS, $NaNiCl_2$)
  - Il est généralement plus rentable de réguler la température plutôt que d'accepter une durée de vie réduite



Data from Rydh & Sanden, 2005

CARACTÉRISTIQUES D'UN STOCKAGE

Chaque technologie de stockage présente des coûts et externalités

- Un investissement initial (€, MJ_{prim}, kg_{CO2}, …) par MW et/ou par MWh
- Une durée de vie calendaire et/ou en nombre de cycles

L'investissement est dimensionné par le besoin en énergie et en puissance (le plus contraignant des deux)

Pour les durées de stockage très longues (peu de cycles par an)

- Gros investissement à cause de l'énergie (beaucoup de MWh)
- Faible nombre de cycles (limité par la vie calendaire)
- Le coût par énergie déchargée devient prohibitif

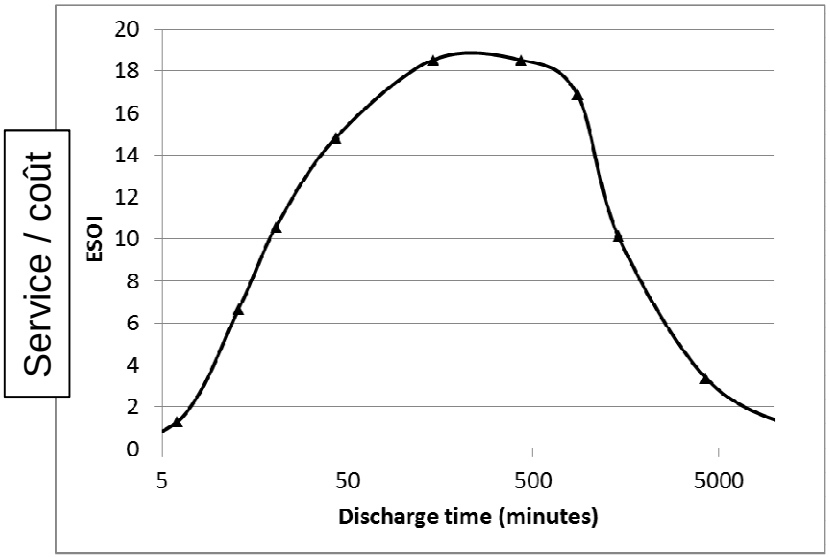
Pour les durées de stockage très courtes (beaucoup de cycles par an)

- Gros investissement à cause de la puissance (beaucoup de MW)
- Système surdimensionné en énergie, seule une fraction est utilisée
- Le coût par énergie déchargée devient prohibitif

CARACTÉRISTIQUES D'UN STOCKAGE

Chaque technologie est donc adaptée à certains temps caractéristiques

Exemple (chiffres arbitraires) pour une batterie Li-ion : de l'heure à la journée



Dimensionnement par la puissance et la cyclabilité
Une faible fraction de l'énergie est utilisée

Dimensionnement par l'énergie et la vie calendaire
Une faible fraction du nombre de cycles maximum est utilisée

Au deux extrêmes les coûts et les impacts environnementaux explosent (/Wh/cycle)

CARACTÉRISTIQUES D'UN STOCKAGE

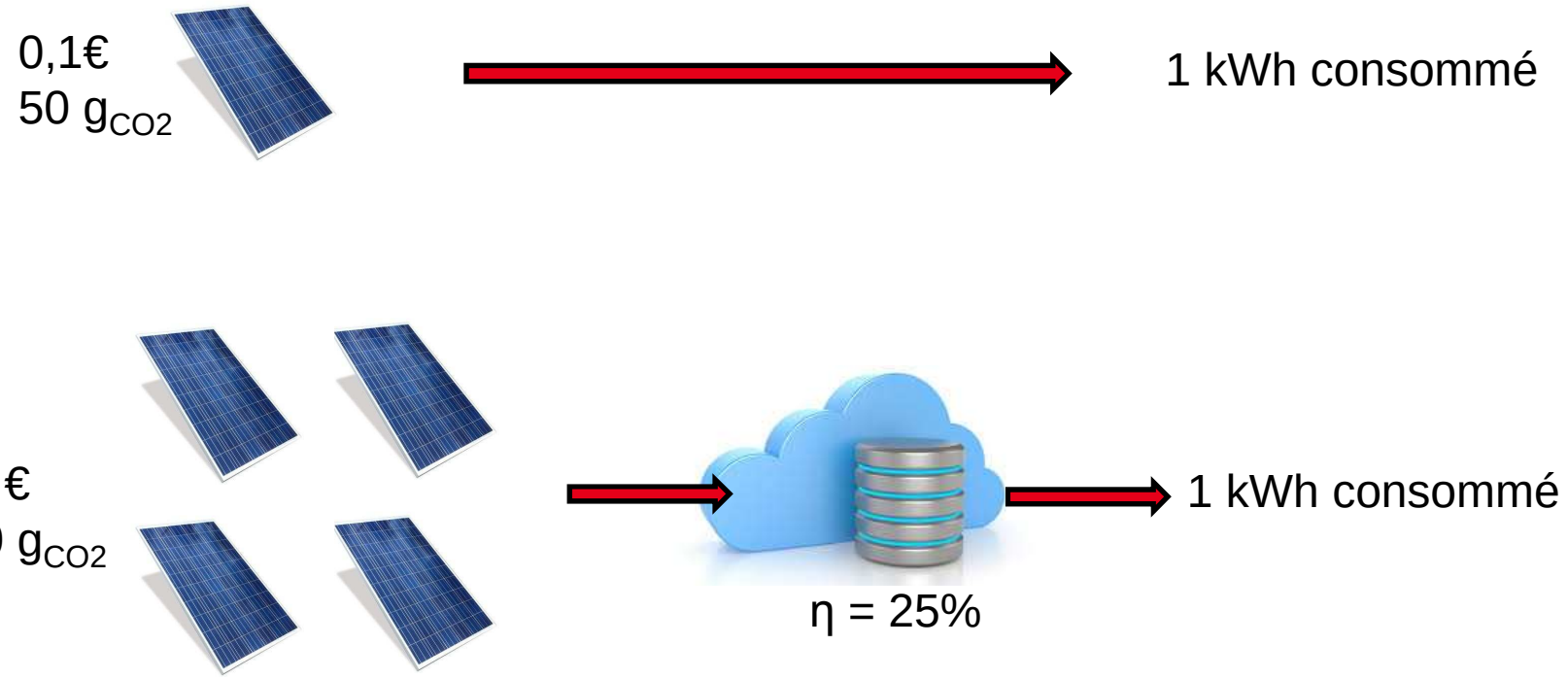
- **A quel coût peut-on stocker?**

- **Si on veut 0.05€/kWh/cycle**
  - Un cycle par jour => 350€/kWh
  - Un cycle par semaine => 50€/kWh
  - Un cycle par an => 1€/kWh

- **Plus on veut stocker sur des durées longues, plus il faut un stockage bon marché**

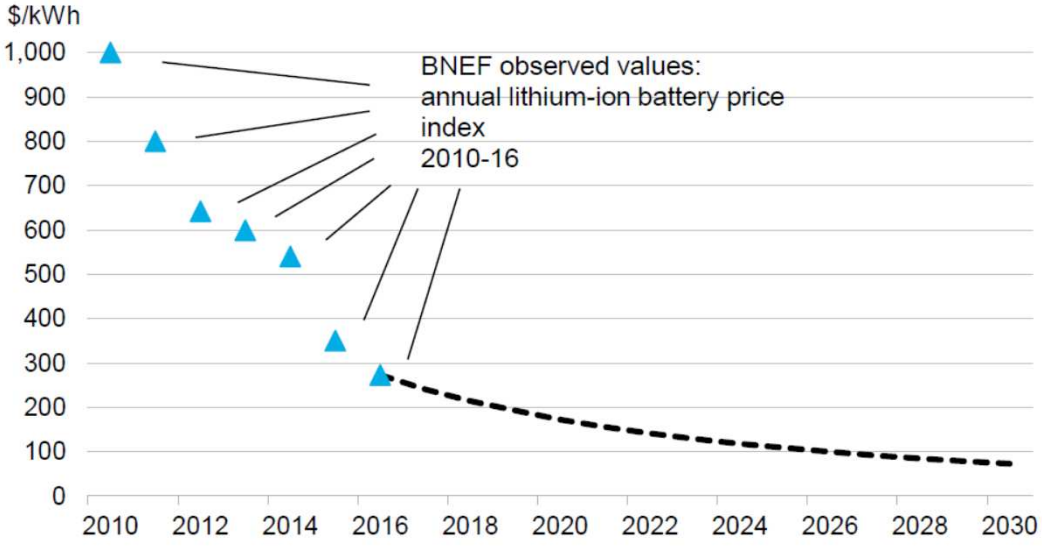
CARACTÉRISTIQUES D'UN STOCKAGE

- **Impact du rendement**
  Exemple d'un rendement de 25% (chiffres arbitraires)

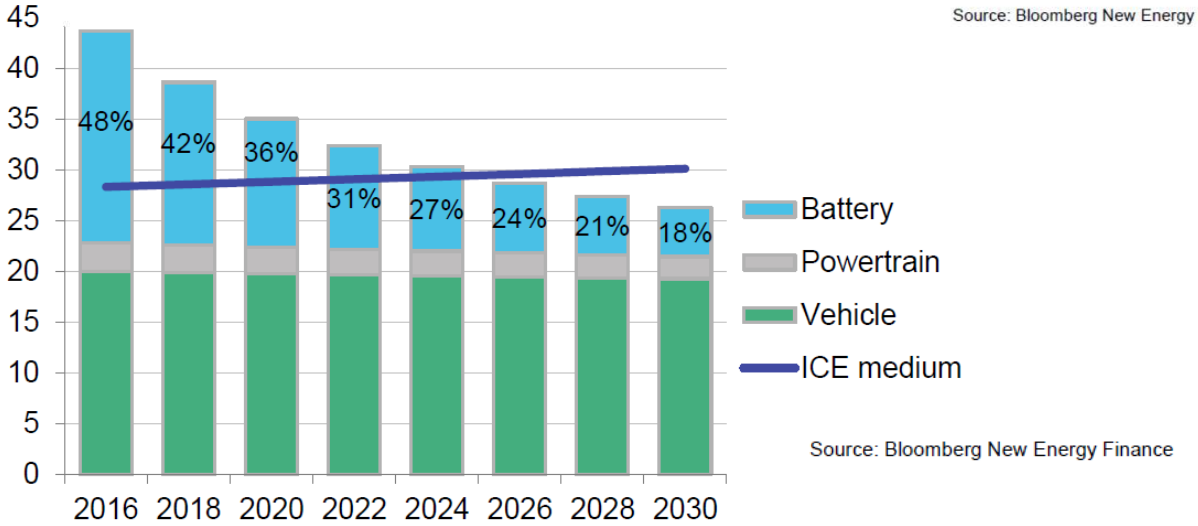


CRITÈRES D'ÉVALUATION DES BATTERIES

- **Evolution du coût des batteries Li-ion**



Source: Bloomberg New Energy Finance



Source: Bloomberg New Energy Finance

Décroissance liée :

- à la densité d'énergie (qui va stagner)
- au process

Mais les matériaux représentent ~50% du coût

=> La baisse devrait ralentir

TECHNOLOGIE DES BATTERIES LI-ION

14/09/2018 | Perdu Fabien

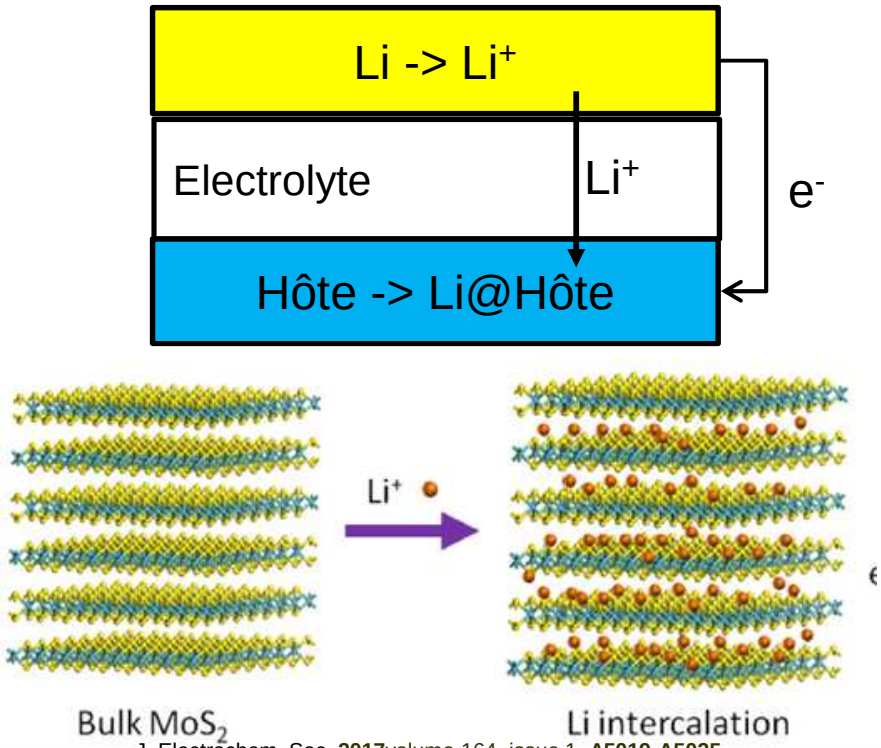
HISTORIQUE ET PRINCIPES DES BATTERIES

Batteries au lithium

- **Tension assez forte car potentiel Li/Li$^+$ très bas**
  Typiquement 3 à 4V selon l'électrode positive

- **Cellules à Lithium métal: Wittingham, 1976**
  Hôte = MoS_2 ou TiS_2

- **Développé par Moli Energy dans les années 1980s**
  Atteignent 100Wh/kg
  (30Wh/kg pour le plomb)

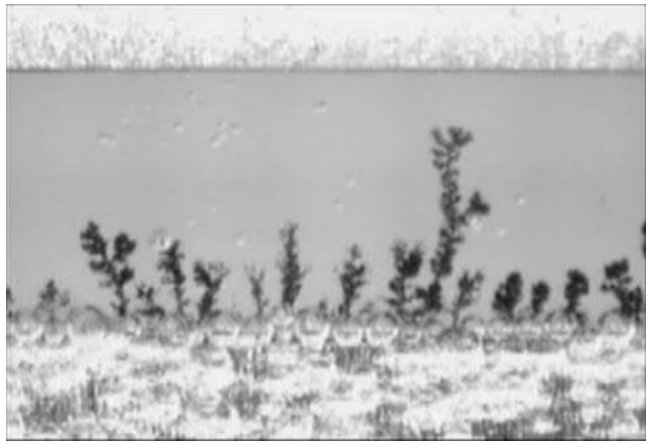


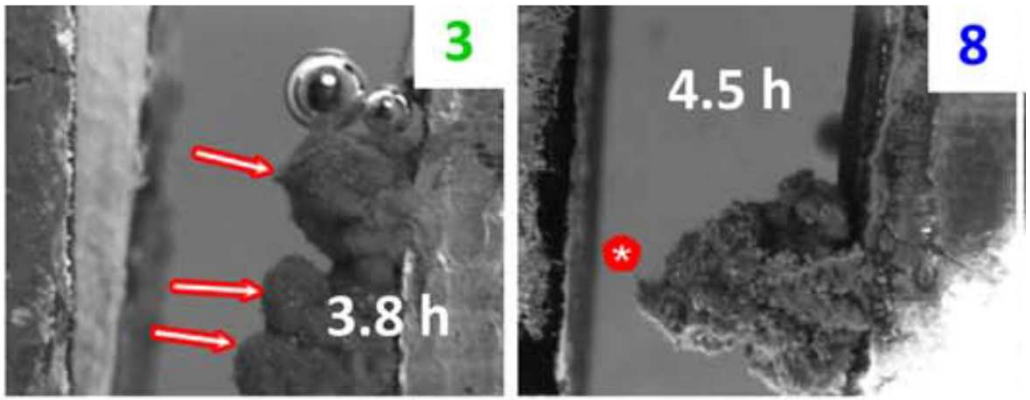
J. Electrochem. Soc. **2017**volume 164, issue 1, **A5019-A5025**

HISTORIQUE ET PRINCIPES DES BATTERIES

Problème des dendrites

- Redépôt du lithium métal à la recharge





- Risque de court-circuit interne et dégagement d'énergie : explosions, incendies de téléphones portables (déjà!)

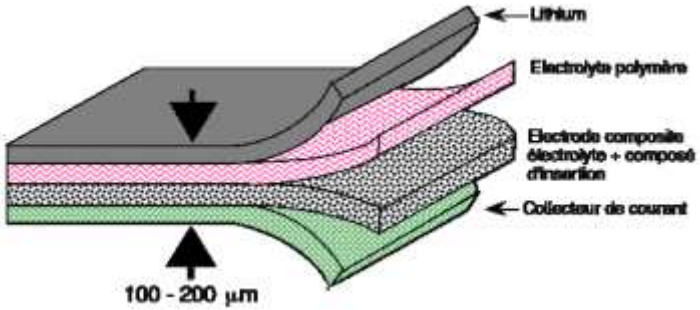
- Filière arrêtée en 1989.

HISTORIQUE ET PRINCIPES DES BATTERIES

Deux solutions au problème des dendrites

1. Confiner le lithium métal derrière un solide (le graal)

- Inorganique (travaux en cours, difficulté de mise en œuvre)
- Polymère
  Voie initiée par Michel Armand.
  Utilisée dans les Blue Car (Autolib)
- Limites des polymères actuels
  - Fonctionnement à 80℃
  - Tension limitée => choix de matériaux actifs et densité d'énergie limités



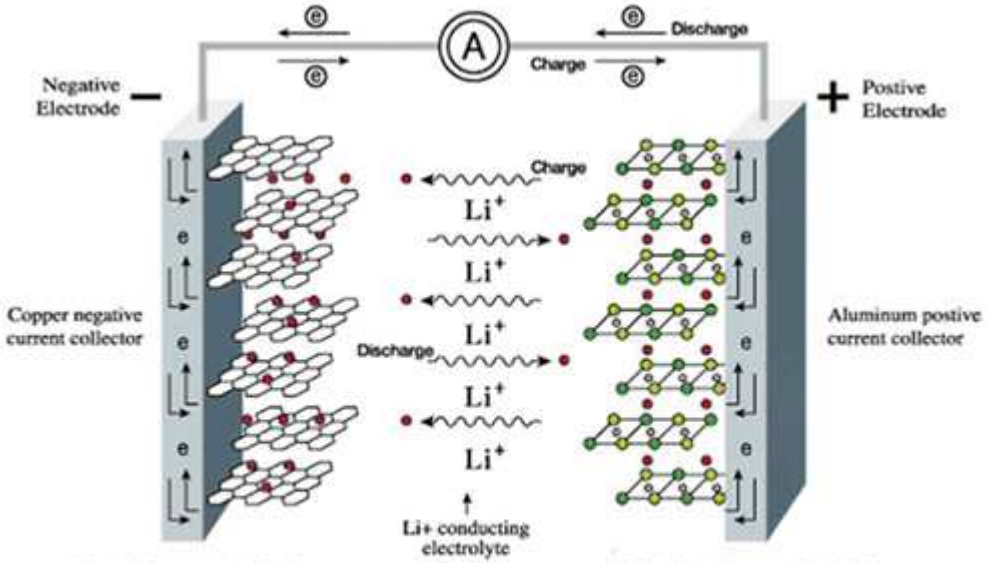
- Indispensable pour Li-Soufre, Li-air,…

HISTORIQUE ET PRINCIPES DES BATTERIES

Deux solutions au problème des dendrites

2. Stocker le lithium sous forme non métallique = Li-ion ou ‘rocking-chair battery’

Goodenough (1980), commercialisation par Sony en 1991
Nombreuses variantes sur l’électrode positive
Le plus souvent graphite à la négative



Anode material
: graphite, Si, Sn, LTO etc.

Cathode material
: transition metal oxide ($LiCoO_2$, $LiFePO_4$, $LiMn_2O_4$, etc.)

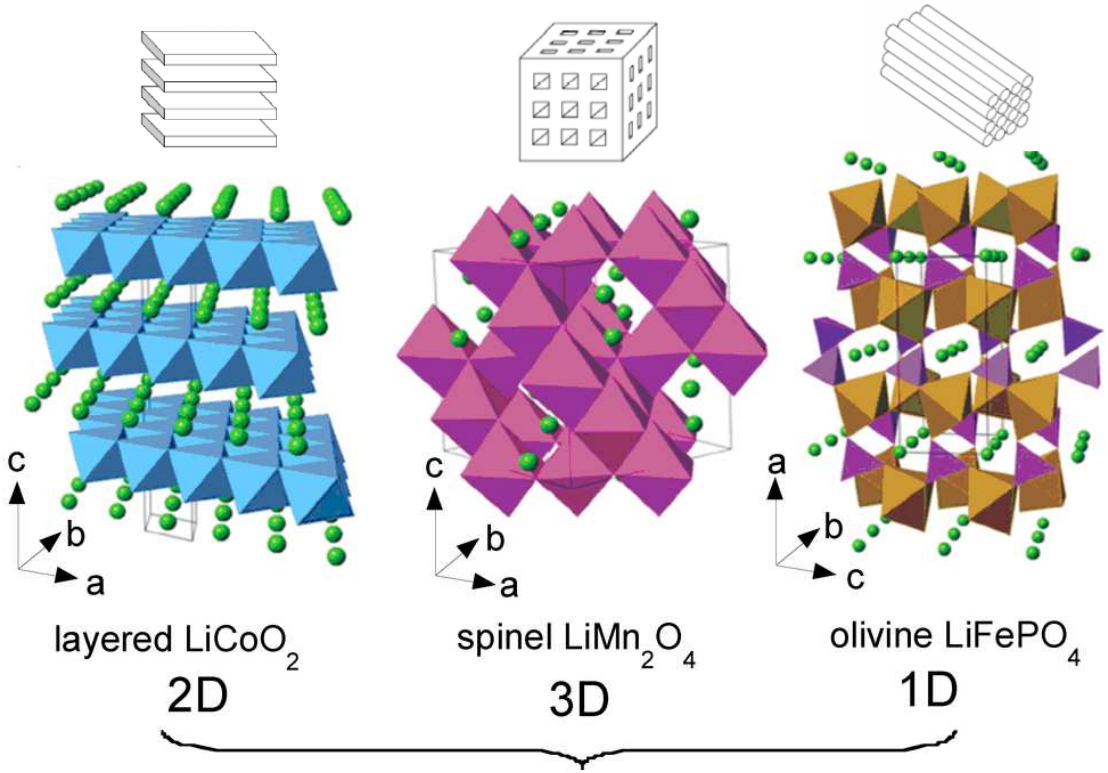
HISTORIQUE ET PRINCIPES DES BATTERIES

Trois grands types de cathodes

1- les composés lamellaires, Ex: LCO, NMC, NCA,…

2- les spinelles, Ex: LMO, spinel 5V, …

3- les composés polyanioniques, Ex: LFP (Olivine), LMP, …

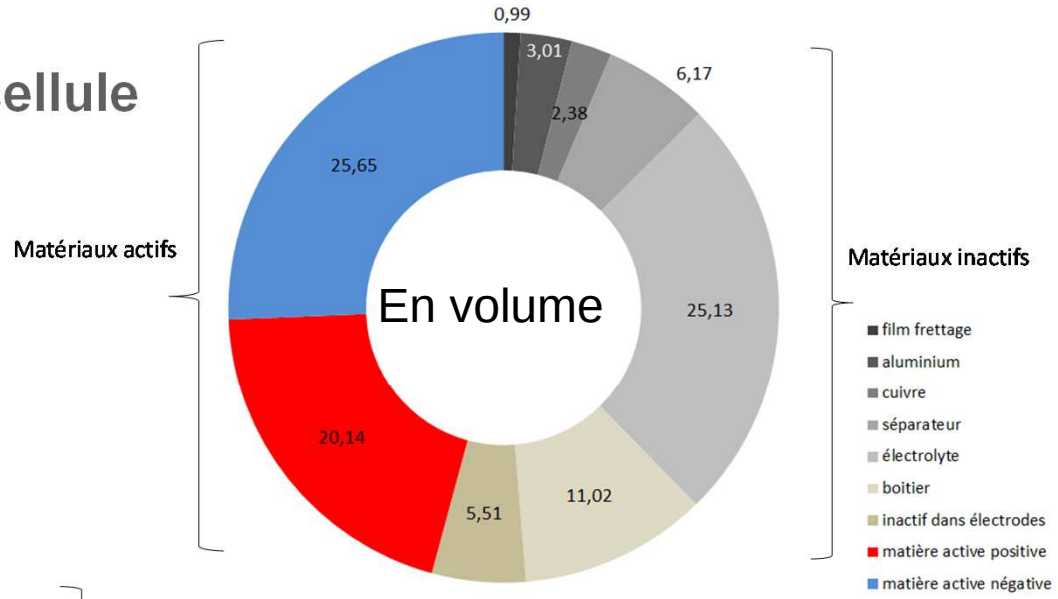


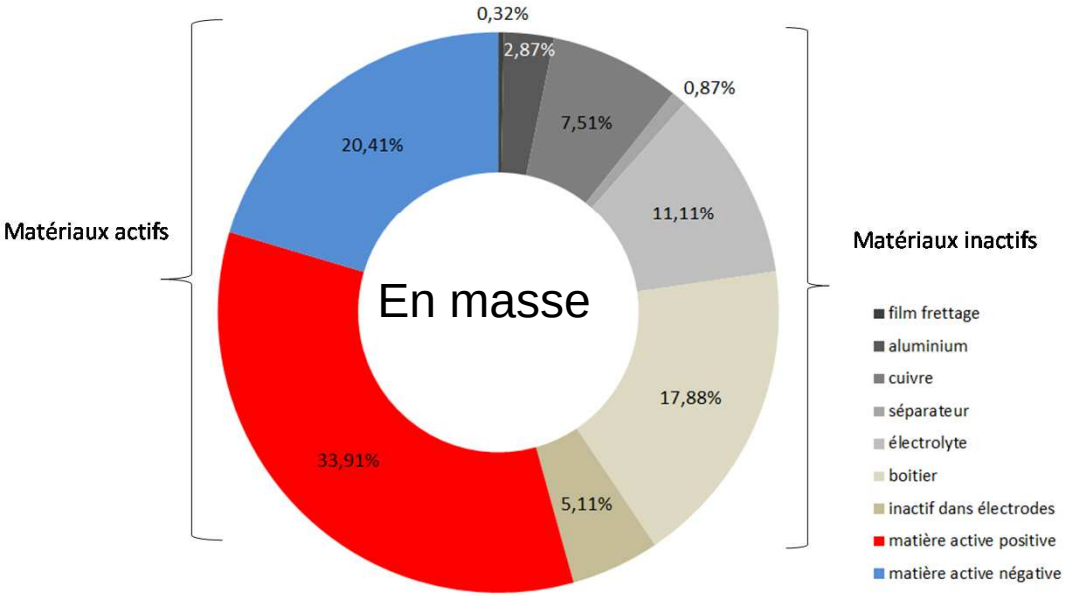
Dimensionnalité du transport du lithium dans la structure

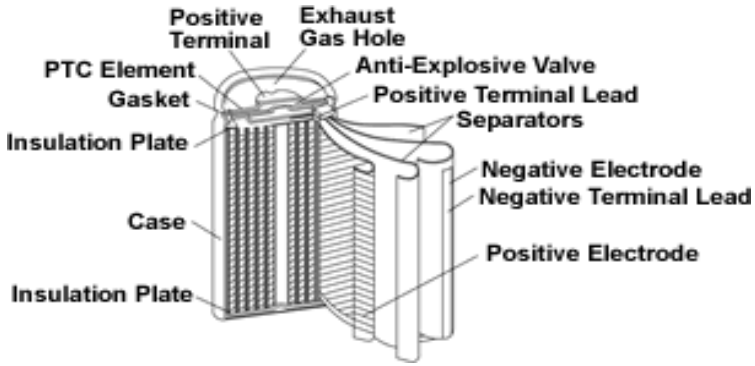
HISTORIQUE ET PRINCIPES DES BATTERIES

Composition réelle d'une cellule

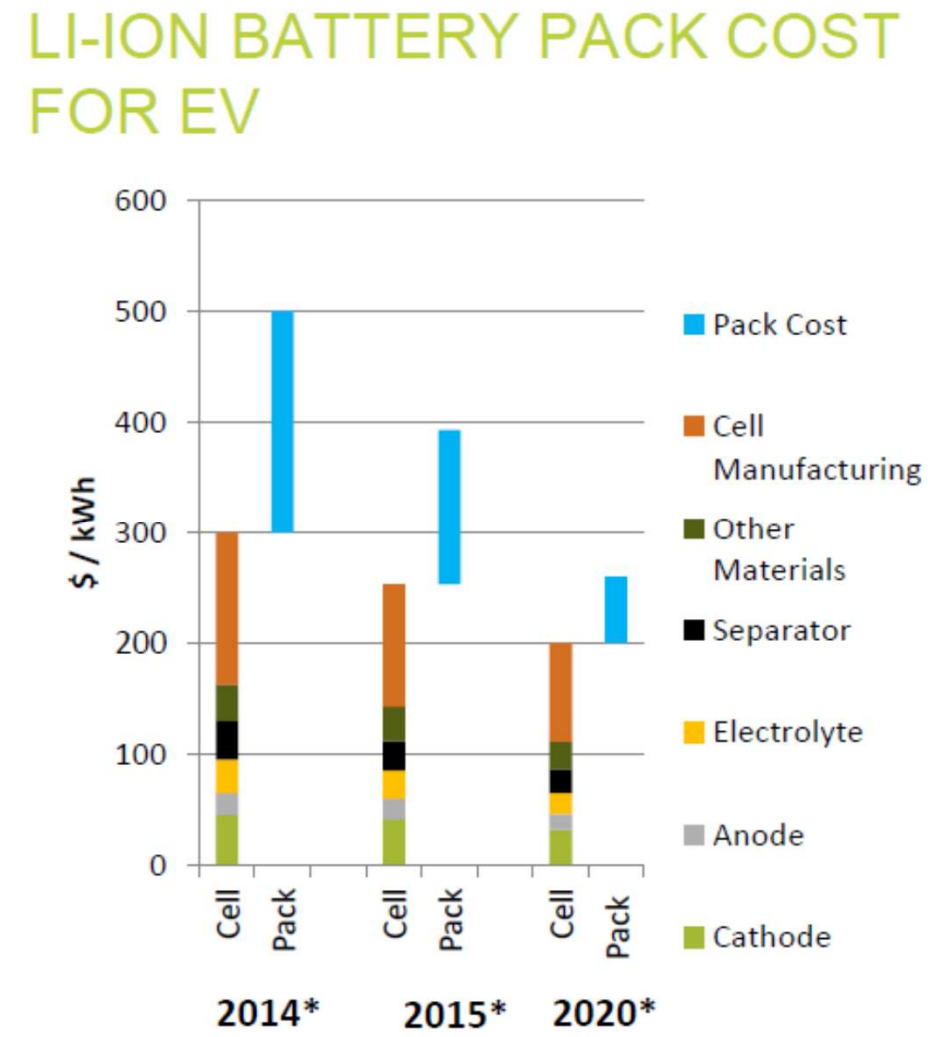
NCR18650B Panasonic NCA
242Wh/kg et 714Wh/L



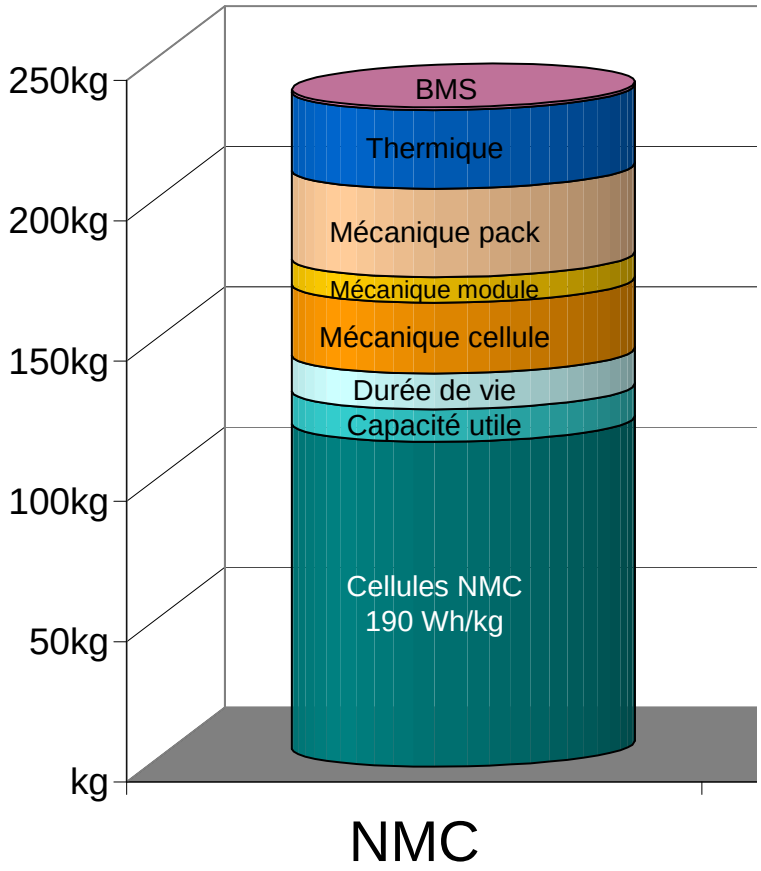




ECHELLES CELLULE ET PACK



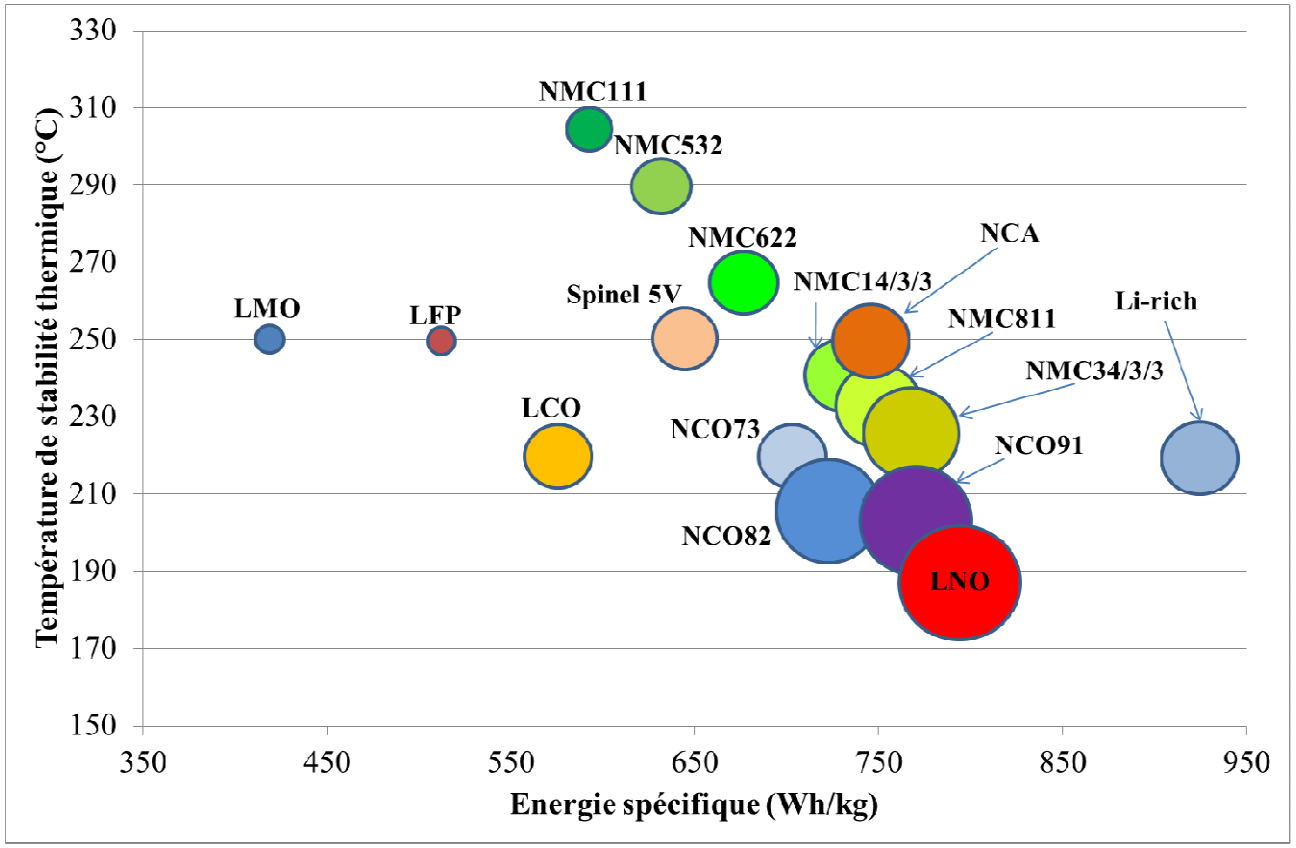
Répartition en masse



Qu'y a-t-il de si compliqué à assembler des cellules entre elles ?

ECHELLES CELLULE ET PACK

La réponse vient essentiellement de la sécurité



Caractéristiques des réactions électrolyte / cathode.
La surface du cercle est l'énergie dégagée en emballement thermique.

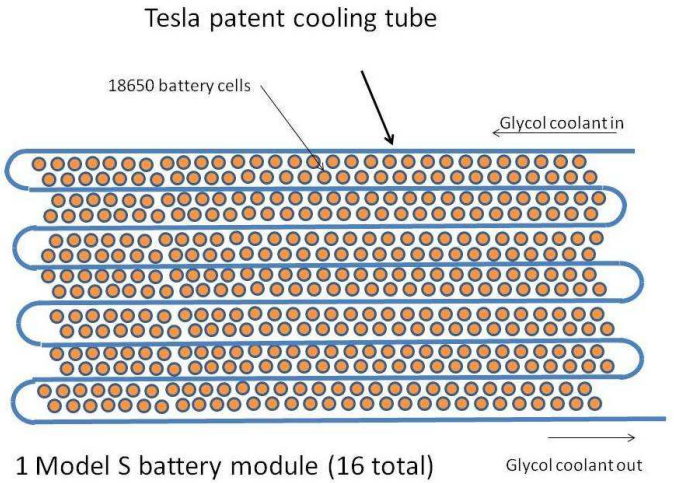
ECHELLES CELLULE ET PACK

La réponse vient essentiellement de la sécurité

- **Gestion thermique**
  - Refroidissement passif (radiateurs) ou actif (pompe à chaleur)
    Chauffage dans le cas LMP
  - Ventilation voire circulation de fluide caloporteur
  - Isolation des cellules les unes des autres
  - Isolation / inertie thermique du pack

Influence forte sur

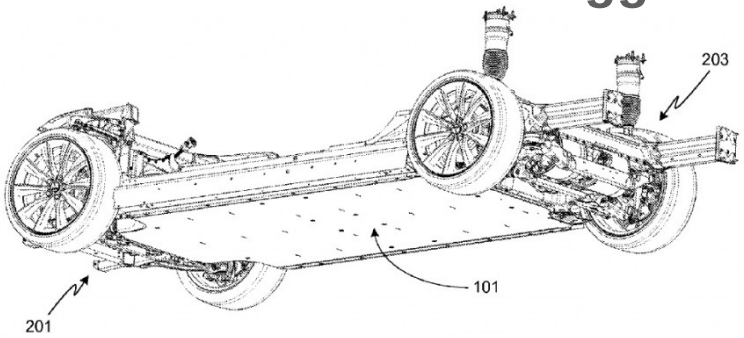
- la sécurité
  emballement et sa propagation
- la durée de vie
  calendaire à chaud, charge à froid
- la performance
  énergie disponible par temps froid

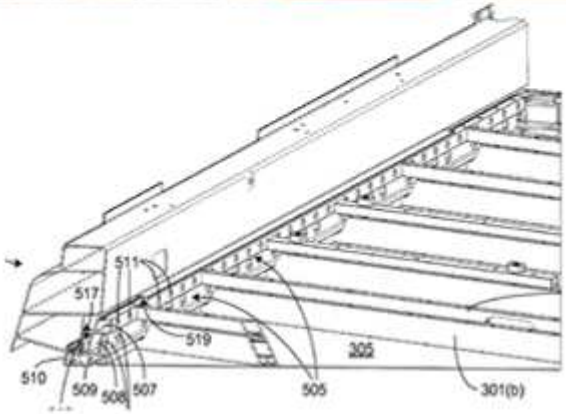


ECHELLES CELLULE ET PACK

La réponse vient essentiellement de la sécurité

- **Protection contre les aggressions extérieures**





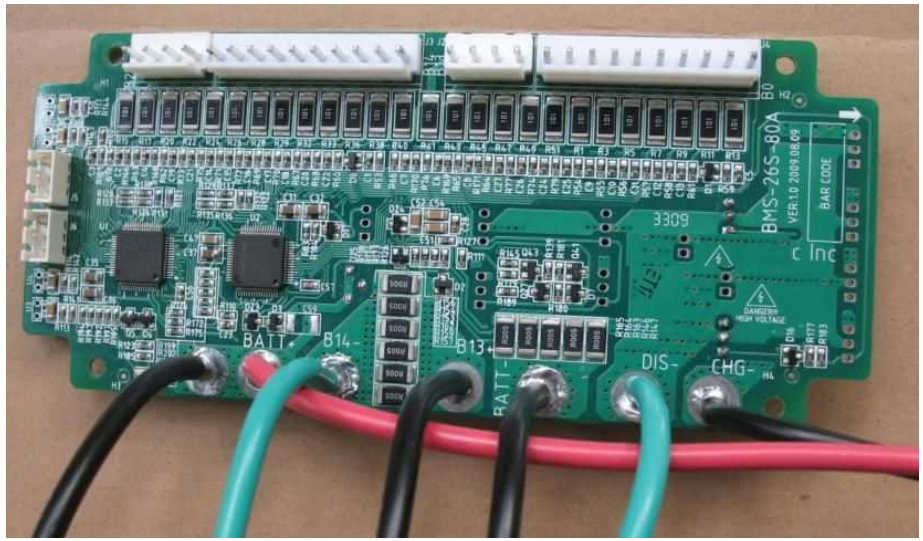
- **Evacuation des gaz**

ECHELLES CELLULE ET PACK

La réponse vient essentiellement de la sécurité

- **Gestion électrique**
  - Tension minimum
  - Tension maximum
  - Courant maximum
  - Equilibrage des cellules
  - Indicateur d'état de charge / de santé / …

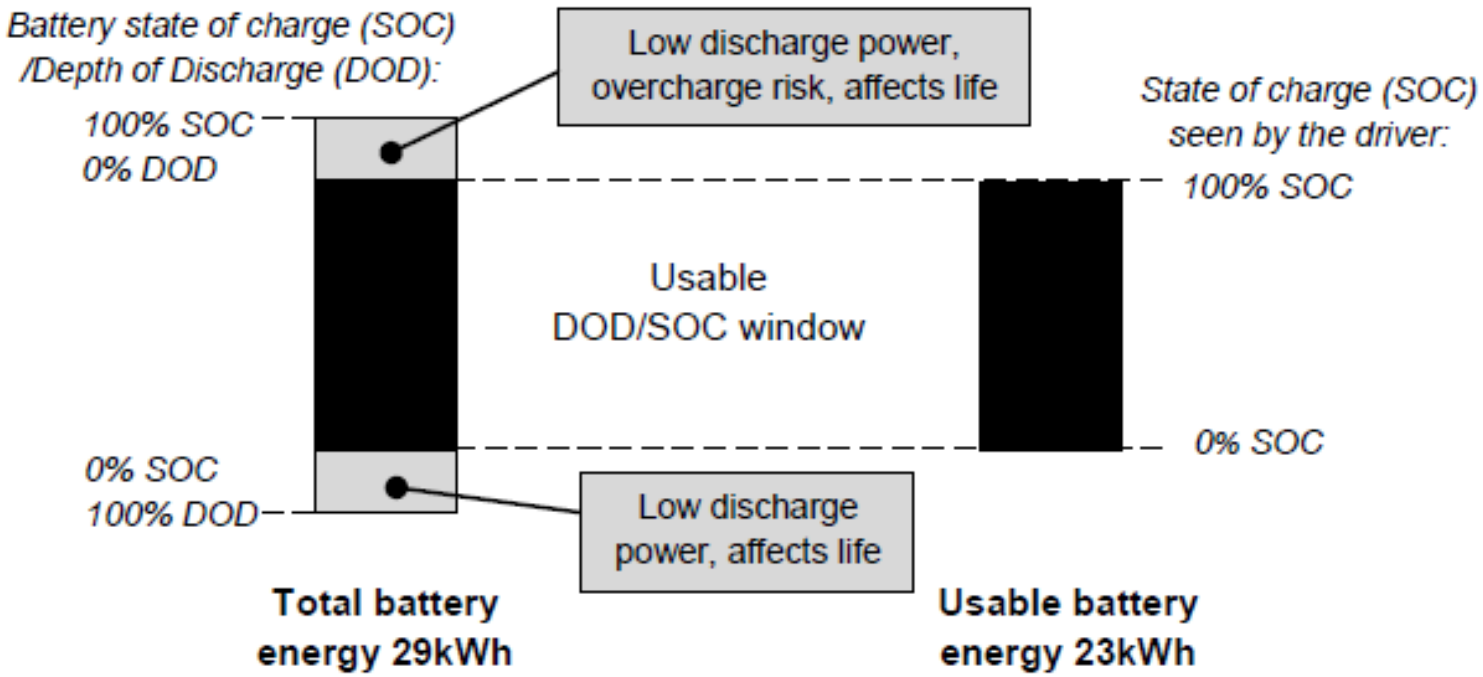
Géré par un Battery Management System



ECHELLES CELLULE ET PACK

Limitation des bornes de charge décharge

- Pour la sécurité
- Pour la durée de vie



ECHELLES CELLULE ET PACK

Au total, **les cellules n'occupent aujourd'hui que 30% à 50% du volume d'un pack véhicule électrique (55 à 75% en masse).**

Elles ne sont pas utilisées au maximum de leur capacité.

Les caractéristiques d'une batterie sont loin de dépendre uniquement des cellules qui la composent

Si le gain prévisible en densité d'énergie des cellules est limité (x2 avec rupture),
on peut espérer des progrès beaucoup plus forts sur les autres paramètres : durée de vie, coût, sécurité, …

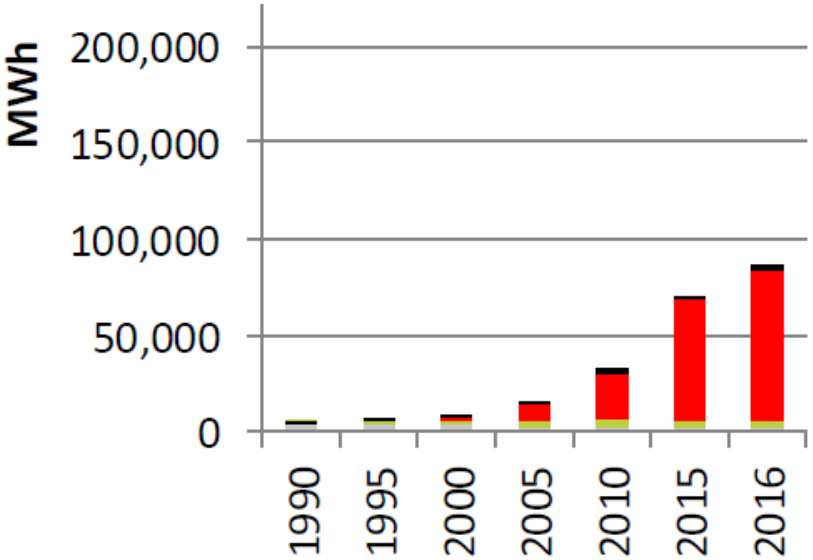
IMPACTS D’UNE PRODUCTION MASSIVE

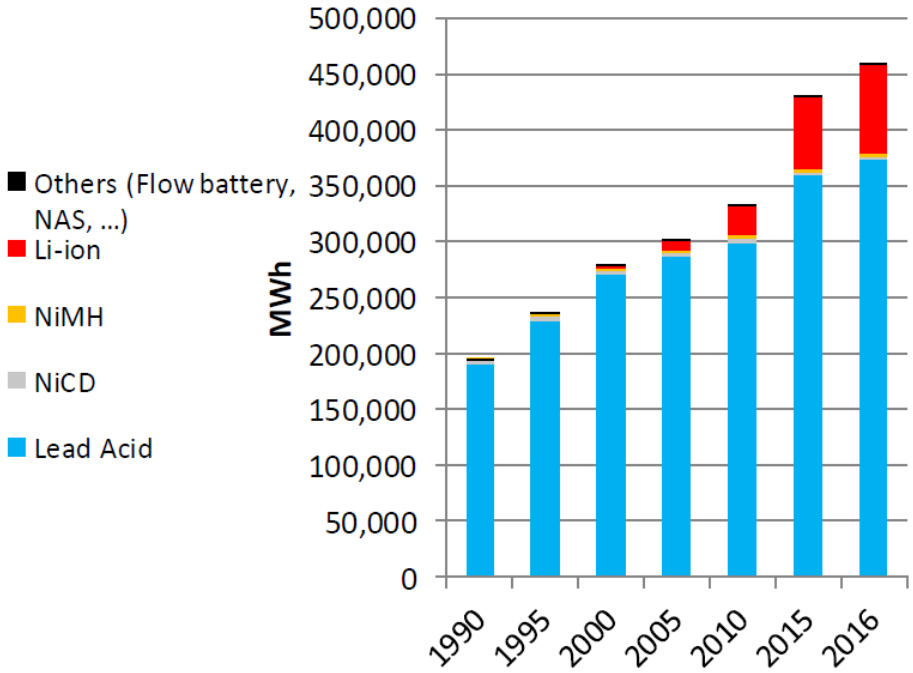
14/09/2018 | Perdu Fabien

COMBIEN DE BATTERIES ?

Aujourd'hui

- Batteries = plomb
- Autre batterie = lithium-ion





Source: AVICENNE ENERGY, 2017

(marché annuel)

COMBIEN DE BATTERIES ?

- 1 milliard de véhicules électriques (flotte mondiale) à 50 kWh

OU

- Stockage de 20h de consommation électrique mondiale

~ 50 TWh de batteries

COMBIEN DE BATTERIES ?

Que représentent 50 TWh de batteries ?

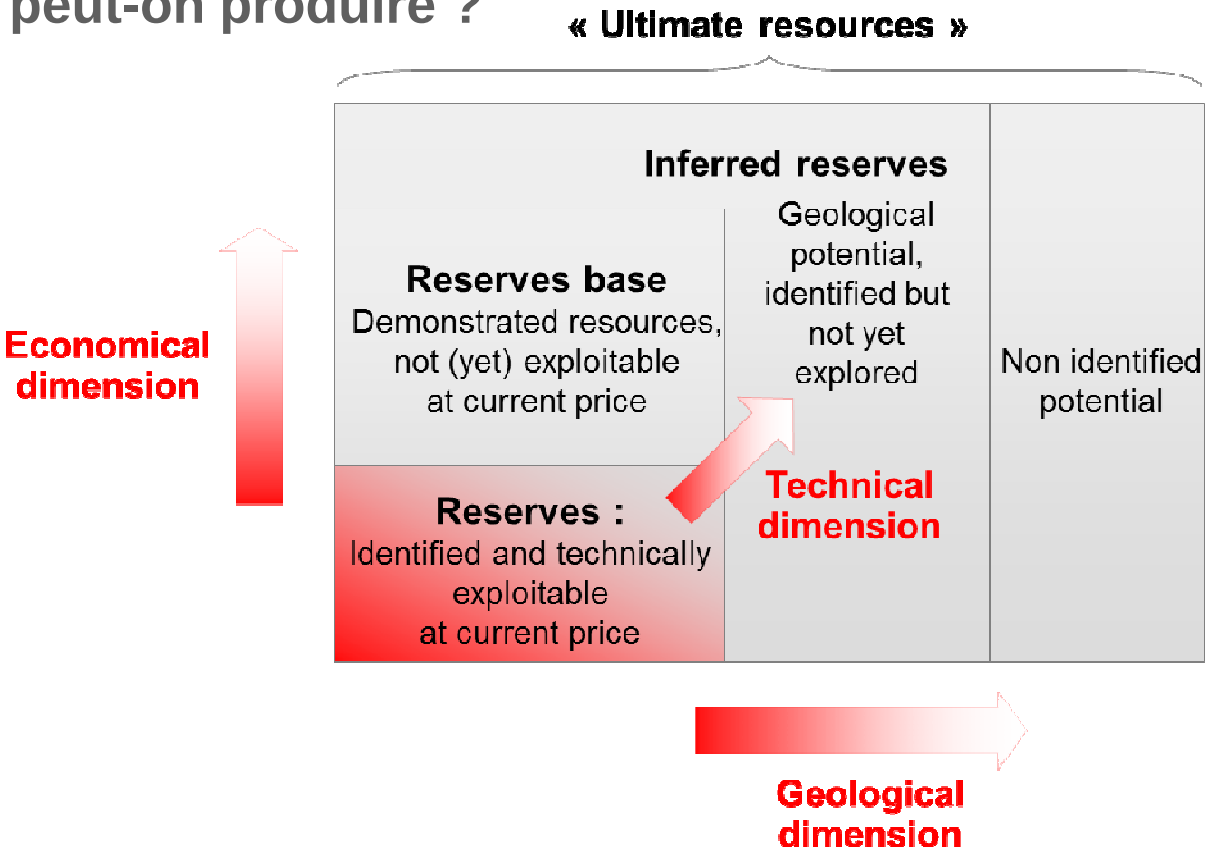
- **140 ans** de la production actuelle de batteries plomb
- **600 ans** de la production actuelle de toutes autres batteries
- Pour les produire en 10 ans, cela nécessite **140 gigafactories**

1 gigafactory = 1,3km²
= 35GWh/year

DISPONIBILITE DES MATERIAUX

Utilisation de matériaux rares

Combien de batteries peut-on produire ?



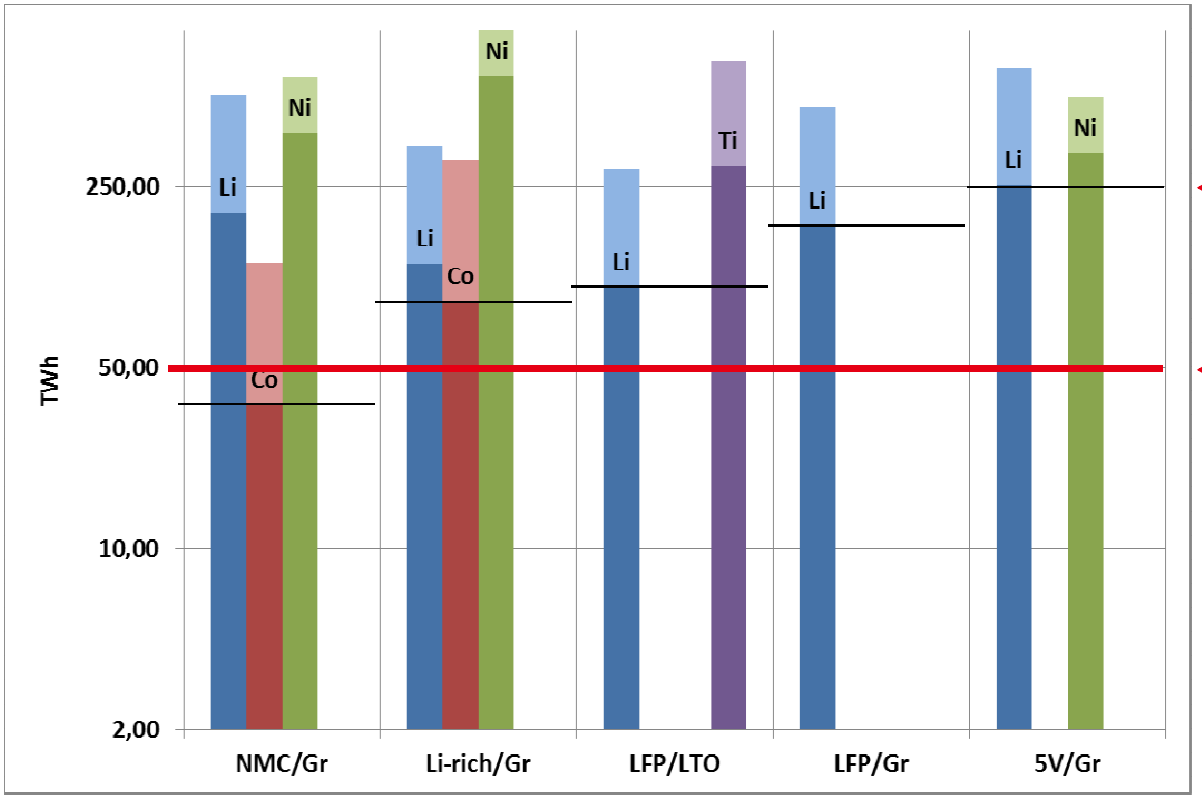
Données USGS 2016 (plutôt pessimistes sur Ni et Co)

Les quantités par kWh considérées sont théoriques (donc optimistes)

DISPONIBILITE DES MATERIAUX

Systèmes Li-ion :

- Limites successives : Co, puis Ni, puis Li
- Seul le LFP ne nécessite ni Co ni Ni
- **Plus hautes tensions => moins d'atomes pour la même énergie**
- Le fluor n'est pas limitant dans l'électrolyte (ce serait différent en matériau actif)



Energie stockable en utilisant
toutes les réserves (foncé)
ou toutes les ressources (clair)

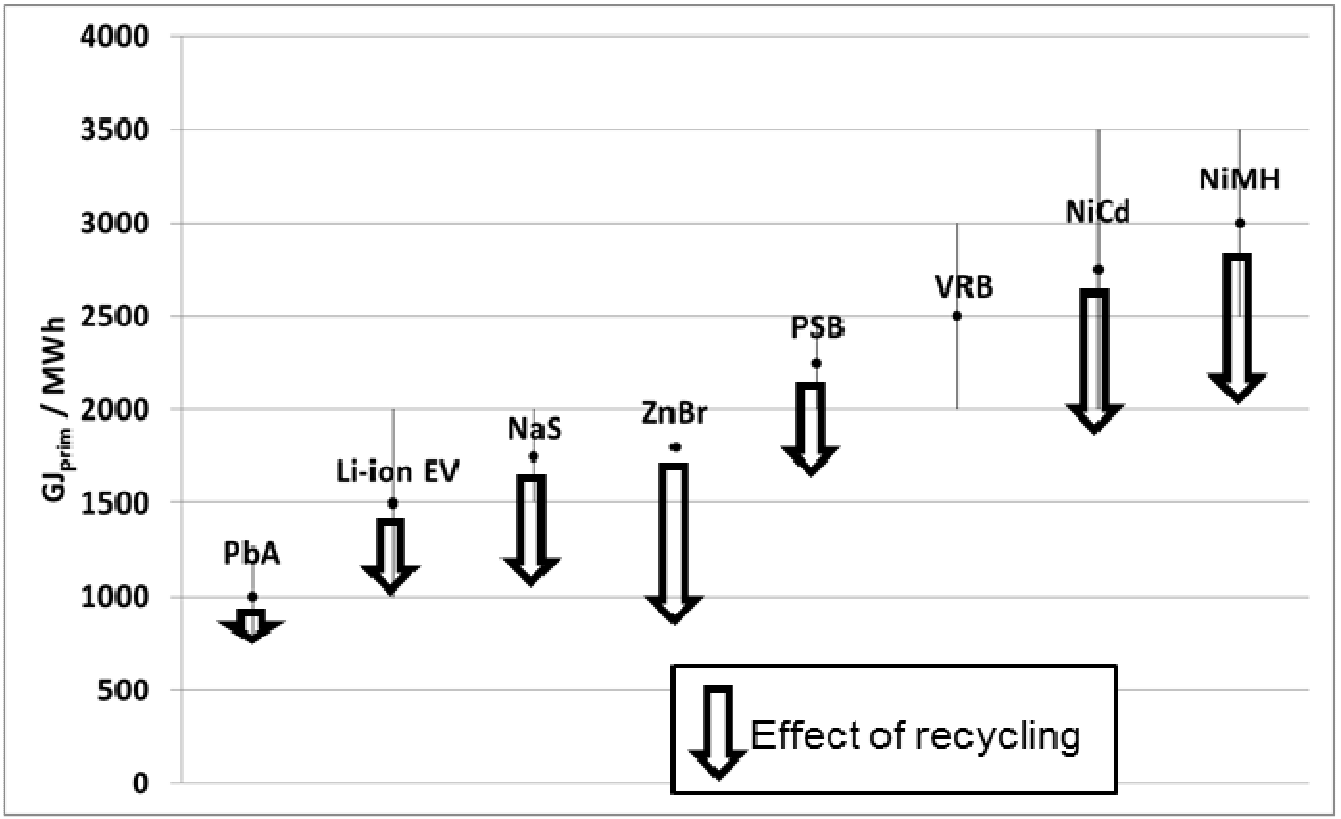
DISPONIBILITE DES MATERIAUX

A retenir

- On peut prévoir une utilisation vraiment massive des batteries.
- **A terme, la plupart des technologies existantes seront limitées par les matières premières, et ce même en considérant le recyclage.**
- La recherche devrait se focaliser sur la **substitution du Co et du Ni à la positive, et du Li à la négative**.

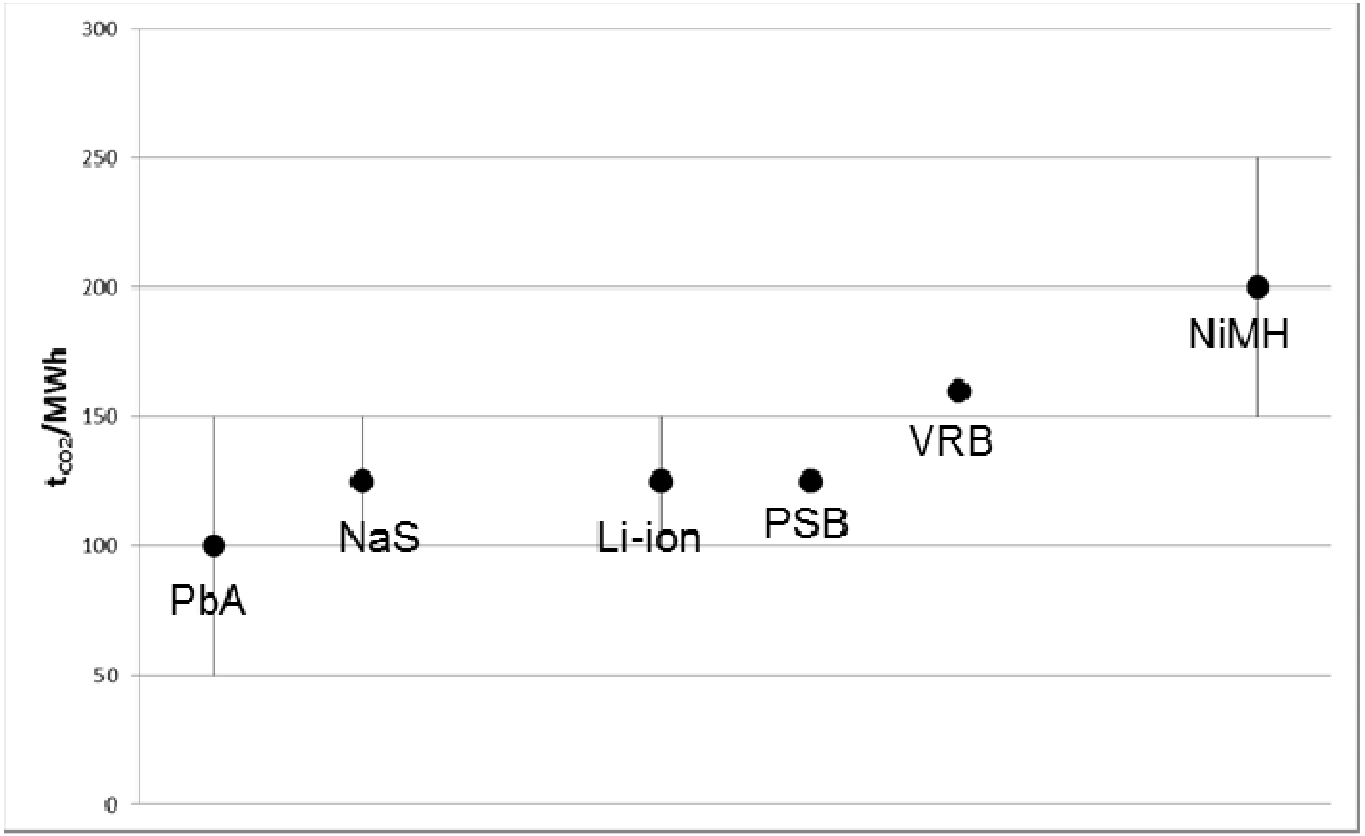
LIFE CYCLE ANALYSIS

- Comsommation d'énergie
- Manque de données pour des technologies intéressantes :
  ZEBRA, ZnFe, FeFe, Zn-air, supercondensateurs, Lithium-soufre



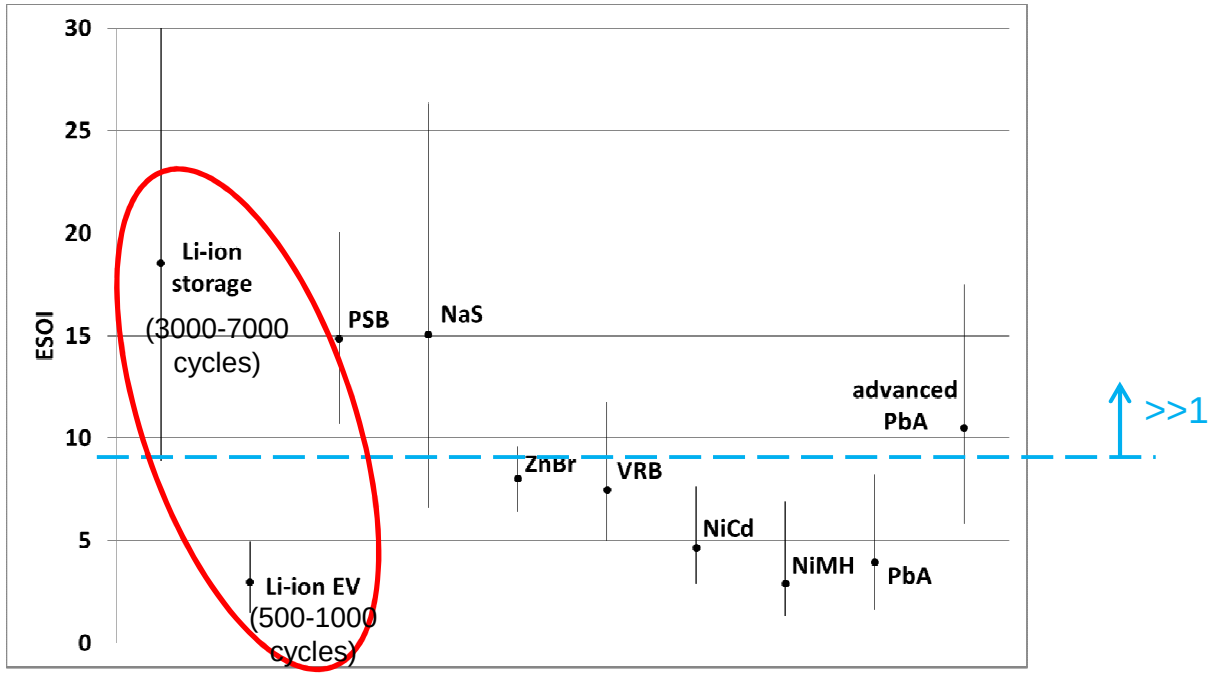
LIFE CYCLE ANALYSIS

- Emissions de CO2 à la fabrication
  (bien corrélées à la consommation d'énergie)



LIFE CYCLE ANALYSIS

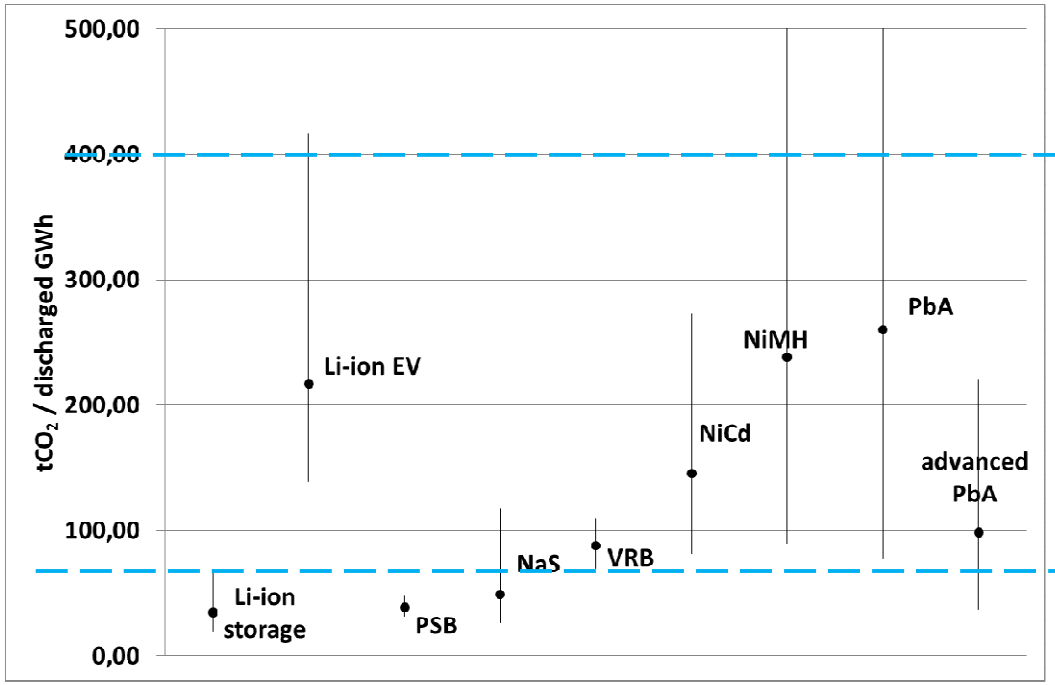
- **Retour sur investissement énergétique (ESOI)**
  - Fort impact de la cyclabilité



  - Incertitudes incluses (mais peut-être sous-estimées) : énergie grise, cyclabilité
  - Faible sensibilité au rendement au taux d'actualisation (ici 0%)

LIFE CYCLE ANALYSIS

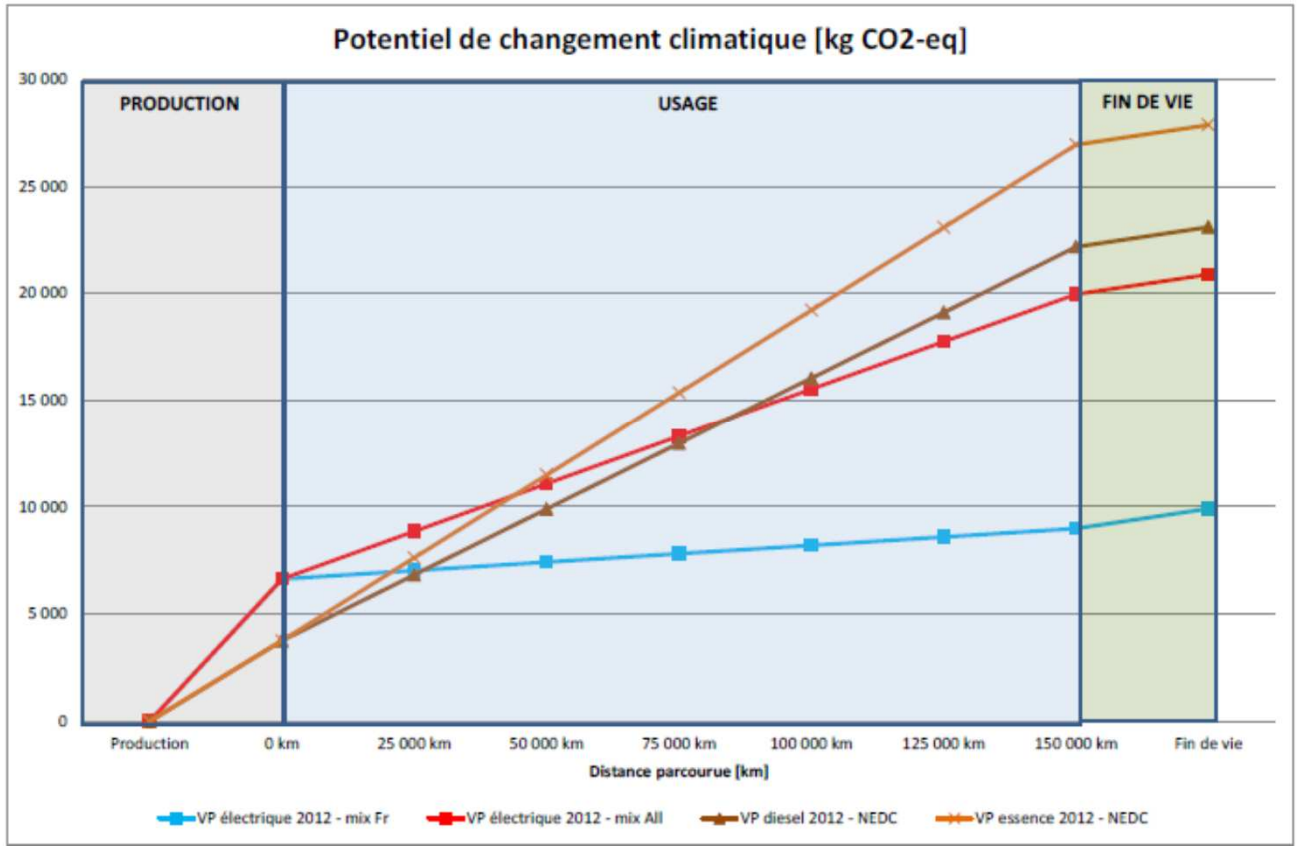
- **CO_2 ajouté sur l'électricité stockée**
  - CO_2 à la fabrication / total énergie déchargée



Très peu de données => en réalité l'incertitude est grande
bon bilan CO_2 ⇔ beaucoup de cycles réalisés

LIFE CYCLE ANALYSIS

- **Etude ADEME comparative Véhicule Electrique / Thermique**
  - Le VE est plus propre à l'usage (surtout avec de l'électricité française)
  - Mais plus sale à la fabrication



LIFE CYCLE ANALYSIS

Les véhicules électrifiés individuels

	Trajets courts (<50km)	Trajets longs (>50km)
Batterie	5-10 kWh	50 kWh et plus
Cycles	~1 cycle/jour	Usage occasionnel
Recharge	Lente 3kW suffit	Charge rapide occasionnelle
Kilométrage	70%	30%

Pour faire les derniers 30% de service en tout électrique,
les 40 kWh de batterie additionnelle coûtent à la fabrication

~10000 €
~8 kg de cobalt
~50 GJ_{prim} (~15 MWh_{prim})
~5 t_{CO2}

Le coût additionnel des bornes de recharge rapide (renforcement réseau) reste à évaluer.

Ces considérations incitent à envisager le PHEV comme une solution potentiellement plus vertueuse que le véhicule tout électrique.

LIFE CYCLE ANALYSIS

- **Et si le complément pour les trajets longs n'était pas un moteur thermique ?**

Siemens

Volvo - Alstom

ElectRoad

LIFE CYCLE ANALYSIS

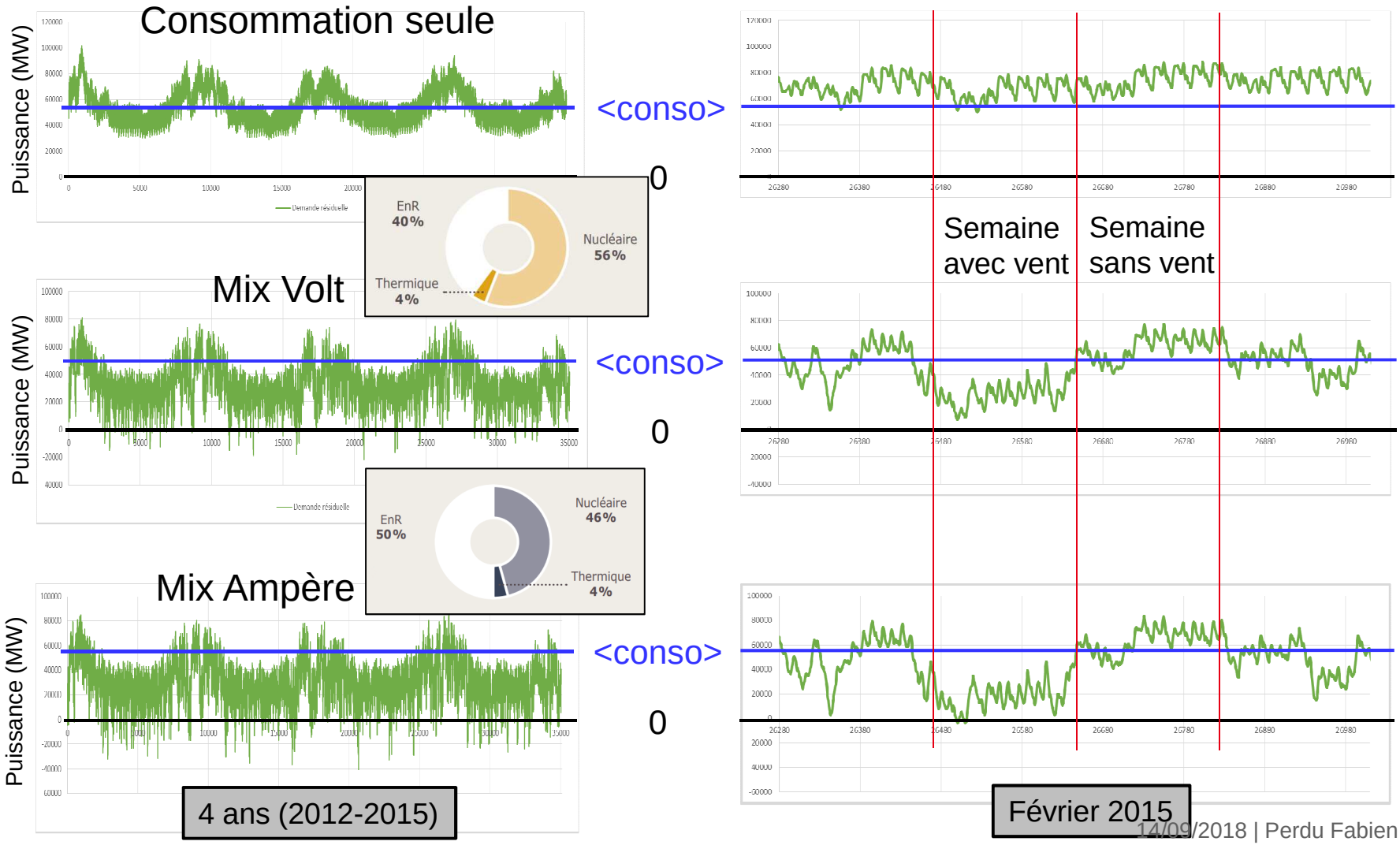
- **Autre usage pertinent :**
  véhicules partagés avec utilisation intensive
  (1 cycle complet par jour)

LIEN AVEC LE STATIONNAIRE

BESOINS DE FLEXIBILITÉ CROISSANTS

- **Introduction d'intermittence supplémentaire par PV+éolien**

  Séries temporelles de demande résiduelle = conso - PV - éolien



POURQUOI STOCKER L'ÉLECTRICITÉ ?

1 MWh intermittent n'a pas la même valeur d'usage que 1 MWh de base
=> ne pas comparer les coûts et impacts en sortie de centrale !

Il faut ajouter les coûts de stockage, de réseau,….

BESOINS DE FLEXIBILITÉ CROISSANTS

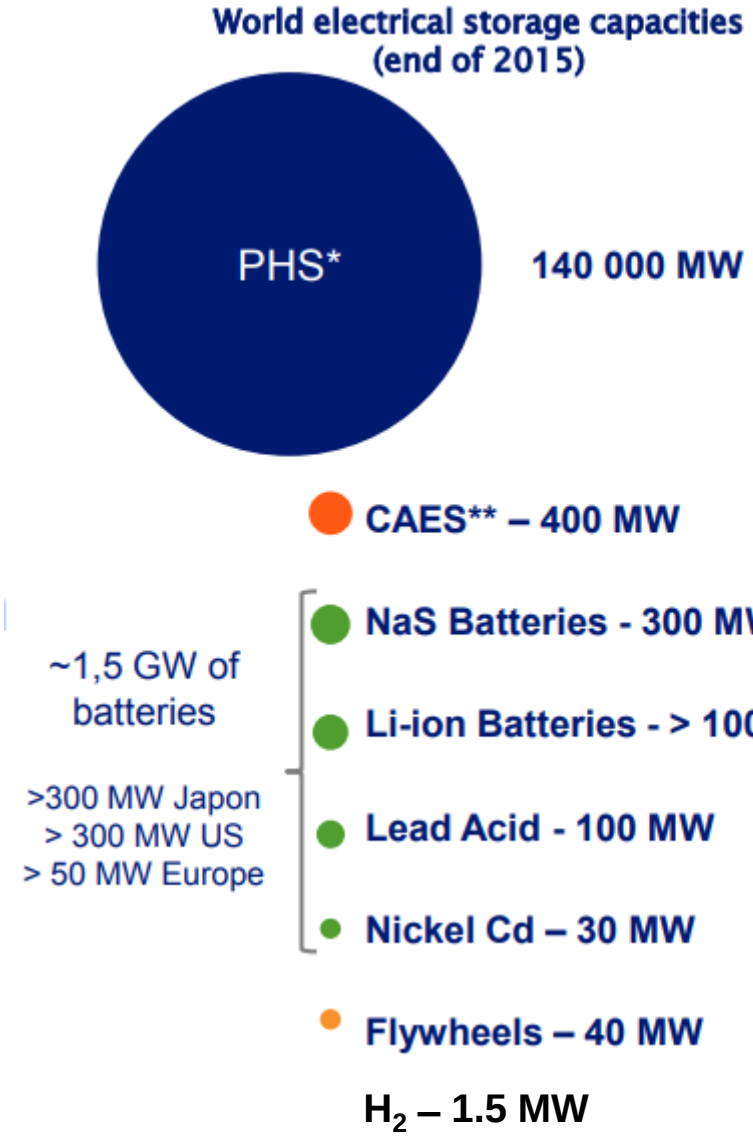
- **Flexibilité à apporter par**
  - Production pilotable (nucléaire, thermique à flamme, barrages)
  - Gestion de la demande (tarifs différenciés, effacement)
  - Stockage

Nombre d'heures de consommation à déplacer	**Sans ENRi**	**Mix Volt**	**Mix Ampère**
Pour lisser sur 1 jour	1 h	2 h	2.5 h
Pour lisser sur 1 semaine	7 h	15 h	20 h
Pour lisser sur 1 mois	35 h	60 h	70 h
Pour lisser sur 1 an	800 h	800 h	800 h

Le stock nécessaire croît très vite avec la durée considérée et avec le taux de pénétration d'ENRi

Tout l'effacement en 2017	1,2 h de conso	sur les deux mécanismes NEBEF + ajustement, selon le bilan électrique RTE
Stock des STEP	2 h de conso	
Stock des barrages	30 h de conso	Entre le niveau haut et le niveau bas d'une même année
Arrêt du nucléaire 10% du temps	**1000 h de conso**	

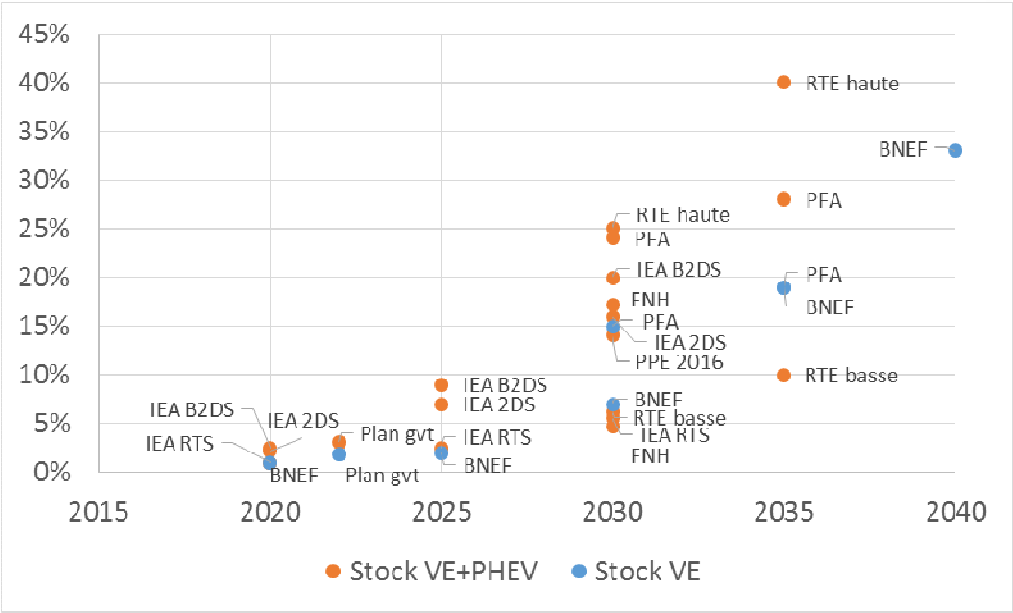
STOCKAGES ÉLECTRIQUES EXISTANTS



	Taille du stock (pas de chiffres officiels)	Rendement
PHS* – 140 000 MW	E/P ~ 15 h	75%
CAES** – 400 MW	E/P ~ 100 h	40%
NaS Batteries - 300 MW Li-ion Batteries - > 1000 MW Lead Acid - 100 MW Nickel Cd – 30 MW	E/P ~ 1 h	85%
Flywheels – 40 MW	E/P ~ 15 min	80%
H_2 – 1.5 MW	E/P ~ 10 h	30%

NOUVEAUX USAGES

Les véhicules électrifiés



Exemple 30% de véhicules électrifiés (sur 32 millions de VP + 8 millions de VUL)

- consommation annuelle : 25-30 TWh **= 4 tranches nucléaires**
- stock batteries : 200-500 GWh (VE / PHEV de 25%-75% à 75%-25%)
  soit 4 à 9 h de conso -> **pertinent pour le lissage à la journée**
- puissance d'échange avec le réseau : 30 - 100 GW
  (pénétration de la charge rapide : de 0 à 10%, 20% à 50% de véhicules non connectés)

NOUVEAUX USAGES

- **Combien faut-il stocker (par foyer type France) ?**

- **Voiture**
  - 8 kWh si hybride rechargeable
  - 50 kWh si full EV

- **Mix type 50% ENR**
  - 4 kWh à la journée
  - 30 kWh à la semaine
  - (1 MWh à l'année)

Quelque chose à réfléchir ?

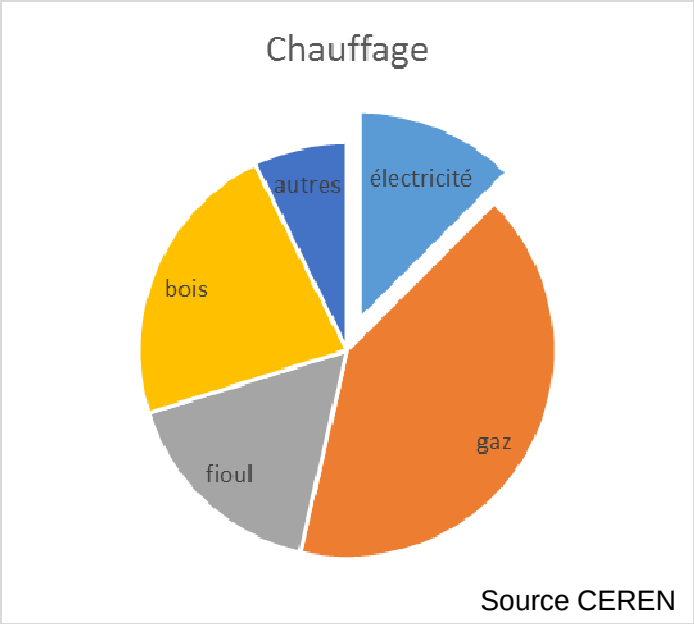
La flexibilité annuelle est aujourd'hui gérée par les arrêts programmés des réacteurs nucléaires.

Le besoin annuel serait peu impacté par un mix 50% ENR, mais pourrait augmenter en cas d'électrification du chauffage par exemple, ou d'arrêt de réacteurs nucléaires.

NOUVEAUX USAGES

La chaleur

Le chauffage représente 425 TWh_{th} (2016, résidentiel et tertiaire)
dont **53 TWh_{elec}** qui créent la saisonnalité de la demande



Electrifier *par exemple* 30% des usages gaz et fioul représenterait
~30 TWh_{elec}/an **= 4 tranches nucléaires** (pompe à chaleur de COP=3, en incluant cuisson et ECS)

Et de nouveaux défis de stockage… (500h de consommation)

NOUVEAUX USAGES

La chaleur

La source de variabilité saisonnière est thermique.
Le stockage saisonnier pourrait-il être thermique plutôt que électrique ?

rendement ~ 60% en saisonnier (Bauer et al 2010)
coût du stockage ~ 5-10 centimes / kWh_{th} (Mangold 2007)

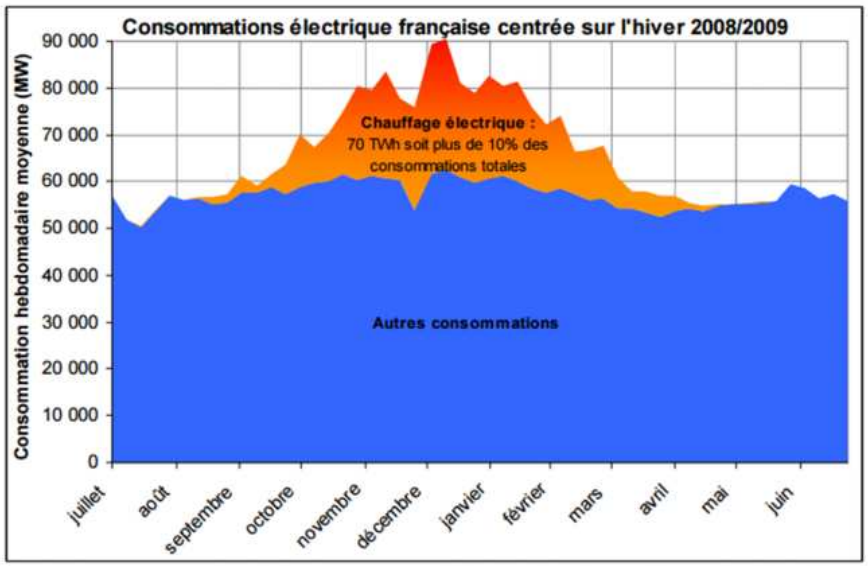


Figure 7 : variation saisonnière de la consommation d'électricité en France liée au chauffage électrique
Source : Données RTE, analyse association négaWatt

CONCLUSION

Nombre d'heures de consommation à déplacer	Sans ENRi	Mix Volt	Mix Ampère
Pour lisser sur 1 jour	1 h	2 h	2.5 h
Pour lisser sur 1 semaine	7 h	15 h	20 h
Pour lisser sur 1 mois	35 h	60 h	70 h
Pour lisser sur 1 an	800 h	800 h	800 h

Les nouveaux usages électriques, outre une consommation supplémentaire, pourraient aussi apporter des solutions de flexibilité au réseau pour aider à l'équilibre offre-demande

CONCLUSION

A retenir

- **Le moyen de loin de plus efficace de limiter l'impact environnemental des batteries est de <u>maximiser leur utilisation</u>**

- **Véhicules**
  - Petites batteries
  - Usage très régulier

  ⟹ Hybride plug-in

  ⟹ Ou véhicule tout électrique partagé, avec une autonomie raisonnable

- **Stockage stationnaire**
  - Pertinent à la journée
  - Pas sur les durées de stockage plus longues

CONCLUSION

A retenir

- **Penser global : production + stockage + réseau**
  - Oublier l'un des points conduit à des raisonnement faux
  - Et même multi-vecteurs pour les temps longs :

    électricité / chaleur / combustibles.

- **Penser fabrication autant que usage**
  - Fabrication : énergie grise
  - Usage : rendement

- **Forte intrication des problématiques énergie et matériaux**