

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



STOCKAGE DE L'ÉNERGIE, FOCUS SUR LA PLACE ET LES ENJEUX SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES DES BATTERIES

14 juin 2018

Philippe AZAIS - DRT/LITEN

www.cea.fr

Ce sont les usages et les besoins qui définissent les solutions...

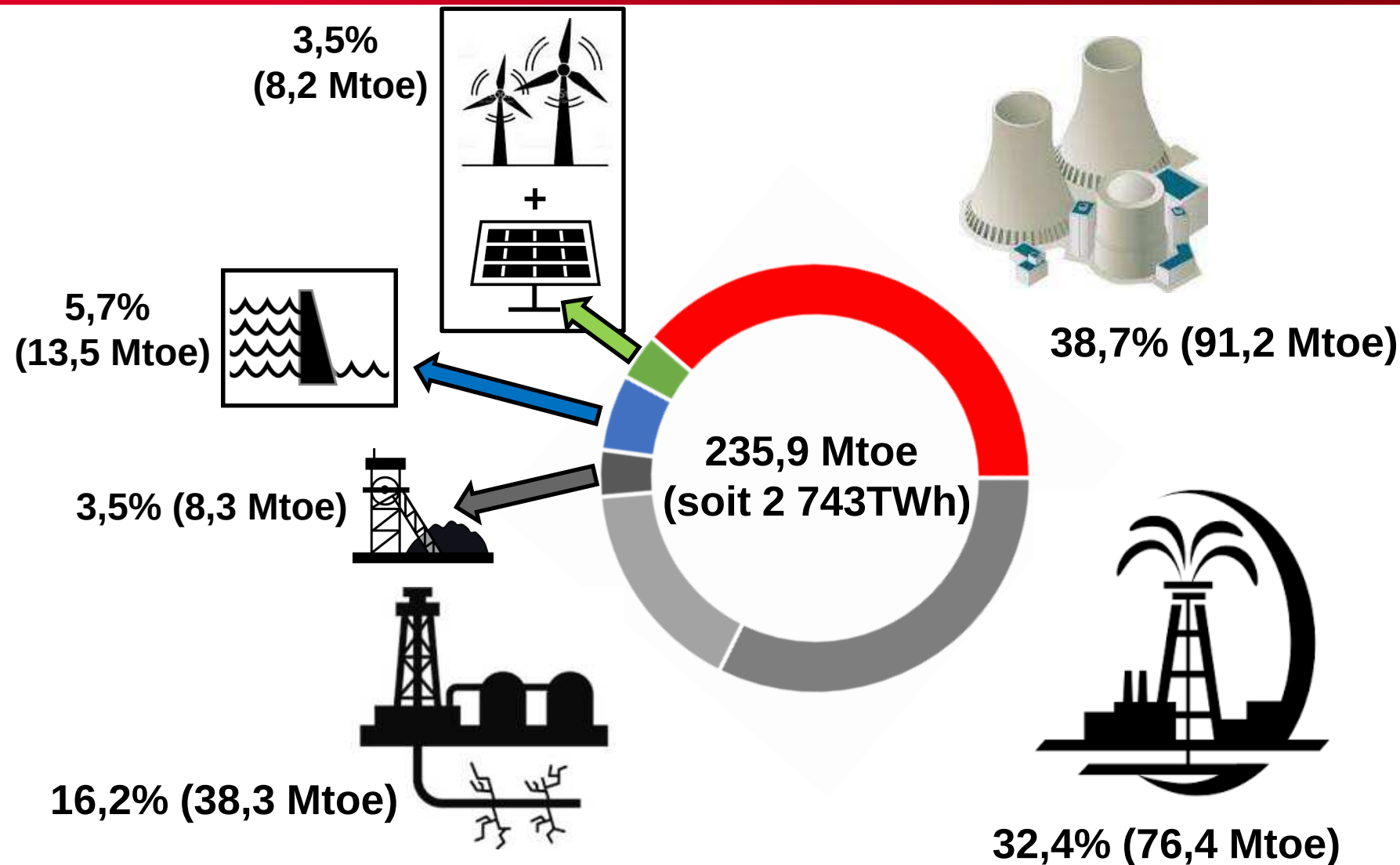
... mais cela a des limites: la physique!

1- Etat des lieux

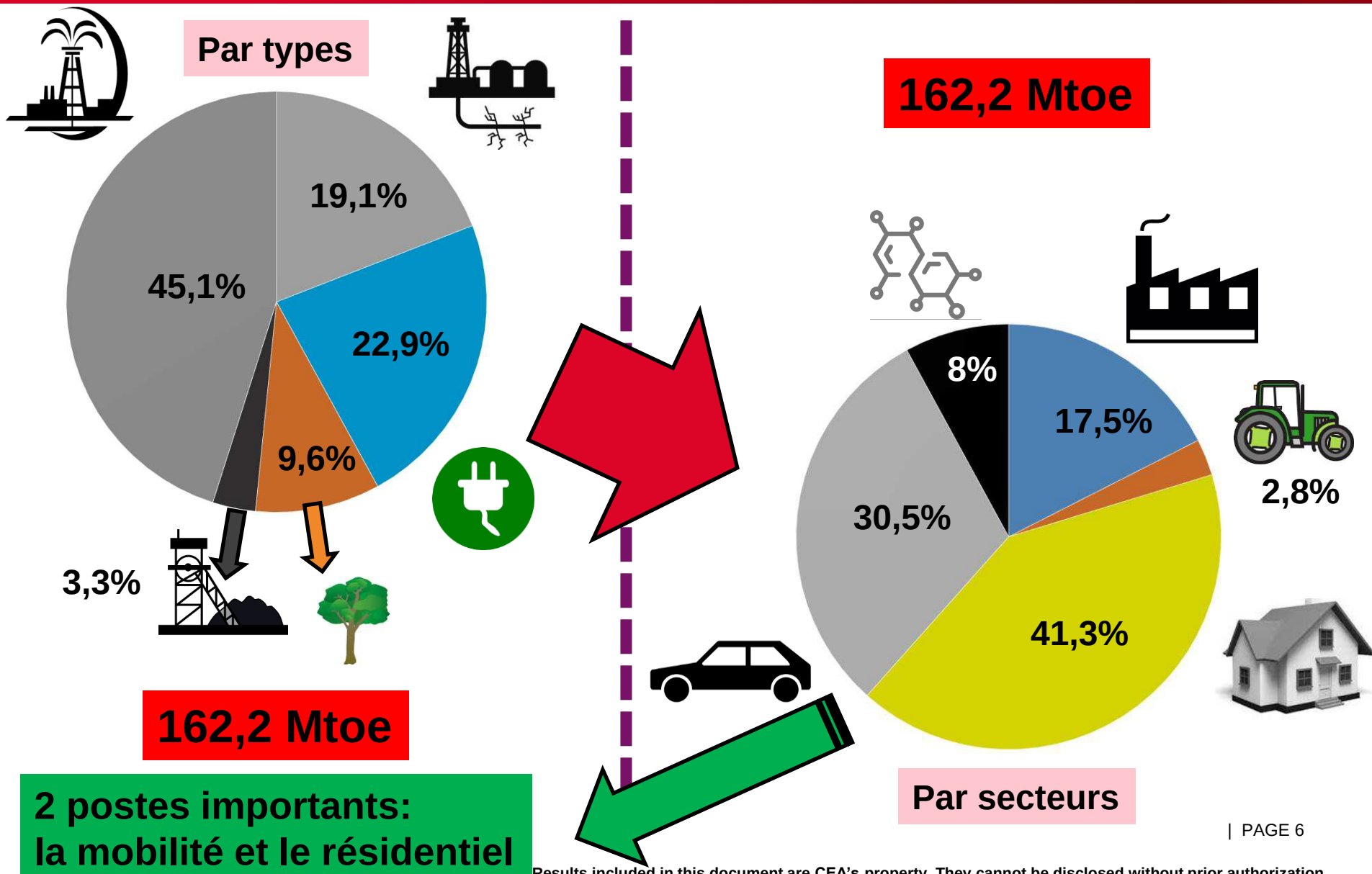
Important:

- **Il ne faut pas conclure à partir de valeurs moyennes
... pour éviter tout raisonnement erroné!**
- ➔ **Il faut également regarder aux différentes échelles
de temps.**

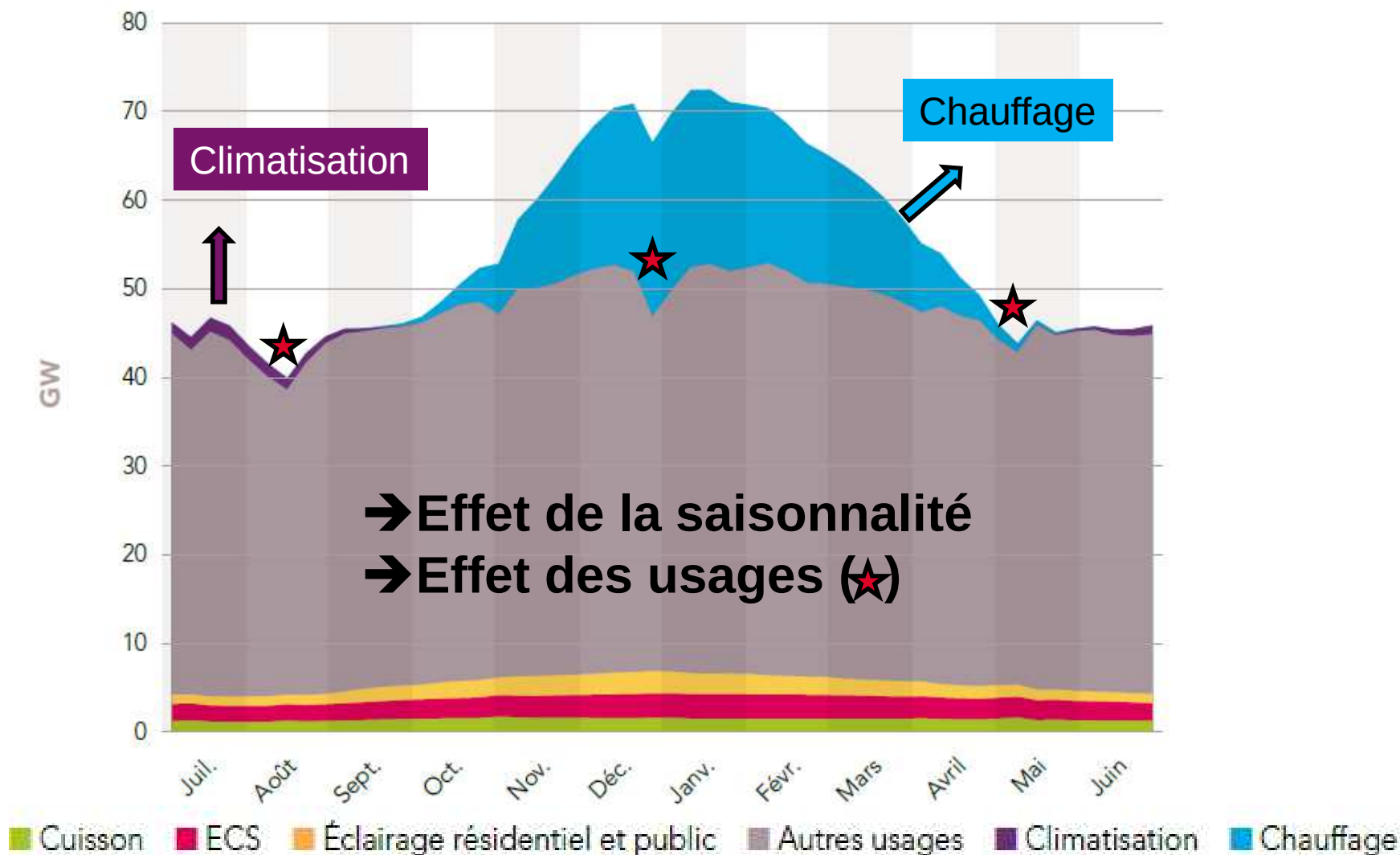
CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE: LA PARTICULARITÉ DE LA FRANCE (ANNÉE 2016)



CONSOMMATION D'ÉNERGIE FINALE: (ANNÉE 2015)



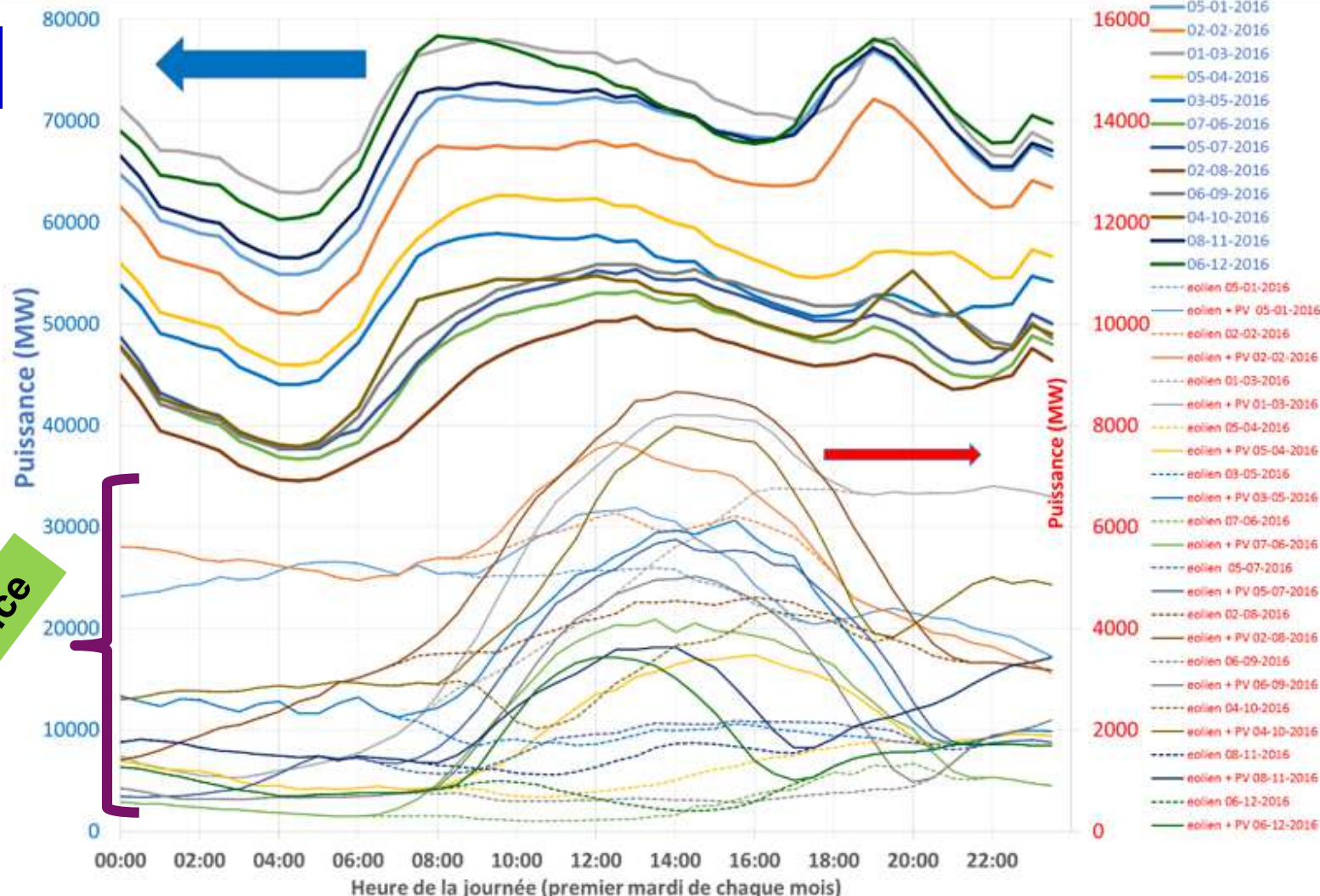
PUISSANCE CONSOMMÉE EN FRANCE (MOYENNE À LA SEMAINE 2016)



QUELQUES ORDRES DE GRANDEURS: PUISSANCE ET ÉNERGIE (ÉCHELLE DE LA JOURNÉE)

Puissance électrique produite en France chaque 1^{er} mardi du mois en 2016

Total



Eolien + PV

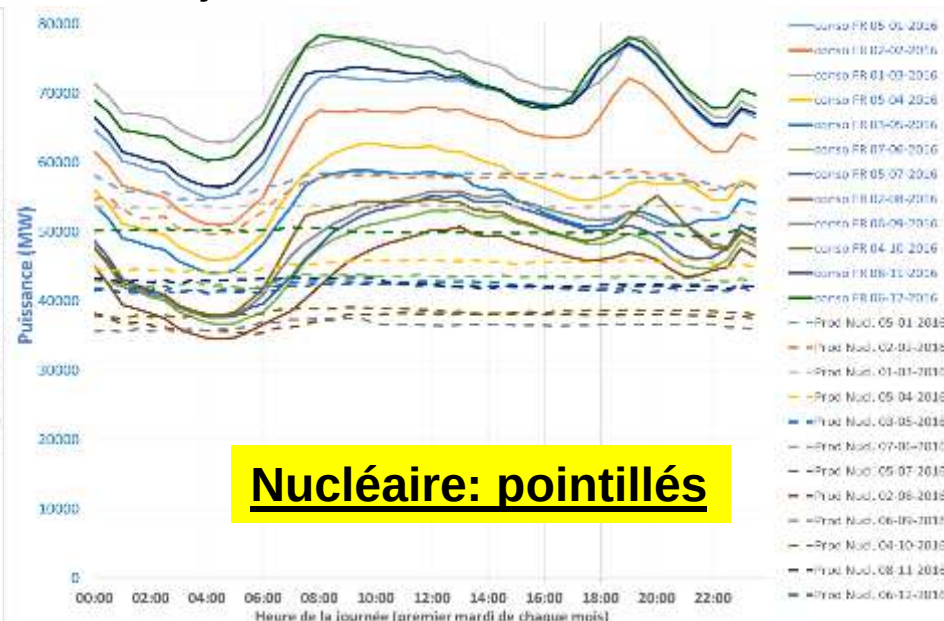
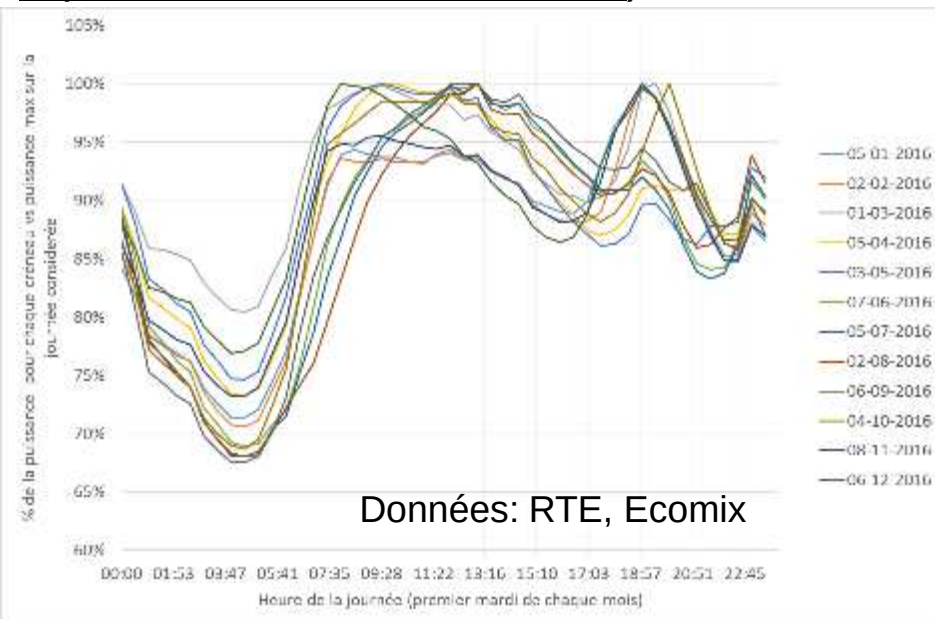
(Eolien (pointillés) + PV) = trait plein

QUELQUES ORDRES DE GRANDEURS: PUISSANCE ET ÉNERGIE (COMPARAISON JOURNÉE / ANNÉE)

Cas 2016

Premières conclusions:

1- La puissance n'est pas constante (fluctuations discrètes, à prendre en compte pour répondre à la consommation) et varie au cours de la journée et de la saison



2- La puissance varie **à l'échelle de la journée** de l'ordre de

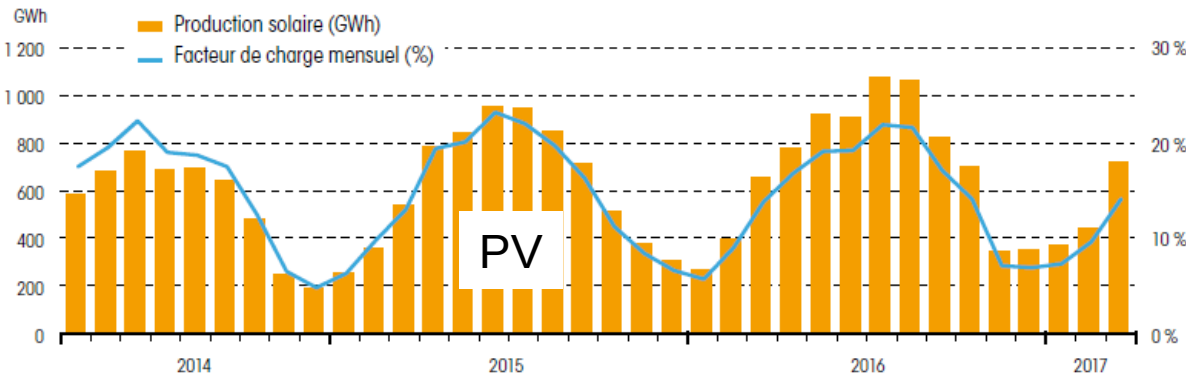
- 65 % (vers 4h du matin) et
- 100% (vers 8h et vers 19h)

À l'échelle de l'année: max: 88 571MW (100%, 18/01), min: 30 584 MW (34%, 07/08)

3- Pas (ou très peu) de suivi de charge du nucléaire vs consommation.

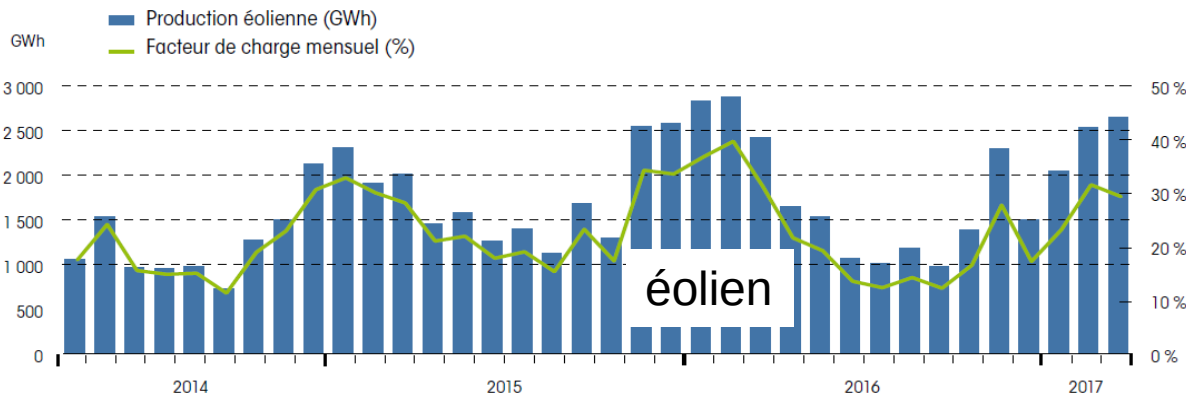
QUELQUES ORDRES DE GRANDEURS: FOCUS SUR ÉOLIEN ET PV

(COMPARAISON MOYENNE MOIS / MOYENNE ANNUELLE)



Facteur de charge
moyen sur l'année

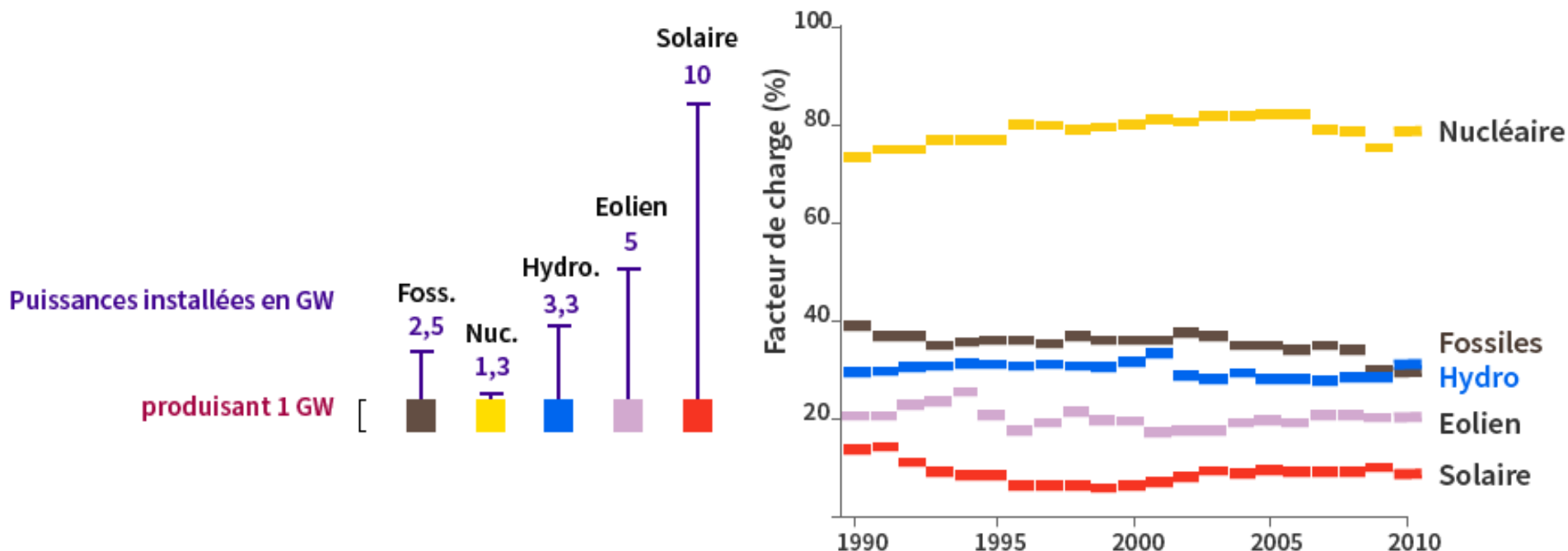
≈ 13%



≈ 22%

- ➔ L'intermittence du PV et de l'éolien nécessite **un stockage tampon pour pouvoir présenter un intérêt vis-à-vis des pics de consommation.**
- ➔ L'éolien présente un facteur de charge plus élevé que le PV.
- ➔ L'éolien produit à des moments plus propices aux pics de consommation que le PV (qui produit plutôt en été et en milieu de journée... donc en creux de consommation).

QUELQUES ORDRES DE GRANDEURS: FOCUS SUR ÉOLIEN ET PV (COMPARAISON ENTRE ANNÉES)



Le facteur de charge ne varie que très peu avec l'amélioration technologique:
Il est dépendant des conditions climatiques et des besoins de consommation.

Question importante (impact technico-économique fort):

**Est-il possible de lisser la production par un
système tampon (stockage)?**

**→ Permettrait de diminuer les pics de production
(aux différentes échelles de temps?).**

BUT N°1: limiter le recours aux énergies fossiles

- **Cas d'applications mobiles:**
 - Délivrer (et stocker, pour certaines applications) de l'énergie pour pouvoir faire avancer le véhicule et alimenter les utilitaires présents à bord.
- **Cas des applications stationnaires:**
 - Stocker de l'énergie provenant du réseau ou d'un système de production local d'énergie pour pouvoir la restituer lorsque le réseau ou le système de production en est incapable.

Cependant, ce système doit être :

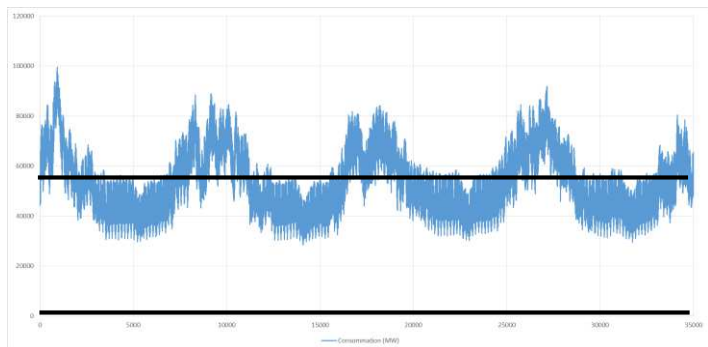
- **Sûr/sécuritaire (non radioactif, sans matériaux CMR, non inflammable, ne pas fuir, ne pas être explosif, ...)**
- **À un prix acceptable (pour l'utilisateur final, à la fois lors de l'achat mais aussi en usage)**
- **Utile (rendre un service, répondre à un besoin)!**



**Vos usages définissent vos besoins
(votre application et ses contraintes)!**

POURQUOI STOCKER L'ÉLECTRICITÉ ?

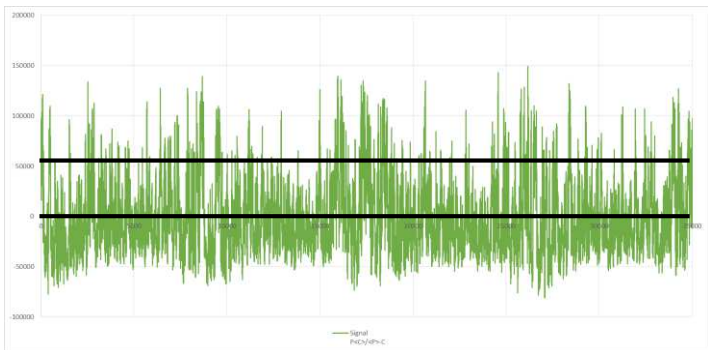
- La consommation et les énergies renouvelables sont intermittentes :



<conso>

0

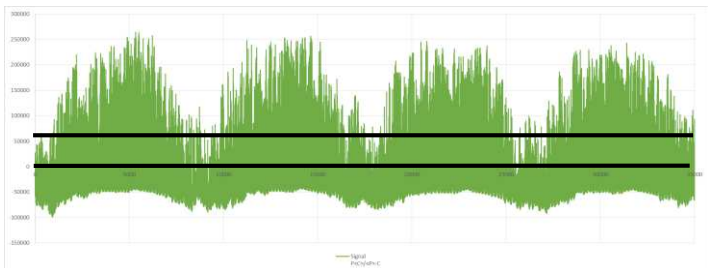
Intermittence de la consommation
sur 4 ans (réalité)



<conso>

0

Production - consommation
Mix fictif 100% éolien



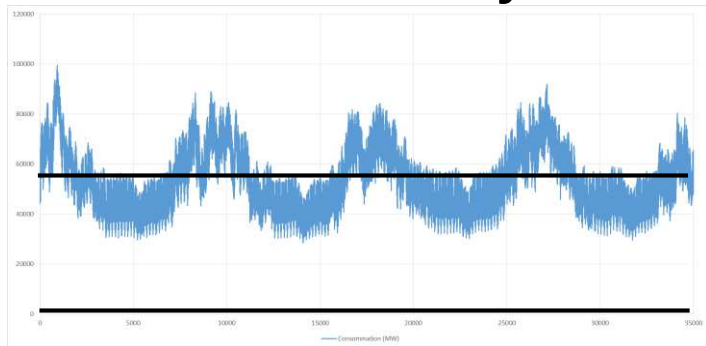
<conso>

0

Production - consommation
Mix fictif 100% PV

POURQUOI STOCKER L'ÉLECTRICITÉ ?

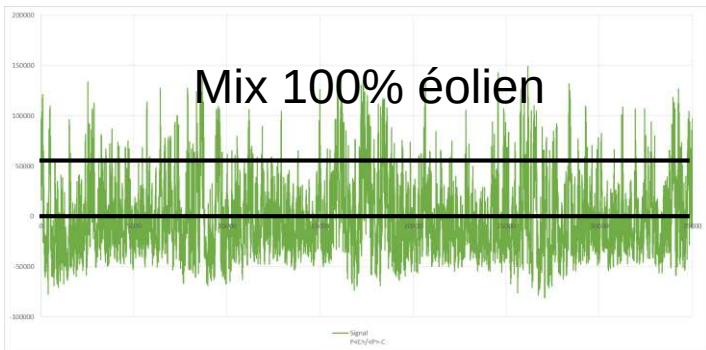
- Si on voulait tout gérer par du stockage, il faudrait stocker la consommation moyenne de :



<conso>

0

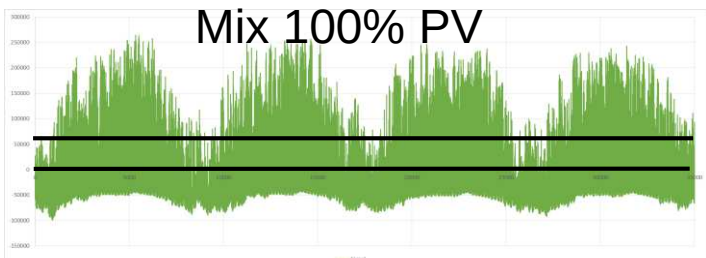
1 h dans une journée (=55 GWh)
7 h dans une semaine
800 h sur une année



<conso>

0

6 h dans une journée
70 h dans une semaine
1000 h dans une année



<conso>

0

20 h dans une journée
20 h dans une semaine
2400 h dans une année

Heureusement, les mix plus diversifiés permettent en partie de foisonner ce besoin

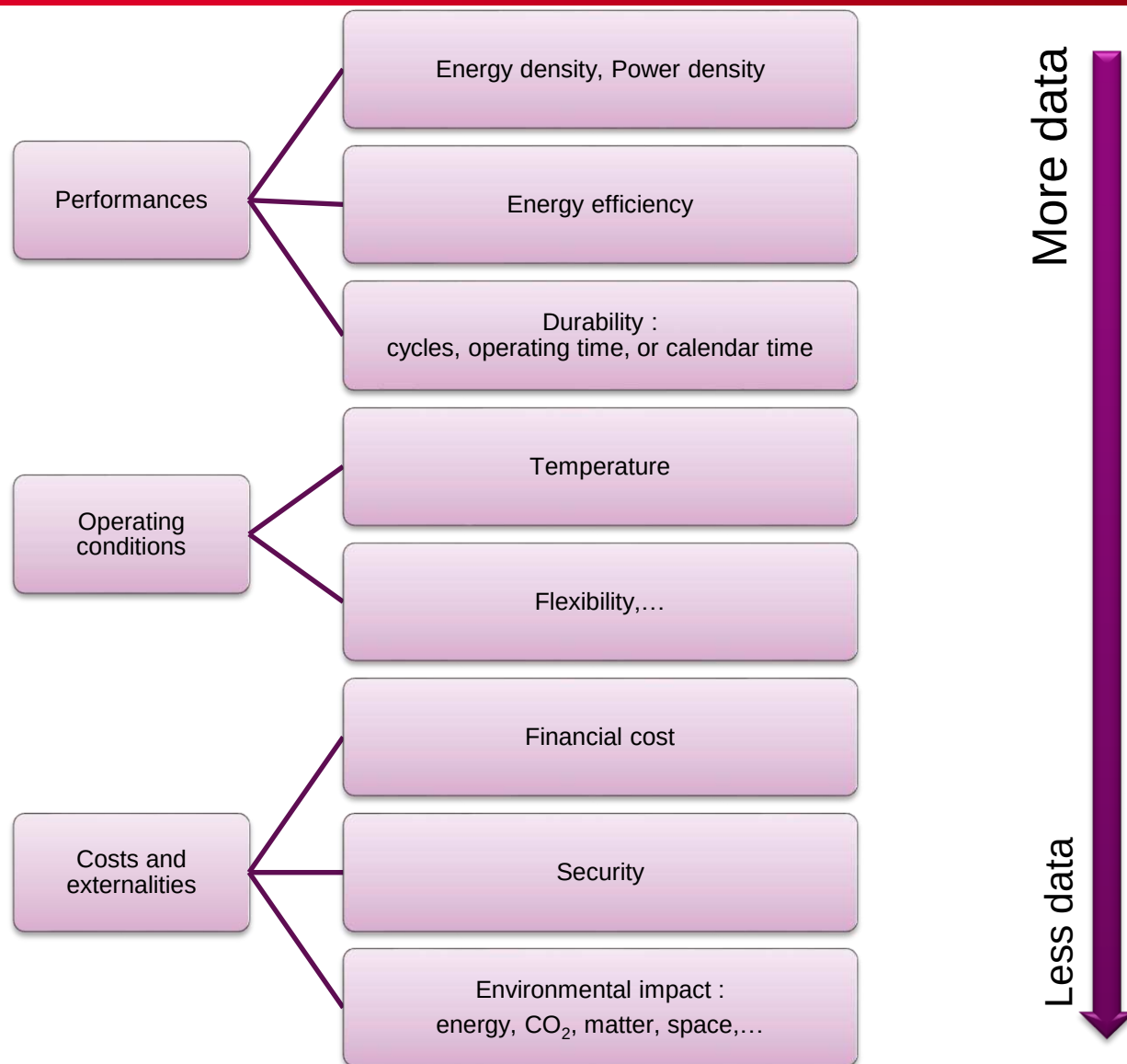
1 MWh *intermittent* n'a pas la même valeur d'usage que 1 MWh *de base*

→ ne pas comparer les coûts et impacts en sortie de centrale !

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

... et les coûts sont directement liés aux rendements!

CARACTÉRISTIQUES D'UN STOCKAGE



Chaque technologie de stockage présente

- 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**

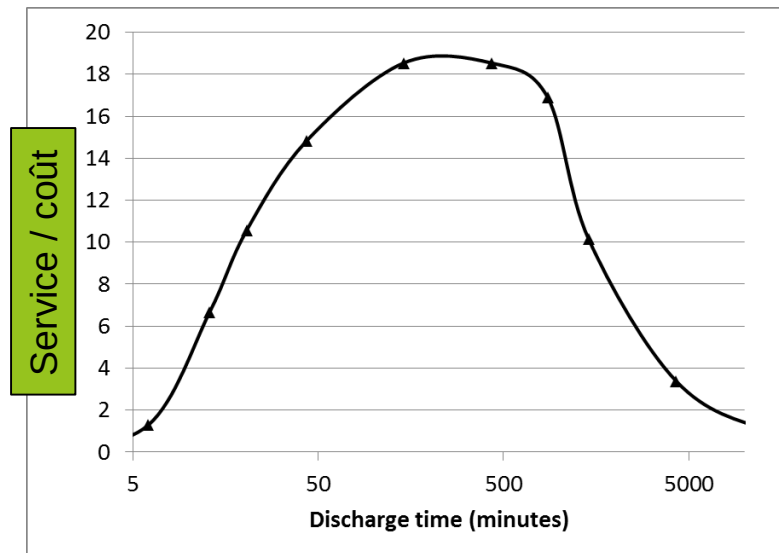
Pour les durées de stockage **très courtes** (beaucoup de cycles par an)

- 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 pour une batterie Li-ion : de l'heure à la journée



Dimensionnement par la puissance



Dimensionnement par l'énergie
cycles limités par la vie calendaire

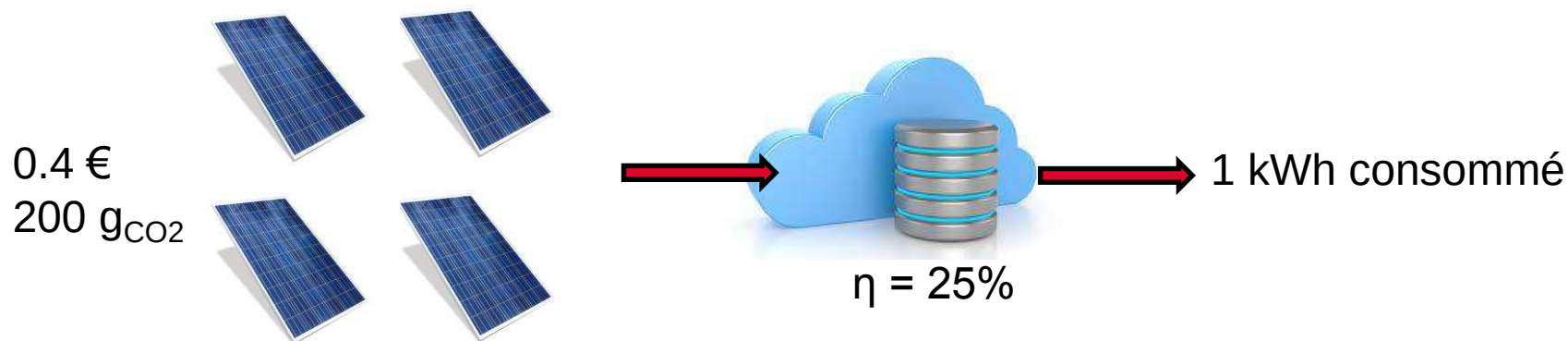
Au deux extrêmes les coûts et les impacts environnementaux explosent (/Wh/cycle)

- **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

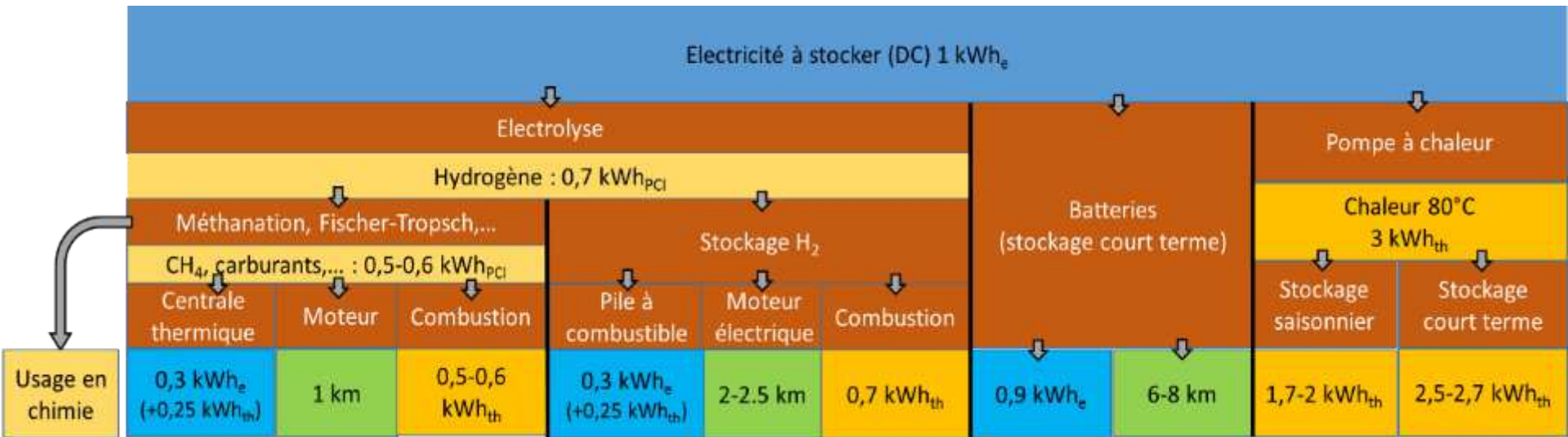
- Impact du rendement

Exemple d'un rendement de 25% (chiffres arbitraires)



QUELQUES ORDRES DE GRANDEURS: COMPARONS DES CHOSES COMPARABLES...

➔ Et pourquoi pas stocker?

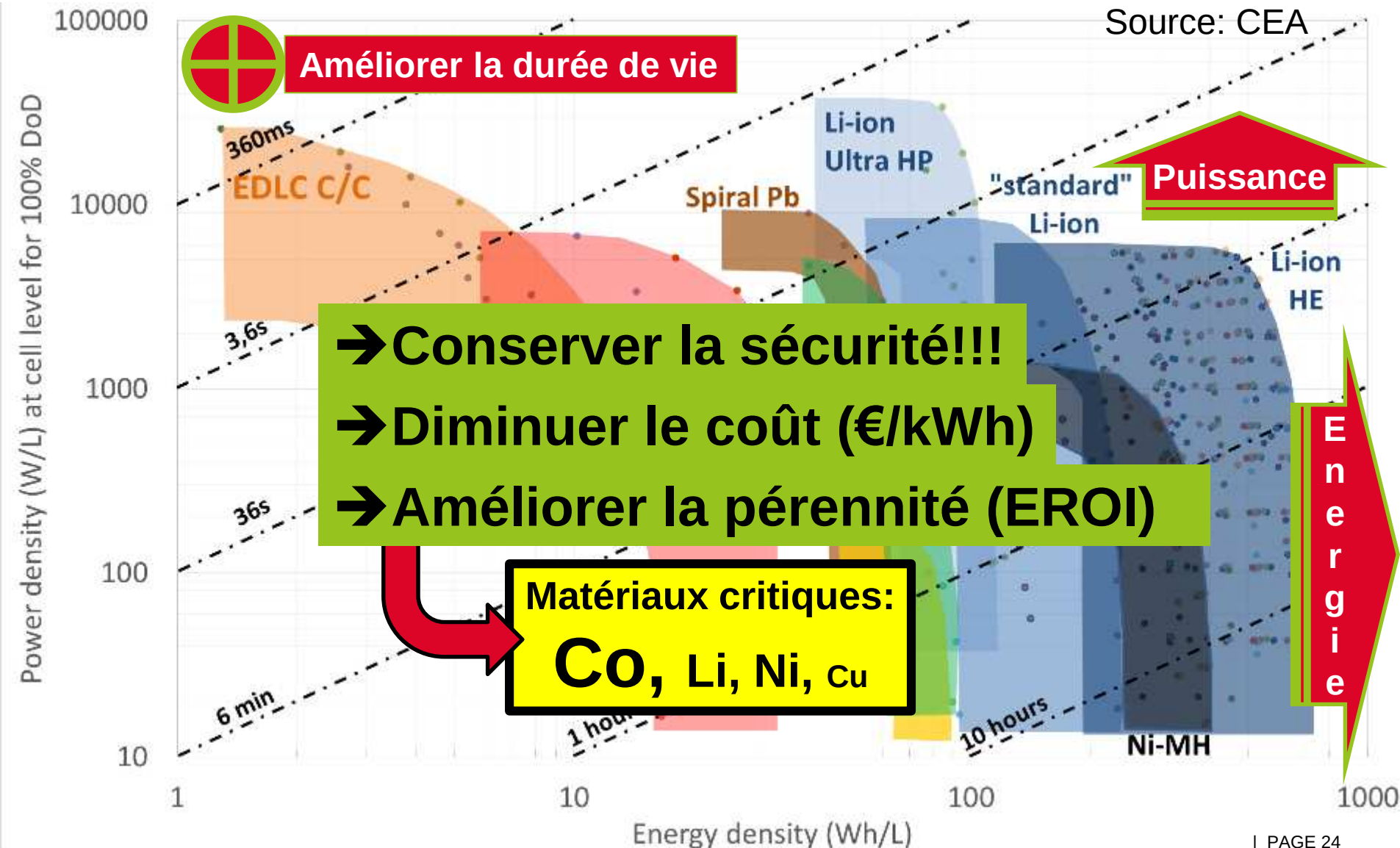


➔ La chaleur et les systèmes électrochimiques secondaires (batteries, supercondensateurs) présentent des rendements intéressants.

2- Etat des lieux sur les batteries

SYSTÈMES DE STOCKAGE ÉLECTROCHIMIQUE: DIAGRAMME DE RAGONE (VOLUMÉTRIQUE)

Source: CEA

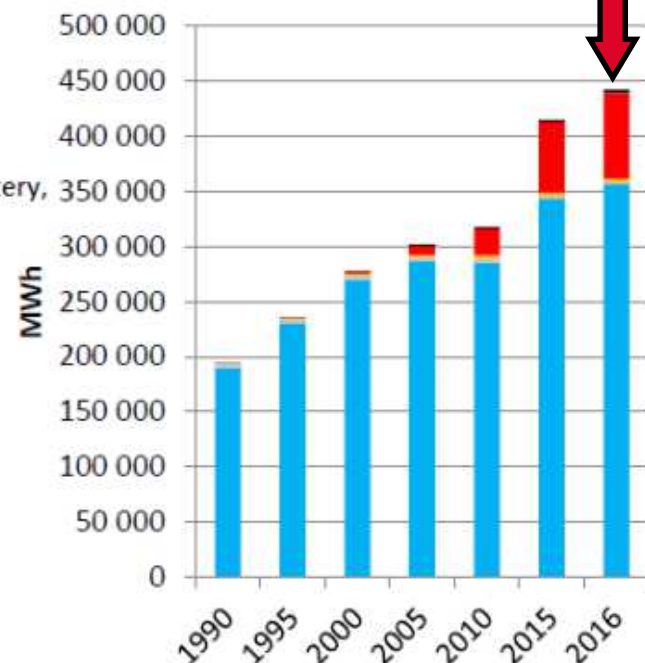
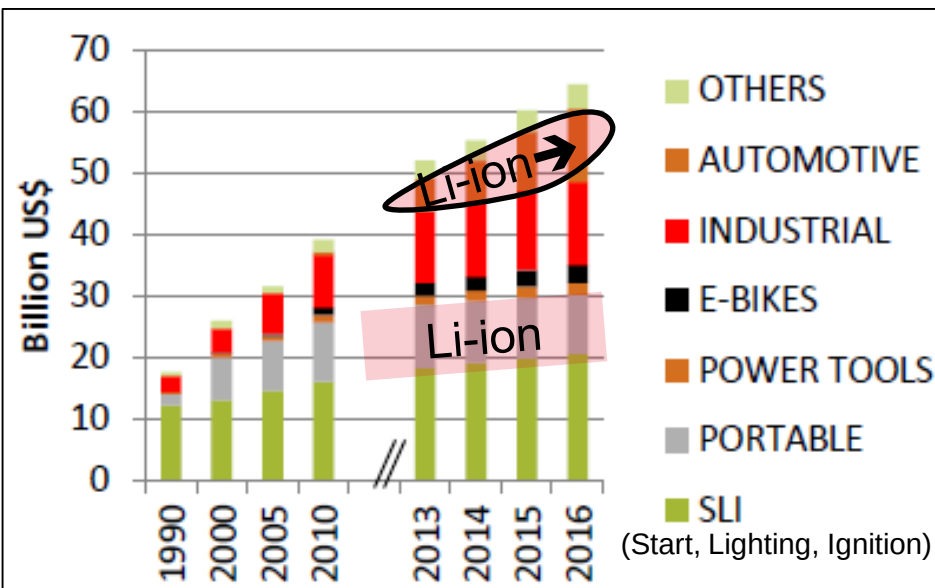
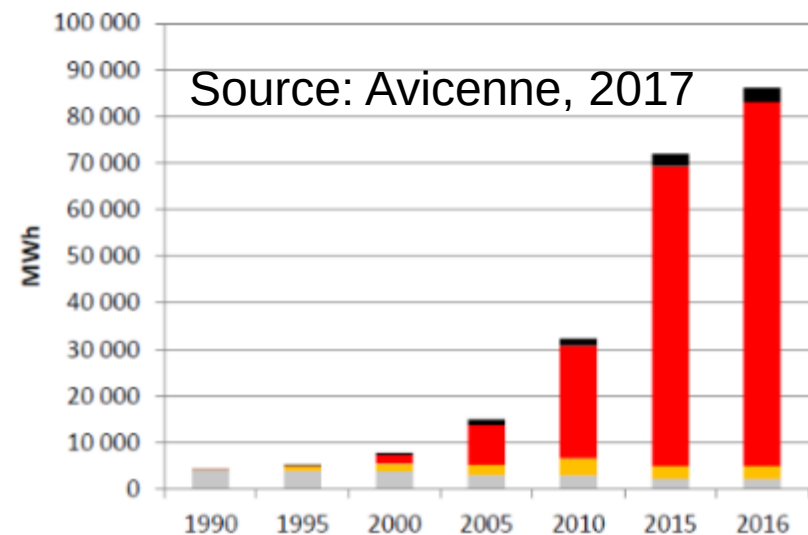


BATTERIES : MARCHÉ MONDIAL (VOLUME & VALEUR)

Source: Avicenne, 2017

Le Li-ion croît très rapidement (~12%/an)
(18% en volume et 40% en valeur) en raison du
marché de l'automobile électrifiée (EV / PHEV)

**... mais la batterie Pb reste de loin la
technologie la plus importante**
(80% en volume et 50% en valeur)!

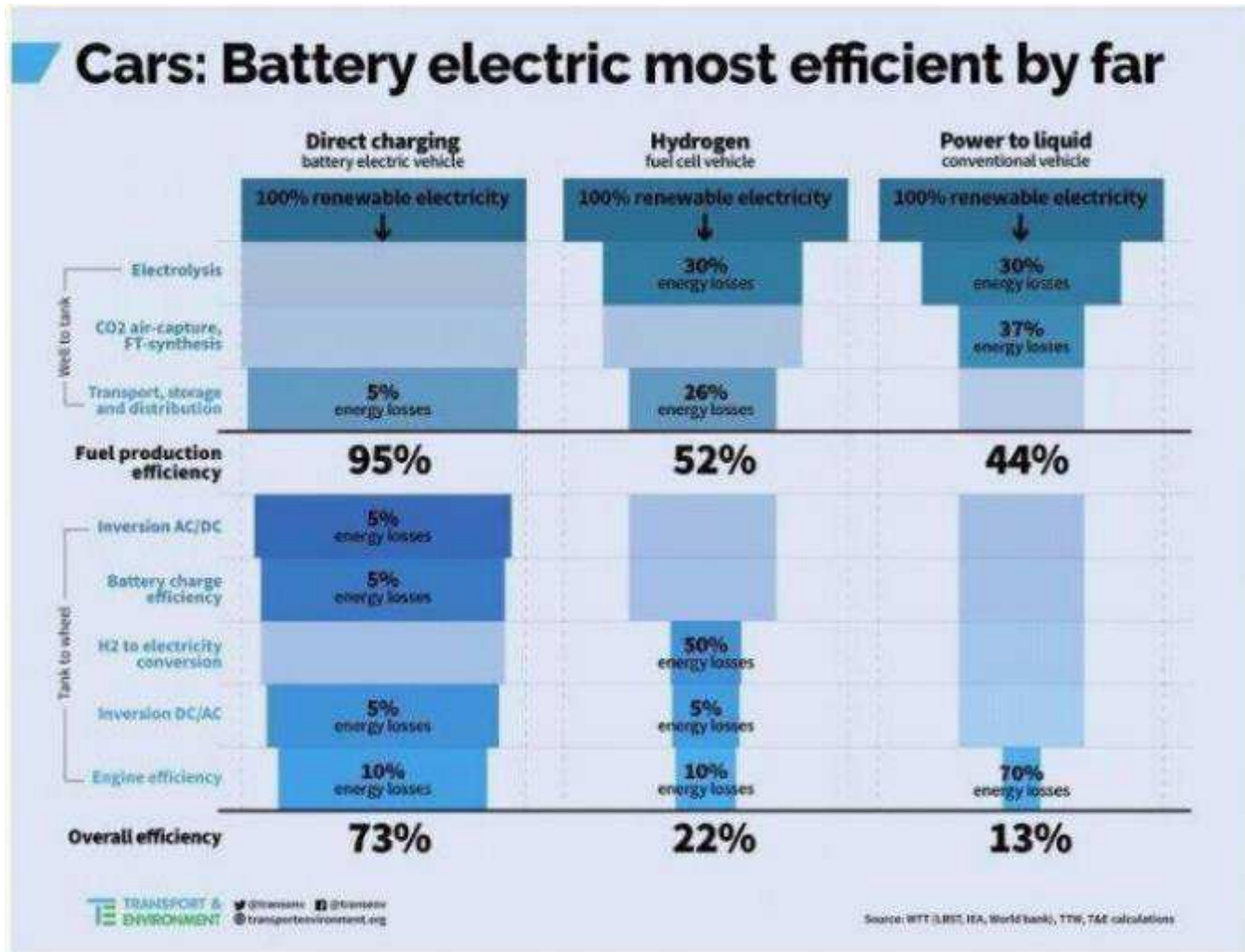


APPLICATIONS TRANSPORTS: PETITE COMPARAISON... AVANT D'ALLER PLUS LOIN!

Critère	Essence	Batterie Li-ion (Zoe V2)
Rendement sortie roues	24% 36% (sortie moteur) x 67% (transmission)	77% (ou 86% après stockage) 95% (charge AC/DC) x 95% (η batterie) x 95% (décharge DC/AC) x 90% (moteur électrique)
Densité de l'énergie (à l'échelle de la batterie ou du réservoir)	11500Wh/kg 8625Wh/L	134Wh/kg 171Wh/L
Densité d'énergie (Wh/kg) utilisable	2760Wh/kg 2070Wh/L	115Wh/kg 147Wh/L
Réservoir d'énergie utile	50L / 37,5kg, soit 103,5kWh	240L / 305kg, soit 35,1kWh
Puissance de charge max. utile	3 105kW	39kW (= 43kW x 0,9)
Consommation/100km	13,2kWh	
Vitesse de charge max.	3 minutes	57 minutes
Distance accessible /charge	800km (6,25L/100km)	265km (<180km sur autoroute)

➔ **Difficile de battre un véhicule thermique...**

QUELQUES ORDRES DE GRANDEURS: COMPARONS DES CHOSES COMPARABLES...



... et je ne suis pas le seul à le constater...

3- La mobilité: faut-il vraiment aller plus loin?

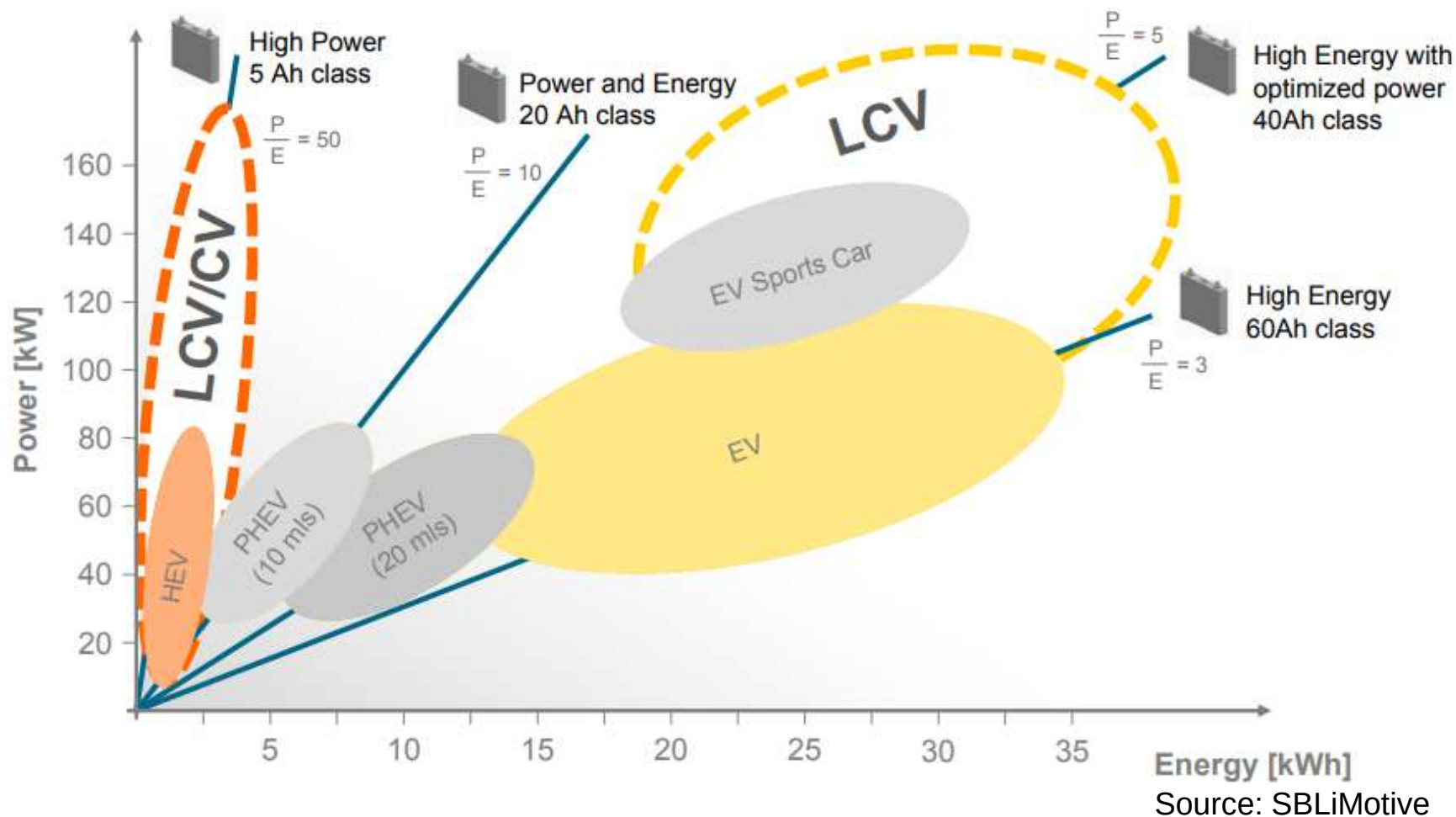
QUELQUES VALEURS : ÉLECTRIFIER LE VÉHICULE... C'EST QUOI?

Type d'hybridation	Substitut Pb	Micro	<u>Mild</u>	Full	PHEV	BEV
Fonctions	Démarrage moteur	S & S Equilibrage de réseau	S & S REF Boost Downsizing Micro ZEV	S & S REF Boost Downsizing <u>Faible ZEV</u>	S & S, REF Boost Downsizing ZEV <u>étendu</u>	100% ZEV
Tension	12V	12V	48V	<300V	<400V	300 à 600V
Puissance	<5kW	<5kW	10 à 30kW	40 à 165kW	> 50kW	>50kW
Energie utilisée/cycle	<2Wh	<5Wh	0,3 à 1,3 kWh	<2kWh	5 à 20kWh	>10kWh
Energie installée	<1,5kWh	<2kWh	1 à 3kWh	<400Wh	6 à 18 kWh	>12kWh
Réduction de CO ₂	0%	<8%	<15%	<20%	>35%	ZEV

Tableau 1 : caractéristiques des applications automobiles pour différents taux d'hybridation

Note: REF: récupération d'énergie au freinage. S & S: start & stop. ZEV: Zero Emission Vehicle.

LE LITHIUM-ION POUR DIFFÉRENTES APPLICATIONS AUTOMOBILES



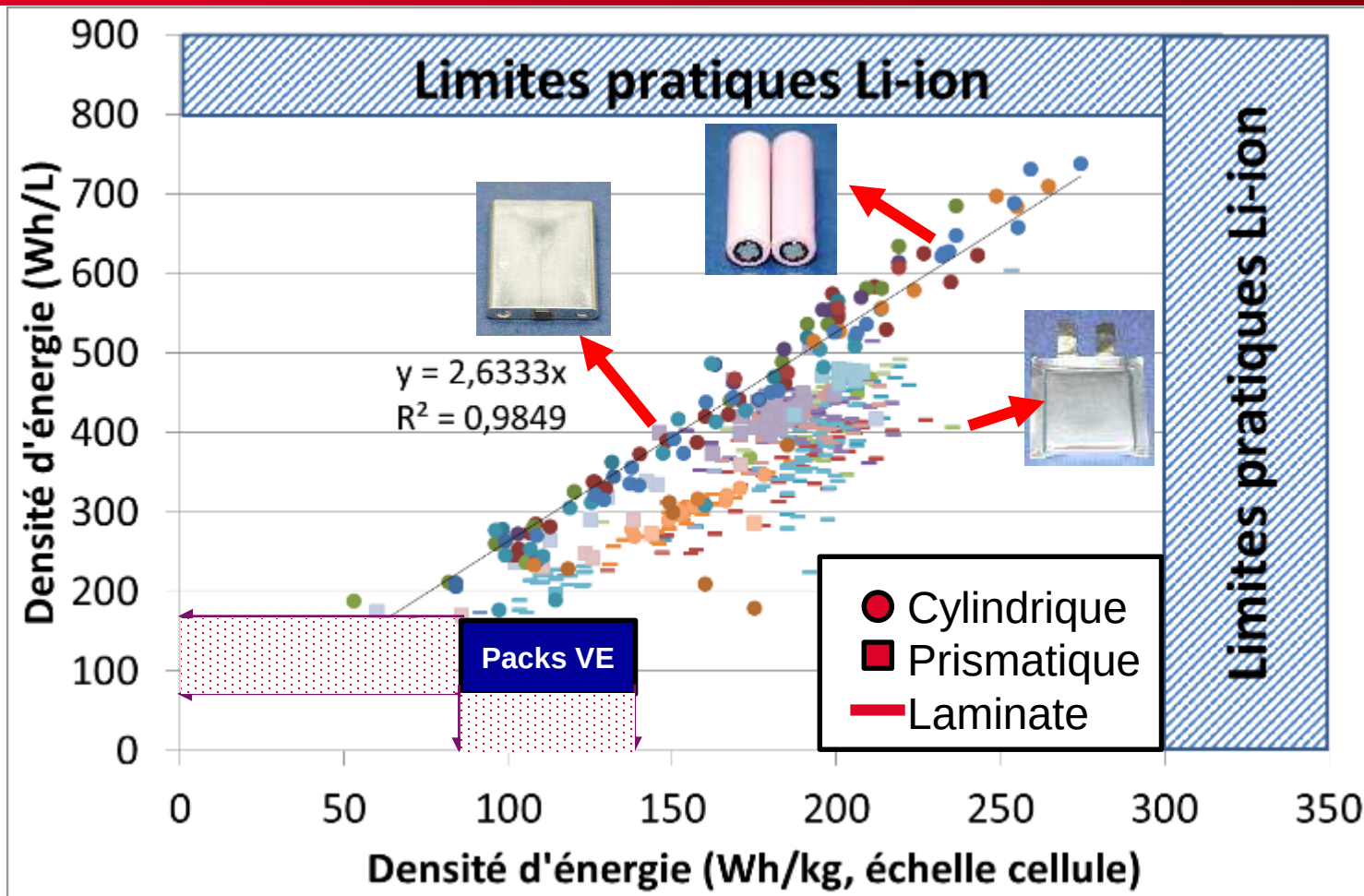
- **Tendance actuelle**

(« **ressenti sociétal** »):

vouloir remplacer le véhicule thermique par un véhicule « tout électrique »:

1. Un véhicule « tout électrique » c'est vert!
→ Est-ce vrai?
2. Augmenter l'autonomie des véhicules « tout électrique »
→ Est-ce possible et est-ce une bonne idée?
3. Accroître la vitesse de charge
→ Est-ce possible et est-ce une bonne idée?
4. Diminuer les coûts
→ est-ce possible et est-ce durable?

CONSTAT: LES FORMATS ACTUELS VS DENSITÉ D'ÉNERGIE (MASSIQUE ET VOLUMIQUE)

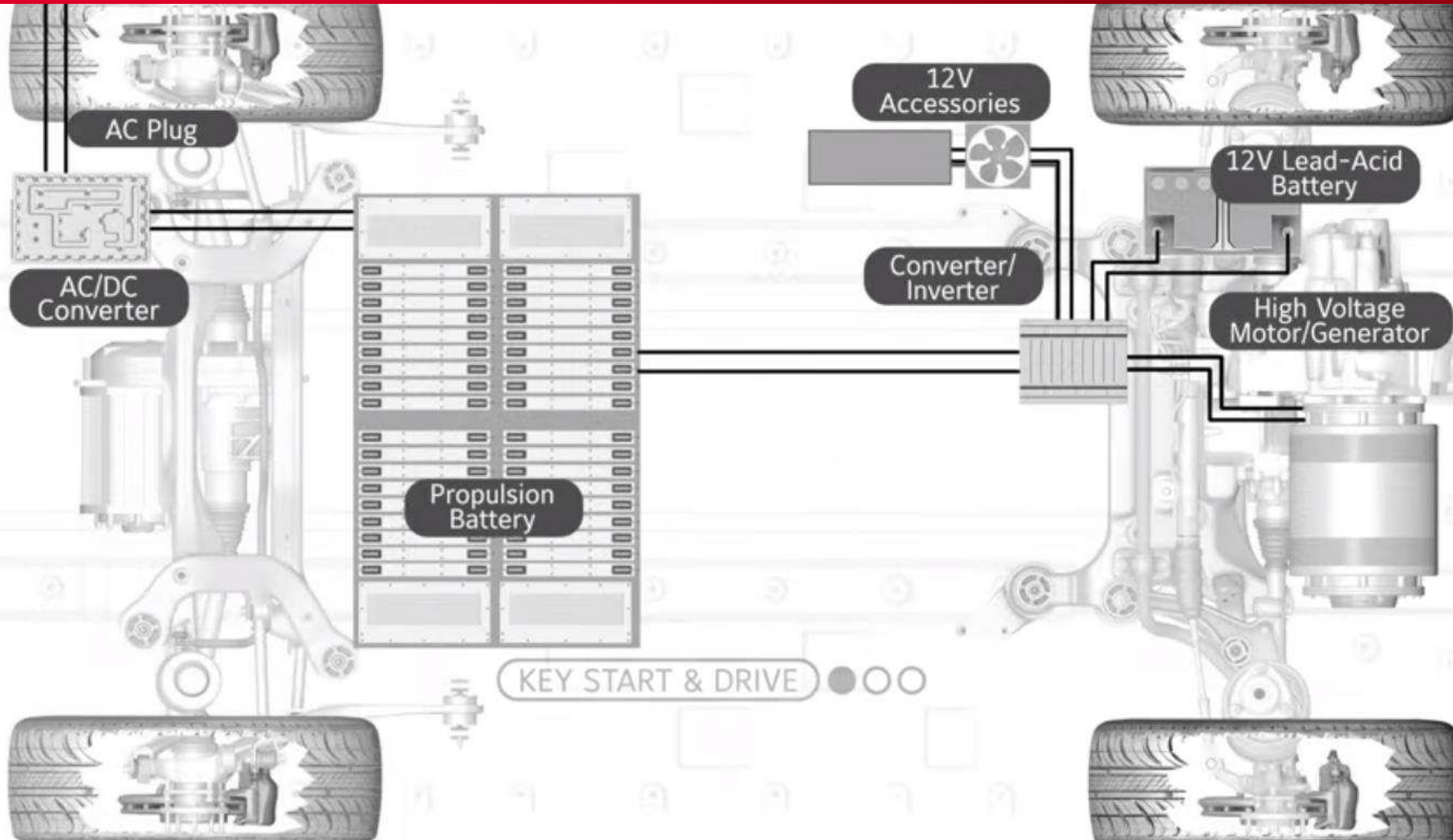


- 1- Les valeurs les plus hautes de densité d'énergie n'ont pas bougé depuis 2012!
- 2- Le format cylindrique est le plus dense, talonné par le laminare (amélioration continue)
- 3- La densité d'énergie des packs est très en deçà de la densité d'énergie des cellules

Source: CEA

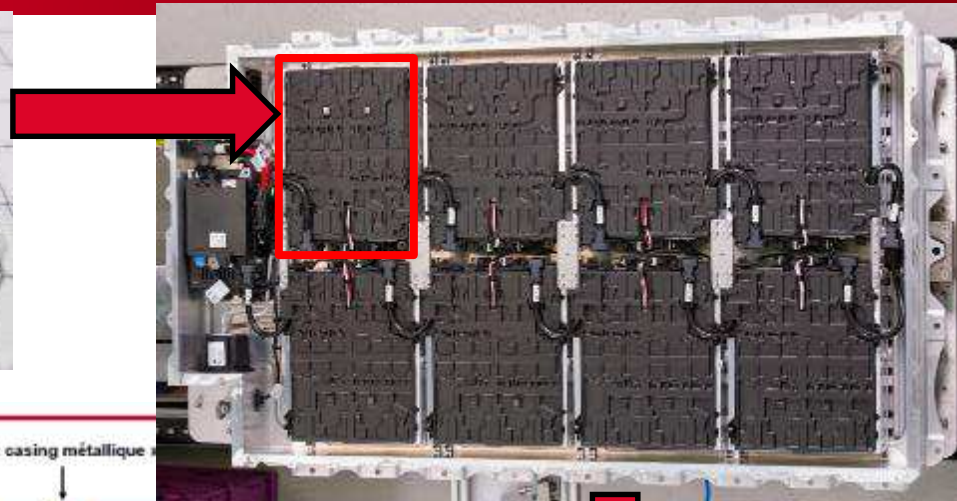
1- Augmenter l'autonomie

BATTERIE ≠ CHAÎNE DE TRACTION...

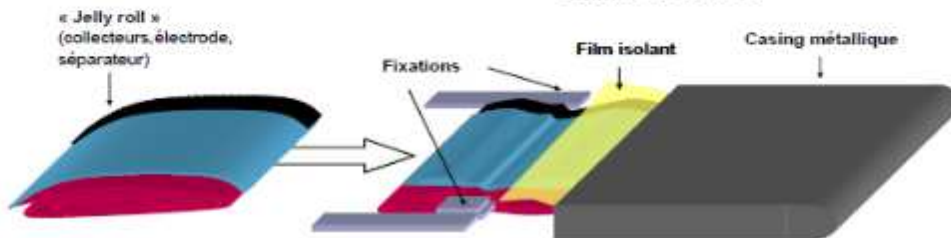
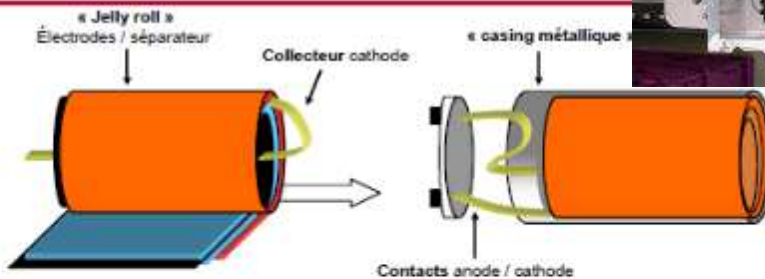


Source: Johnson Controls (<https://www.youtube.com/watch?v=wEEBBXm2BsM>)

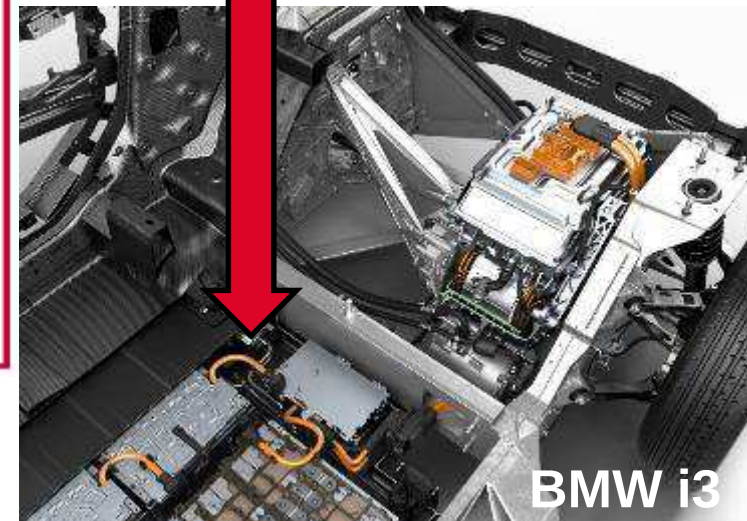
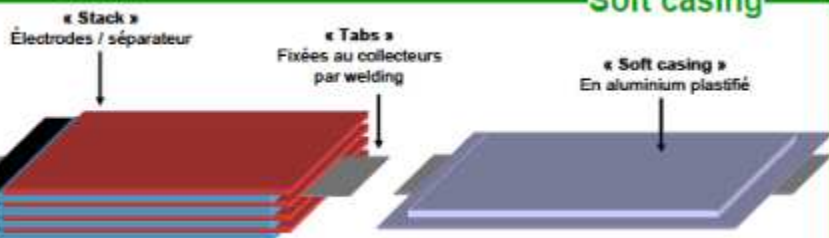
LES SYSTÈMES DE STOCKAGE: DES BOITES DANS DES BOITES?



Hard casing



Soft casing



Il faut donc penser au recyclage
(démarche d'éco-innovation)

POURQUOI UTILISER DES ÉLECTROLYTES SOLIDES ?

Objectif N°1: accroître la densité d'énergie (massique et volumique) pour diminuer le coût du kWh.

CONSTAT:

- Le Li-ion conventionnel est proche de ses limites sans dégrader la durée de vie et la sécurité.
- Le Li-ion utilise des solvants organiques potentiellement dangereux
- Utiliser le lithium métal permet de répondre à l'objectif, mais il est impossible d'utiliser les électrolytes liquides (création de dendrites de lithium = risque de feu!)

Anode en graphite
(360mAh/g)

< 750Wh/L

< 260Wh/kg

Anode Si/graphite
(500mAh/g)

< 800Wh/L

< 300Wh/kg

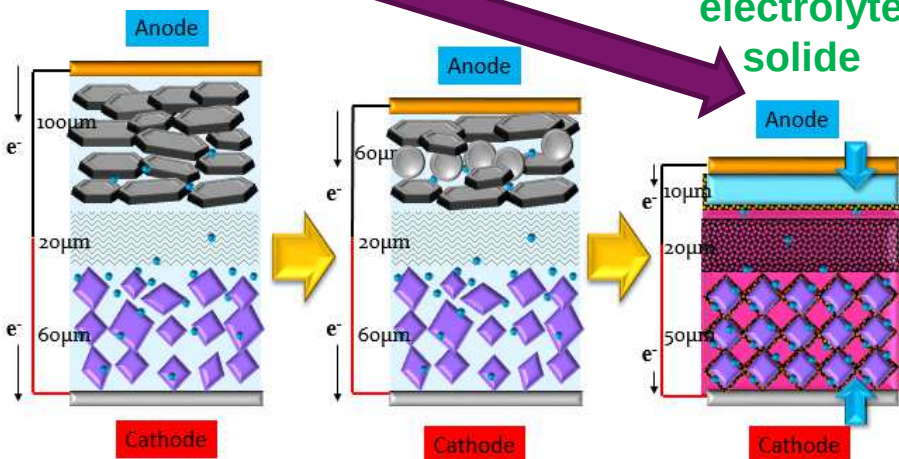
Anode en Li-métal
(3000mAh/g)

800 to 1200Wh/L
>350Wh/kg

Li-ion standard

Li-ion avancé

Li-métal avec
électrolyte
solide



SOLUTION ENVISAGEE:
ELECTROLYTE SOLIDE

Intérêt:
**permet de conserver
les cathodes actuelles**

VERROUS DES BATTERIES « TOUT SOLIDE » ?



Il faut les 4 piliers ensemble!!!!

$>1\text{mS/cm}$ à 20°C

Conductivité
de
l'électrolyte

Electrolyte
solide

Gestion des
interfaces
entre les
constituants

Nouveaux
procédés

Stabilité
électro-
chimique de
l'électrolyte

$[0\text{V} ; 4,5\text{V}]$
Vs Li métal

Sécurité /
toxicité /
pérennité

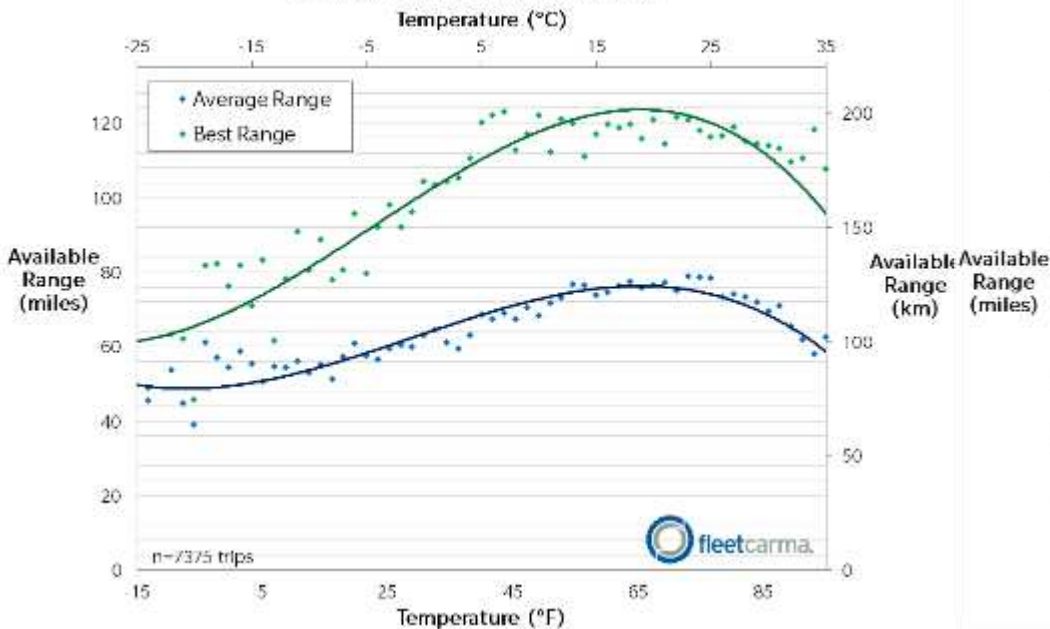
Pas de matériaux critiques, pas de matériaux toxiques, garantir la sécurité

EXEMPLE D'IMPACT DE LA TEMPÉRATURE SUR L'AUTONOMIE D'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE

Impact de la température sur l'autonomie

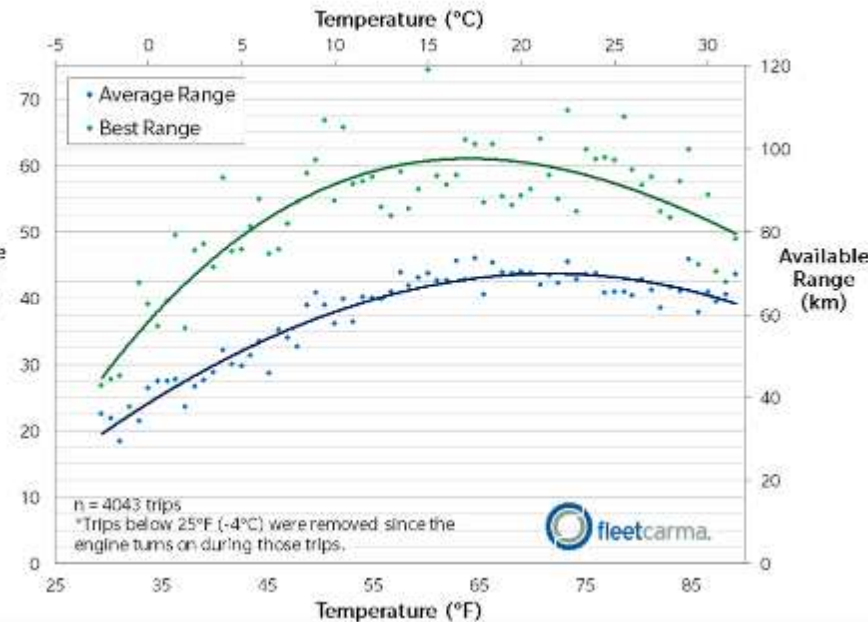
Nissan Leaf: Range vs. Temperature

Spanning All Model Years in the FleetCarma Database



Chevrolet Volt: Electric Range vs. Temperature

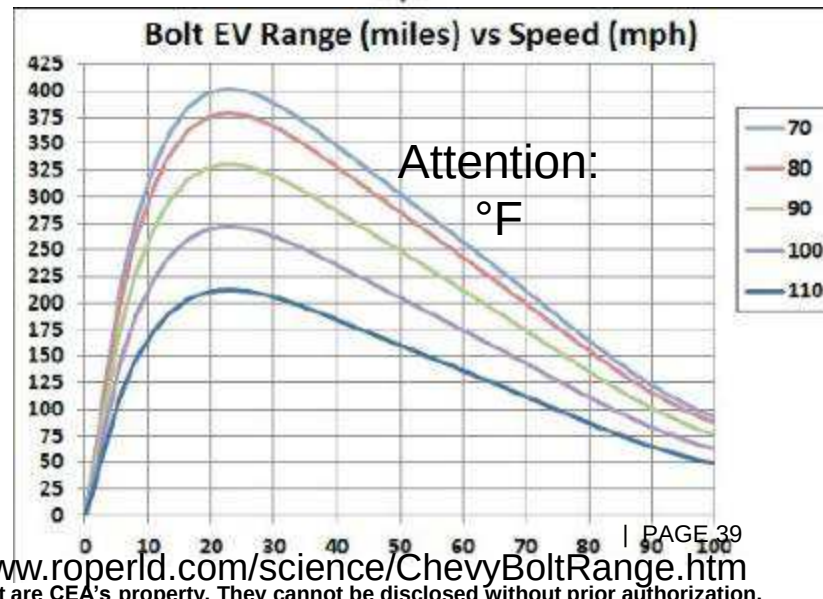
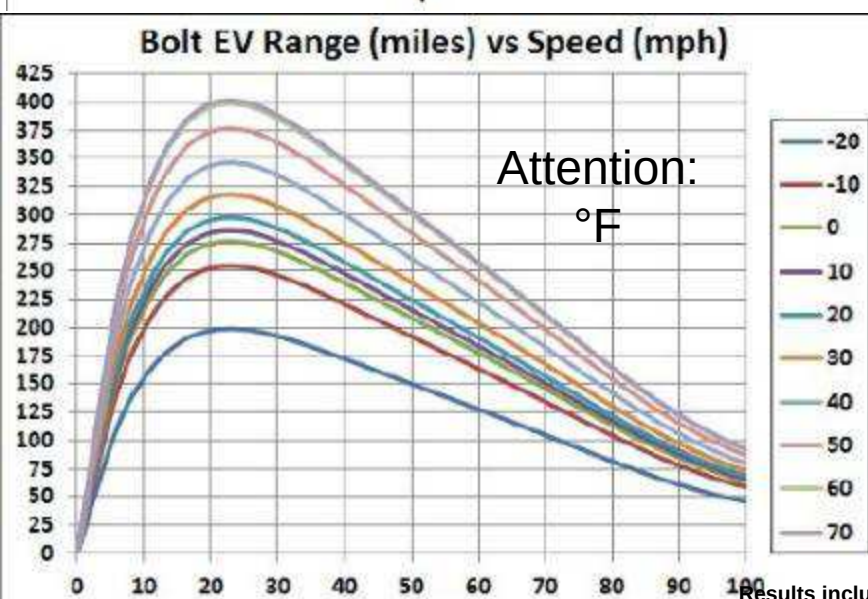
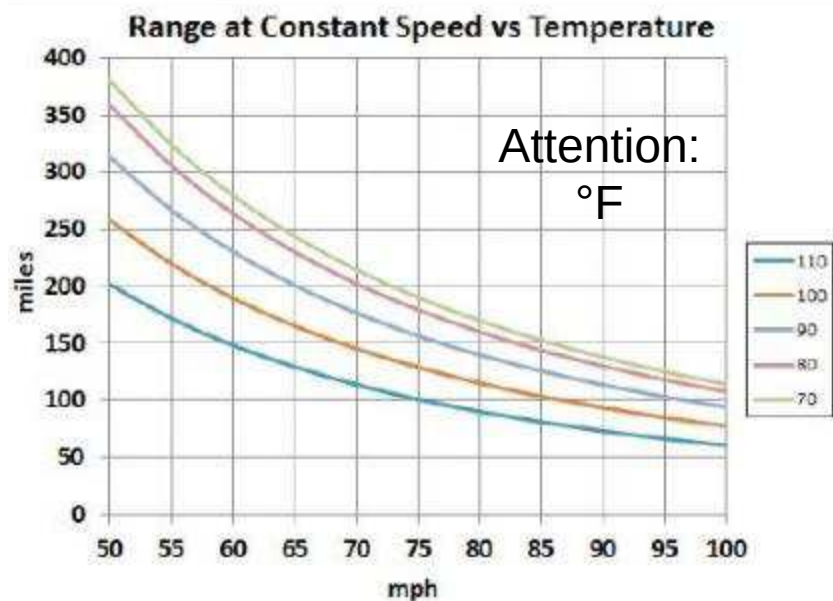
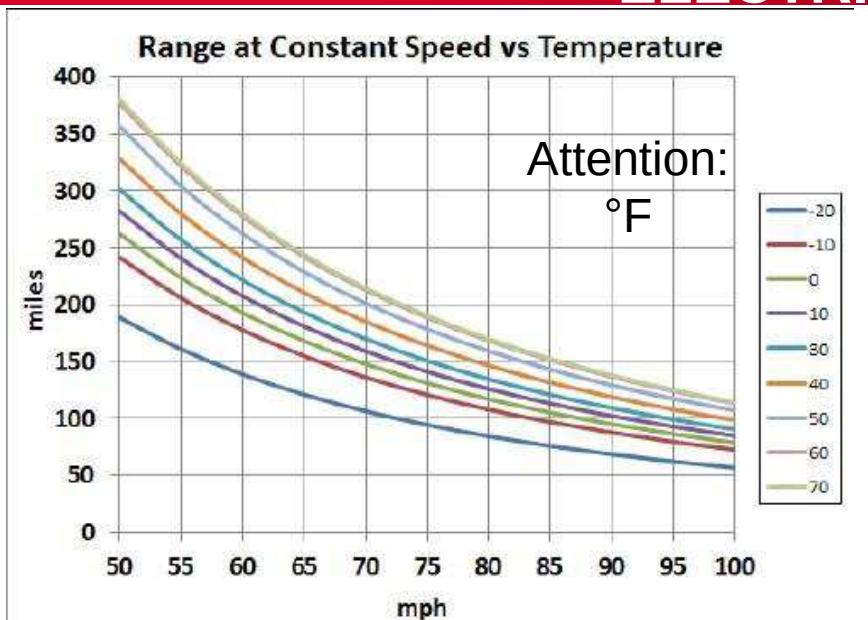
Spanning All Model Years in the FleetCarma Database



Note: en deçà de -4°C, le moteur thermique de la Chevrolet Volt se remet en route

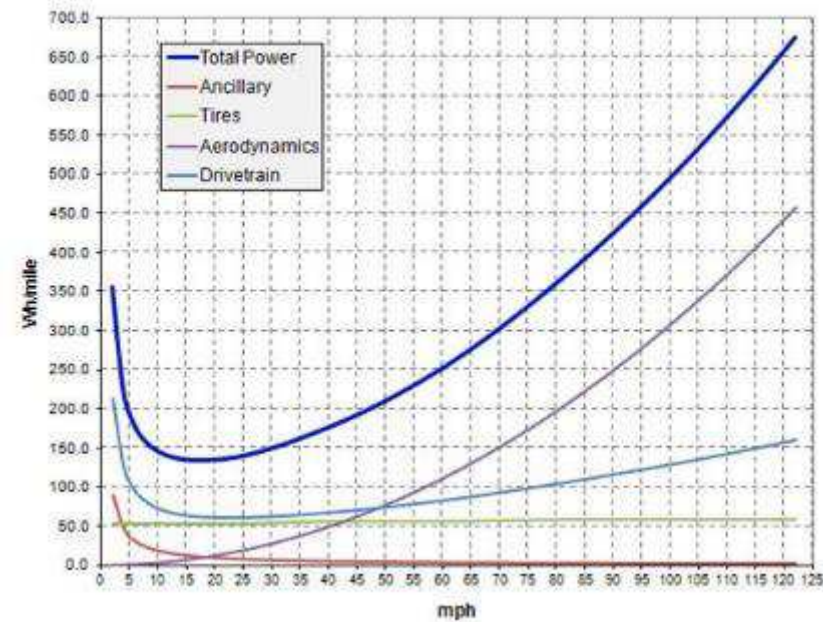
➔ Impact très fort à la fois aux basses températures (chauffage et performances dégradées en puissance) et aux hautes températures (climatisation et thermalisation du pack batterie).

EXEMPLE D'IMPACT DES AUXILIAIRES ET DE LA TEMPÉRATURE SUR L'AUTONOMIE D'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE (CAS DE LA BOLT)

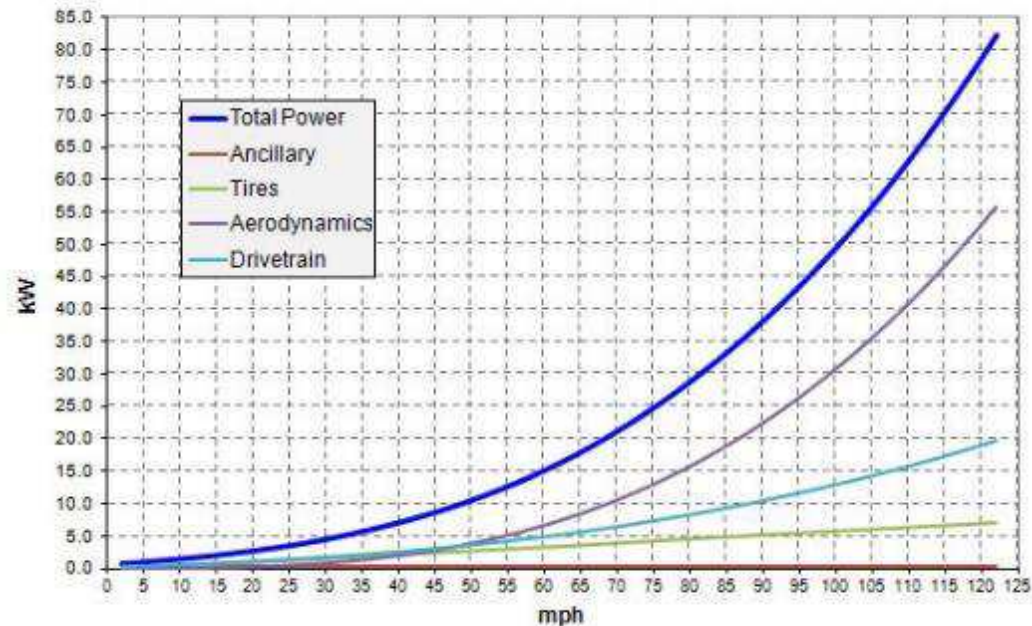


RÉPARTITION DES ORIGINES DE CONSOMMATION (CAS DE LA TESLA ROADSTER)

Wh/mile vs. Speed



Power vs. Speed



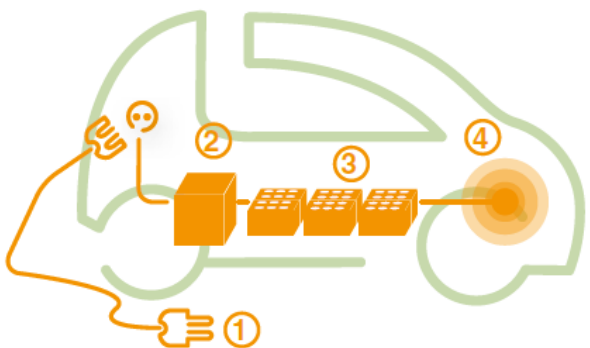
Constat sur un véhicule réel (vitesse vs consommation)

Source: <http://www.solarjourneyusa.com/EVdistanceAnalysis5.php>

| PAGE 40

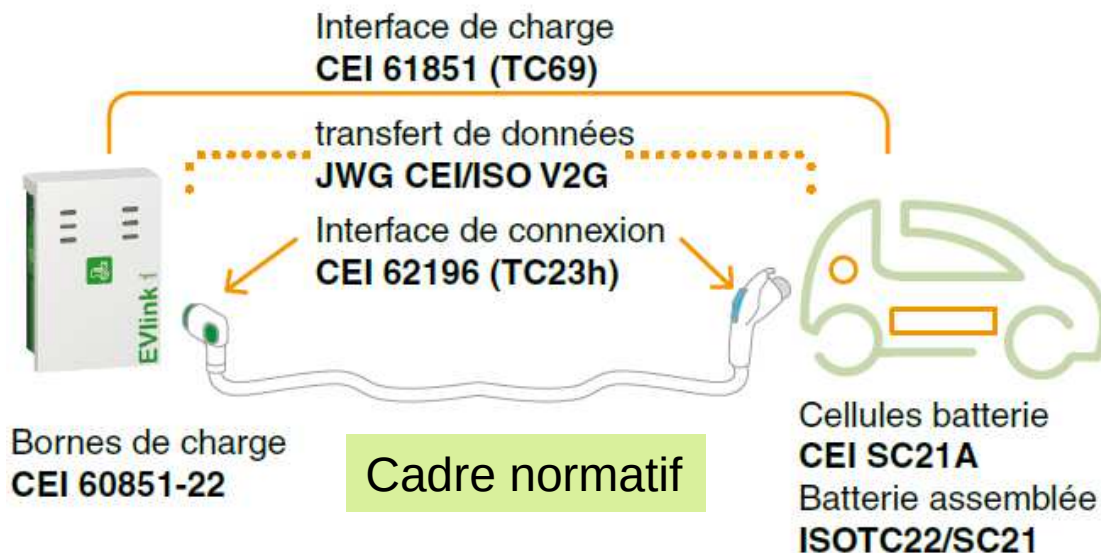
2- Charger toujours plus vite...

LE BUZZ DE LA CHARGE RAPIDE (TOUJOURS PLUS VITE... TOUJOURS PLUS CHAUD!)



- ① Prises de raccordement pour charge
- ② Chargeur intégré
- ③ Groupe de batteries permettant le stockage de l'énergie
- ④ Onduleur et Moteur(s) de traction

Architecture d'un VE



Les 4 types de charge

- Charge **lente** : courant alternatif à 2 kW
- Charge **normale** : courant alternatif à 4 kW
- Charge **accélérée** : courant alternatif de 7 à 22 kW

Au-delà, on parle de charge **rapide** :

- ≥ 43 kW
- en courant continu ou alternatif selon les constructeurs

ÇA DONNE ÇA!

Fastned: 350kW (Allemagne)



**Le problème n'est pas l'énergie...
mais la puissance!**

Petit calcul:

1VE : charge à 4kW en charge lente et 40kW en rapide

Hypothèses:

Parcours: 13 000km/an et 13kWh/100km
➔ $\approx 2\text{MWh/an}$ (consommation moyenne électrique d'un foyer en France: 4,7MWh)

Si 2 000 000 de VE (**évolution envisagée...**)

Charge à l'heure de pointe:

- à **8GW électrique** en charge « normale »
- à **80 GW** en charge rapide...

Petit rappel : puissance max. élec. Installée en France: **130,7GW** (en 01/2018)

Tesla Supercharger: 125kW (Allemagne)



STRATÉGIES DE CHARGE

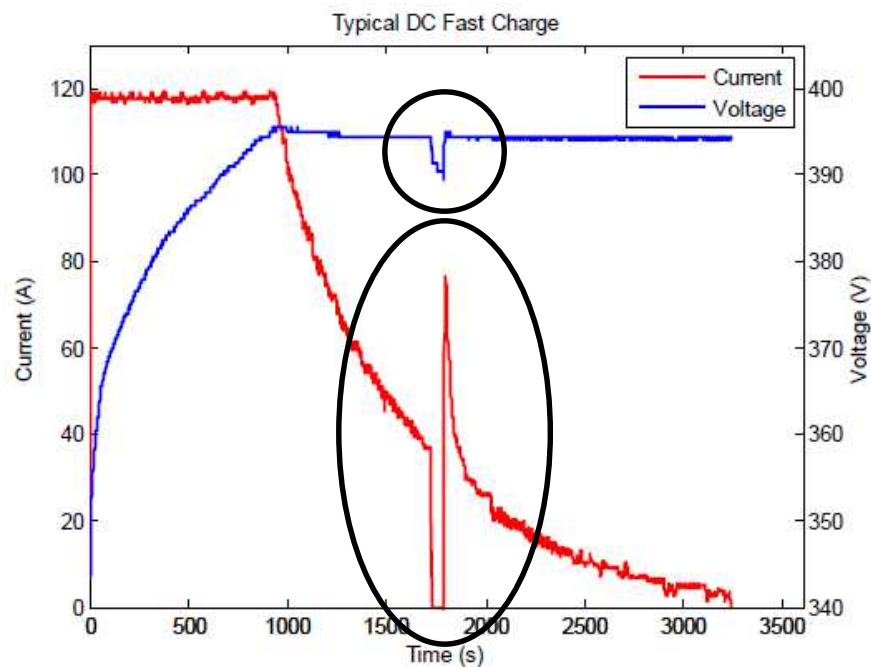


Figure 1. A DC fast charge is shown for a 2012 Nissan Leaf charged with a 50kW fast charger. The charge automatically ended after 1725 seconds, and another charge session was initiated shortly after the first one ended to fully charge the battery.

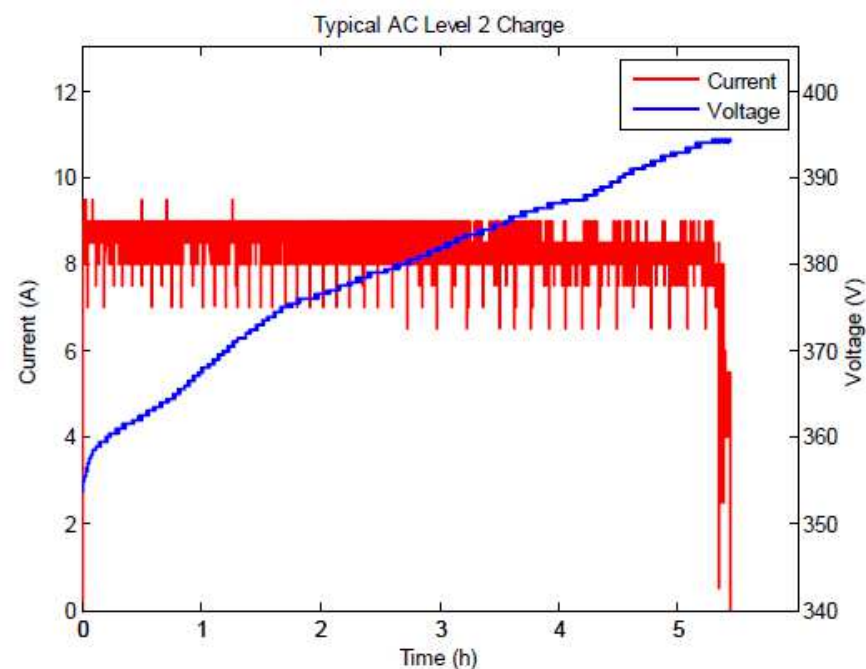


Figure 2. An AC level two charge is shown for a 2012 Nissan Leaf with a 3.3 kW onboard charger.

- ➔ En charge rapide (50kW), après 1/2h la charge n'est pas complète!
- ➔ La puissance réelle n'est pas de 50kW mais de 47,4kW ($= 395V \times 120A$) : le rendement est donc de 95%

STRATÉGIES DE CHARGE

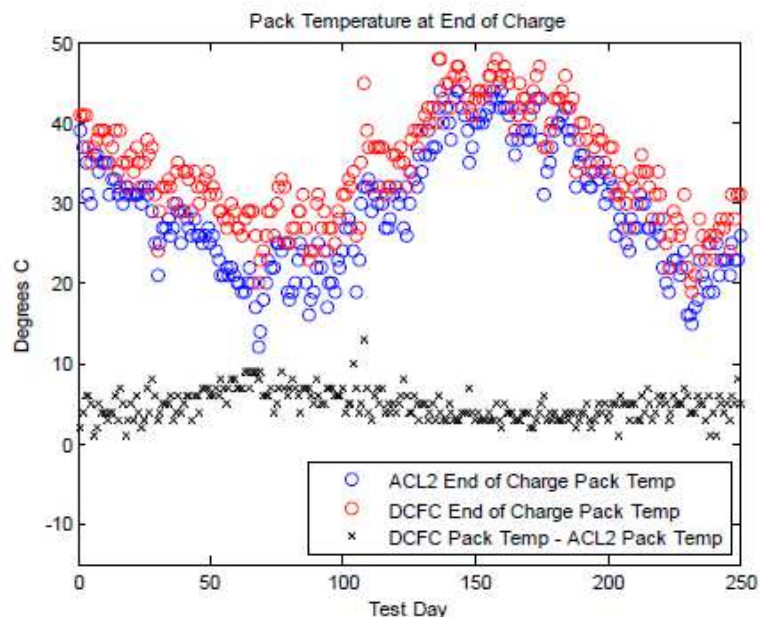
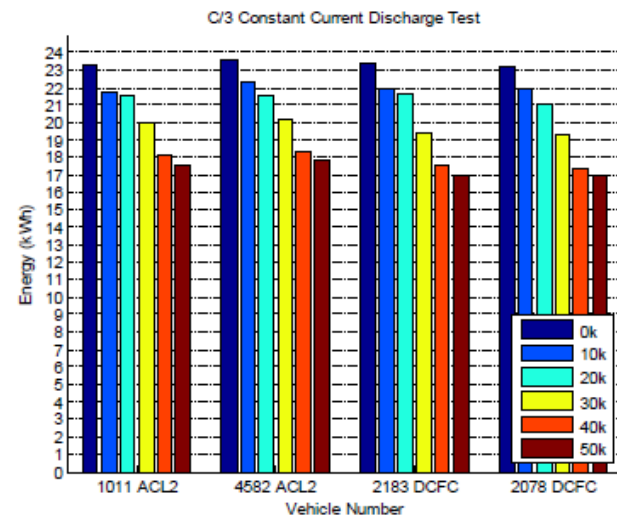


Figure 11. Battery pack temperatures at end-of-charge is shown for an alternating test pair of one ACL2 vehicle and one DCFC vehicle over 250 consecutive test days.

- La charge rapide accroît la température du pack (rendement plus faible)
- Les pertes irréversibles sont plus importantes
- **Charger trop rapidement n'est pas une bonne idée!!!!**



Perte d'énergie mesurée tous les 10 000 miles En fonction du type de charge

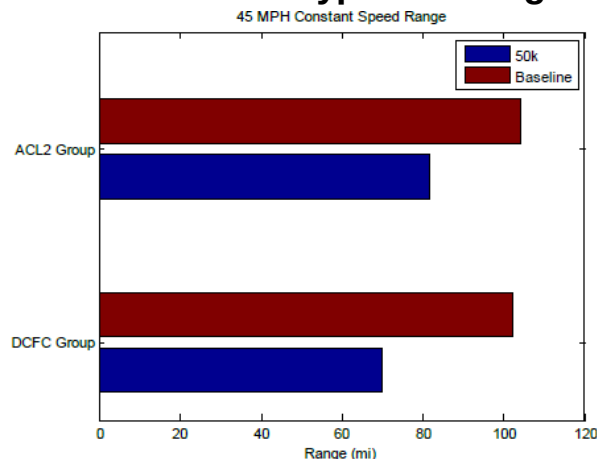


Figure 17. Constant-speed average range achieved for each test group at baseline and after 50,000 miles.

AUTONOMIE ET VITESSE DE CHARGE: PRENDRE LE PROBLÈME DIFFÉREMMENT... QUELS SONT LES VRAIS USAGES?

- Constat: la prise électrique ne suit pas la voiture



70% des km en trajets <50km
50km ≤ 6 kWh

30% des km en trajets longs
30 – 50 – 100 – 200 kWh ???
+ charge rapide

Qu'est-ce qui est raisonnable ?

- Quoique...



Siemens

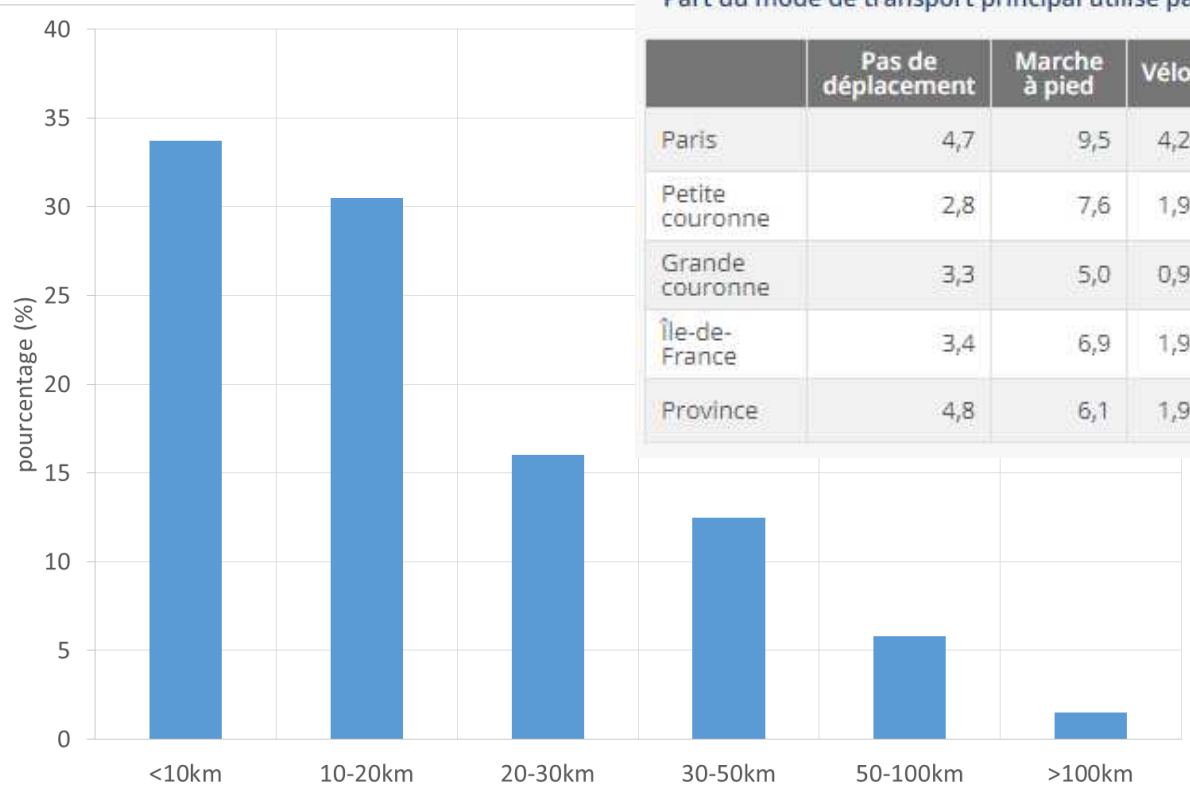


Volvo - Alstom



ElectRoad

PRENDRE LE PROBLÈME DIFFÉREMMENT: QUELS SONT LES VRAIS USAGES?



Part du mode de transport principal utilisé par les actifs en emploi (en %)

	Pas de déplacement	Marche à pied	Vélo	Deux-roues motorisés	Voiture, camion, fourgonnette	Transports en commun
Paris	4,7	9,5	4,2	4,5	12,3	64,8
Petite couronne	2,8	7,6	1,9	3,6	36,6	47,5
Grande couronne	3,3	5,0	0,9	1,9	58,9	29,9
Île-de-France	3,4	6,9	1,9	3,1	41,5	43,2
Province	4,8	6,1	1,9	1,6	77,9	7,6

Un VE à forte autonomie n'a pas beaucoup de sens...

➔ L'hybride rechargeable est beaucoup plus pertinent (techniquement parlant)

Distance domicile – travail pour les « navetteurs »
(>50% en voiture en France)

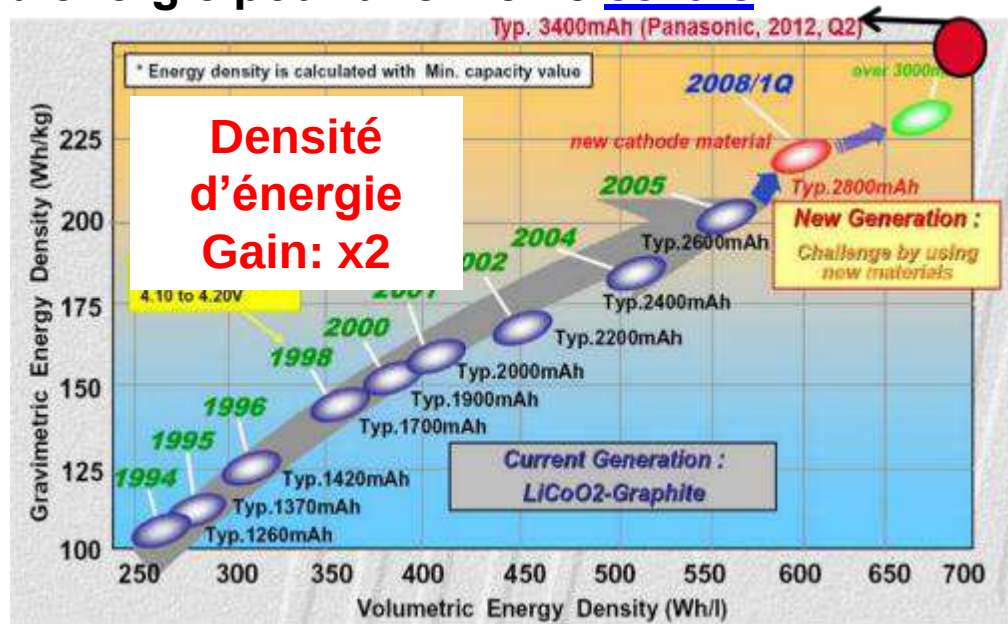
Note: en France: 25,8 M d'actifs ayant un emploi, dont 6 M en Ile de France.

Source: INSEE, 2013

3- Baisser le prix

BAISSER LES COÛTS: COMMENT?

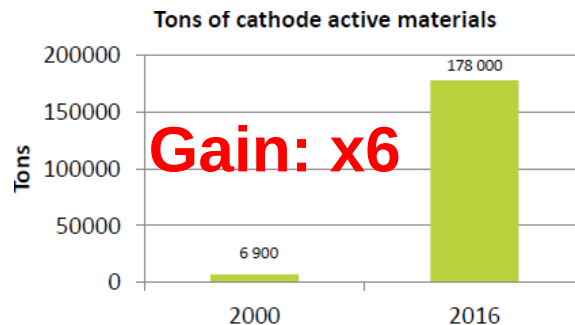
Baisser les coûts par des effets de volume et l'accroissement de la densité d'énergie pour une même cellule



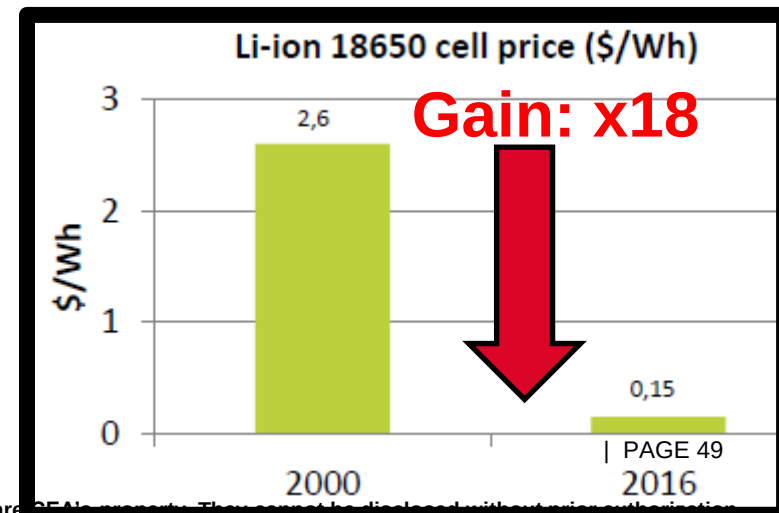
Amélioration du process et des composants passifs → impact de ratio actif/passif de l'accumulateur et donc la densité d'énergie

Gain: x1,5

Évolution de la densité d'énergie des accumulateurs 18650 depuis 1994



Accroissement des volumes



- **Diminuer la quantité de cobalt et les matériaux critiques**
- **Améliorer la durée de vie**
 - ➔ **diminuer le coût d'usage (par cycle)**
- **Diminuer l'énergie embarquée dans la batterie!**
 - ➔ **mais contraire à l'augmentation de l'autonomie**
 - ➔ **plus durable!**

VERS UN ACCUMULATEUR LI-ION PLUS DURABLE?

$$E^+ - E^- = \text{Cell voltage}$$

Matériaux de cathode actuels

Positive

Negative

Matériaux d'anode actuels

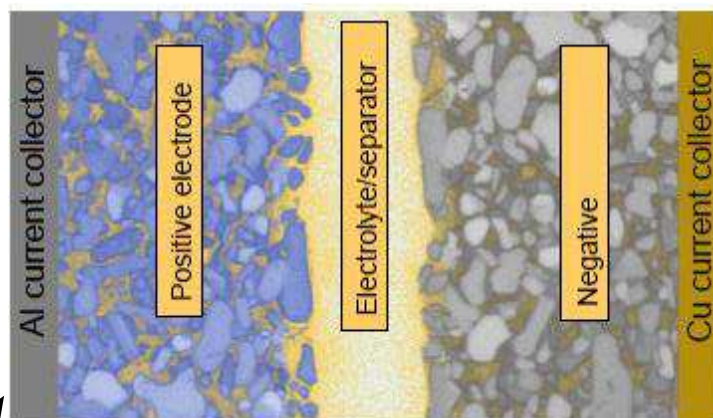
LCO (LiCoO_2)

NCA ($\text{LiNi}_a\text{Co}_b\text{Al}_c\text{O}_2$)

LMO (LiMn_2O_4)

NMC ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$)

LFP (LiFePO_4)



Graphite

(>95% Li-ion)

LTO

Hard Carbon

Li-Alloy (Si, Sn...)

↗ Densité d'énergie
et
Supprimer le cobalt

↗ Durée de vie ($\propto$ densité de puissance) et ↘ coût des matériaux actuels

↗ Densité d'énergie

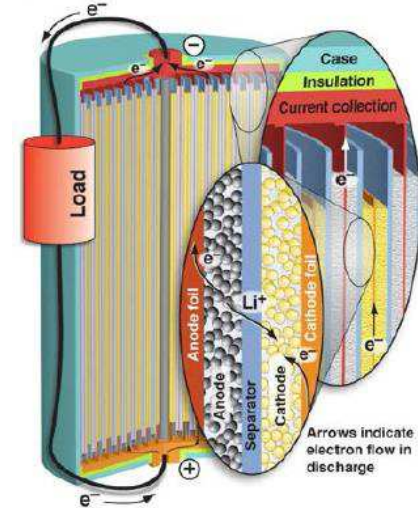
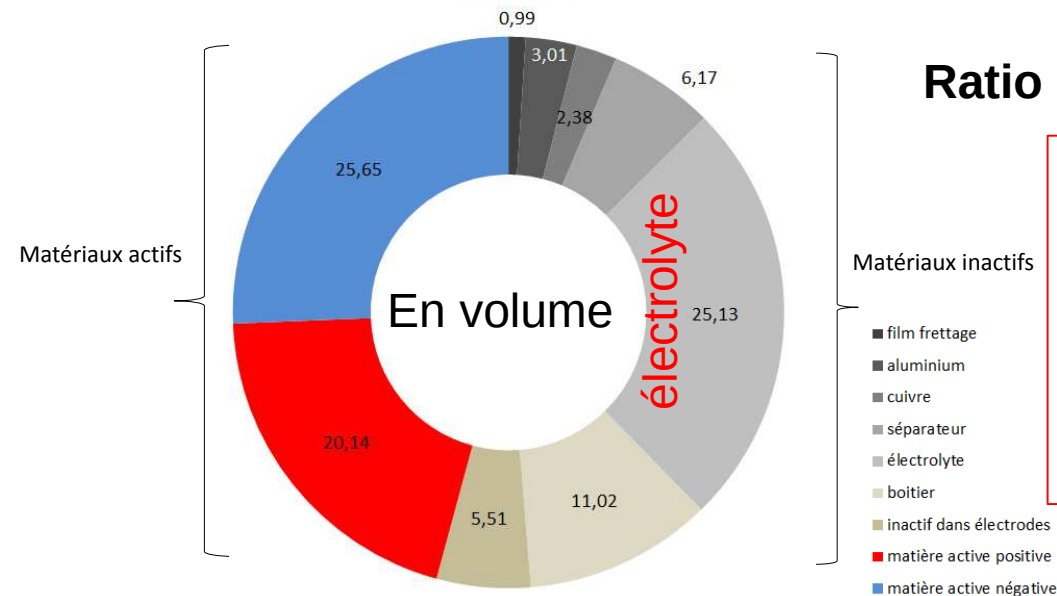
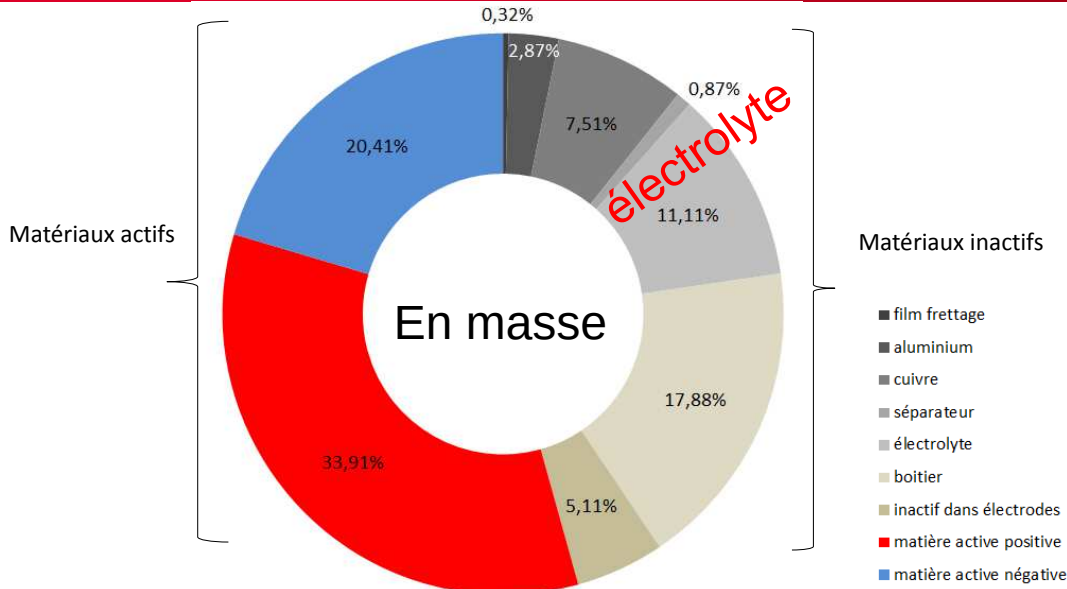
→ Nouveaux matériaux
- Li-Rich
- Rock Salts

→ Comprendre le vieillissement
→ Améliorer les process pour produire

→ Nouveaux matériaux à base de Si

4- Un véhicule électrique, c'est vert?

EXEMPLE DE CELLULE LI-ION TYPE « CONSUMER » TRÈS FORTE DENSITÉ D'ÉNERGIE



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

Ratio de matière active : > 50% en masse

Électrolyte =

LiPF_6 ( )

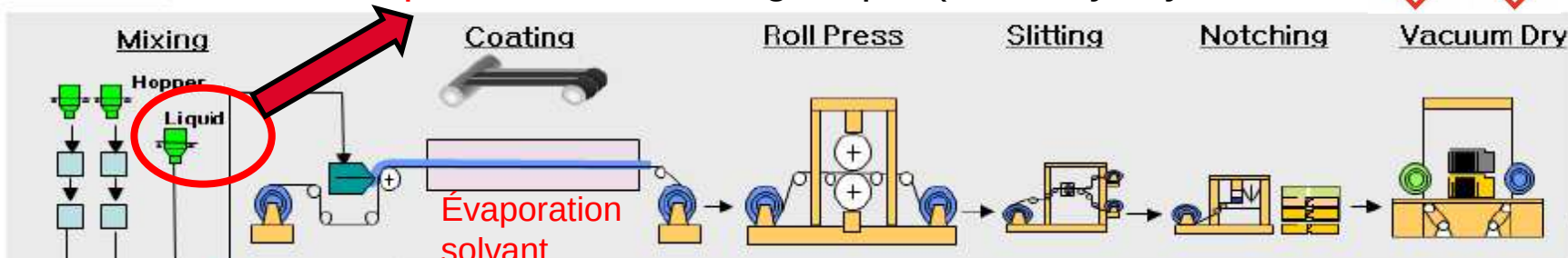
Mais pas d'alternative performante!

+ mélange de carbonates organiques (EC, DEC, DMC, EMC, PC....)

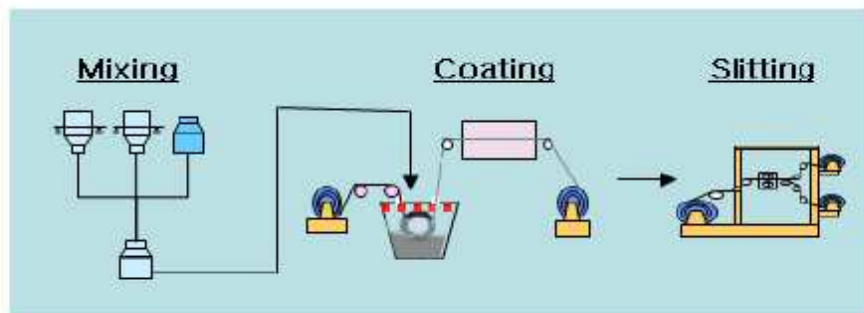
Commun à tous les formats!

PROCESS DE RÉALISATION D'UN ACCUMULATEUR LI-ION (DU MATÉRIAU À LA CELLULE): CAS DE LG CHEM

Électrode **né**gative: solvant aqueux
Électrode **pos**itive: solvant organique (N-Méthyl-Pyrrolidone,)

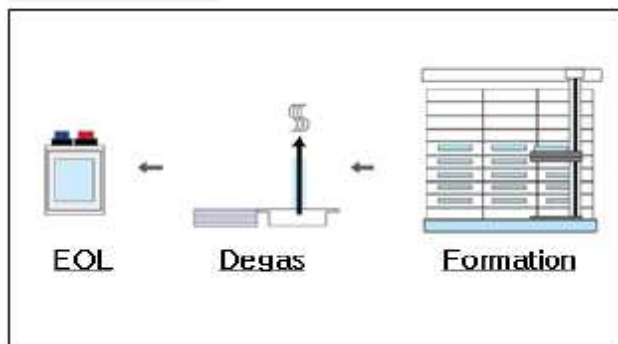


SRS
(Séparateur)

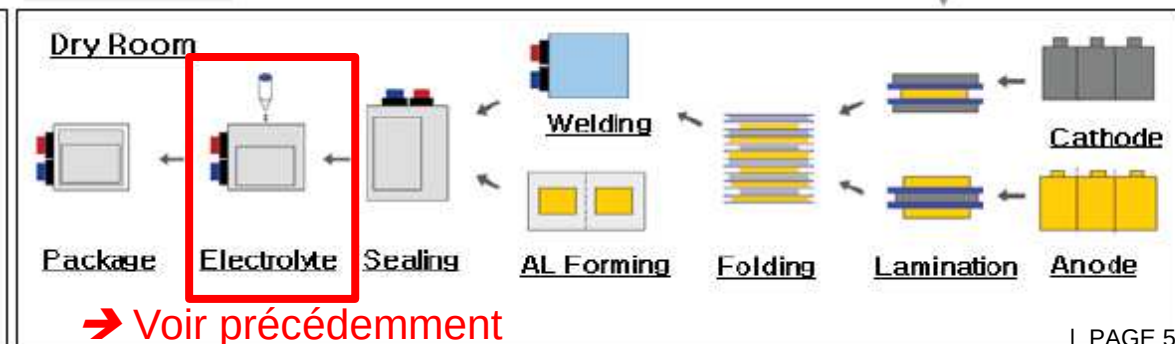


Les solvants sont ajoutés pour réaliser l'enduction puis éliminés
→ « Process aid »

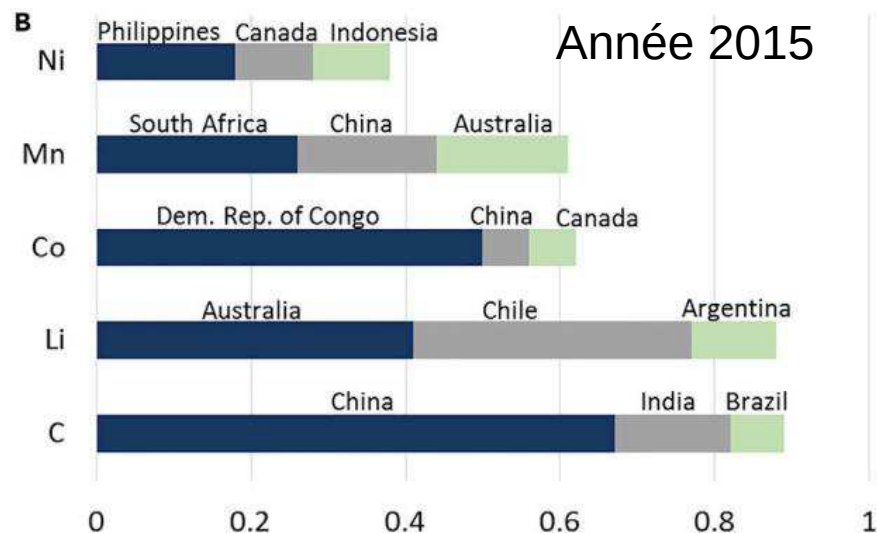
Formation



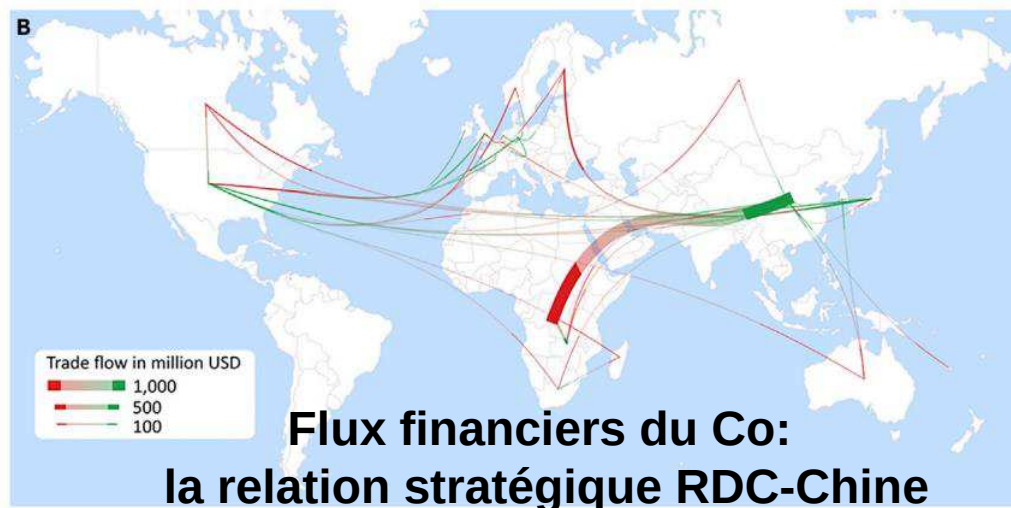
Assembly



COMPRENDRE L'ENJEU DES RESSOURCES...



Les matériaux du cœur du Li-ion:
Très régionalisé...



Tendance des constructeurs:

Quitter les matériaux riches en Co... mais en dégradant la durée de vie!

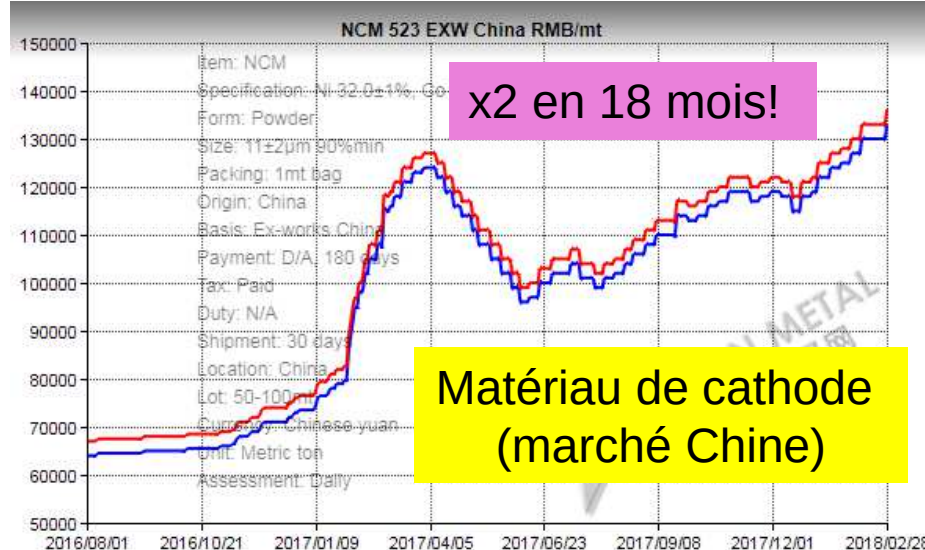
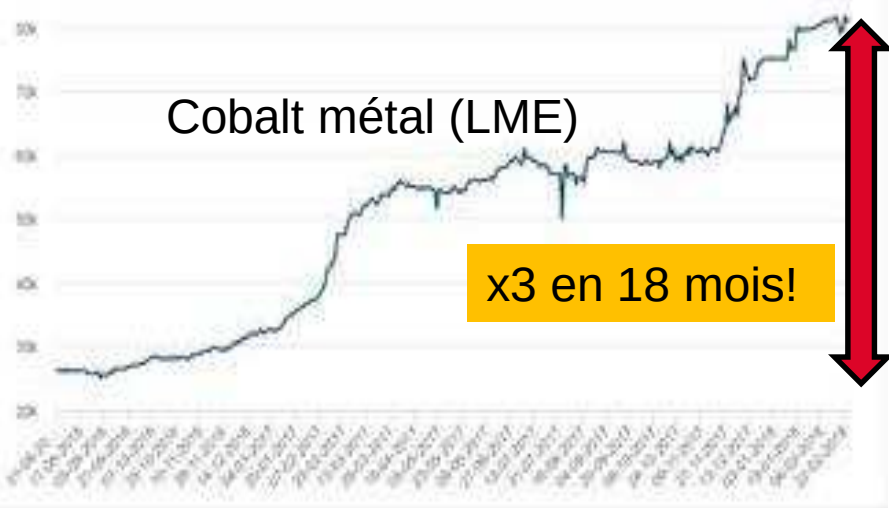
	Li	Co	Ni	Mn	C
LCO	0.113	0.959	0	0	~1.2
NCA	0.112	0.143	0.759	0	
NMC-111	0.139	0.394	0.392	0.367	
NMC-622	0.126	0.214	0.641	0.200	
NMC-811	0.111	0.094	0.750	0.088	

Exemple

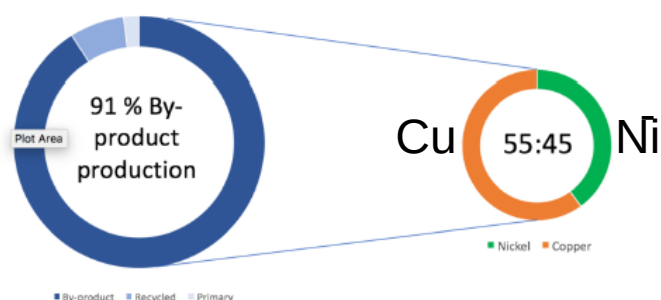
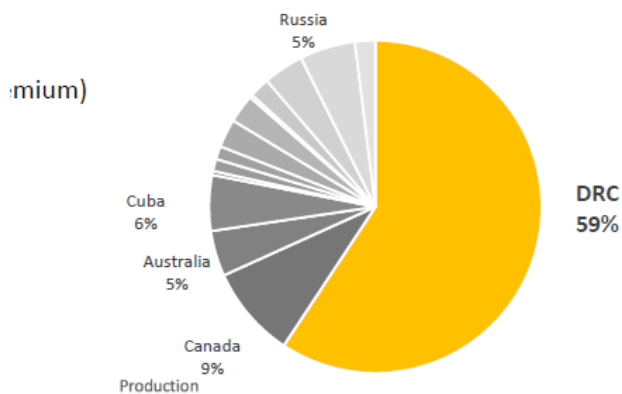
Tesla S, BMW i3 v2,
Zoe 1, MiEV2
Zoe 2
Zoe 3

Masse (kg) par kWh de batterie

LA PROBLÉMATIQUE DU COBALT



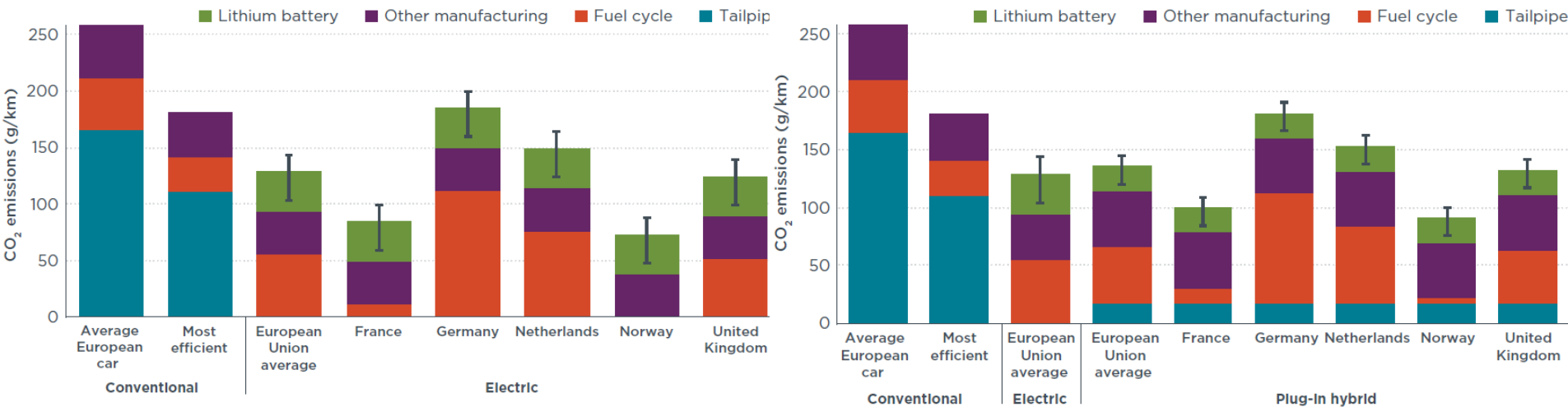
mium)



- Problématique de la toxicité du cobalt... et de l'extraction minière du cobalt (>50% du cobalt provient de République Démocratique du Congo).
- Le cobalt est essentiellement issu de by-product... (on n'ouvre pas une mine de cobalt!) **du cuivre** ou **du nickel**!

... mais... doubler le coût du Co n'entraîne que +10% d'augmentation de la batterie...

LES BATTERIES EN USAGE (BEV ET PHEV)



Cas pour 150 000km (base 2015)

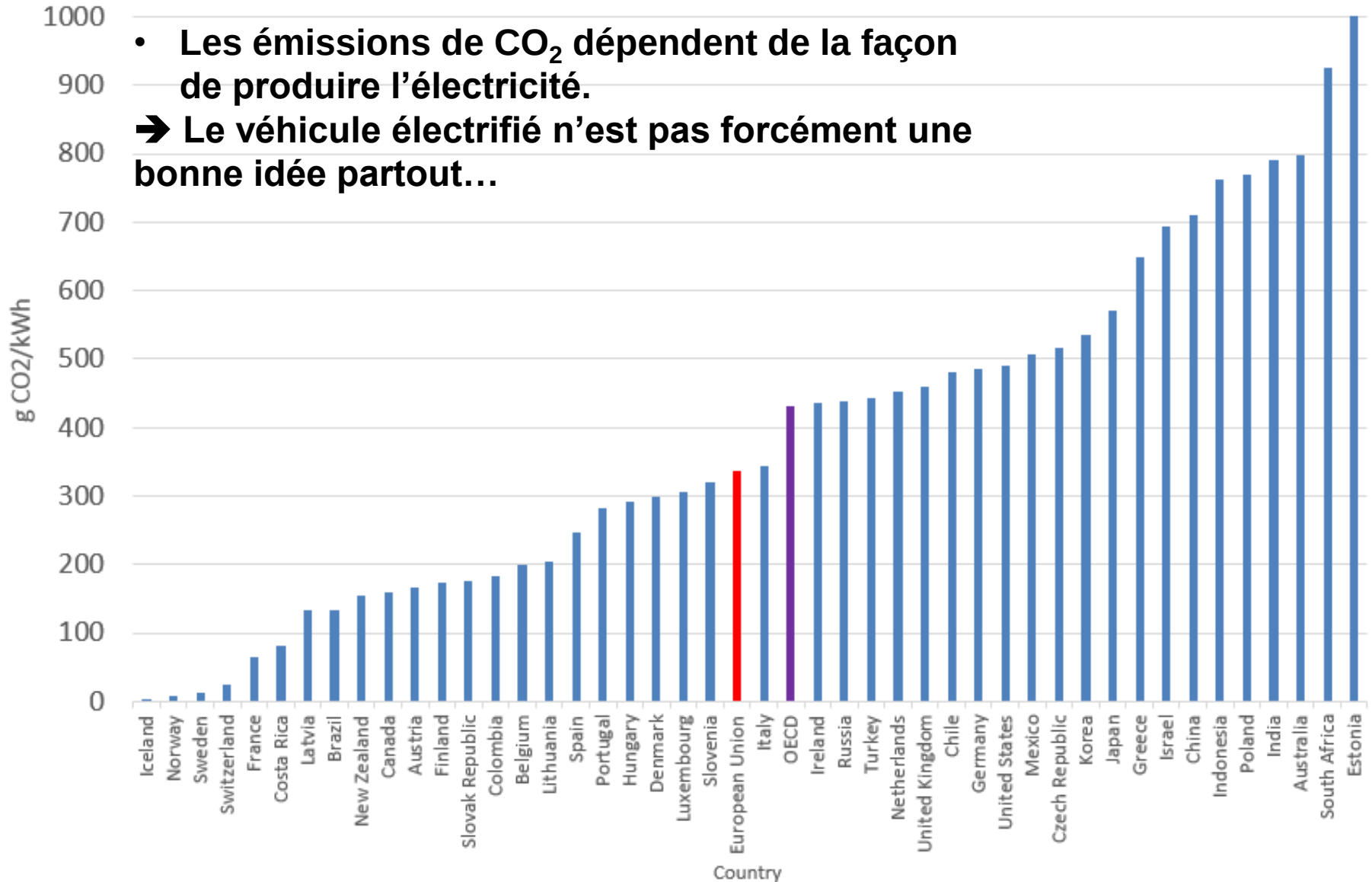
➔ Part fixe: la construction du véhicule.

➔ Part variable:

- Le process de fabrication des batteries varie en fonction du volume produit et du lieu de production (➔ forte disparité... d'où la barre d'erreur).
- **En usage, les émissions de CO₂ dépendent de la façon de produire l'électricité.**

CO2 VS ÉLECTRICITÉ

- Les émissions de CO₂ dépendent de la façon de produire l'électricité.
- ➔ Le véhicule électrifié n'est pas forcément une bonne idée partout...

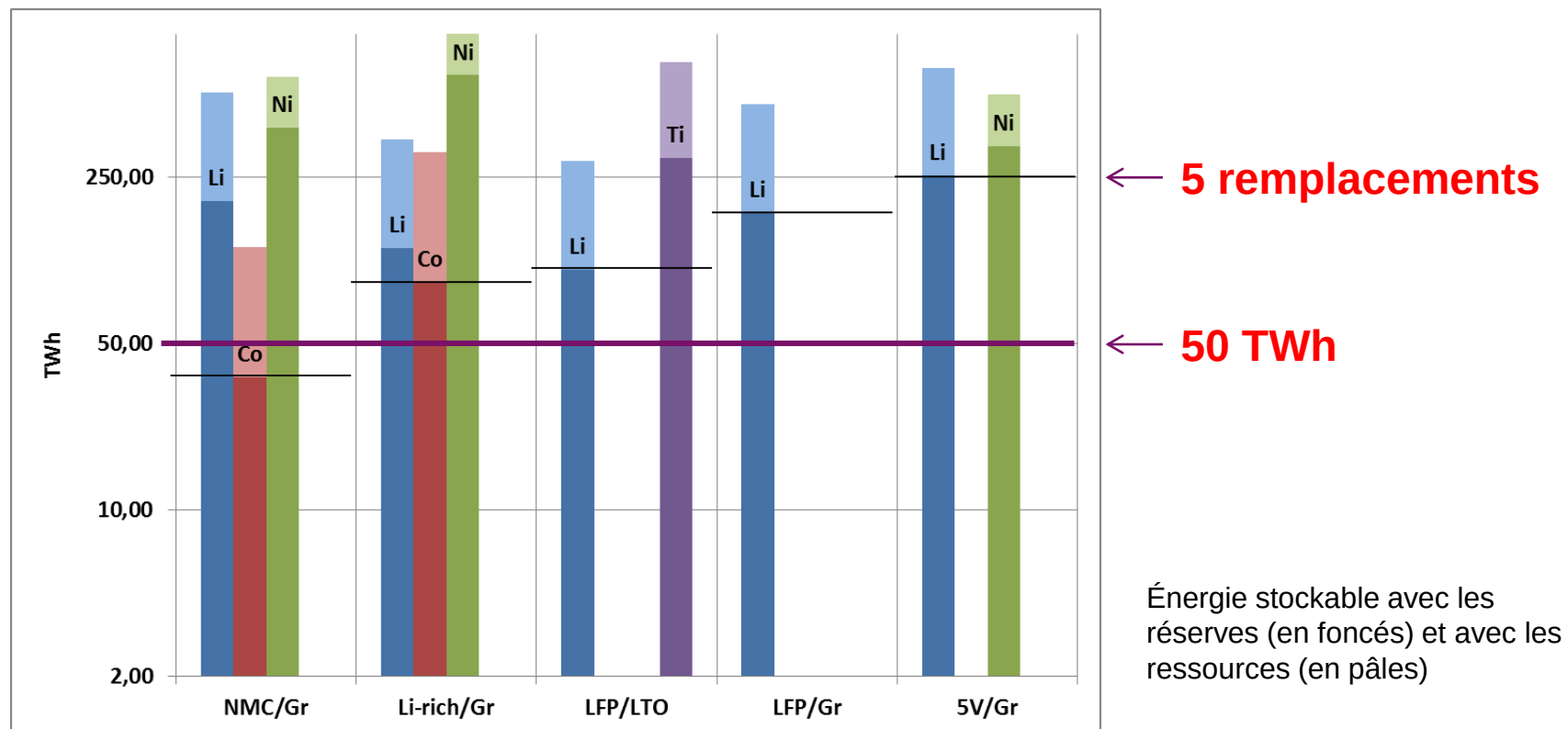


DISPONIBILITÉ DES MATÉRIAUX: PETIT EXERCICE...

1 milliard de véhicules équipés de 50kWh chacun... 50TWh embarqués!

Pour les systèmes électrochimiques Li-ion :

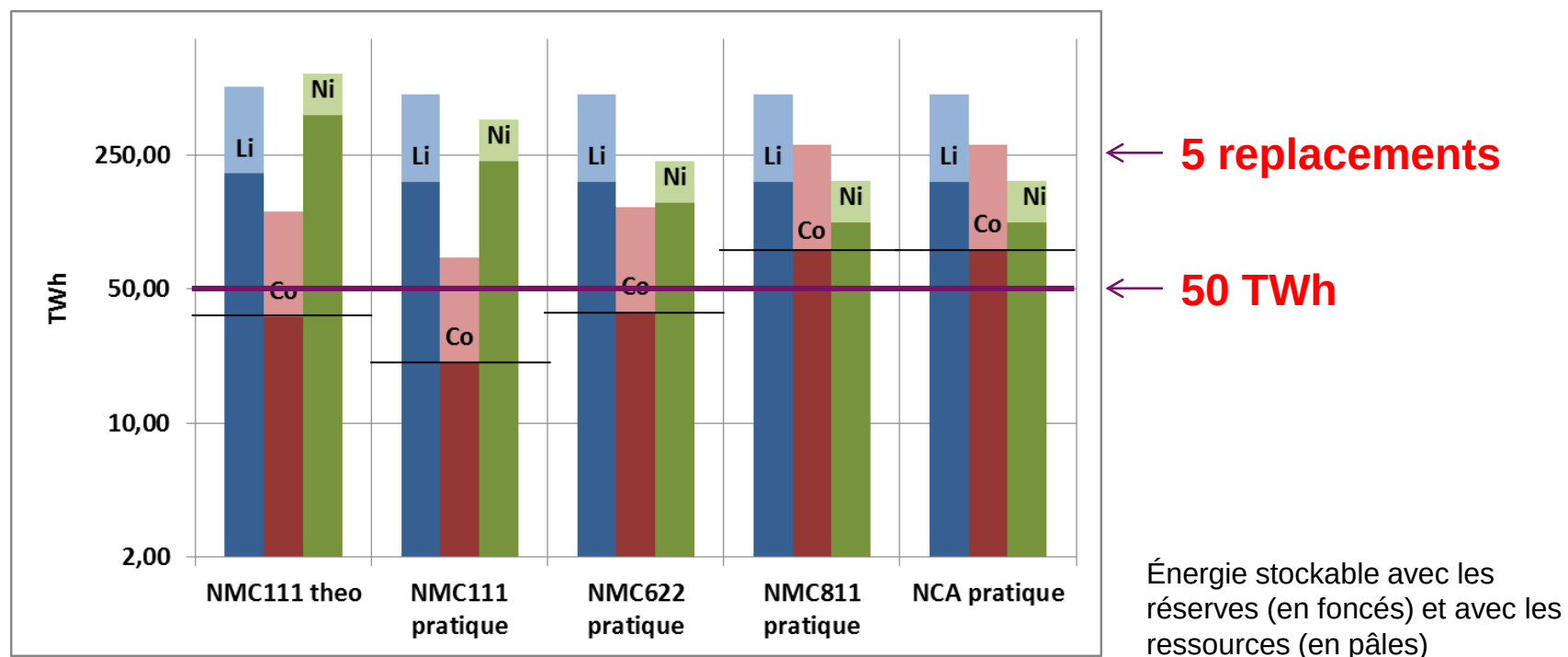
- Après le cobalt, le lithium deviendra limitant.
- Le nickel arrive rapidement après le lithium (sauf pour les systèmes sans Ni, tel que LFP)
- Le fluor n'est pas un problème (sauf s'il est implémenté dans le matériau actif).



DISPONIBILITÉ DES MATÉRIAUX

Pour les systèmes électrochimiques Li-ion :

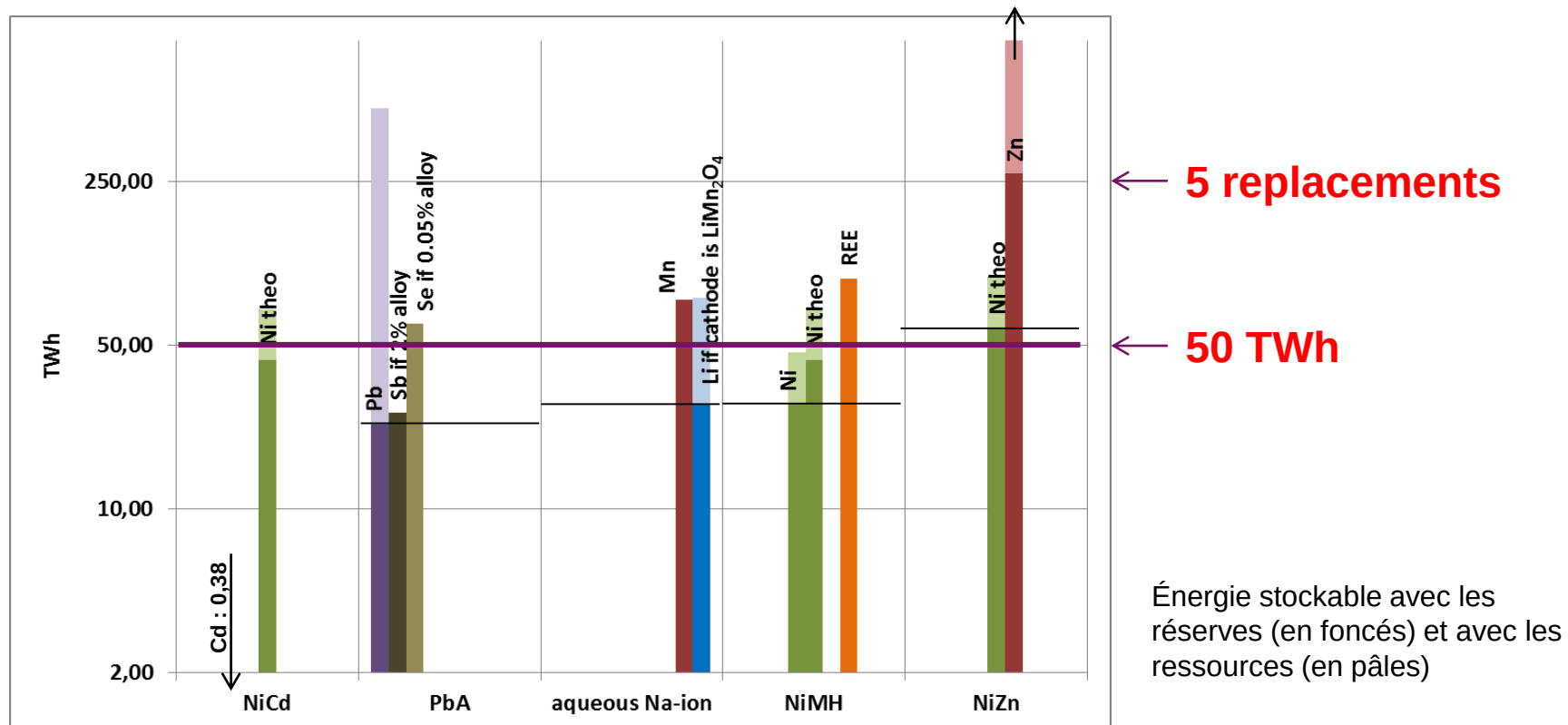
- Les fabricants font face à une demande en forte croissance.
- Tous tendent à réduire le cobalt en accroissant le nickel... mais les Ni-rich sont moins stables (sécurité/durée de vie) et la synthèse est plus complexe.



DISPONIBILITÉ DES MATÉRIAUX

Pour les systèmes électrochimiques aqueux :

- La limite matériau est beaucoup plus basse pour les systèmes aqueux (en raison d'une densité d'énergie plus faible)
- Même pour le Na-ion aqueux, la demande en Mn serait trop forte.



COMMENT ALLER PLUS LOIN...

1. Augmenter la durée de vie

- Dans l'usage prévu initialement, permet de diminuer l'impact carbone
- Augmenter le nombre de cycles accroît l'EROI (→ pas la tendance actuelle...)
- Utiliser la batterie dans une seconde vie (par exemple: usage 1 en VE et usage 2 en stationnaire)... mais quel modèle économique (il faudra toujours démanteler!)?
- Diminuer la taille des batteries (kWh/véhicule). Limite de la bascule: <30kWh (pour un VE partagé!)

2. Changer de procédés de fabrication en anticipant le recyclage (éco-innovation)

- Supprimer/réduire les process-aid.
 - Cas de batteries Li-ion actuelles: supprimer la NMP (mais à un coût viable)
 - Cas des batteries tout-solide (pour accroître la densité d'énergie dans des batteries plus petites!)
 - Extrusion
 - Frittage
 - ... à condition de ne pas réduire la durée de vie et l'impact environnemental (matériaux critiques...)*
- **Permet de s'affranchir de l'utilisation de LiPF_6 et potentiellement des solvants!**

3. Recycler mieux!

- voir ci-après

Constat: la priorité est la récupération du cobalt et du nickel (rentabilité)

Problèmes:

- a- la baisse du taux de Co dans les futures cathodes rend les procédés moins rentables..
- b- Il existe de nombreuses chimies différentes en Li-ion → efficacité médiocre pour le recyclage.

1- Pré-traitements:

- Eviter les courts-circuits et les emballages thermiques
- Éliminer les composés volatiles

2- Procédés de broyage

3- Procédés de récupération des matériaux

- **Procédés pyro-métallurgiques (pré-chauffage / smelting)**
- Procédés hydro-métallurgiques (séparation de métaux, leaching)
- Procédés combinés:
 - **Umicore:** chauffage/smelting suivi par leaching (récupération Co, Ni, Cu, Fe)
 - **Toxco:** refroidissement dans N₂ liquide, broyage mécanique puis procédé hydro-métallurgique (récupération de LiOH et métaux)
 - **Sony-Sumitomo:** incinération (récupération du Co à partir des résidus métalliques)

Faire converger la mobilité et le stationnaire...

- 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 ?

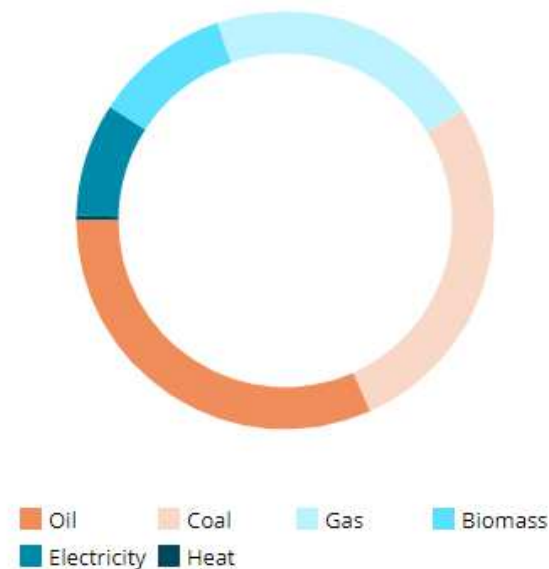
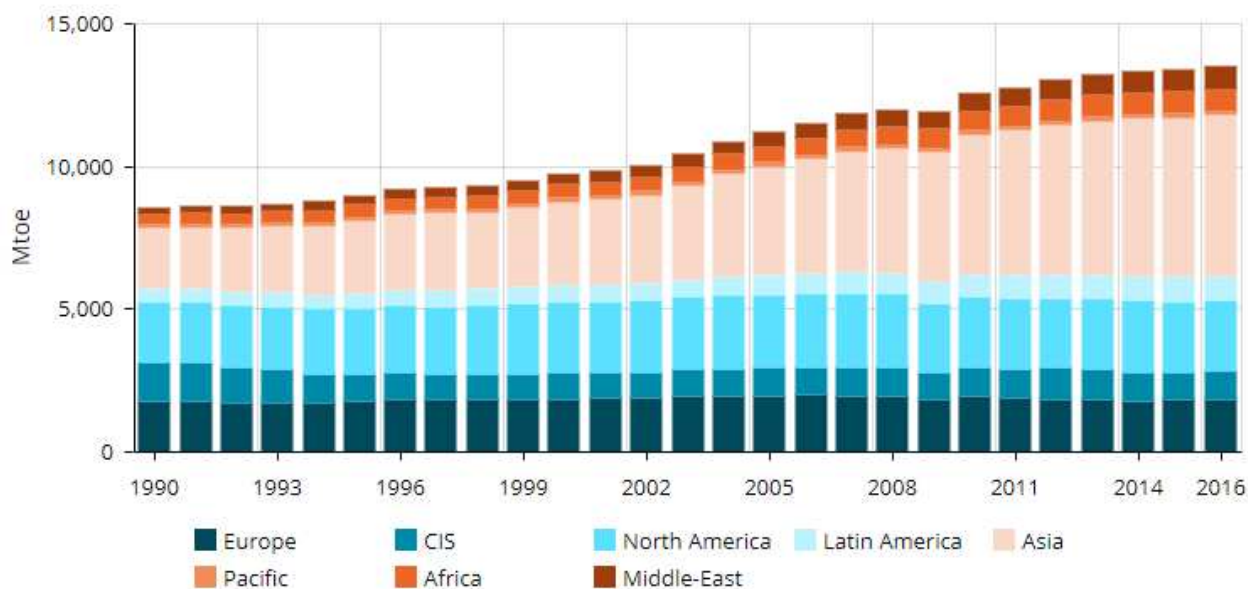
→ Smart-grid

- **Vehicle to Home (V2H)**
- **Vehicule to Grid (V2G)**

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).

NE PAS TIRER SUR L'AMBULANCE!



<https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>

Améliorer le transport par l'électricité, certes, mais il faut travailler également sur d'autres postes de consommation.

La priorité: l'économie d'énergie!

Thank you for your attention



FROM RESEARCH TO INDUSTRY



French Alternative Energies and Atomic Energy Commission

Alternative Energies and Atomic Energy Commission
Centre de Saclay | 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
T. +33 (0)1 64 50 10 00 | F. +33 (0)1 64 50 11 86
Philippe.azais@cea.fr

Direction de la Recherche Technologique
Département de l'Electricité et de l'Hydrogène
pour les Transports