

Batterie Li-ion: qui es tu vraiment?

L. Monconduit, Directrice de recherche
CNRS Montpellier

&

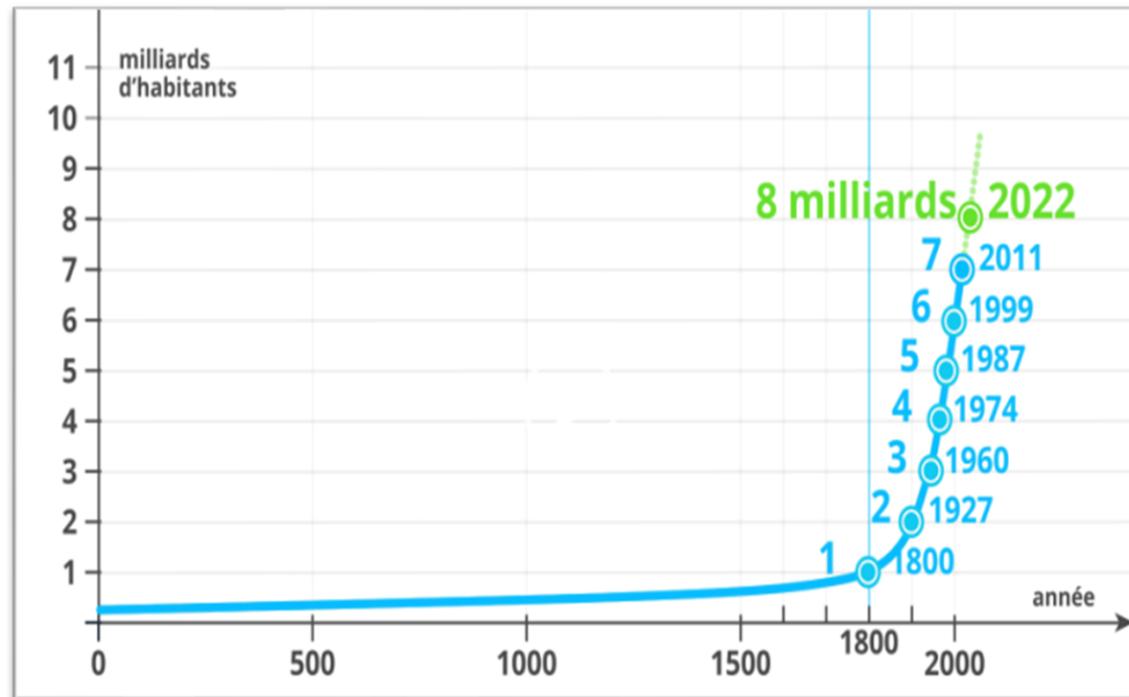
M. T. Sougrati, Ingénieur de recherche
CNRS Montpellier

Plan de la discussion :

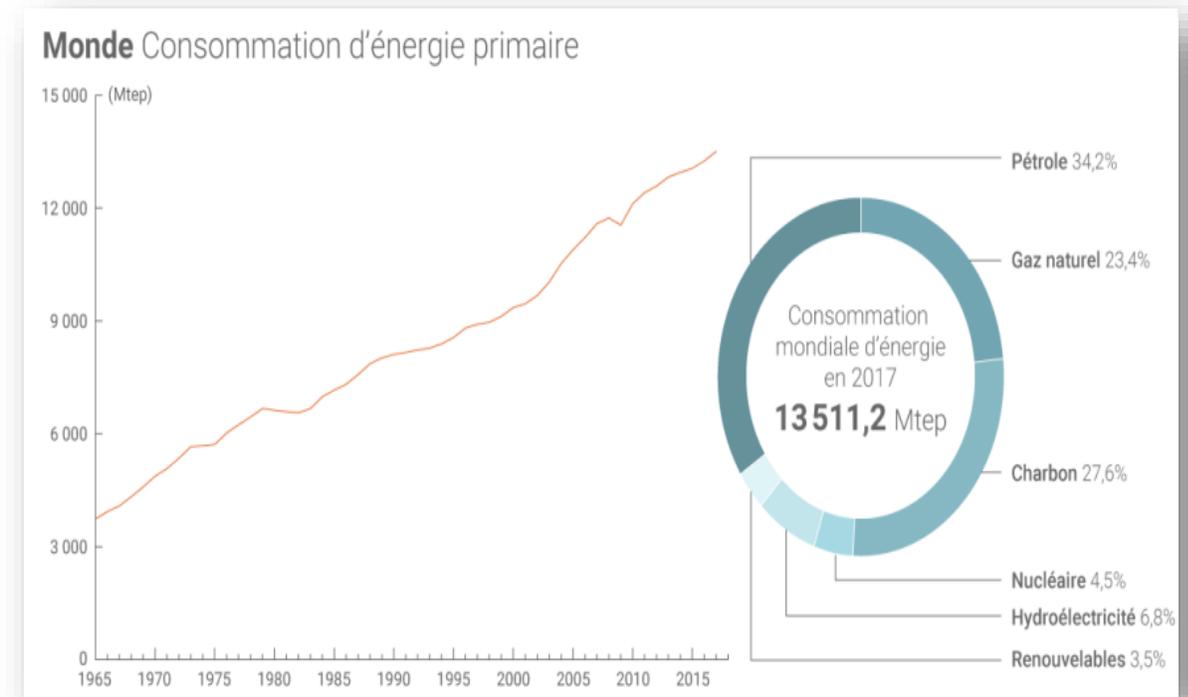
- Situation énergétique mondiale
- Pourquoi les batteries Li-ion?
- Principe des batteries Li-ion
- Electrique ou thermique ?
- Rôle du recyclage des Li-ion

Situation énergétique mondiale

Evolution et estimation de la population mondiale dans le temps



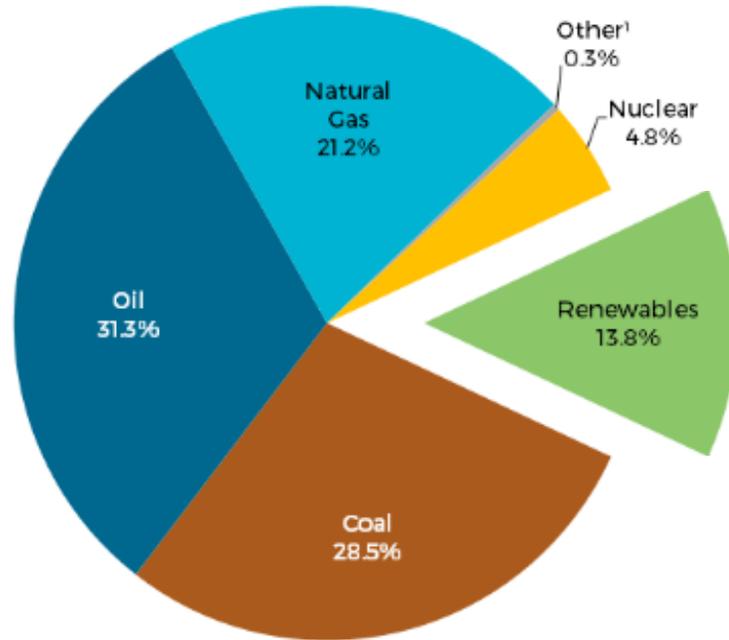
Consommation énergétique mondiale entre 1965 et 2017



L'énergie est un enjeu mondial avec d'énormes challenges pour les années à venir

Demande énergétique mondiale

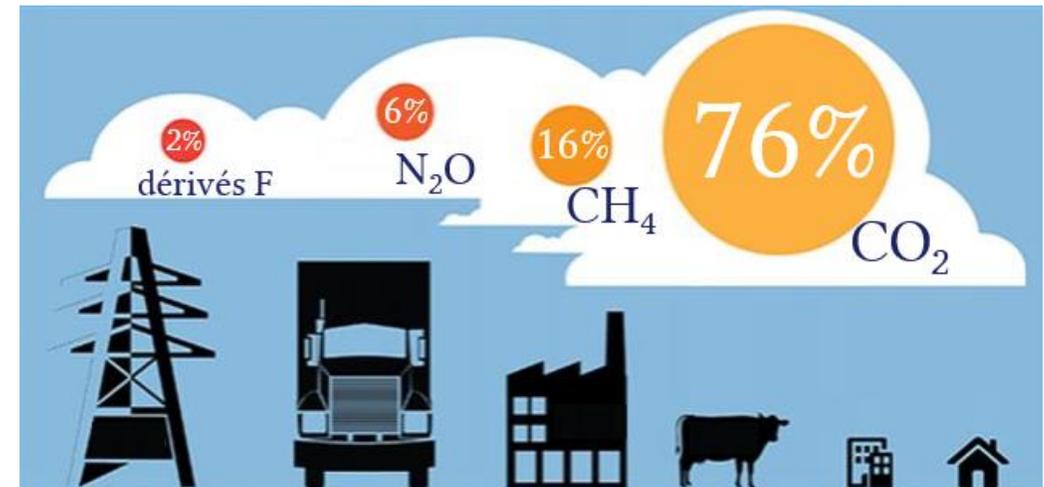
Origine de l'énergie



Plus de 85% énergies fossiles



Gaz à effet de serre



➔ Favoriser les énergies renouvelables ---> GES ≈ 0

Vers un véhicule réellement écologique...



- Réchauffement climatique
- Ressources fossiles

- Situation énergétique mondiale
- **Pourquoi les batteries Li-ion?**
- Principe des batteries Li-ion
- **Electrique ou thermique ?**
- Rôle du recyclage des Li-ion

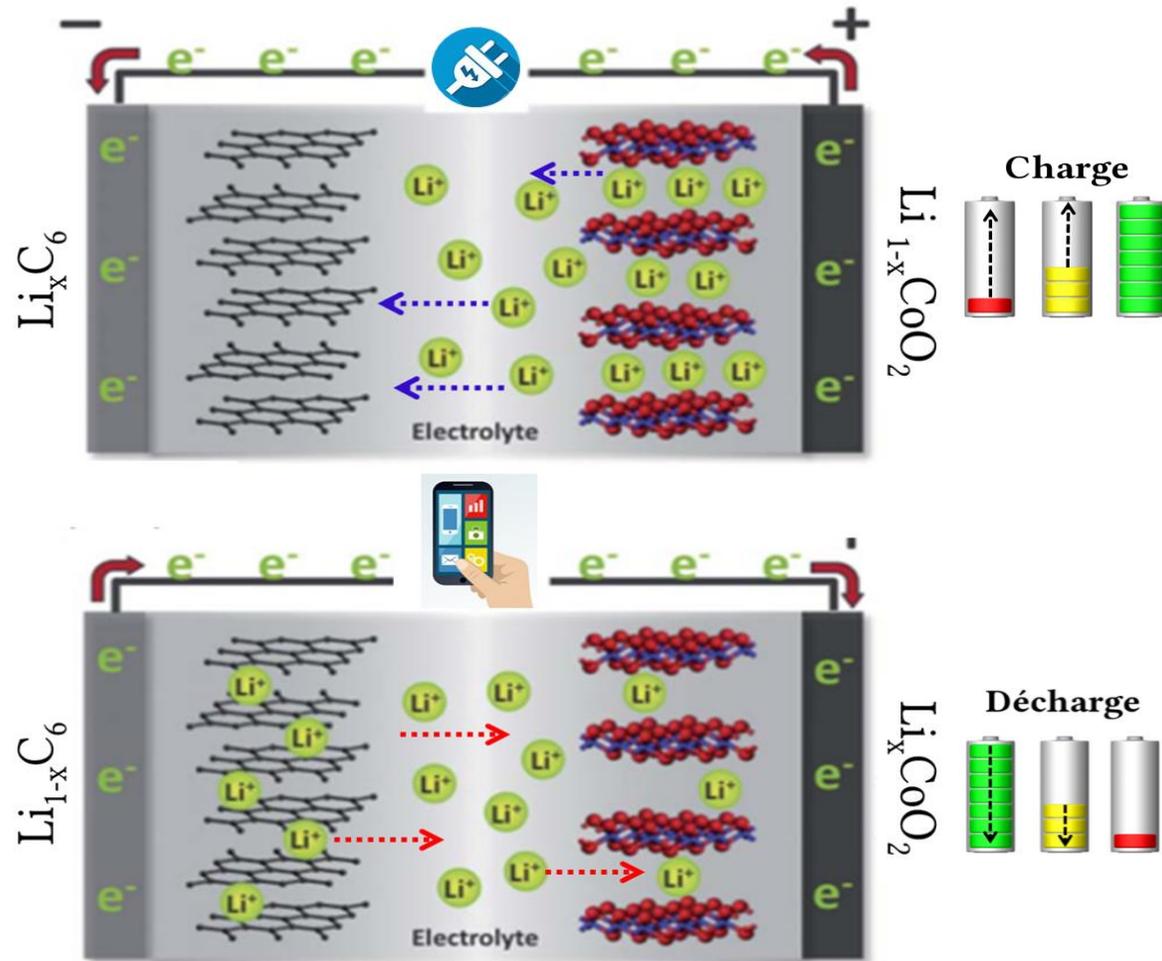
Comparaison avec les autres technologies d'accumulateurs

	Plomb	Ni/Cd	Ni/MH	Li-Polymère	Li-ion
Energie spé. (Wh/kg)	30-50	45-80	60-110	150-190	>250
Densité d'énergie (Wh/L)	75-120	80-150	220-330	220-230	500
Puissance	Jusqu'à 700	-	Jusqu'à 900	Jusqu'à 250	Jusqu'à 1500
Nbre de cycles	400	2000	1500	1000	5000
Auto- Decharge	5%	20%	30%	5%	5%
Gamme de T°	-20° 60°C	-40° 60°C	-20° 60°C	0° 60°C	-20° 60°C
Cout indicatif (€/kWh)	200 250	600	1500 2000	1500 2000	1500

- Situation énergétique mondiale
- Pourquoi les batteries Li-ion?
- **Principe des batteries Li-ion**
- **Electrique ou thermique ?**
- Rôle du recyclage des Li-ion

Principe des batteries lithium-ion

Schémas de principe :



Électrode positive lithiée, réduite
Électrode négative délithiée, oxydée

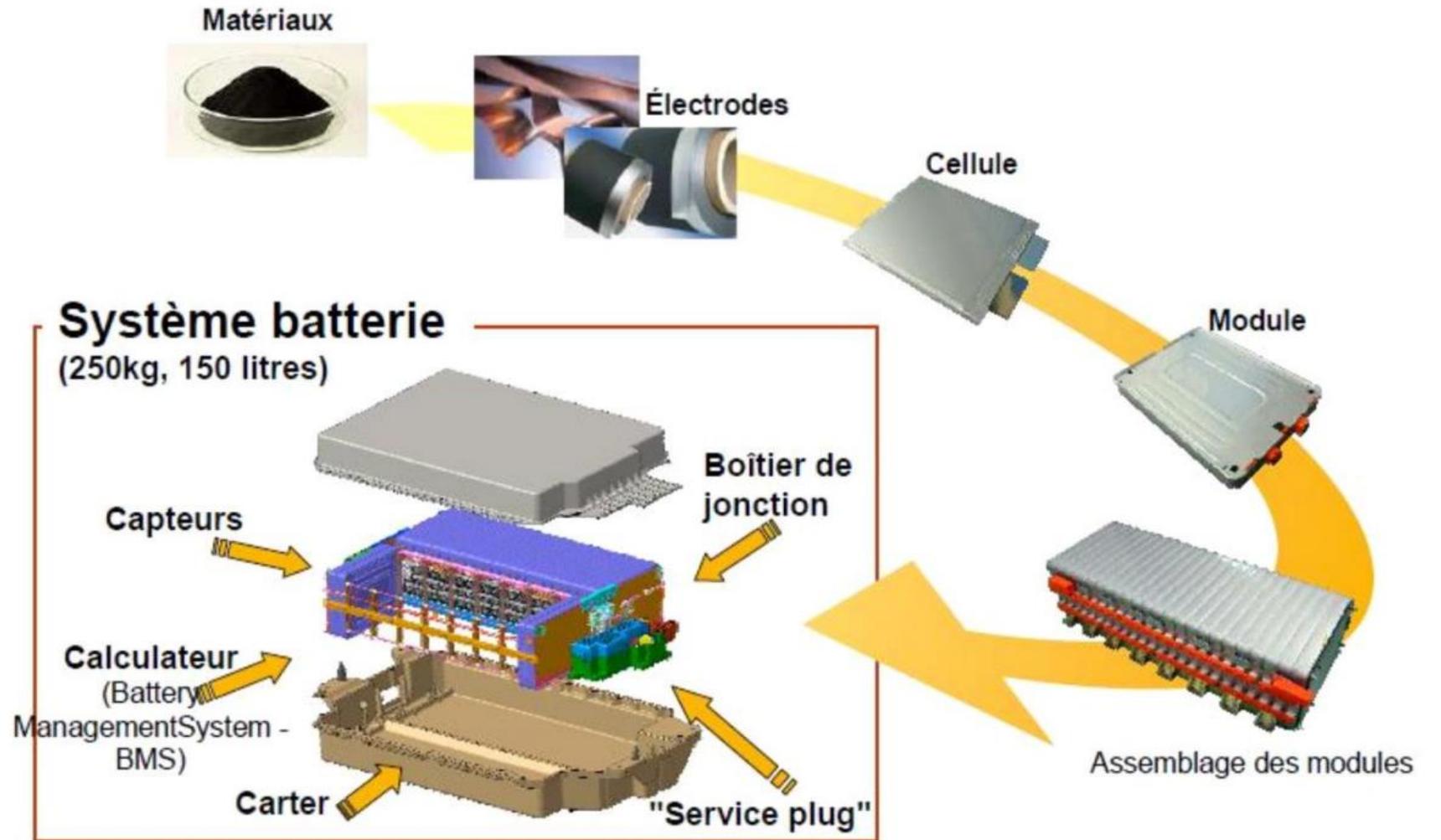
2 couples redox

– électrode positive : à l'état oxydé lorsque le générateur est chargé
met en jeu le couple le plus oxydant

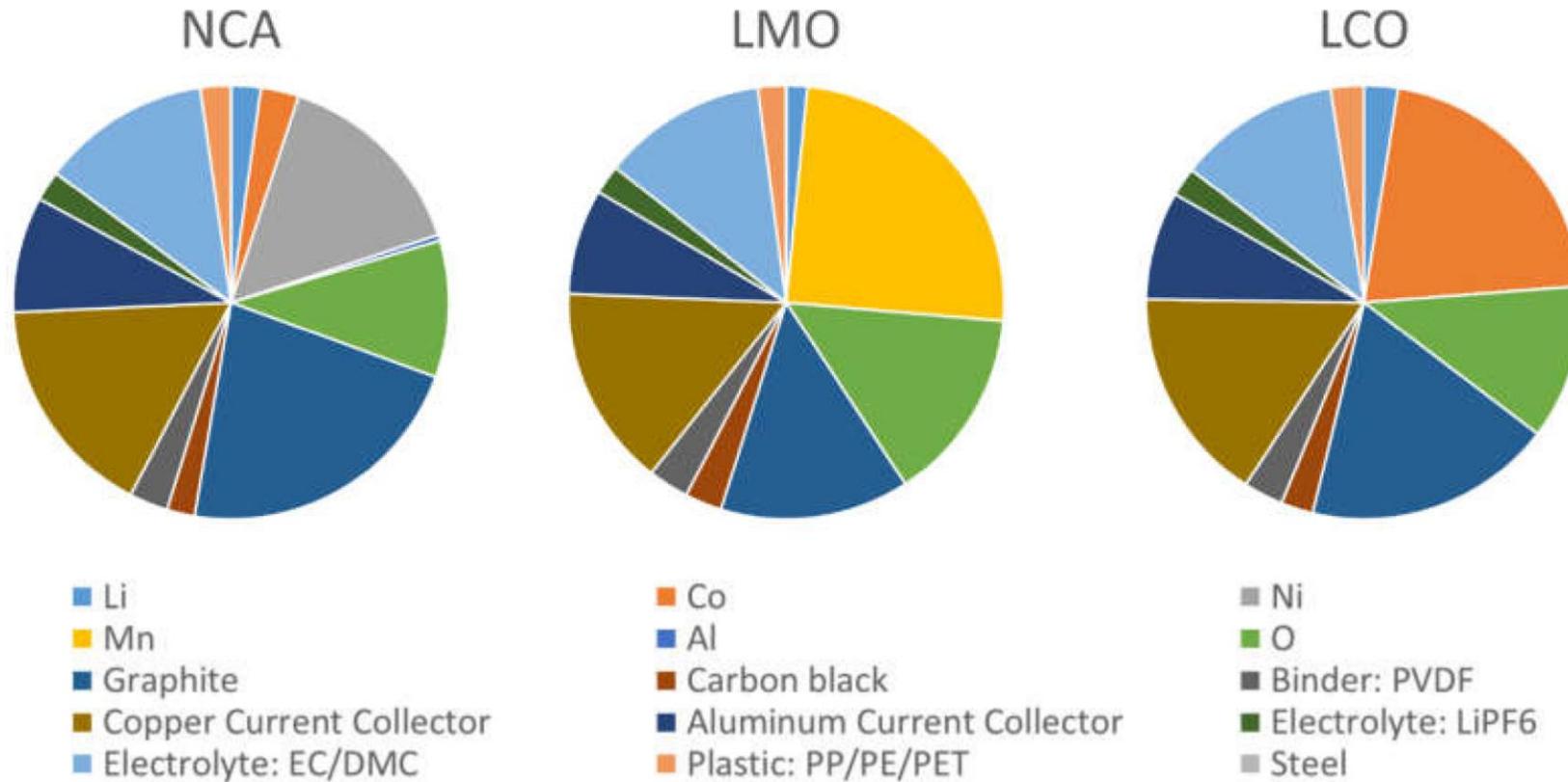
– électrode négative : à l'état réduit lorsque le générateur est chargé
met en jeu le couple le plus réducteur

Principe des batteries lithium-ion

Constitution d'une batterie de VE :



Les technologies les plus utilisées en Europe,



Objectif :

- Moins ou pas de cobalt
- Moins de Nickel

➔ rien à faire pour le lithium ?

Situation du Lithium

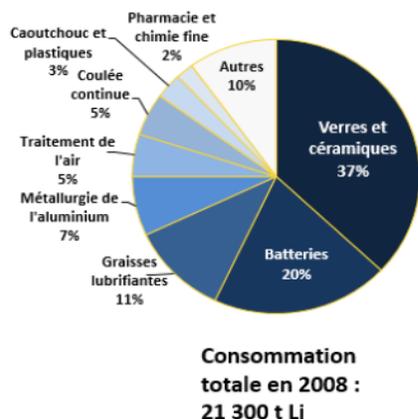
Criticité et enjeux du marché du lithium



- En 10 ans, la demande mondiale en lithium a plus que doublé
- En 2008, 20 % destinée aux **batteries** contre **58 % en 2018**, soit **~29 500 t Li contenu**
- En 2025, la demande européenne sera(it) équivalente à la production mondiale 2013

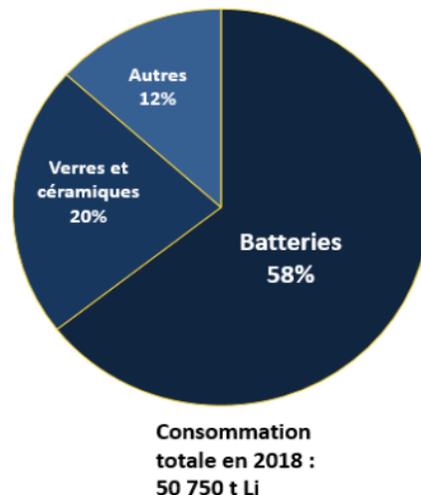


Usages mondiaux du lithium en 2008
Source : Roskill, 2009



+ 58 %

Usages mondiaux du lithium en 2018
Source : Infinity Lithium, 2019



BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), service géologique national français

- Abondance : 25^{ème} élément le plus abondant sur terre (20-70 ppm en poids)
- Principalement contenu dans l'eau de mer :
 - 230 milliards de tonnes, mais en faible concentration (<1 ppm)

Situation du Lithium : Enjeux économiques et politiques

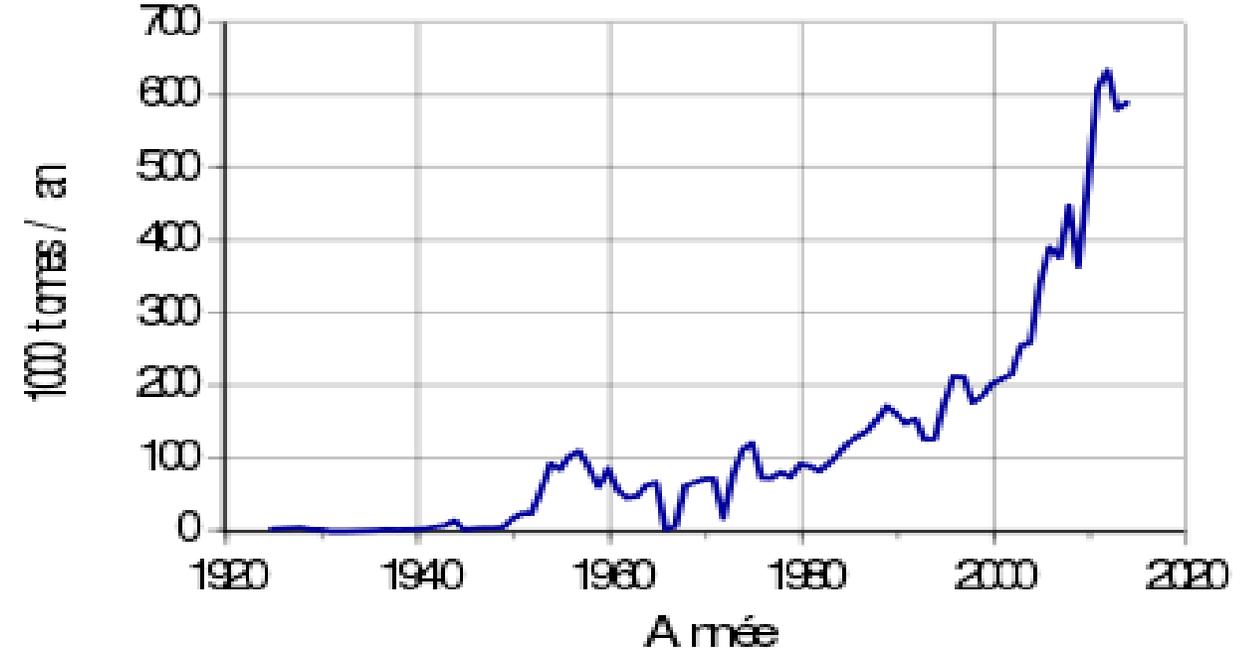
- Demande en augmentation constante
 - Pénétration dans le marché automobile



- ❖ Prix très fluctuant ces dernières années
- Entrée dans le marché des pays d'Amérique du Sud



La production mondiale de lithium



De nouvelles ressources à identifier !

Situation du Lithium

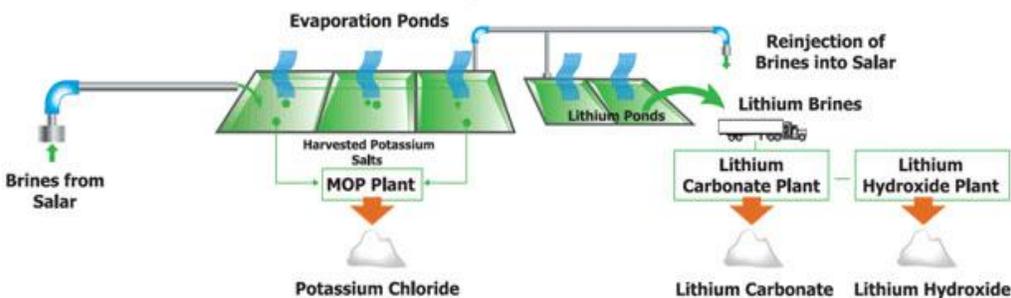
Les ressources actuelles ?

- Concentration importante en Amérique du sud, entre Chili et Bolivie



Et aussi en Europe

Serbie, Portugal, Allemagne, République tchèque, France (Bretagne, Alsace) - (BRGM)



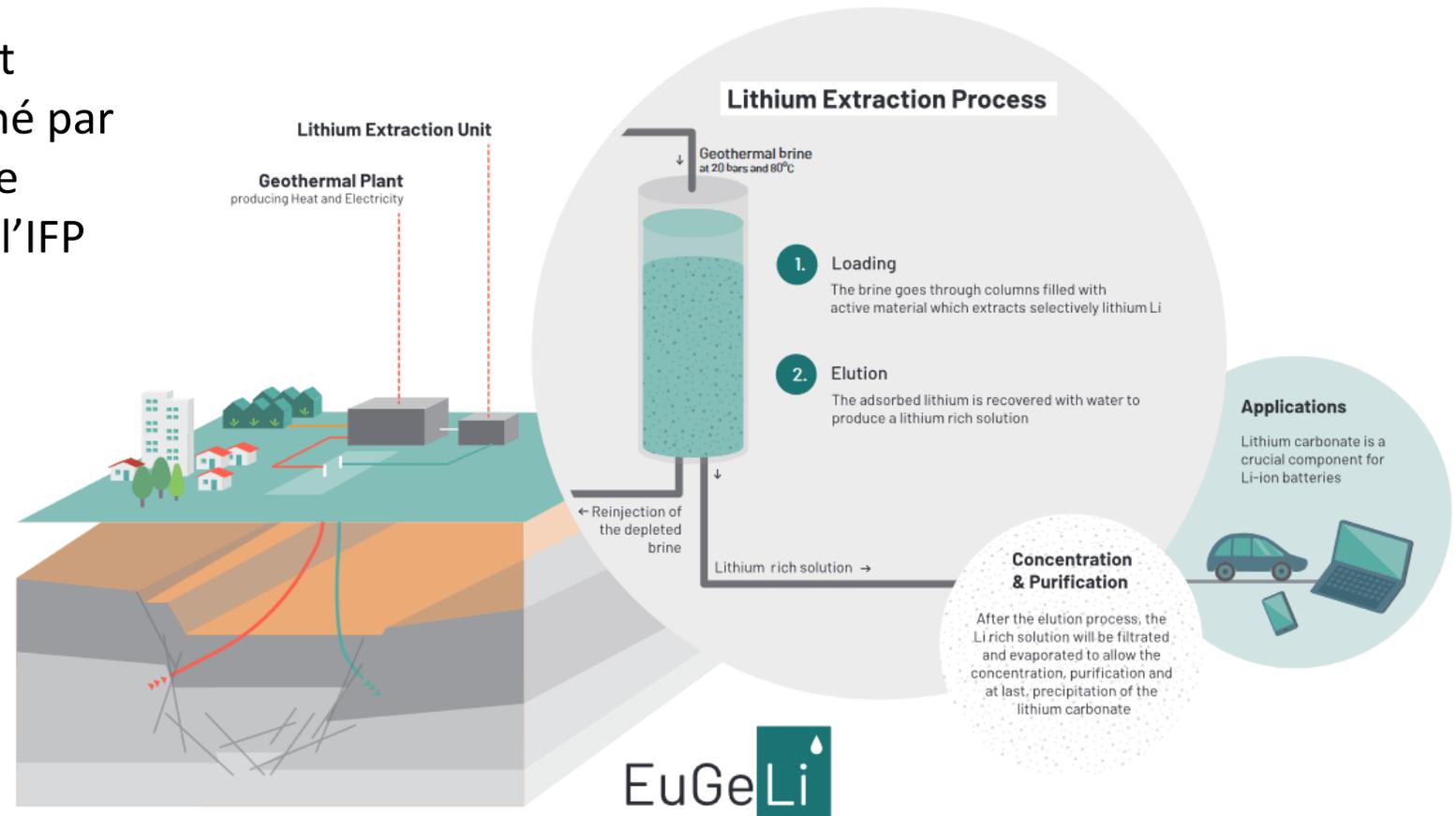
Production → simple évaporation de saumures concentrées de Li après extraction des sels de potassium

Situation du Lithium : Lithium « made in France » ?

Produire du lithium "made in Europe", c'est l'ambition du projet européen EuGeLi, mené par Eramet qui réunit notamment Electricité de Strasbourg-Géothermie, BASF, le BRGM et l'IFP Energies nouvelles.

installer une unité d'extraction directe du lithium, sur la branche de réinjection d'un puits de géothermie existant

European geothermal Lithium Brine

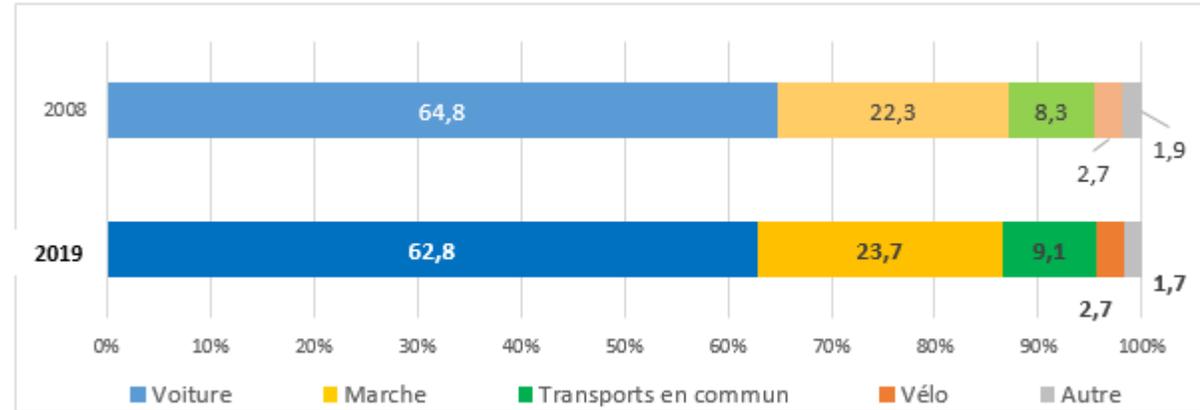


2022: Premier kg de carbonate de lithium produit en France par méthode géothermale

- Situation énergétique mondiale
- Pourquoi les batteries Li-ion?
- Principe des batteries Li-ion
- **Electrique ou thermique ?**
- Rôle du recyclage des Li-ion

Electrique ou thermique ?

Nature des déplacements ?



Les actifs consacrent près d'une heure par jour en moyenne aux trajets domicile-travail



Combien de temps mettez-vous en général pour vous rendre sur votre lieu de travail ?

Et combien de temps mettez-vous en général pour en revenir ?

Base: ensemble

Electrique ou thermique ?

Etat des lieux du parc automobile français

Quiz :

Voitures particulières :

20 M 30 M 50 M ?

Utilitaires légers :

10 M 20 M 30 M ?

Poids lourds :

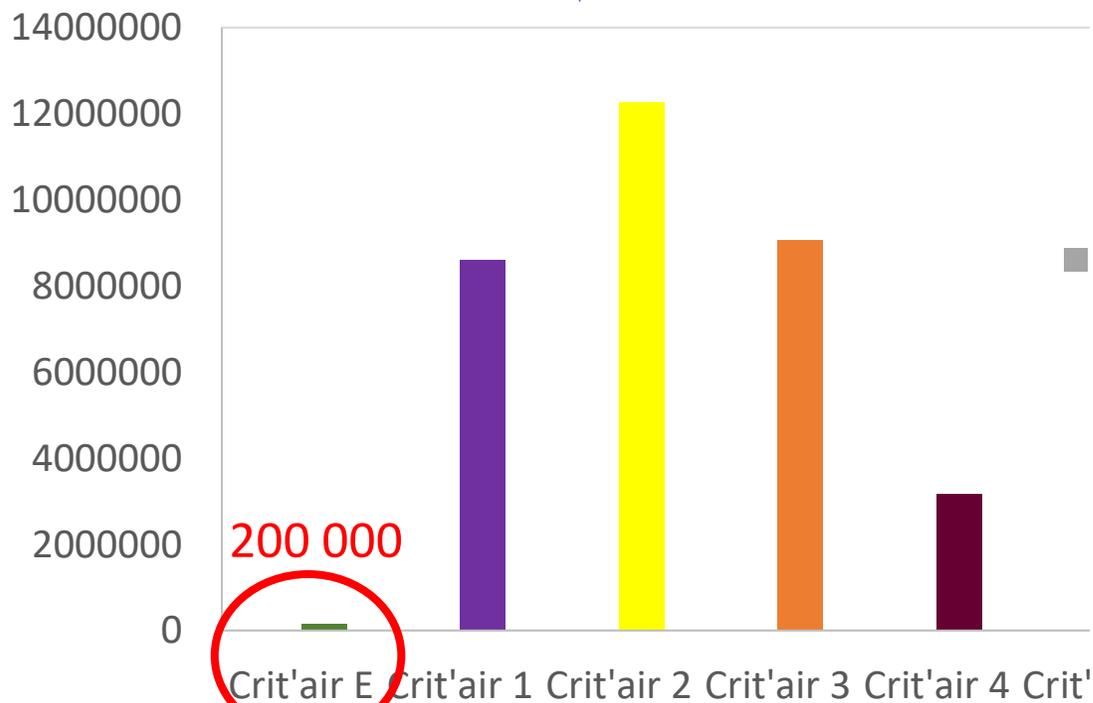
Cars/bus :

Classement Certificat qualité de l'air Voitures particulières

NORME EURO (inscrite sur la carte grise)
ou, à défaut, date de 1^{re} immatriculation

Véhicules à moteur Diesel [\[modifier \]](#) [\[modifier le code \]](#)

Pour les véhicules à moteur Diesel les normes sont les suivantes^{10, 11} :



Véhicules à moteur Diesel

Norme	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5a
Oxydes d'azote (NO _x)	-	-	500	250	180
Monoxyde de carbone (CO)	2 720	1 000	640	-	500
Hydrocarbures (HC)	-	-	-	-	-
Hydrocarbures non méthaniques (HCNM)	-	-	-	-	-
HC + NO _x	970	-	-	300	230
Particules (PM)	14	-	50	25	5
Particules (PN) (nb/km)	-	-	-	-	6 × 10 ¹¹

Valeurs, sauf PN, exprimées en mg/km.

Où est le CO₂ ?

Electrique ou thermique ?

Impact écologique

Pollution délocalisée !

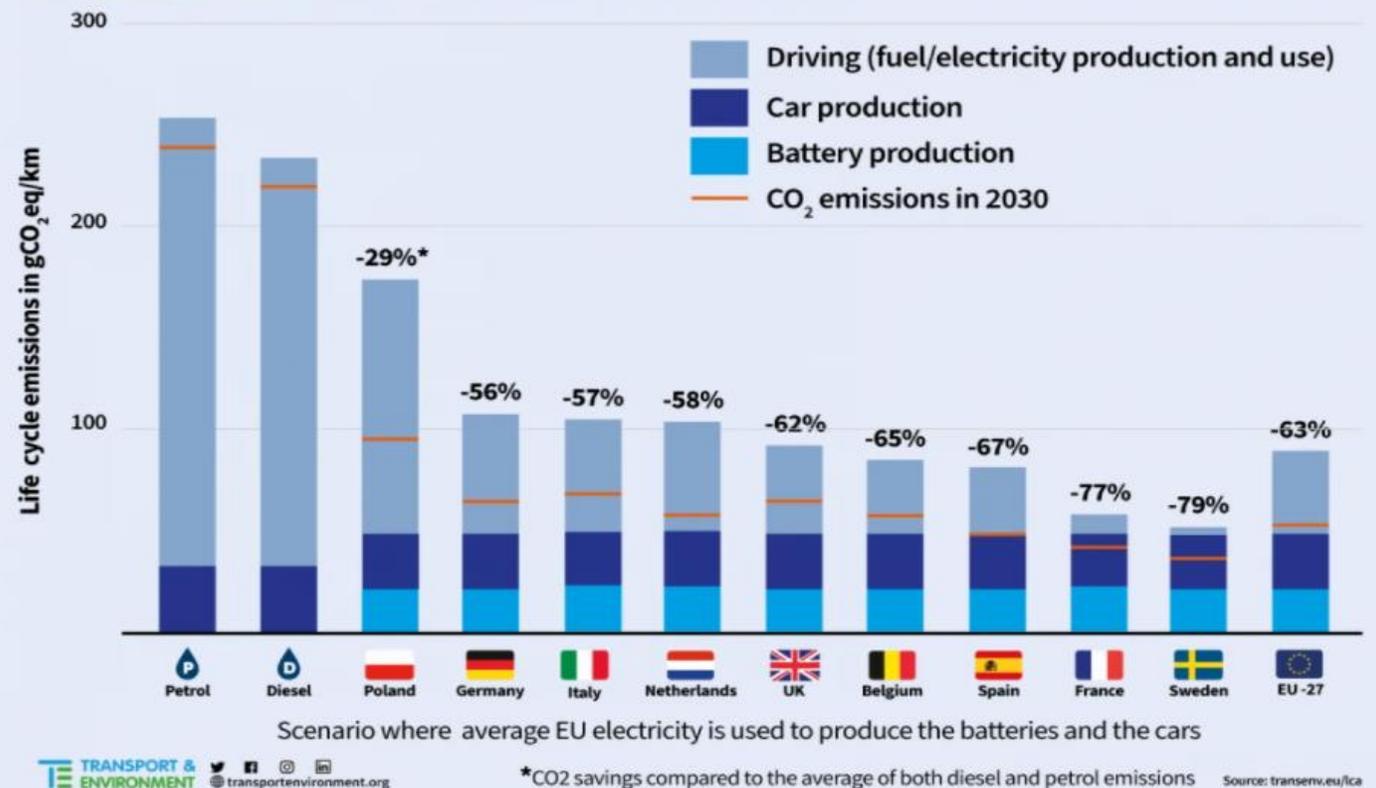
Bilan d'émission du CO2 lors de la fabrication

	Thermique	Electrique
Composants	3,30 t eq CO ₂	3,06 t eq CO ₂
Assemblage	0,44 t eq CO ₂	0,36 t eq CO ₂
Batterie		3,15 t eq CO ₂
Sous-total	3,74 t eq CO ₂	6,21 t eq CO ₂

Bilan d'émission du CO2 lors de l'utilisation

	Thermique	Electrique
Usage / 10 an	18,26 t eq CO ₂	2,34 t eq CO ₂
Total	22 t eq CO ₂	9 t eq CO ₂

Today petrol and diesel cars emit almost 3 times more CO₂ than the average EU electric car

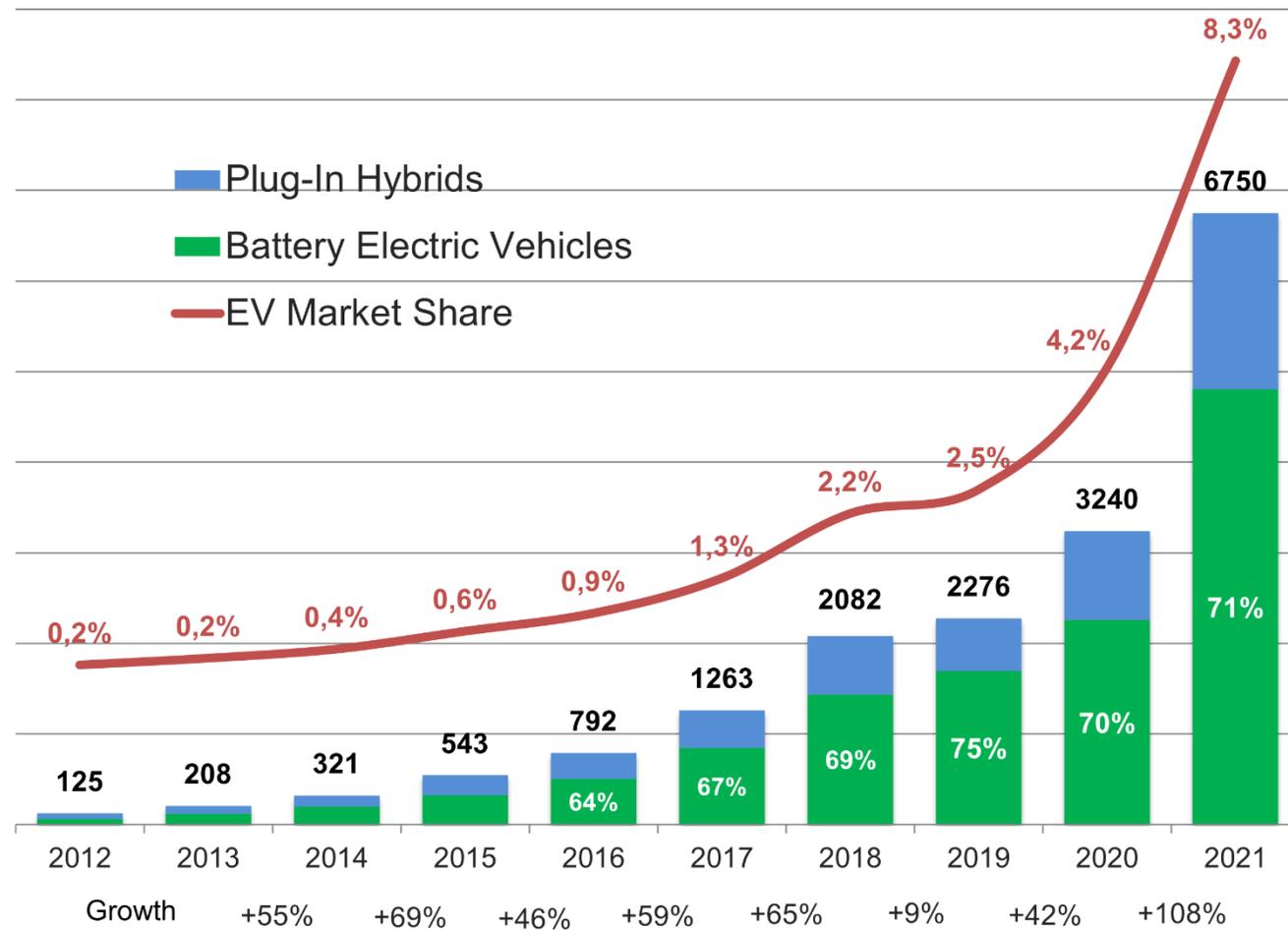


Comparaison entre les émissions de CO2 des voitures électriques et thermiques (essence et diesel) suivant les pays, de la fabrication du véhicule à son utilisation
Auteur : Transport & Environnement - Licence : DR

Electrique ou thermique ?

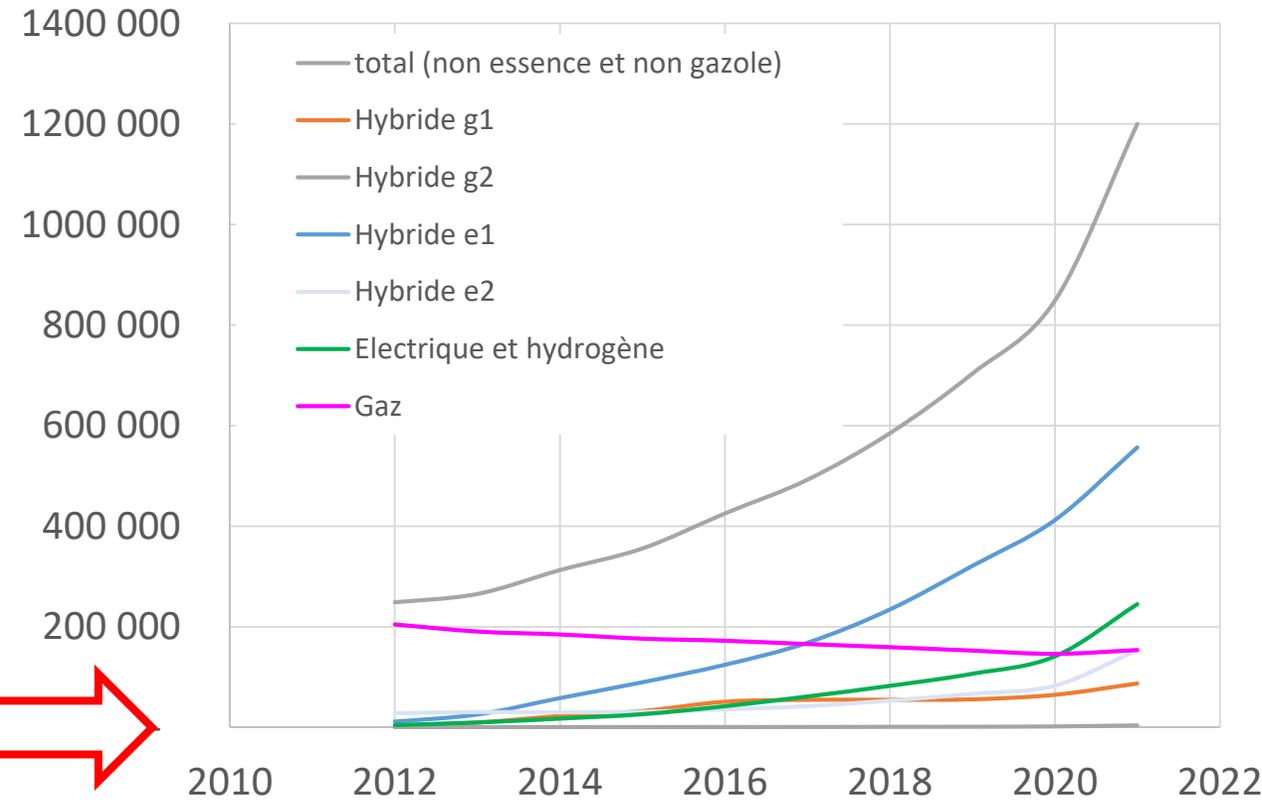
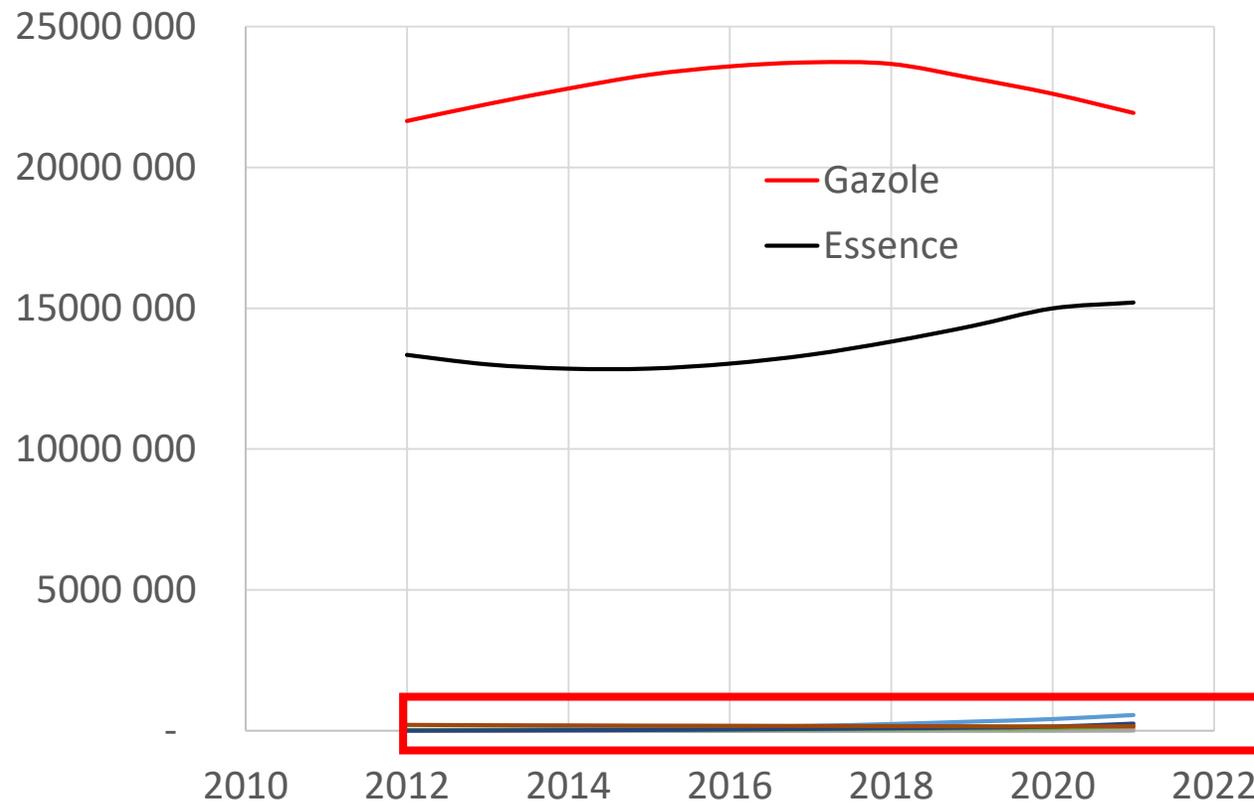
Evolution de la part de l'électrique (mondial)

GLOBAL BEV & PHEV SALES ('000s) EV VOLUMES



Electrique ou thermique ?

Evolution de la part de l'électrique (France)



Electrique ou thermique ?

Quel prix ?

Publicité de 1900



Petites voitures à 2 places

CRÉANCHE

ÉLECTRIQUES (moteur et acc. B. G. S.)..... 7,500 fr.
A PÉTROLE (moteur de *Dion*, 3 ch. à eau)... 4,500 fr.

ESSAIS DE SUITE 7, rue Brunel, Paris. — Téléphone 545,63.

Prix des modèles les plus vendus



Les quatre meilleures ventes de voitures électriques
au 1^{er} semestre 2020

Prix de base **Prix déduit du montant d'aides maximum :**
- bonus écologique : - 7 000 €
- prime à la conversion : - 5 000 € max.



RENAULT ZOE
17 651 exemplaires vendus

24 200 € **12 200 €**



PEUGEOT E-208
8 956 exemplaires vendus

32 700 € **20 700 €**



TESLA MODEL 3
3 562 exemplaires vendus

49 600 € **41 600 €***



HYUNDAI KONA
1 855 exemplaires vendus

35 100 € **23 100 €**

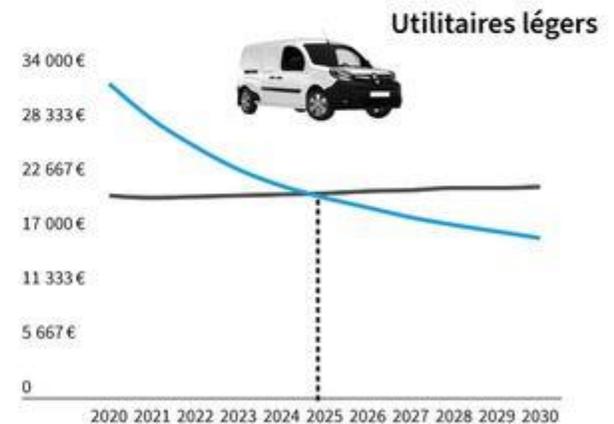
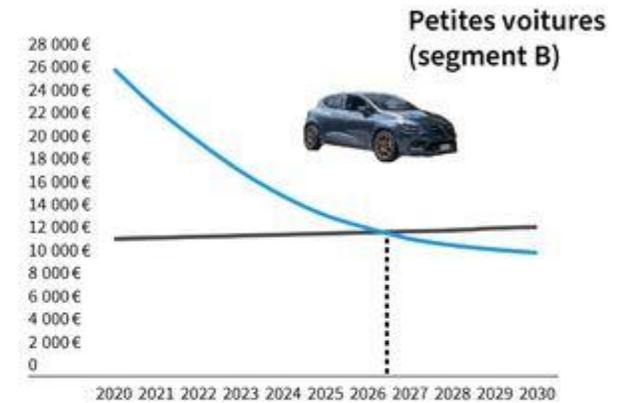
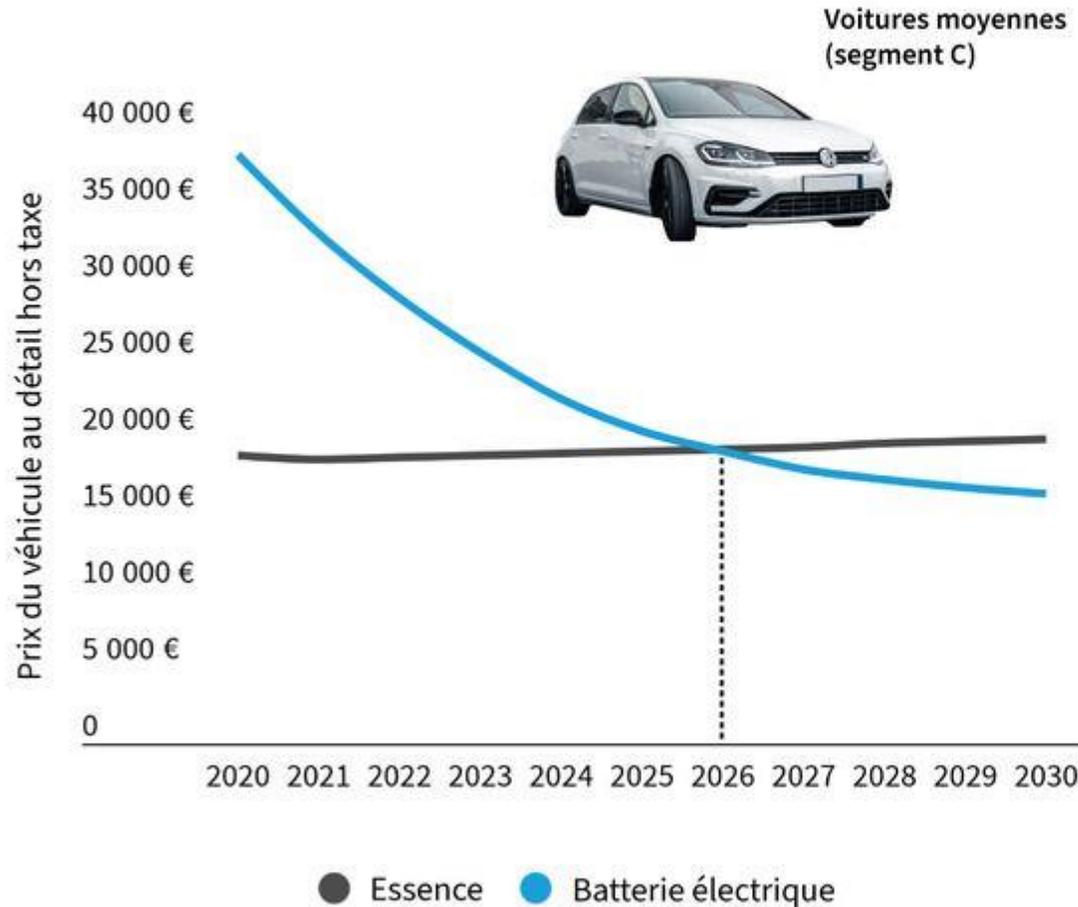
* Pour les véhicules entre 45 000€ et 60 000 €, le bonus écologique est ramené à 3 000€.

SOURCE : CONSTRUCTEURS.

LP/YANN FOREIX, OLIVIER BOSSUT. LP/INFOGRAPHIE.

Quel prix ?

Des VE moins chers que les véhicules à combustibles fossiles en Europe d'ici 2025-2027



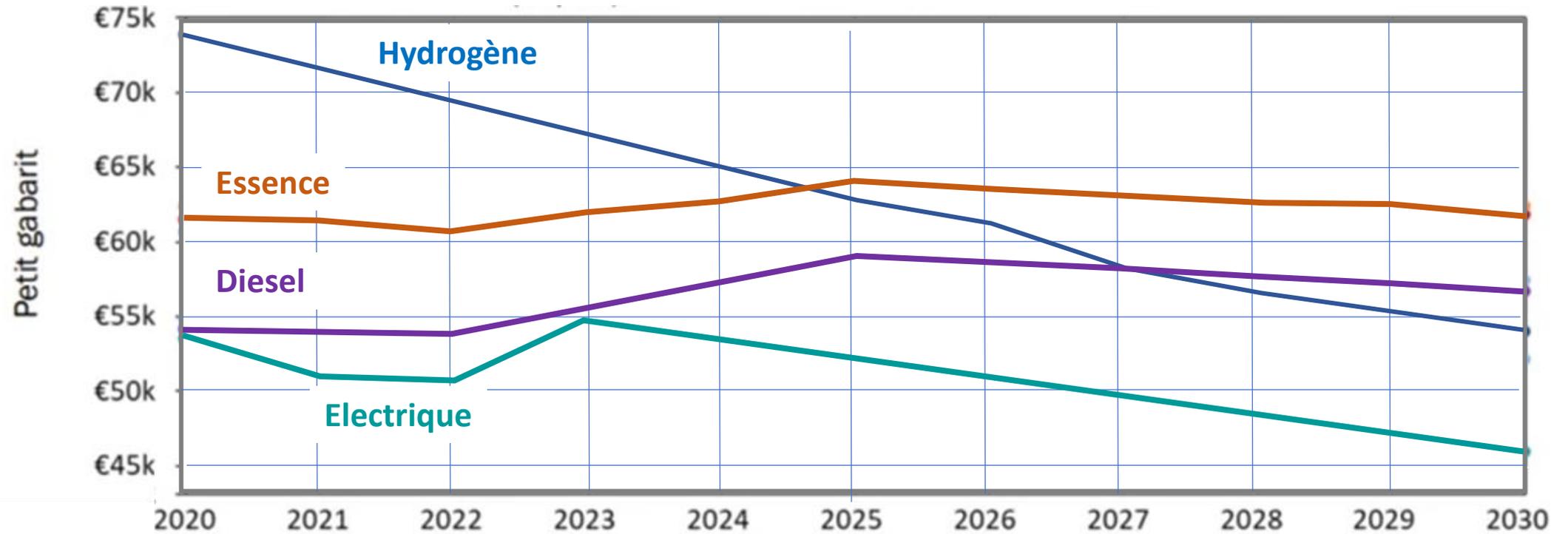
Note : tous les autres segments de véhicules (grandes voitures, SUV petits, moyens et grands, ainsi que les utilitaires lourds) atteindront la parité de prix la même année que les voitures moyennes, en 2026.

Source: Bloomberg NEF (2021), Hitting the EV Inflection Point

Electrique ou thermique ?

Est-ce le bon moment de passer à l'électrique ?

Coût total (**achat + utilisation**) sur toute la durée de vie du véhicule en fonction de la date d'achat !



L'étude a été commandée par le Bureau européen des unions de consommateurs (BEUC) et neuf de ses membres, dont l'UFC-Que choisir. Elle a été réalisée à [l'échelle européenne](#) et au sein de neuf pays par le cabinet de conseil Element Energy et financée par l'European Climate Foundation (ECF), une organisation internationale philanthropique qui promeut des politiques climatiques et énergétiques qui permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre en Europe.

Electrique ou thermique ?

Comme pour le thermique, attention à la pub !

On connaît tous les voitures qui sont vendu pour consommer 4L/100km et qui font en réalité 6L/100km

Modèles	Autonomie réelle	Autonomie cycle WLTP	Autonomie cycle NEDC
Tesla Model S	533 km	N.D.	632 km
Hyundai Kona Electric	435 km	482 km	564 km
Jaguar I-Pace	315 km	470 km	543 km
Renault Zoe	276 km	300 km	400 km
Nissan Leaf	211 km	270 km	378 km
smart EQ fortwo	124 km	N.D.	160 km

Un avantage et un inconvénient !

Faible cout d'entretien :

- 20 pièces en mouvement dans un moteur électrique (contre 1 000 pour un VT) :

Pas de vidange, de remplacement de filtres, bougies...
pas de boîte de vitesses, ni d'embrayage, pas de filtre à particules ou de vanne EGR.

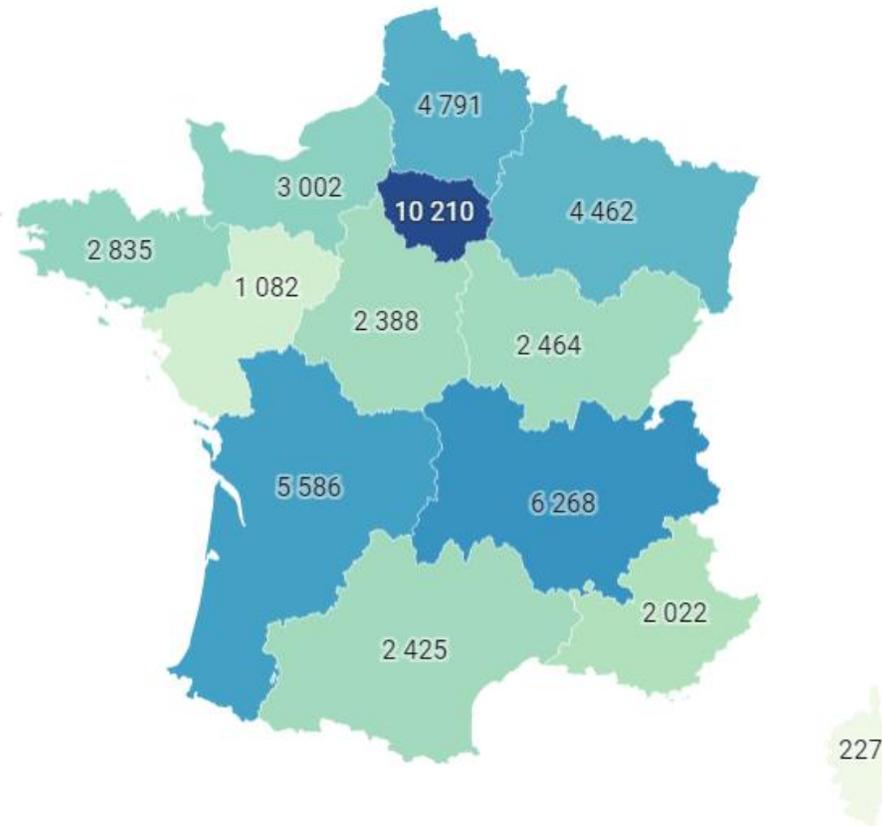
Frais d'assurance élevés : 20 à 50%
(à cause de la valeur de la voiture

Electrique ou thermique ?

Points de recharge (publique) !

Nombre de points de recharge par région

Total France : 55 515 (au 28/02/2021)



Electrique ou thermique ?

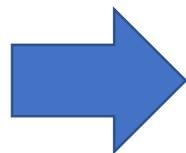
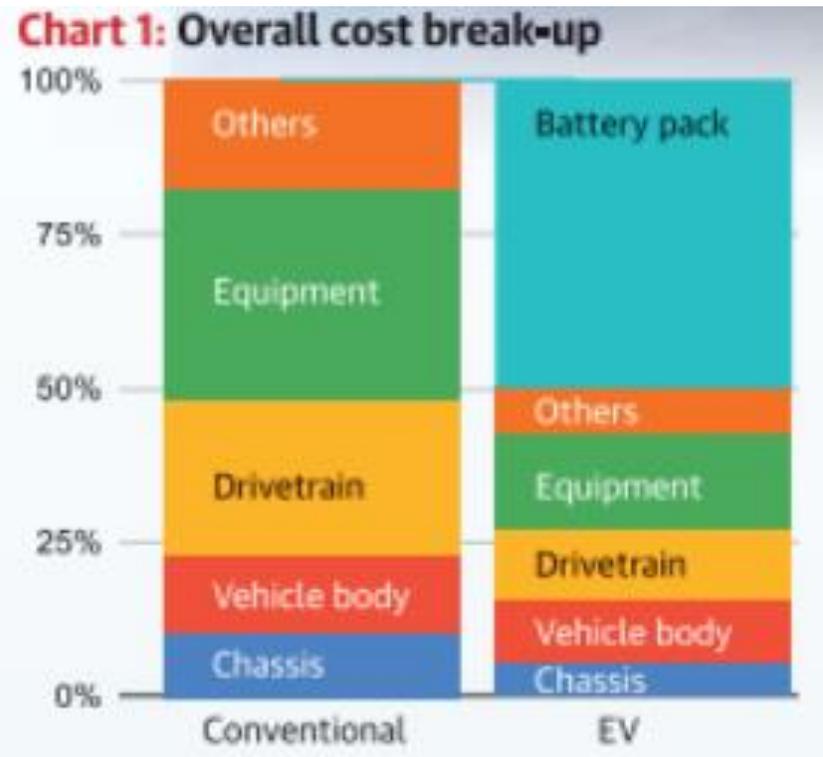
↳ Le match : véhicule thermique / véhicule électrique



Critère	Véhicule thermique	Véhicule électrique
Densité énergétique (Wh / kg)	😊😊	😊😞
Facilité de stockage et de « recharge »	😊😊	😊😞
Émissions locales	😞😞	😊😊😊
Impacts environnementaux globaux (ACV)	😞😞	😊😞

- Situation énergétique mondiale
- Pourquoi les batteries Li-ion?
- Principe des batteries Li-ion
- Electrique ou thermique ?
- **Rôle du recyclage des Li-ion**

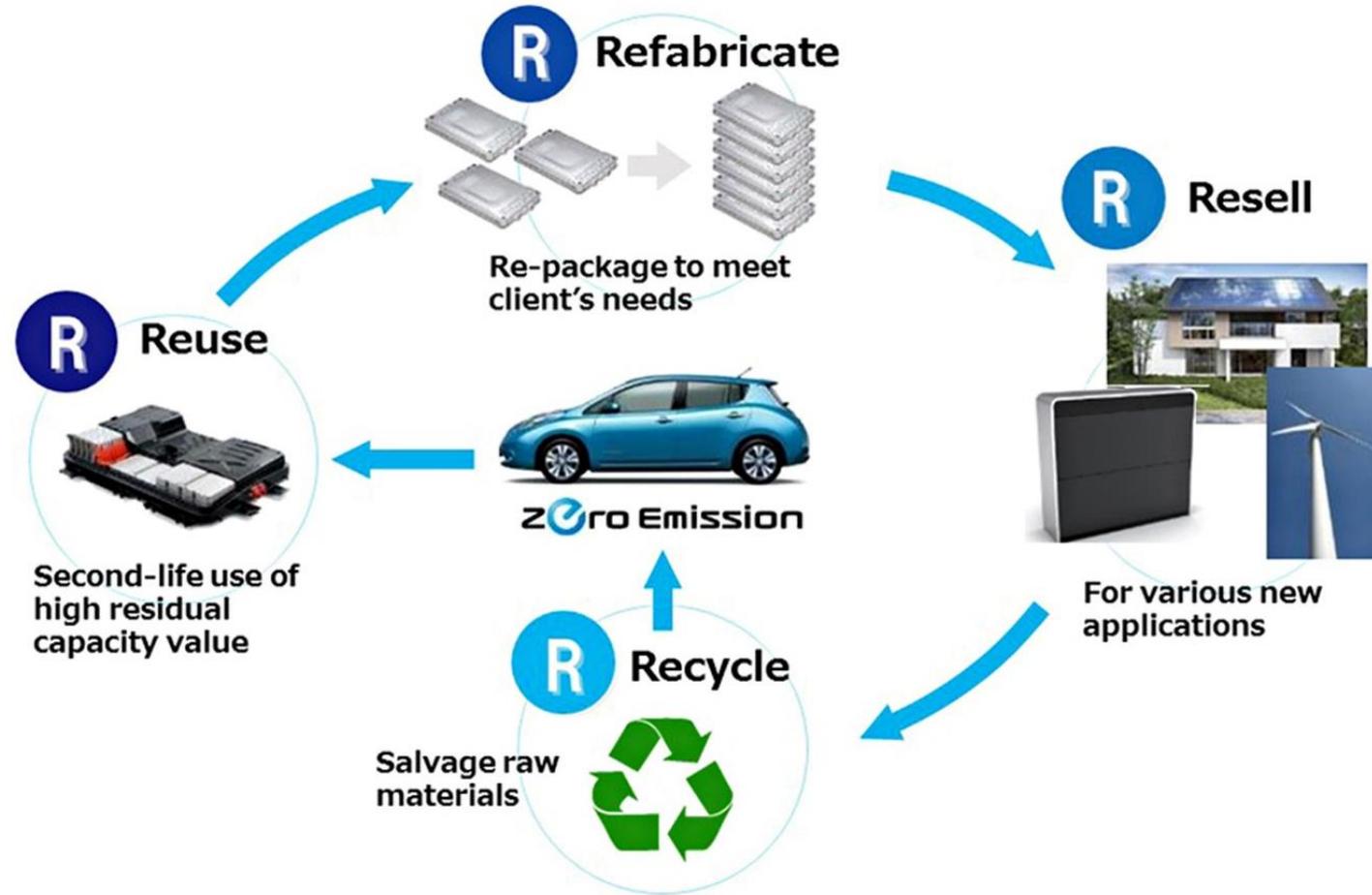
Pourquoi est-ce important ?



La batteries :

- représente entre 40 et 50% de la valeur de la voiture
- Contient des métaux critiques (Co, Li, Cu), non disponible en France
- Contient des produits dangereux

Les différents types de recyclages ?



Travaux de recherche en collaboration avec des acteurs de la région (SNAM)

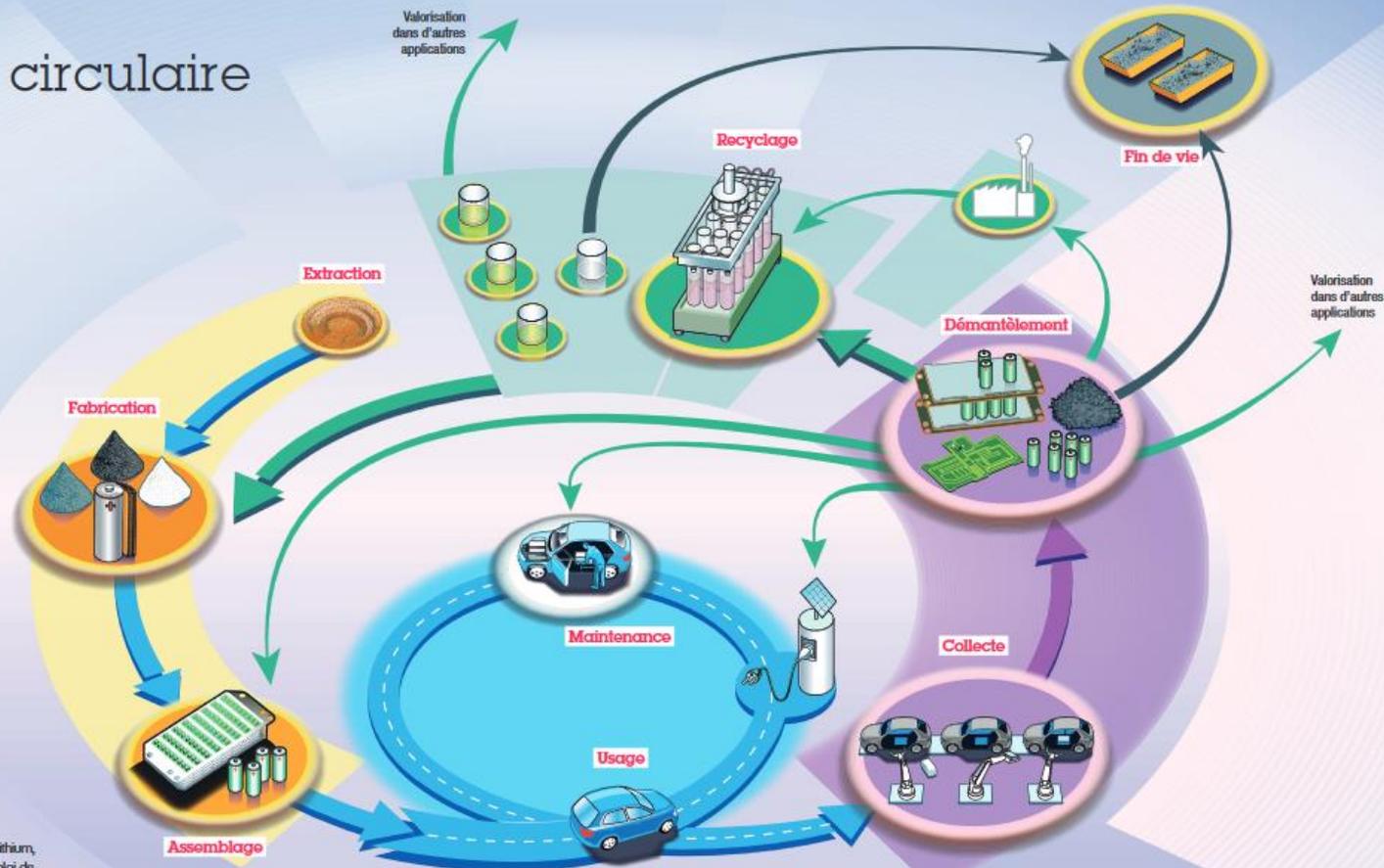
Merci pour votre attention !

Recyclage des batteries

L'économie circulaire

PRINCIPE

Mode opérationnel et organisationnel reposant, dès la conception des produits et systèmes, sur des processus résolument « durables ». Exemple avec le cycle vertueux d'une batterie lithium-ion de véhicule électrique.



Écoconception

Approvisionnement durable : extraction des matières (lithium, fer, cobalt) respectueuse de l'environnement et emploi de matières recyclées.

Utilisation propre et économe des ressources : fabrication optimisée des accumulateurs avec davantage d'éléments actifs (amélioration du stockage d'ions lithium) utilisant moins de matières critiques, avec des solvants de base aqueuse, car moins polluants, et avec des techniques « additives » (ajout de matières plutôt que suppression et donc déchets).

Anticipation du démantèlement : assemblage des accumulateurs en batterie selon des procédés facilitant leur désassemblage (pour un recyclage efficace ou une deuxième vie).

Réduction de l'empreinte carbonique : livraison des batteries dans des circuits courts, via des modes de transport « doux » : fluvial, fret ferroviaire, électrique.

Éco-utilisation

Optimisation de la durée de vie : sollicitation non-agressive de la batterie dans le véhicule, grâce à des logiciels de pilotage intelligent tenant compte de plusieurs paramètres (état de charge de la batterie, vitesse du véhicule, dénivelé du trajet).

Maintenance préventive et curative : surveillance en temps réel de la batterie grâce au système de gestion intelligente : par exemple, les accumulateurs défaillants peuvent être déconnectés du système (qui continue de fonctionner) avant d'être réparés.

Écorécupération

Collecte : récupération des batteries en fin de « première vie », mise en sécurité et diagnostic de l'état de tous leurs modules.

Démantèlement optimisé : désassemblage mécanique des batteries avec des procédés limitant les pertes de matière.

Valorisation des modules viables : réintroduction des éléments aux performances moindres dans d'autres applications : complément au stockage stationnaire d'énergie solaire, alimentation de dispositifs portables.

Traitement des autres éléments : séparation mécanique selon trois alternatives : valorisation énergétique (incinération), mise en décharge ou recyclage.

Écorecyclage

Tri physique optimisé : séparation selon des familles de matériaux (métaux, plastiques, inorganiques) avec des techniques innovantes en termes de performances et de coûts : tri magnétique, par densité.

Séparation chimique poussée : extraction des matières d'intérêt par des procédés d'hydrométallurgie ou de pyrométallurgie conçus notamment pour réduire la génération de sous-produits polluants.

Mise en décharge des déchets ultimes : stockage dans des sites dédiés.

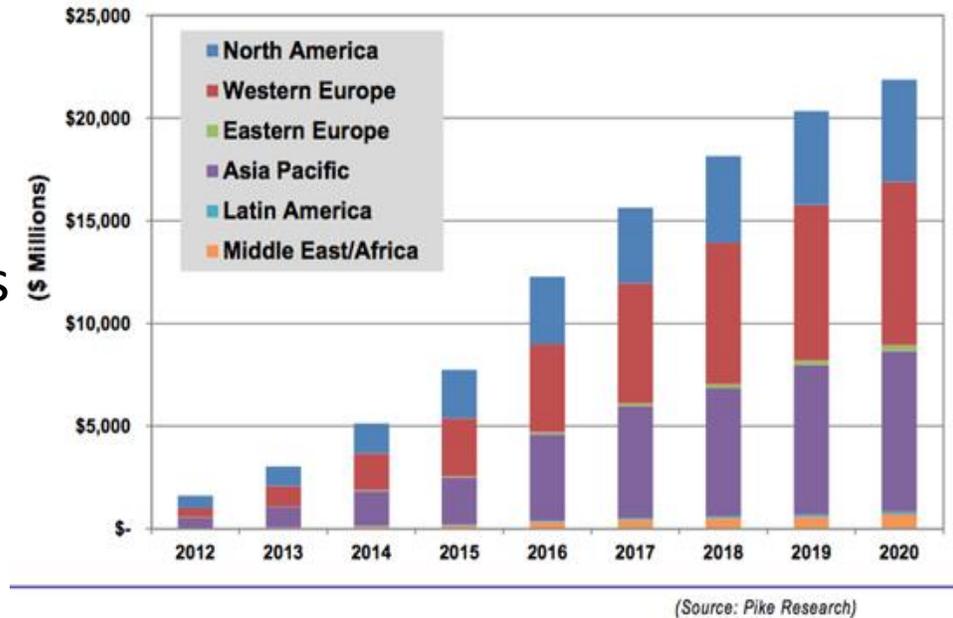
Recyclage des batteries



☐ Développement exponentiel des appareils électroniques

La taille du marché mondial des batteries Li-ion devrait croître à un taux de croissance annuel moyen de 16,4 % de 2020 à 2025, pour atteindre 94,4 milliards de dollars en 2025, contre 44,2 milliards de dollars en 2020

t 1.1 Total Lithium Ion Transportation Battery Revenue by Region, World Markets: 2012-2020



Recyclage des batteries



- 3500 à 4000T / an de déchets Li-ion
- Environ 50% de métal à recycler
- 2 voies de recyclage :
 - la destruction avec récupération uniquement des métaux lourds
 - la valorisation avec récupération de tous les métaux et des électrolytes (sels).



- Toyota premier constructeur à participer activement à la mise en place d'une filière qui permet une traçabilité depuis le détenteur de la batterie en fin de vie jusqu'au certificat de recyclage émis par une société agréée
- un coût de recyclage permettant l'autofinancement → aspect économique s'ajoutant à la motivation écologique des metteurs sur le marché

Recyclage des batteries

Prix du recyclage est totalement dépendant de la techno...

Du matériau d'électrode

Voiture électrique : modèles citadines

Modèle	Prix TTC hors bonus	Autonomie approximative	Avantages	Inconvénients
Smart ForTwo	22 950 €	160 kms	Petite, compacte, idéale pour une vie citadine, Facile à conduire, habitacle spacieux, coffre facile d'accès	Performance du moteur, confort, finition de l'habitacle, perte de puissance, bruit, suspensions dures
Renault Zoé	23 700 €	400 kms	Consommation, agrément de conduite, habitabilité, autonomie réelle, prix	Confort, fiabilité, coût de la location de la batterie, finitions moyennes
Smart ForFour	23 850 €	155 kms	Compacte, idéale pour une vie citadine, Design et polyvalence	Performance du moteur, habitabilité
Citroën C0	26 900 €	150 kms	Citadine 4 places, Possibilité de rechargement sur une prise domestique, Design, habitacle spacieux, voiture silencieuse	Faible autonomie, Prix élevé, fiabilité
Peugeot iOn	26 900 €	150 kms	Design, Batterie inclus, compact, conduite agréable	Mauvaises finitions, faible autonomie
VW e-Up	28 000 €	160 kms	Agréable à la conduite, deux cables de recharge, habitacle intérieur	Tarif élevé, autonomie réduite
Nissan Leaf	29 700 €	270 kms	Voiture 5 places, conduite facile, puissance, voiture silencieuse, habitacle agréable	Autonomie réduite, petit coffre
Hyundai Ioniq	33 600 €	280 kms	Vitesse de pointe, Design, confort, consommation	Autonomie réduite
Kia Soul	36 400 €	250 kms	Design, bons équipements, vraie autonomie, garantie 7 ans	Petit coffre, prix élevé
BMW i3	39 950 €	300 kms	Tenue de route, options, coque renforcée, assistance BMW	Prix
VW e-Golf	40 040 €	300 kms	Autonomie sur autoroute, confort, design	Tarif élevé, puissance de charge limitée

Pollution??

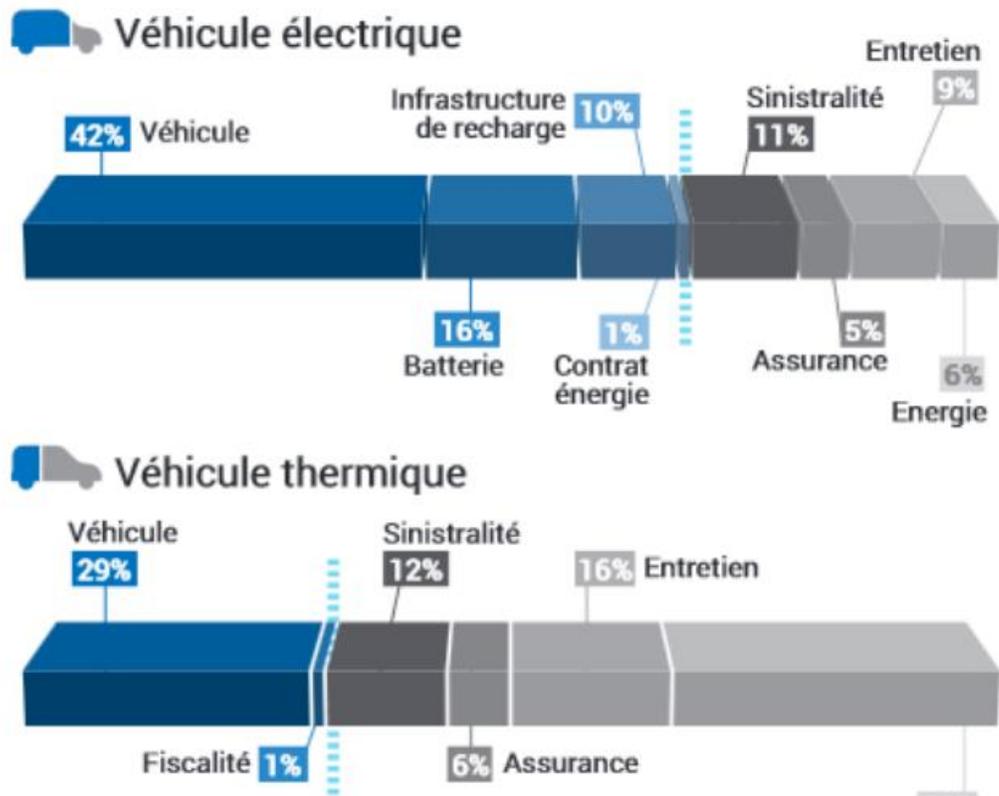


Figure 4: Répartition des coûts pour les véhicules électriques et thermiques constatée sur une flotte d'entreprise (projet InfiniDrive*)

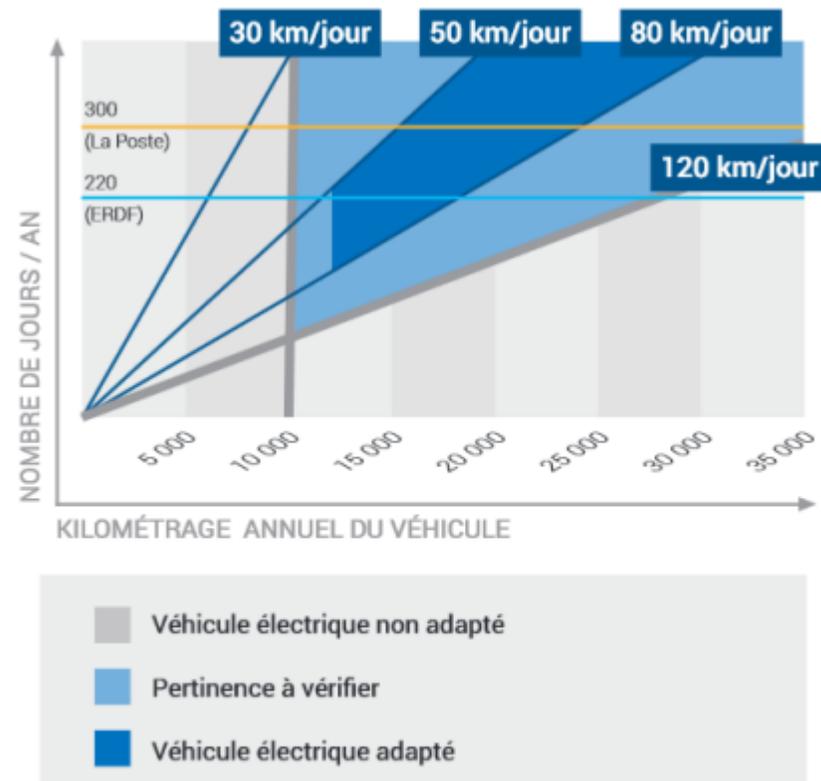
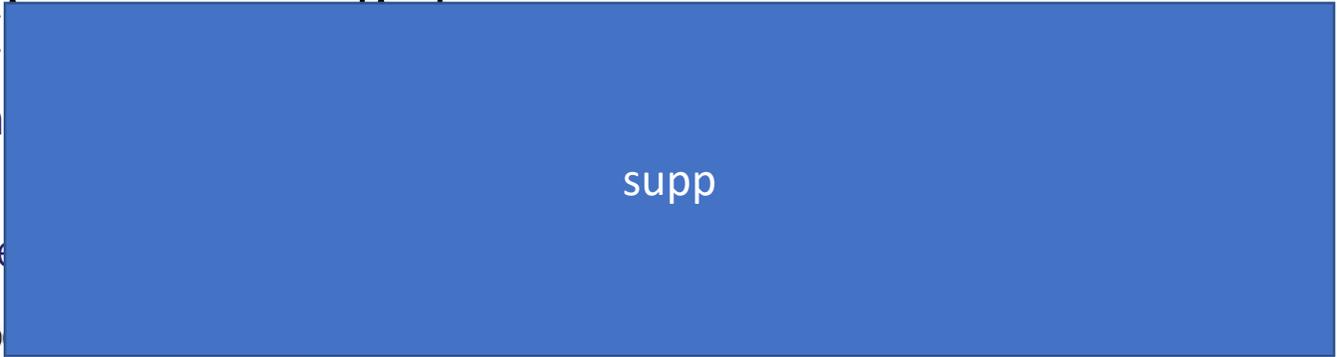
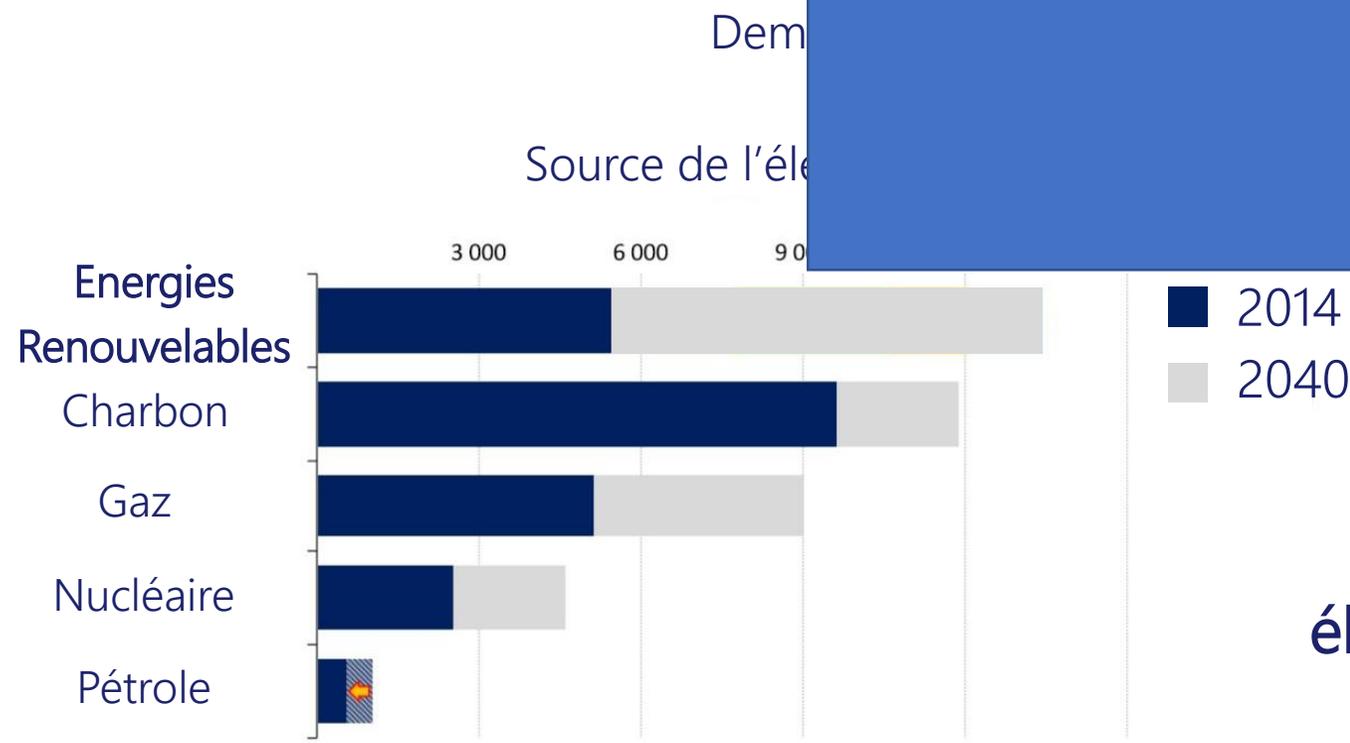


Figure 5 : Pertinence économique du véhicule électrique en fonction de son usage (quotidien / annuel) constatée dans le cadre du projet InfiniDrive¹⁰

Situation énergétique



x2.5 production
électricité issue d'ER



Inépuisables

Empreinte carbone faible

Energies Renouvelables



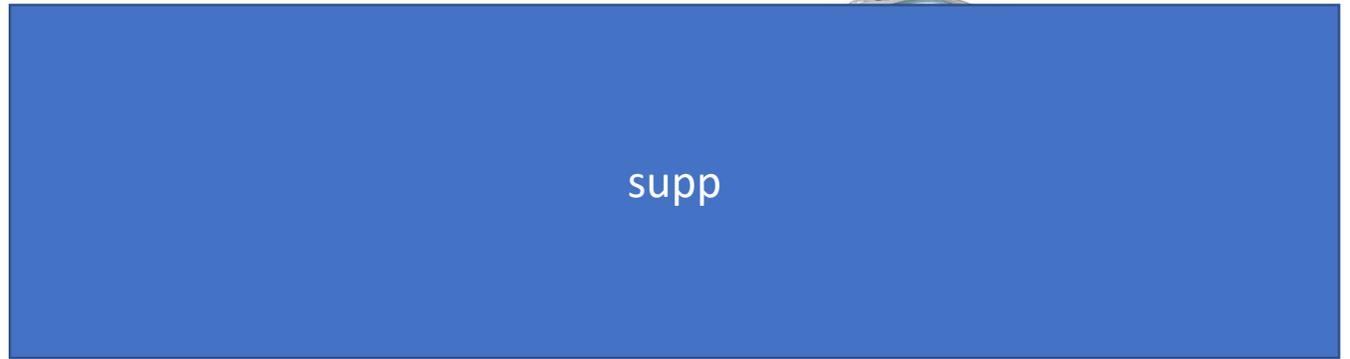
Intermittentes

Production - Consommation



VE ou VT?

Evolution du cout du KWh



Prévisions de l'évolution du prix de stockage d'un KWh.

Année	2010	2012	2014	2016	2018	2026	2030
Prix du KWh (\$)	1000	650	500	300	200	100	73

Evolution du prix du pack batterie par rapport au coût d'un EV et comparaison du prix d'un VE par rapport à un VT classique.

Année	2018	2024	2030
Prix du pack batterie / Prix VE (%)	48	27	18
Prix VE / Prix VT (%)	133	100	< 100

VE ou VT?

supp

↳ Autonomie liée principalement à l'énergie
capacité de la batterie en Ah

↳ Une tendance à l'augmentation de la quantité d'énergie embarquée...

Batterie lithium-ion



< 2016, 2017	≥ 2016, 2017
16 kWh	-
22 kWh	41 kWh
-	60 kWh
24 kWh	30 kWh



50 à 75 kWh
409 à 650 km

... pour une autonomie théorique courante autour des 400 km

Comparaison des prix d'assurances auto



Profil : Salarié, bonus 72,

Période : du 1^{er} janvier au 1^{er} juillet 2021

40 ans, marié, 2 enfants,

vivant dans un pavillon en banlieue parisienne

Date d'achat du véhicule et date de la 1^{re} immatriculation 1^{er} janvier 2020

Marque	Modèle	Énergie	Prix de vente	Tarif le plus bas assurance tous risques
 RENAULT		Zoe ZE Intens R110	34 000 €	525 €
		Clio 1.0 SCE 65 Life	17 000 €	280 €
		Megane TCE 115 Life	25 000 €	487 €
 Volkswagen		ID.3 1st Max	35 000 €	699 €
		Golf 1.0 TSI OPF 110 Life First	22 000 €	441 €
 CITROËN		C-Zero	27 000 €	449 €
		C3 1.2 Pure Tech 110 Feel	17 000 €	376 €

Prime moyenne d'assurance auto
664,71 €/an

Moteur électrique


Moteur thermique


Prime moyenne d'assurance auto
691,05 €/an