L'intérêt et les freins au développement de la voiture électrique

L'offre de voitures électrique est en train de s'étoffer et leur prix va baisser avec la quantité produite et la concurrence. Les municipalités (et notamment la Métropole) offrent des locations, à la hauteur de la demande, mais qui restent faible (quelques centaines de véhicules), par rapport au trafic de voitures individuelles (quelques centaines de milliers).

On peut classer les freins à la possession d'une voiture électrique à plusieurs niveaux :

Les inconvénients de son utilisation :

- ⇨ les incertitudes sur l'avantage fiscal ;
- ⇨ les problèmes de recharge : le manque de bornes, la lenteur de recharge et l'intensité importante des recharges rapides ;
- ⇨ le besoin et le coût de la possession d'une 2ème voiture ;

Les freins imposés par l'inadaptation de la Métropole à ce progrès sont :

- ⇨ les congestions qui dissuadent l'utilisation des voitures, mêmes propres,
- ⇨ L'indisponibilité de bornes de recharge.
- ⇨ Les limites de places de garage pour une seconde voiture.

Les freins dépendant de l'inadaptation de l'état aux contraintes électriques sont :

- ⇨ La réglementation pour disposer de garages équipés,
- ⇨ la disponibilité d'énergie électrique propre, et encore plus pour une recharge propre,
- ⇨ l'empreinte carbone sur la durée de vie, incluant la fabrication des batteries,
- ⇨ le surcoût de la maîtrise de la production d'électricité renouvelable.

Nous allons montrer également que la loi actuelle sur la Transition énergétique est le frein majeur à la généralisation des véhicules électriques annoncée par le gouvernement !

1 Les incertitudes sur l'intérêt fiscal

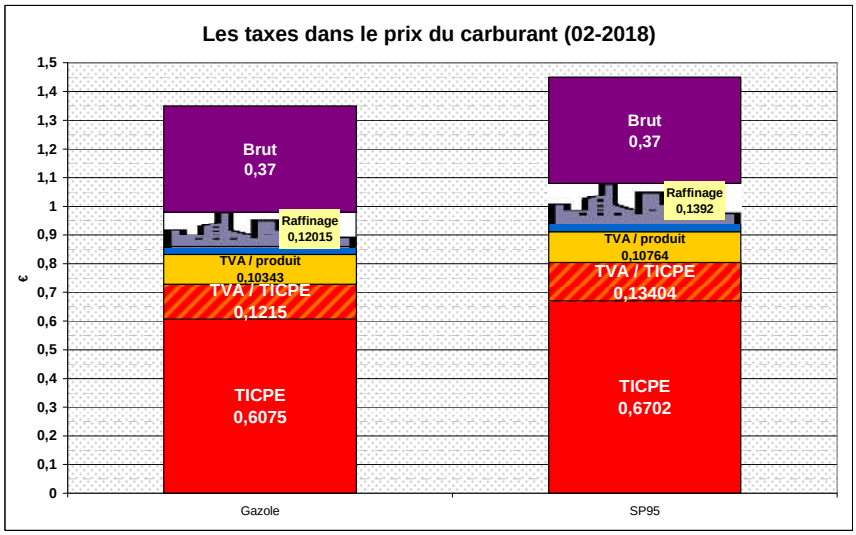
1.1 Les 5 taxes sur l'énergie

Les 5 taxes sur l'énergie sont :

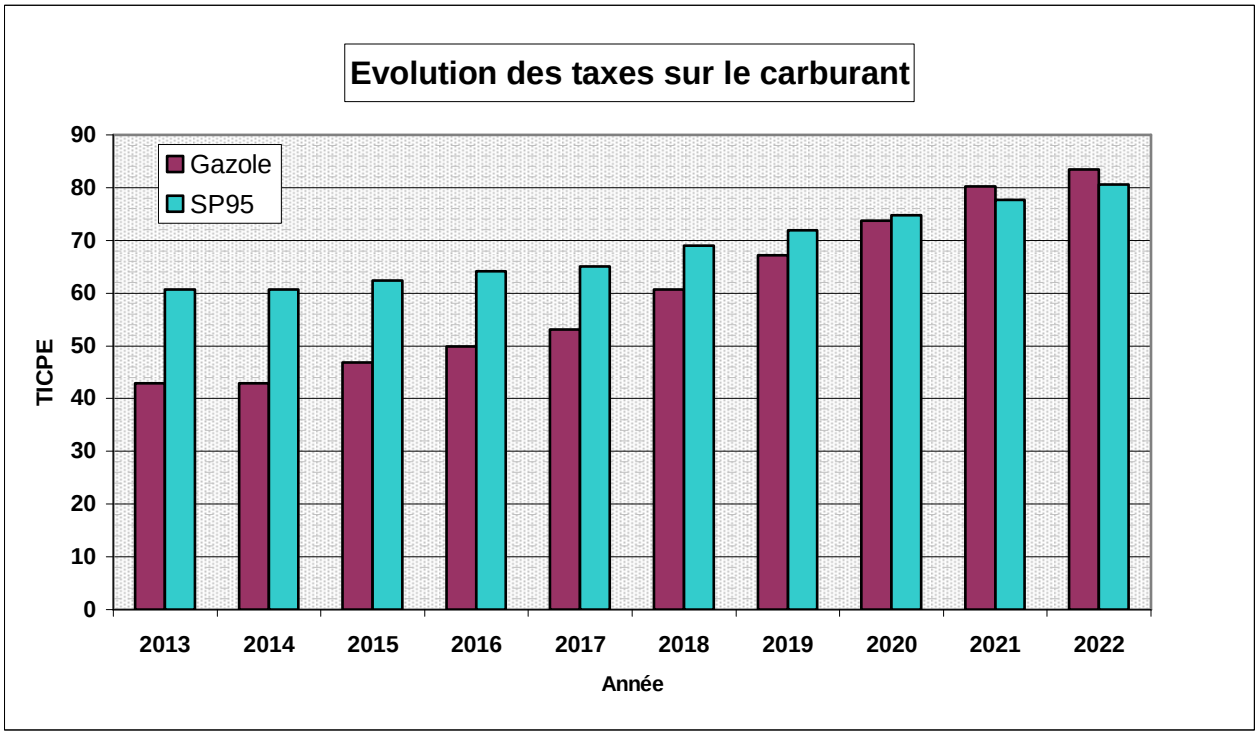
- ⇨ la **CSPE** (Contribution au service public de l'électricité),
- ⇨ les **TLCFE** (Taxes locales sur la Consommation Finale d'Électricité),
- ⇨ la **TICGN** (Taxe Intérieure de Consommation sur le Gaz Naturel),
- ⇨ la **TICPE** (Taxe Intérieure de Consommation sur les Produits Énergétiques)**,**
- ⇨ la **TVA** qui vaut : 5,5% sur l'abonnement (électricité et gaz naturel) et sur la Contribution Tarifaire d'Acheminement (*si la puissance souscrite ≤ 36 kVA),*
  20% sur le prix de l'énergie HT (électricité, gaz ou produits pétroliers) et aussi sur les autres taxes.

1.2 Les taxes sur les carburants

Un des inconvénients, en France, de l'utilisation des trajets en véhicules thermiques est la forte taxation des carburants automobile (~125% du coût du carburant non taxé).



De plus, les taxes sur les carburants ne cessent d'augmenter. Il avait été annoncé que la taxe carbone serait compensée par une baisse des autres taxes (TICPE). Ce n'a pas été le cas. Le diesel est le plus touché par les augmentations, mais le SP95 a été augmenté, ce qui n'encourage que modérément l'achat de véhicules essence.



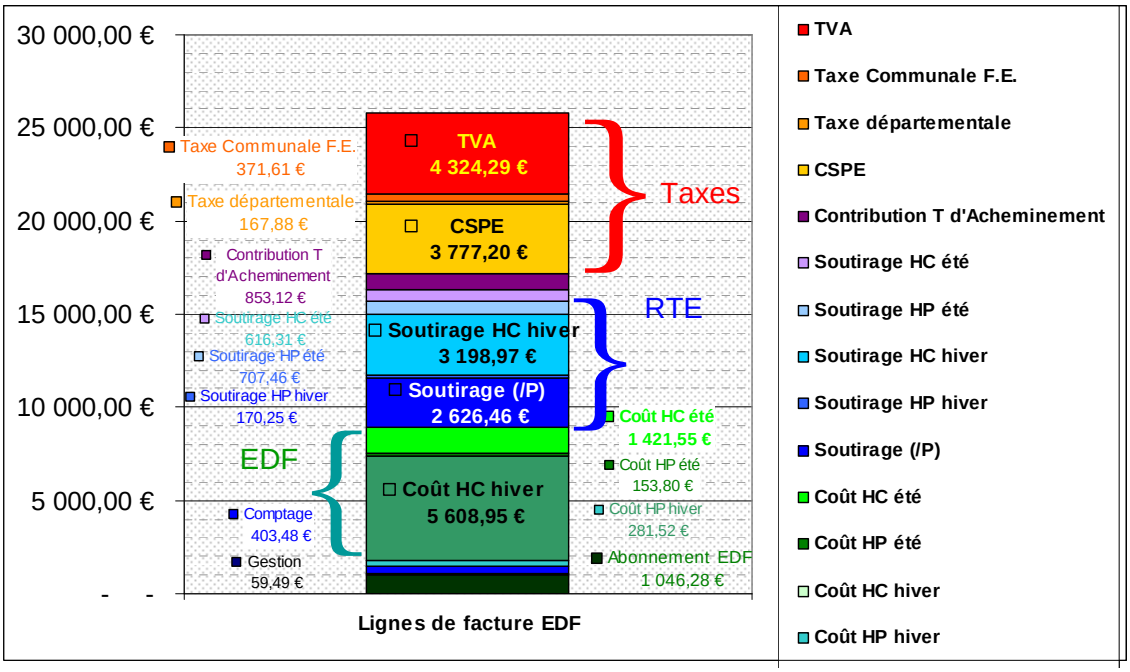
Evolution passée et programmée de la TICPE

1.3 Taxes sur l'électricité

Le tarif actuel de l'électricité, reste l'un des moins cher d'Europe, grâce au nucléaire et à l'hydraulique.
La taxation de l'électricité (CSPE + TVA + TCFE + TDCFE + TCCFE) est moins élevée que la TICPE :

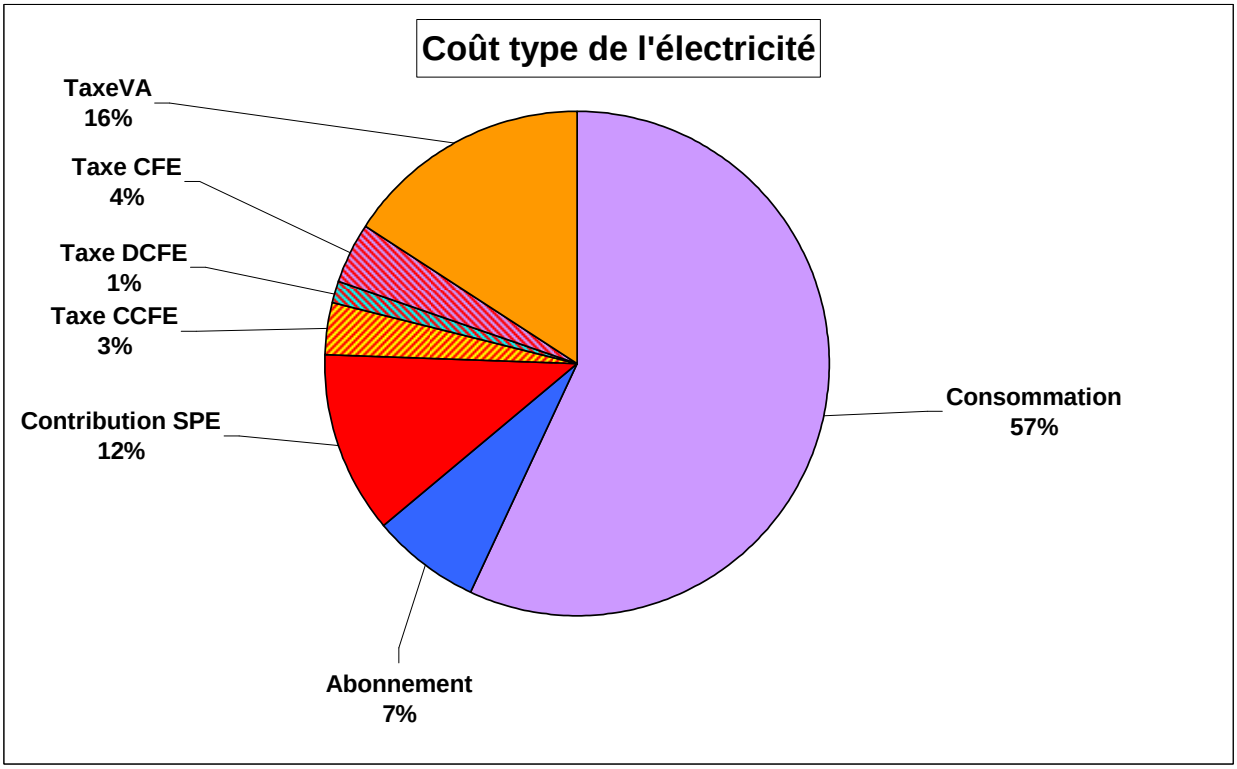
- ⇨ la taxe départementale sur la consommation finale d'électricité (= 0,5 et 0,31875 c€/MWh),
- ⇨ la taxe intérieure sur la consommation finale d'électricité**,
- ⇨ la CSPE (Contribution au Service Public de l'Electricité) = 2,3c€/kWh.
- ⇨ la CTA (Contribution tarifaire à l'acheminement) qui finance RTE,
- ⇨ la TVA (Taxe sur la Valeur Ajoutée) = 20% sur le total.

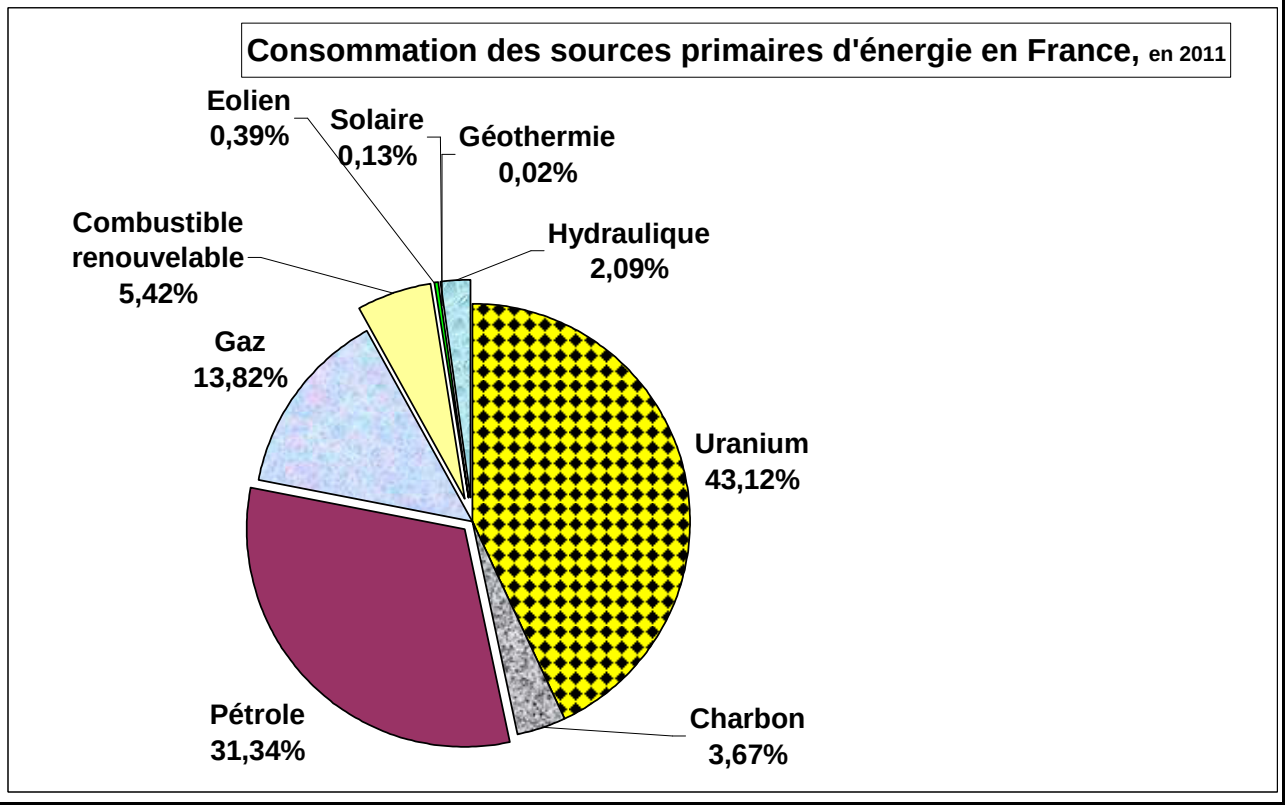
La CSPE, finance l'achat à coût réduit des énergies renouvelables, TVA incluse, qui est de 14% du coût hors abonnement (consommation + transport) et environ 25% de la consommation seule.



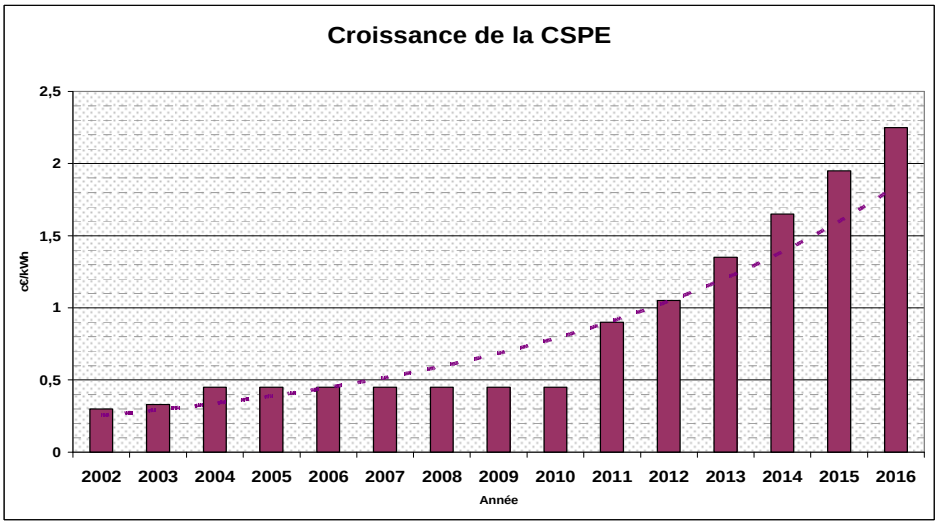
Analyse des factures des charges communes d'une copropriété (hors gel, VMC, éclairage)

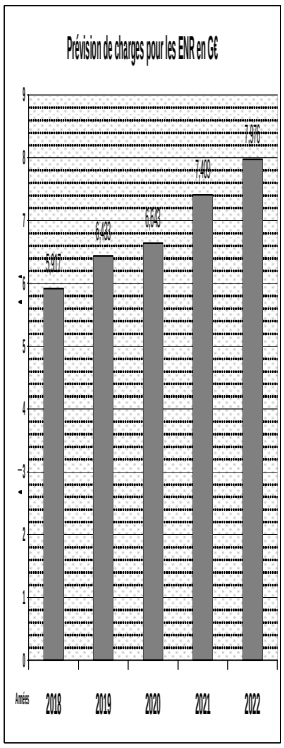
Les diagrammes suivants présentent la part de la CSPE dans le coût de l'électricité et la part des énergies renouvelables dans la fourniture d'électricité.





Or la CSPE est en constante augmentation, encore plus que la TICPE, alors que la part des renouvelables est constante depuis 2010, même si la part de l'éolien n'est plus totalement négligeable.





Source : http://www.fournisseurs-electricite.com et la Cour des Comptes pour les engagements financiers

1.4 Utilisation de la CSPE

A quoi sert-la CSPE ?

Elle sert à financer essentiellement les électricités renouvelables (5% de la consommation). Le graphique suivant montre la part de chaque subvention et la part d'électricité renouvelable qu'elle subventionne. On voit qu'il n'y a aucune corrélation entre les 2.

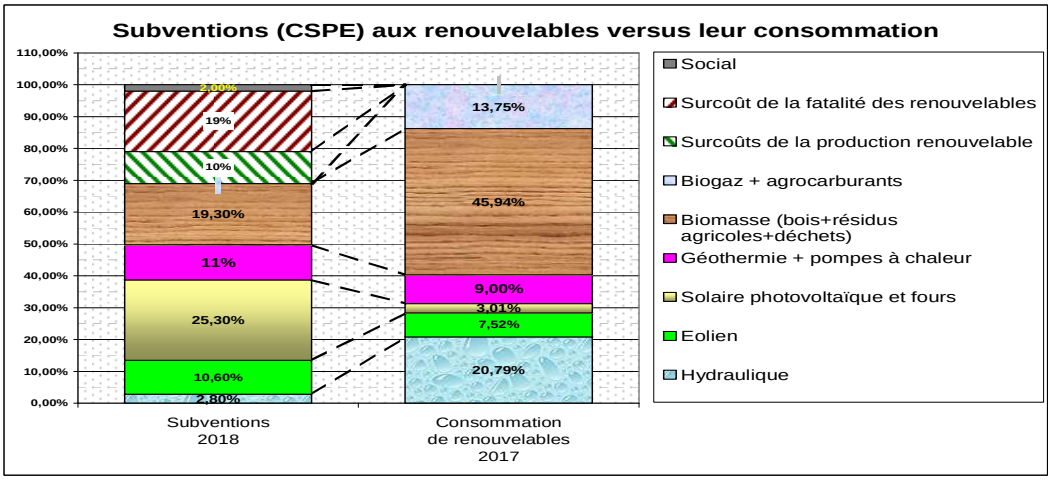
Il nous est impossible de trouver une justification logique ou raisonnable à cette disparité.

La CSPE finance surtout le photovoltaïque et l'éolien dont nous pensons qu'il conviendrait de se passer, car :

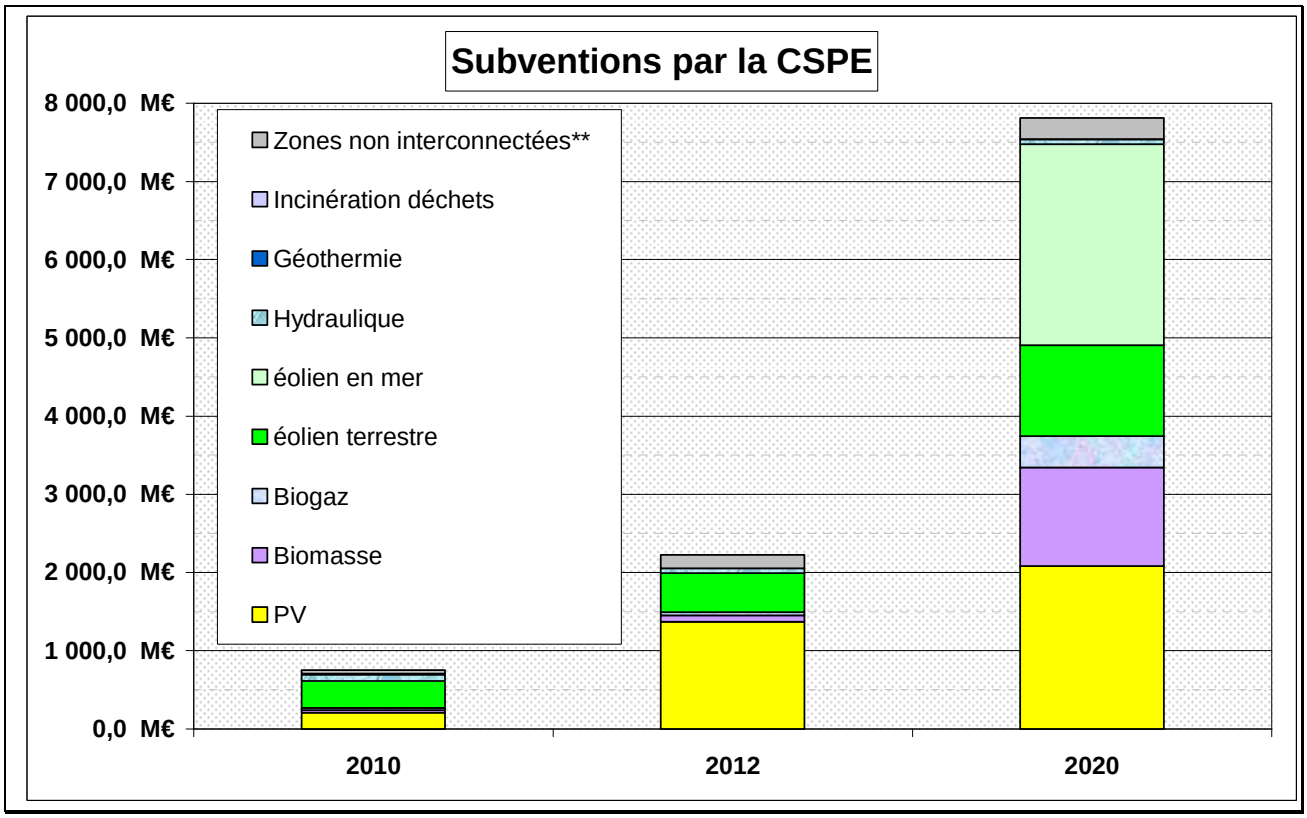
- ⇨ le coût de leur production est 2 fois le coût des maîtrisables,
- ⇨ ces énergies sont aléatoires et il faudrait les stocker (en multipliant leur surcoût par 10 à 20),
- ⇨ elles sont indisponibles quand on en a besoin, 80% du temps pour l'éolien, toujours pour le solaire,
- ⇨ elles sont fatales, c'est-à-dire doivent être consommées à perte la plupart du temps.

Par exemple, on note que le photovoltaïque reçoit les plus fortes subventions pour financer du matériel chinois et fournit le moins d'énergie. En revanche, c'est l'hydraulique qui fournit la plus grande part d'énergie, qui est sollicitable à la demande, notamment quand l'électricité est rare et chère, qui reçoit le moins de subvention.

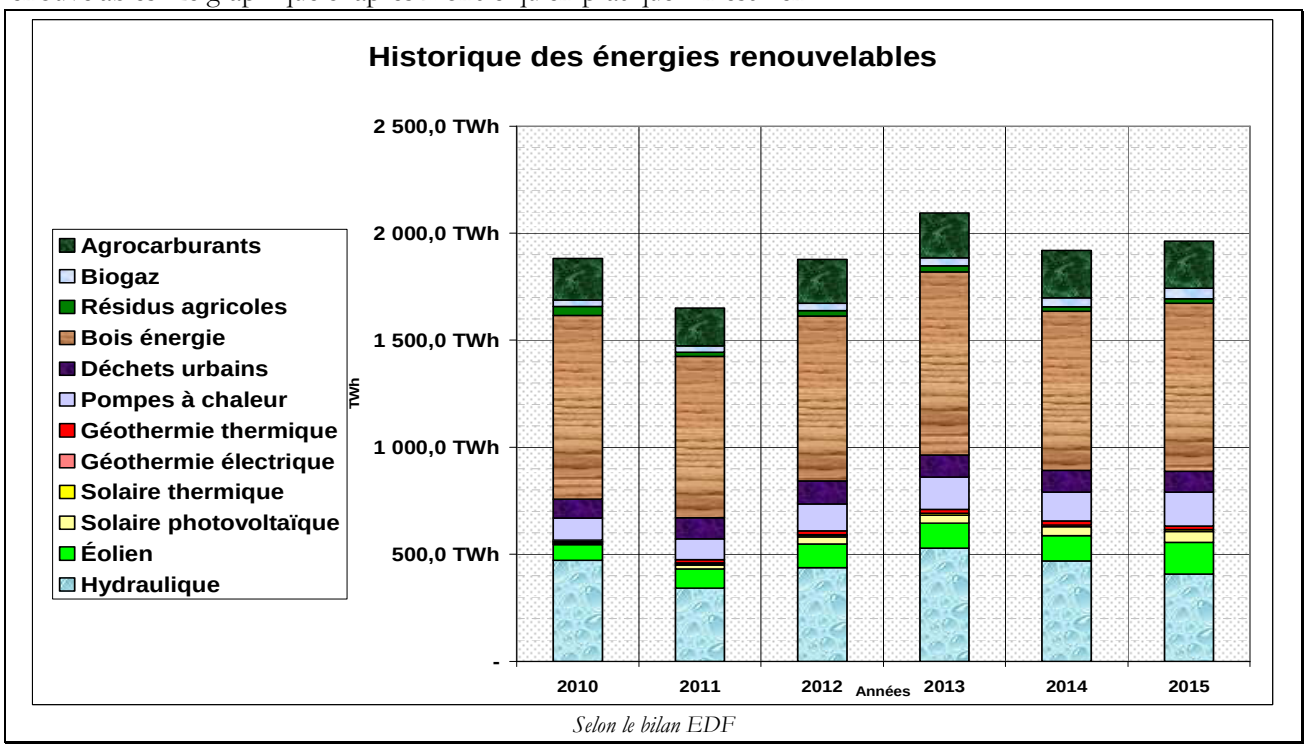
Pour l'avenir, l'état s'est engagé à une augmentation des charges pour financer les énergies renouvelables et surtout le photovoltaïque de l'ordre de 30% en 4 ans. La CSPE devrait donc poursuivre sa croissance à proportion.



Sources multiples



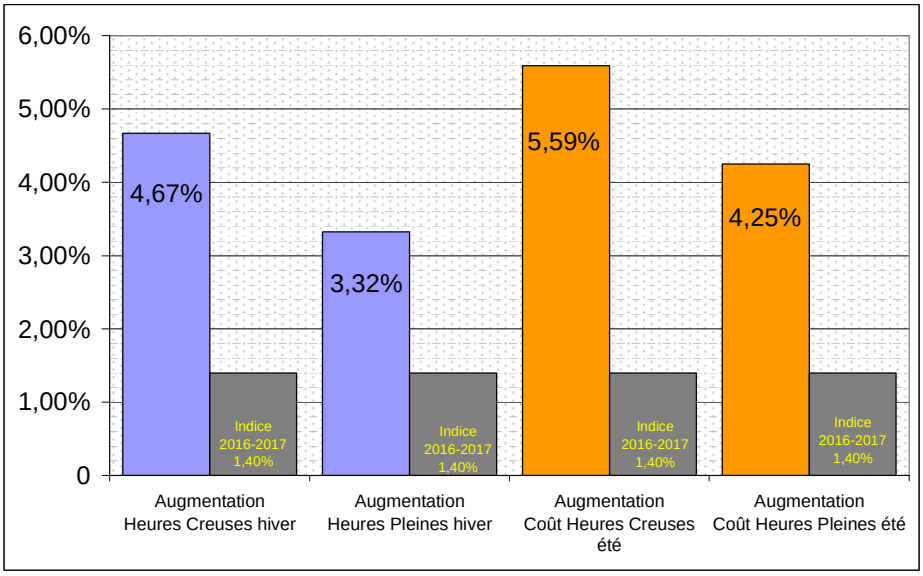
On pourrait penser que l'augmentation de la CSPE va se traduire par une augmentation de la part des énergies renouvelables. Le graphique ci-après montre qu'en pratique il n'est rien.



Selon le bilan EDF

Du fait de l'évolutivité rapide et non maîtrisable des énergies éoliennes et solaires, au-delà de 3% elles imposeraient des variations de régime des centrales nucléaires, qui entraîneraient un **gaspillage d'énergie**. Malgré tout, les politiques projettent d'accroître la part des énergies aléatoires et fatales jusqu'à 5% en 2030.

Cependant, le tarif actuel de l'électricité subit des augmentations bien supérieures au niveau de vie.



Selon une analyse des factures EDF

1.5 Perspectives d'évolution de taxes

Les français dépensent 67 milliards d'euros en carburants par an (2012)[1] dont 62% et 56% de taxes en 2017, soit plus de **42 G€ de revenu pour l'état**. De plus, au fur et à mesure que le taux de voitures électriques augmentera et thermiques diminuera, l'état ne sera-t-il pas tenté de taxer davantage l'électricité, beaucoup plus qu'il le fait aujourd'hui ? Et ceci, indépendamment du financement des renouvelables.

L'incertitude sur la fiscalité de l'usage de l'électricité freinera fatalement l'engouement pour la mobilité électrique.

1.6 Conclusion sur la fiscalité des énergies

S'il en accepte les incommodités de recharge et de manque d'autonomie, l'usager français d'un véhicule individuel a intérêt à profiter aujourd'hui de la niche fiscale de l'énergie électrique bon marché.

Mais on peut parier que cette niche fiscale ne durera pas.

Au fur et à mesure que le transport électrique se développera, par ajout de taxes nationales et locales, de subventions inutiles et dispendieuses à quelques énergies renouvelables peu utiles, par besoin d'équilibrer le budget de l'état et pour financer les investissements d'EDF, le coût et la fiscalité de l'énergie électrique des transports va probablement continuer à croître encore et sans doute bien plus que les taxes sur les carburants malgré la taxe carbone croissante.

Cette augmentation prévisible sera un signal très négatif pour le développement souhaitable de l'acquisition de voitures électriques ou hybrides.

[1] selon planétoscope.com

2 Les difficultés de recharge

2.1 Le manque de bornes publiques

La capacité actuelle des batteries donne aux véhicules une autonomie allant de 50 km à 250 km (exceptionnellement de 400 km pour une Tesla, voiture de luxe).

On dénombre un peu plus de 20 000 bornes de recharge rapide en France, fin 2016. Mais il n'y a pas au moins une borne par station service. L'objectif annoncé est de 40 000 bornes en 2020. Pour cela, un renforcement de l'infrastructure du réseau électrique sera nécessaire. Trouver une borne de recharge rapide restera encore une inquiétude, tant que l'automobiliste ne sera pas sûr de trouver des bornes de recharge rapide dans chacune des quelques 11 000 stations service françaises.

2.2 Les difficultés des recharges individuelles

Une recharge rapide dure 30 minutes, comparée à moins de 3 mn pour le temps d'un plein.

Une recharge lente peut durer jusqu'à environ 10 heures. Mais, **après environ 50% du temps de recharge, la batterie a déjà atteint 80% de sa capacité de chargement**. L'idéal est de mettre à charger sa voiture électrique la nuit, en période creuse. Pour un budget de **300 à 1 000 €**, le temps de recharge peut être réduit quasiment de moitié, mais en accroissant la puissance électrique du logement.

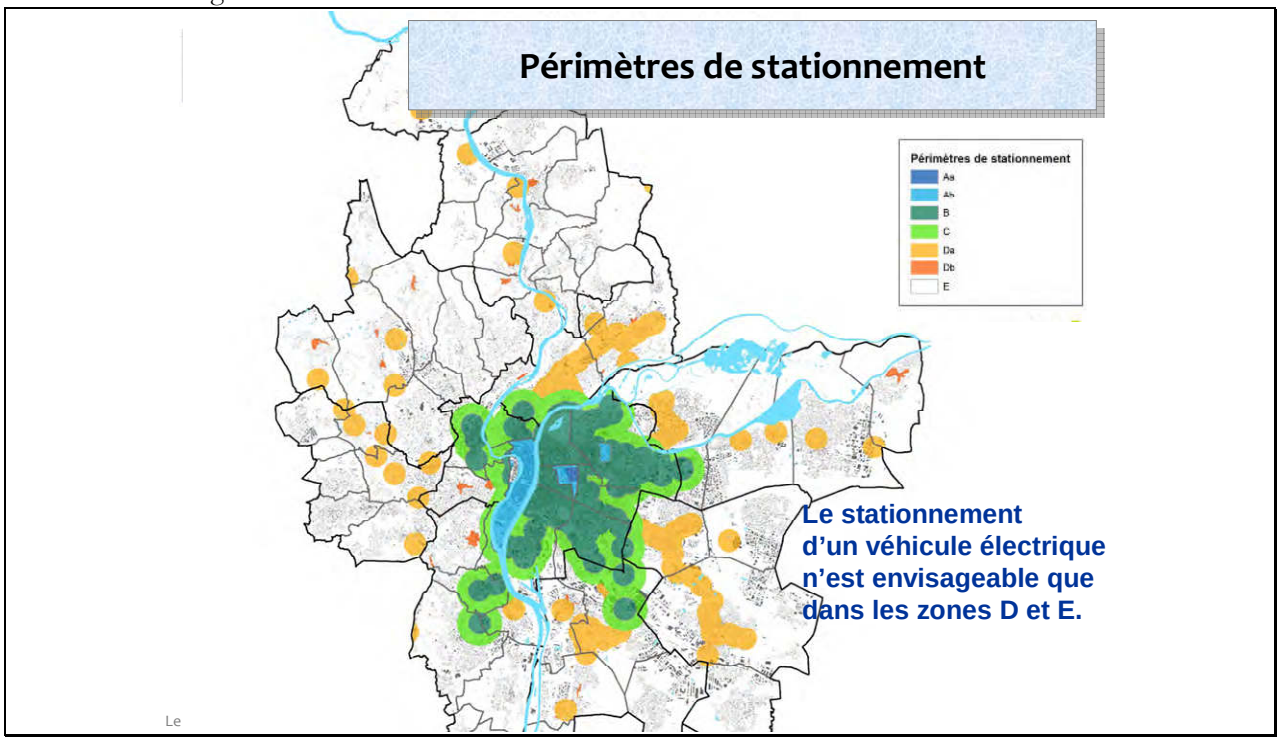
La difficulté majeure est celle de la pénurie de garages équipé ou encore plus des parkings équipé en immeuble collectif pour une 2ème voiture électrique.

Pour faciliter les interventions éventuelles des pompiers, il n'est pas souhaitable de tirer des câbles depuis son domicile. Alimenter son véhicule depuis les communs implique d'installer un compteur individuel par prise !

2.3 Les limitations métropolitaines de places dans les garages

De plus, la Métropole limite de plus en plus le nombre de garages par logement en centre ville.
Le PLU-H définit « des normes maximale de places de garage calées sur :

- ⇨ Les taux de motorisation des ménages (2015) et
- ⇨ l'accessibilité et la desserte en transport collectif,
- ⇨ en fonction du stationnement public,
- ⇨ selon des périmètres de stationnement résidentiel, censées répondre à tous les besoins,
- ⇨ sans encourager à la multi motorisation.



Ainsi sont définies 7 zones de limitation :

- ⇨ Zones Aa et Ab : Hyper centralité :
  Presqu'île, Confluence, Vieux-Lyon, Pentes Croix-Rousse, Part-Dieu, Villeurbanne Gratte-ciel ;
- ⇨ Zone B : quartiers du centre à moins de 500 m (à pied) d'un arrêt de transport collectif, d'une ligne métro, tramway, lignes C1, C2 et C3 ;
- ⇨ Zone C : Centre et première couronne à moins de 1 000 m accessibilité vélo ou bus d'un arrêt de ligne ; métro, tramway, lignes C1, C2 et C3 ;
- ⇨ Zone Da : quartiers de périphérie à moins de 500 m d'un arrêt de transport collectif : gares TER, tramway, lignes C1, C2 et C3 ;
- ⇨ Zone Db : certains centre-bourgs des communes de périphérie ;
- ⇨ Zone E : reste du territoire.

L'objectif de ces limitations est de limiter la possession de la voiture, selon l'hypothèse que moins l'on possède de voiture, moins on l'utilise. Si cette affirmation est vraie à la limite, elle est fausse en réalité.

Parking	**Périmètres de stationnement >>>**	**Aa et Ab**	**B**	**C**	**Da**	**Db**	**E**
Habitat	**1 place par Surface de Plancher**	115 m2	75 m2	65 m2	55 m2	55 m2	45 m2
	ou nombre de places par logement	0,6	0,9	1	1	1	1,4
Logement social	**Nombre de places par logement**	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7
Bureaux	**minimum 1 place par SdP de**	250 m2	160 m2	120 m2	100 m2	70 m2	70 m2
	maximum 1 place par SdP de	100 m2	70 m2	60 m2	50 m2	-	-

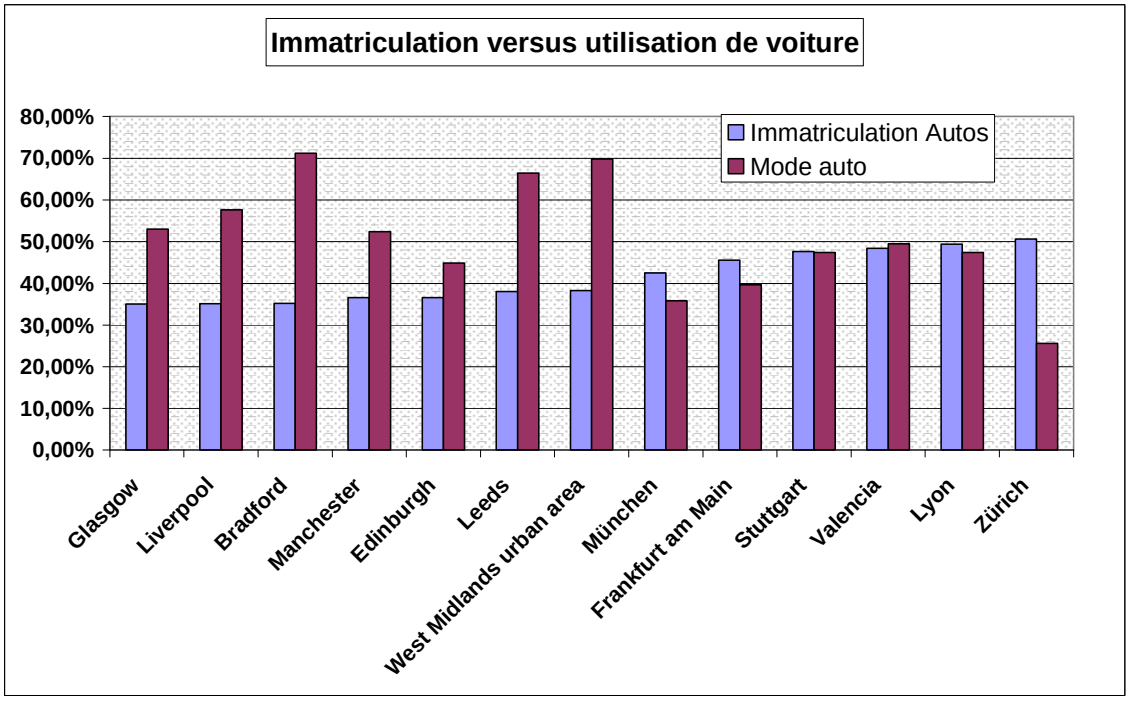
Mais comme pour toutes les contraintes, il faut se méfier des effets pervers induits, qui seront bien plus délétère que l'amélioration espérée.

Etant obligés de stationner leur voiture, le soir dans la rue, les propriétaires sont obligés de le reprendre le lendemain matin.

Ne pouvant plus disposer de garage et a fortiori de garage ou de place de stationnement pour une deuxième voiture électrique, les métropolitains vont avoir plus tendance à aller habiter en banlieue. C'est juste le contraire de l'objectif de densification du centre ville exprimé dans le SCoT, le PDU et le PLU-H. Par cette mesure, ignorant le changement de paradigme de la mobilité électrique, le PDU et le PLU-H renoncent aux économies d'énergie, aux réductions de CO2 et de polluants.

Or il n'y a aucune corrélation entre la possession d'une voiture et son utilisation.

C'est ce que montre une comparaison des villes européennes (non capitales) qui renseignent ces informations sur Eurostat. La ville ou le mode de déplacement en voiture est le plus faible est Zurich (25%). C'est aussi la ville où le taux d'immatriculation sur 2 ans est le plus important (50%). La ville où le mode de déplacement est le plus élevé est Bradford, c'est aussi une des villes où l'immatriculation d'automobile est la plus faible. On voit que c'est aussi le cas des villes britanniques. La raison probable est le mauvais rapport qualité-prix des transports urbains.



Données Eurostat 2012

2.4 Les freins à la possession d'une 2ème voiture plus écologique

Pour un ménage, afin d'éviter les inconvénients de la limite d'autonomie, il est envisageable d'utiliser 2 voitures, une thermique et une électrique. Cette solution est possible en banlieue. En ville, ce n'est possible qu'exceptionnellement, compte tenu de réglementation limitant le nombre de garages à 1 par surface habitable (en pratique 1 par ménage). La contrainte de posséder une voiture électrique pour un ménage est de devoir en louer une autre thermique pour les déplacements du conjoint ou les trajets de week-end ou de vacances. Il est envisageable aussi de louer une voiture électrique. Encore faut-il être sûr de trouver un véhicule garé dans une station proche. Si un jour c'était le cas, il n'y aurait quasiment plus de place pour stationner les voitures thermiques en ville.

2.5 La solution d'une voiture hybride

Selon Yves Crozet, économiste des transports: "*Avec le tout électrique, on nous raconte une belle histoire, mais c'est une chimère économique et technologique. Il aurait été plus judicieux de commencer par développer les véhicules hybrides rechargeables*", D'abord parce qu'avec les hybrides disparaît la peur de la panne sèche. C'est cette peur qui oblige à installer des bornes de recharge rapides… mais très coûteuses en investissement.

En effet, à supposer que les conditions de disponibilité d'énergie non carbonée soient réalisées, le développement des véhicules hybrides, avec une autonomie de 50 km semble une solution plus simple et plus rassurante pour l'usager.

Cette solution a cependant 4 inconvénients :

- ⇨ le poids de la double motorisation et des batteries, handicap pour de longs trajets.
- ⇨ le surcoût de l'hybridation et des batteries,
- ⇨ la disponibilité des bornes à destination,
- ⇨ l'incertitude sur les avantages fiscaux de l'électricité et sur la taxe carbone pour amortir le surcoût.

3 Inconvénients due au coût et au vieillissement précoce des batteries

Les caractéristiques et l'intérêt des véhicules électriques sont liés aux caractéristiques des batteries qui servent à stocker l'énergie.

Les limitations sont dues à divers facteurs :

- ⇨ la puissance délivrable et acceptable en charge, liée à la surface et aux caractéristiques des électrodes,
- ⇨ l'autodécharge,
- ⇨ le nombre de cycles de charges décharges avant que la capacité soit trop dégradée,
- ⇨ rapport énergie/poids,
- ⇨ la durée de vie, selon la durée et température de stockage
- ⇨ l'existence d'un effet mémoire.

3.1 Les progrès des accumulateurs

3.1.1. Les matériaux :

Il y a plusieurs générations essentielles de batteries. Citons :

- ⇨ les batteries au plomb,
- ⇨ les batteries Ni-MH,
- ⇨ les battereies au Lithium,
- ⇨ bientôt des batteries au Sodium.

3.1.2. Les batteries au Plomb

Les batteries au Pb sont restées quasiment la seule solution industriellement disponible jusqu'au début des années 1990 pour fournir des puissances élevées.

Le Plomb permet de réaliser des batteries de puissance élevée, dont la cathode et l'anode sont constituées de plaques de plomb et dont l'électrolyte est du sulfate de Cuivre (CuSO4) liquide ou en Gel ou imbibé dans des éponges de fibre de verre (batteries AGM). La tension aux bornes de chaque cellule est de l'ordre de 2,4 V. On en associe en général 6 pour faire une batterie de voiture, dite 12V, par exemple.

Elles offrent une capacité de l'ordre de **40Wh/kg**. Elles subissent une **auto décharge limitée** (1%/mois).

L'inconvénient des batteries au plomb est que si on les décharge beaucoup, elles ont une durée de vie qui varie de 300 charges-décharge à 50%, pour les batteries ordinaires à 500 pour des batteries de puissance AGM et 1000 pour des batteries au Gel. Pire, leur durée de vie (perte de 20% de capacité) est d'autant plus courte que le rapport :

[profondeur de décharge] / [énergie de décharge] est élevé. De plus elles supportent très mal d'être déchargées à fond (en version liquide), un peu mieux en AGM, mieux en version au gel, car elles « sulfatent » et les électrodes se dégradent.

Autrement dit, pour avoir une bonne durée de vie, il faut des packs de batteries surpuissants par rapport au besoin, pour éviter de les décharger profondément.

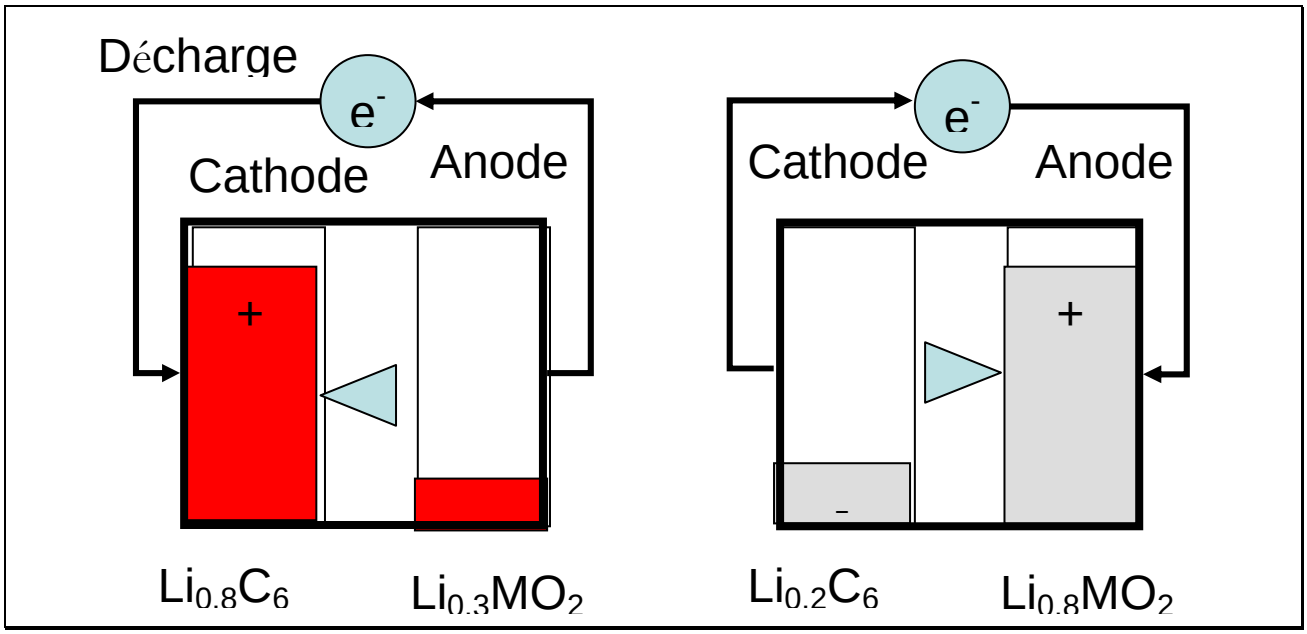
Le plomb est assez bon marché, mais lourd. Les batteries au plomb sont donc peu adaptées au stockage d'énergie pour les applications de transport. C'est pourquoi, il a été cherché d'autres solutions.

3.2 Les batteries au Nickel

Ce sont par exemple les batteries Ni-Mh. Ces batteries ont une mémoire, c'est-à-dire nécessite d'être d'être complètement déchargées avant d'être rechargées. C'est un inconvénient majeur, pour des batteries utilisables dans le transport.

3.3 Les batteries au Lithium

3.3.1. Principe des accumulateurs au Lithium (batteries)



Les composants d'une batterie au Lithium sont :

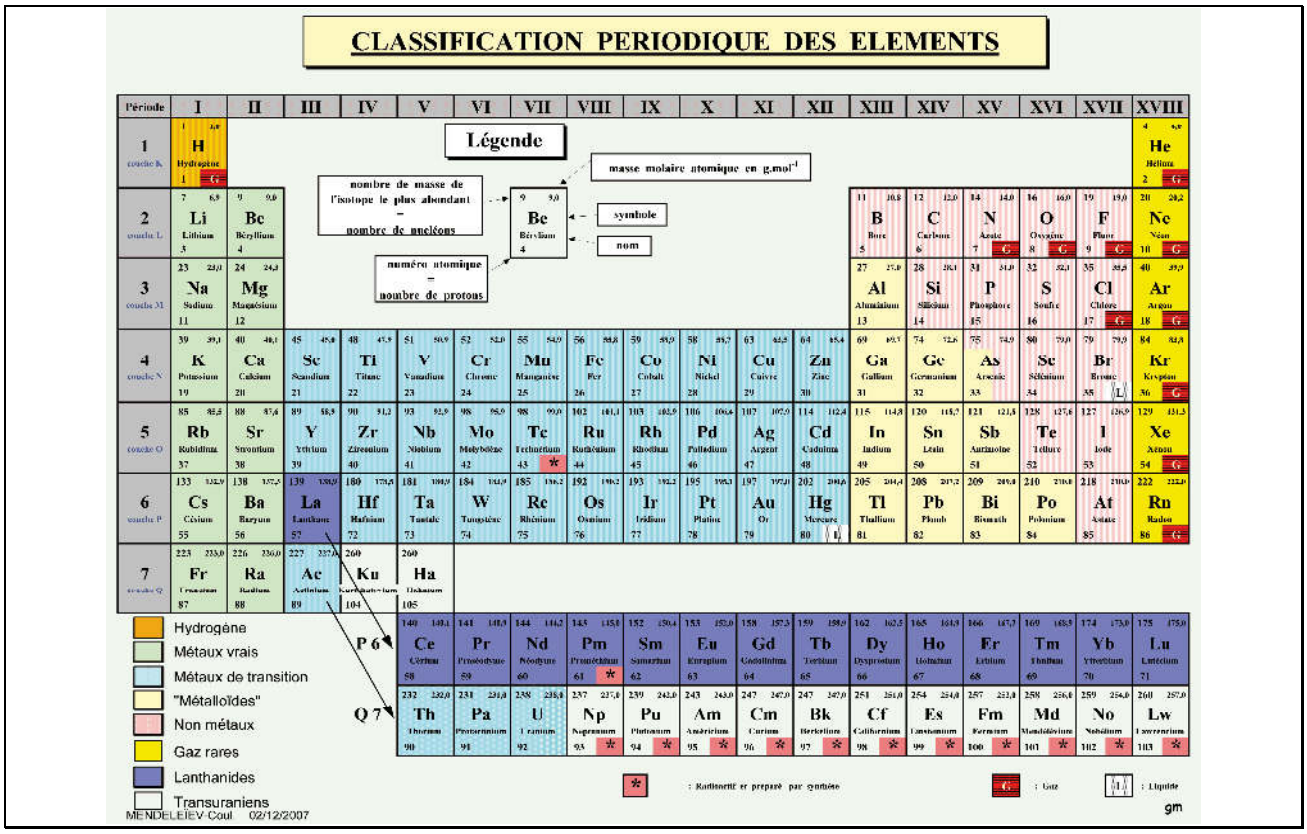
- ⇨ une Cathode (LiMeO2)+ collecteur Al), avec pour Me : NiCoMn, NiCoAl, LiMn2O4, LiFePO4…
- ⇨ une électrolyte, de sels de Lithium dissous dans un solvant organique,
- ⇨ une anode (avec un collecteur Cu) généralement en graphite (LixC6), coke ou maintenant en Li4T5O12.

Elles délivrent une tension qui évolue, selon la décharge de 4,2V à 3V, voire même 2,5V.

3.3.2. Pourquoi des accumulateurs au Lithium ?

Comme le montre le tableau de classification périodique des éléments du chimiste russe Dmitri Mendeleïev, le Li est un des éléments les plus légers (nombre de masse = 7, contre 11 pour le sodium et 208 pour le Plomb.
Le Lithium est le plus léger des métaux.
En conséquence, le lithium (Li) :

- ⇨ permet de fabriquer des batteries légères,
- ⇨ offre le plus grand potentiel électrochimique et
- ⇨ génère la plus grande quantité d'énergie.



Les batteries rechargeables, au lithium à l'anode (électrode négative), ont à une tension assez élevée (4V), un excellent rapport : capacité énergétique poids.

C'est pourquoi, les batteries au Lithium ont tendance à remplacer les autres. Mais malheureusement, elles ont aussi des inconvénients. Aussi, elles ont subit d'incessantes évolutions.

Le lithium peut être extrait du sel de mer (NaCl). Le sel est retiré, par des populations pauvres, des croûtes de sel d'ancien lacs en Bolivie ou en Chine, plutôt qu'obtenu dans les marais salants. Mais le Li est en faible proportion dans le sel et implique un affinage industriel dans d'autre pays comme la Chine.

3.3.3. Les batteries initiales

En 1990 furent mise au point les premières batteries Lithium-Ion (Li non métallique).
Elles étaient constituées au départ :

- ⇨ d'une anode : au Carbone (coke ou graphite),
- ⇨ d'une cathode : dioxyde **de Cobalt ou de Nickel (rare), puis NiCoAl 5**.

Leur capacité était alors de 120 à 150Wh/kg.
La charge peut se faire en 3 heures minimum, 10 heures maximum.
Les premières batteries au Lithium (Sony) présentaient aussi des risques de prendre feu et d'explosion.

3.3.4. Des batteries plus sures

En 1999, apparaissent des batteries au lithium-ion à électrolyte en polymère gélifié. Elles offrent une meilleure longévité, une meilleure sécurité mais offrent une plus faible densité énergétique.

L'inconvénient des batteries au lithium est qu'elles nécessitent des métaux assez rares, et donc aussi assez chers, pour la cathode. La généralisation des batteries au Lithium entraînerait l'épuisement de ces métaux d'ici une cinquantaine d'année.

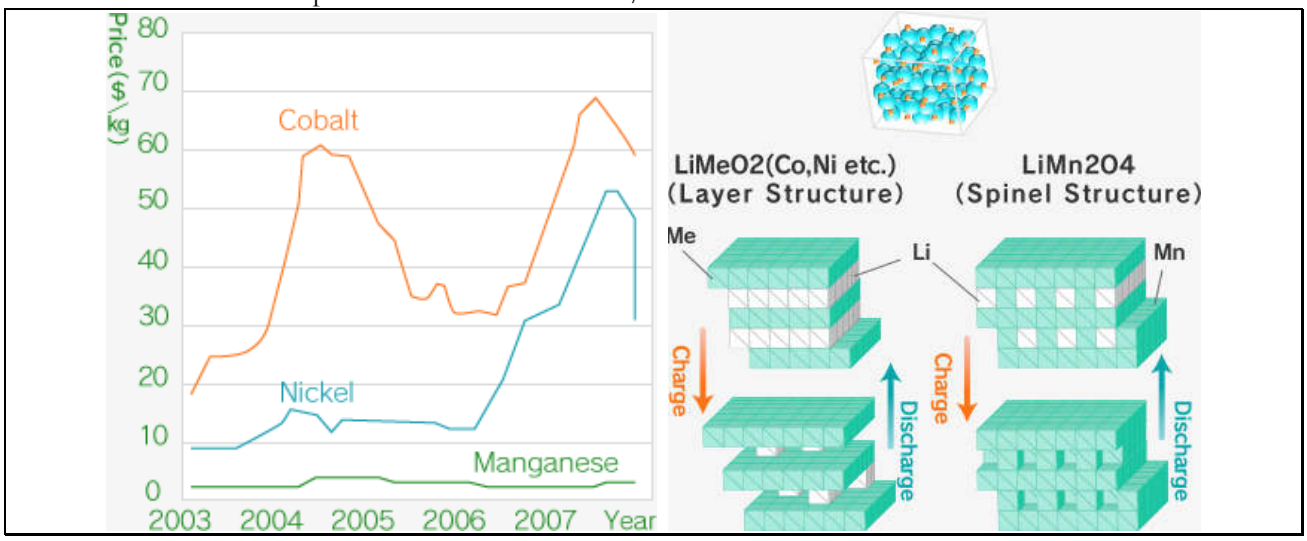
3.3.5. Les batteries avec des matériaux moins rares

Les premières batteries au lithium étaient trop chères pour un emploi dans les transports, à cause des métaux rares à la cathode et aussi à cause du coût d'extraction du Li.
Les batteries les plus récentes utilisent des matériaux moins rares à la Cathode :

- ⇨ Titanate de Lithium,
- ⇨ de la spinelle (cristal cubique) de Lithium-Manganèse (LiMn2O4) moins chère, mais de moindre durée de vie : anode Co : 300 cycles, capacité = 50 % au 500ème cycle, Mn (Spinelle), capacité < 300 cycles
- ⇨ en phosphate de fer et Lithium : LiFePO4, qui produit des batteries solides !

Ces batteries sont plus sures, car la structure cristalline accueille de façon plus stable les électrons.

Ces batteries offrent une capacité accrue : 150 à 170Wh/h



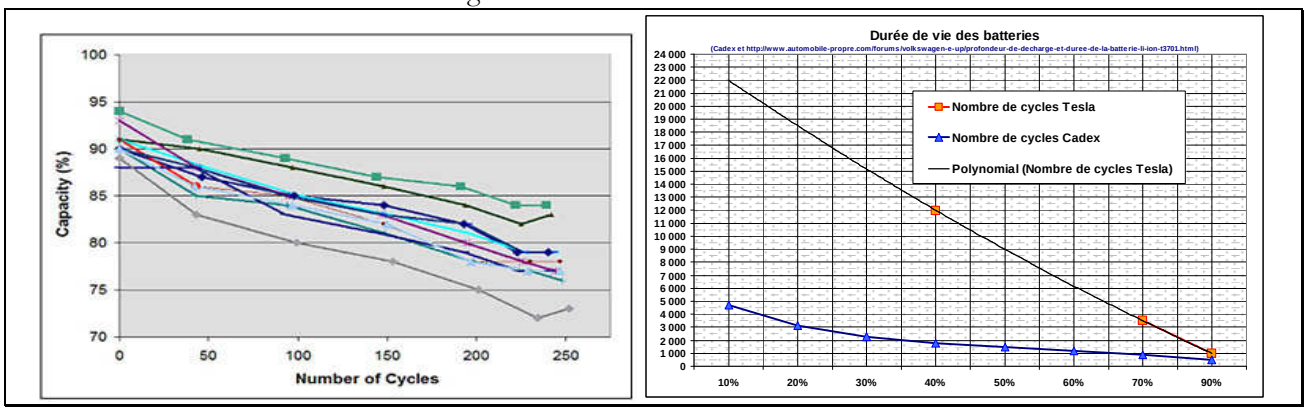
Le coût des batteries est ainsi passé de 1000€/kWh en 2010 à 300€/kWh en 2015.

3.3.6. Les évolutions futures

Sont annoncée de façon récente des batteries à **: une double couche de nanocristaux et de manganèse.**

Elles seraient 2 fois plus puissantes que les batteries actuelles (250 Ah / kg), mais de moins bonne stabilité.
En résumé, les progrès des batteries au Lithium sont incessants pour :

- ⇨ accroître leur capacité,
- ⇨ obtenir une bonne sécurité,
- ⇨ surtout en diminuer le coût et l'usage de matériaux rares.

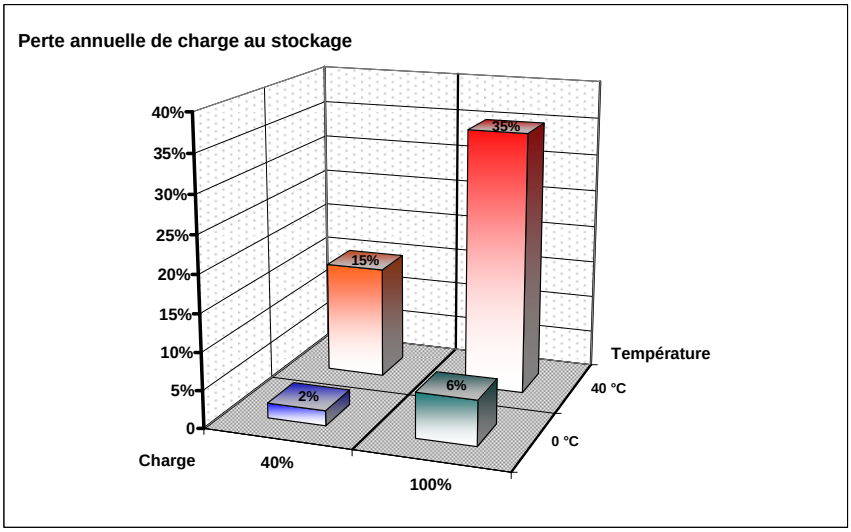


3.3.7. Durée de vie des batteries au Li en fonction de la température de stockage

La température d'utilisation influence sur la durée de vie de la batterie.

Pour une batterie chargée initialement à 100 %, la résistance interne augmente avec l'âge.

Température de la batterie	Reste en capacité
0°C	94 % au bout d'un an
25°C	80 % au bout d'un an
40°C	65 % au bout d'un an
60°C	60 % de la capacité au bout de 3 mois



3.4 Les futures batteries au Sodium

Il est probable que les futures batteries seront au sodium.

L'intérêt du Sodium est par rapport au Lithium est qu'il est plus facile de l'extraire du sel de mer (NaCl) qui en contient beaucoup, plutôt dans les croutes de sel que dans les marais salants. La terre contient 2,6% de Sodium 0,06% de Lithium 40 fois moins).

La start-up **Tiamat en France** annonce des batteries au sodium pour **2020.**

Le sodium a des caractéristiques techniques qui ressemblent à celle du Li, les batteries au Na vont profiter de l'expérience acquise. Naturellement elles sont plus lourdes que les batteries au Li.

Leur capacité dans l'état actuel de la technologie est donc naturellement plus faible : de 90 Wh/kg et 40 mAh/g.

En copiant l'expérience du lithium, la Cathode serait en **$NaTi_2(PO_4)_3$.**

En plus d'un coût de fabrication plus faible qu'au Li, les batteries au Sodium semblent proposer des avantages nets sur les points fondamentaux :

- ⇨ elles permettront une longévité bien supérieure en offrant plus de 10 000 cycles au lieu de 2 000 cycles,
- ⇨ Leur durée de vie serrait de 10 ans au lieu de 3 à 5,
- ⇨ elles autoriseraient une recharge 10 fois + rapide.

3.5 Le match économique entre électrique et thermique

Le coût du kWh de batterie était 1 000 € en 2010, 300 € en 2015.

Cette diminution de coût est déterminante pour l'intérêt de la voiture électrique.

	Plomb AGM	Lithium-Ion
Capacité installée	100 KWh	50 KWh
Capacité utile	50 KWh	50 KWh
Durée de vie	500 cycles à 50% de DOD	2000 cycles à 100% de décharge
Coût de la batterie	15 000€ (150€/KWh) (x 4)	15 000€ (300€/KWh)
Coût d'installation	1K€ (x 4)	1000 €
Coût de transport	28€ par KWh (x 4)	10€ par KWh
COUT TOTAL	**76 200€**	**16 500€**
Coût par KWh utile / cycle	**0.76€ /kWh/cycle**	**0.165 € /kWh/cycle**

Faisons un calcul en prenant le cas de la Zoë.

En Zoë électrique (disposant de 40kWh/200 km) au coût de 0,29€/kWh :

- ⇨ Au coût de batterie de ~0,165€/kWh et
- ⇨ Au coût d'électricité de ~0,125€/kWh.

100 km avec 20kWh de puissance (on pourrait aussi prendre 15 kWh) coûte 5,8€ :

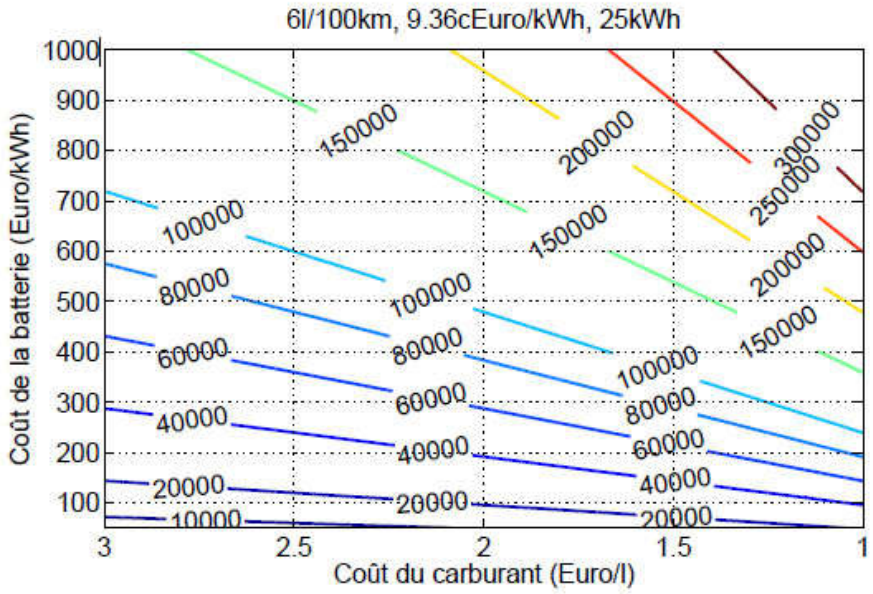
- ⇨ en batterie 3,3€,
- ⇨ en électricité : 2,5 €.

En thermique, avec 50ch,

- ⇨ avec une consommation de 5l. d'essence à 1,5€ le km coûte 7,5€

L'écart serait bien moins favorable à l'électrique avec un niveau de taxation équivalent sur l'énergie même avec une taxe carbone à 10c€/kg.

Actuellement, une voiture est intéressante au-delà de 80 000km comme le montre le diagramme suivant.



Extrait de la thèse de thèse :
Caractérisation de l'usage des batteries Lithium-ion dans les véhicules électriques et hybrides.
Application à l'étude du vieillissement et de la fiabilité (Arnaud Devie)

3.6 Conclusion sur les batteries et l'électrique

Des progrès utiles sont prochains pour

- ⇨ utiliser durablement uniquement des matériaux courants pour les électrodes Fe, P,…, au lieu du Co, Ni Mn,
- ⇨ diminuer le coût (Na abondant et + obtensible que le Li),
- ⇨ accroître leur longévité (âge, nombre de cycles…), notamment pour des batteries au Na,
- ⇨ réduire la durée de charge (<3h),
- ⇨ en assurer la sécurité,
- ⇨ sans dégrader la [capacité / poids], ou en l'accroissant.

Ces progrès vont :

- ⇨ réduire les inconvénients du stockage mobile d'électricité,
- ⇨ diminuer le nombre de km parcourus au-delà duquel l'énergie électrique devient concurrentielle (à taxes ≡).

En 2018, le coût pour l'utilisateur d'un véhicule électrique est à peine favorable, seulement à cause des aides.
Le coût des taxes sur l'électricité va croître, les aides vont surement disparaître progressivement.
L'intérêt de la mobilité électrique est :
Pour les individus,

- ⇨ non pas son coût plus faible,

mais son agrément de conduite pour des trajets urbains, *Pendulaires : banlieue > centre*.

Pour la ville,

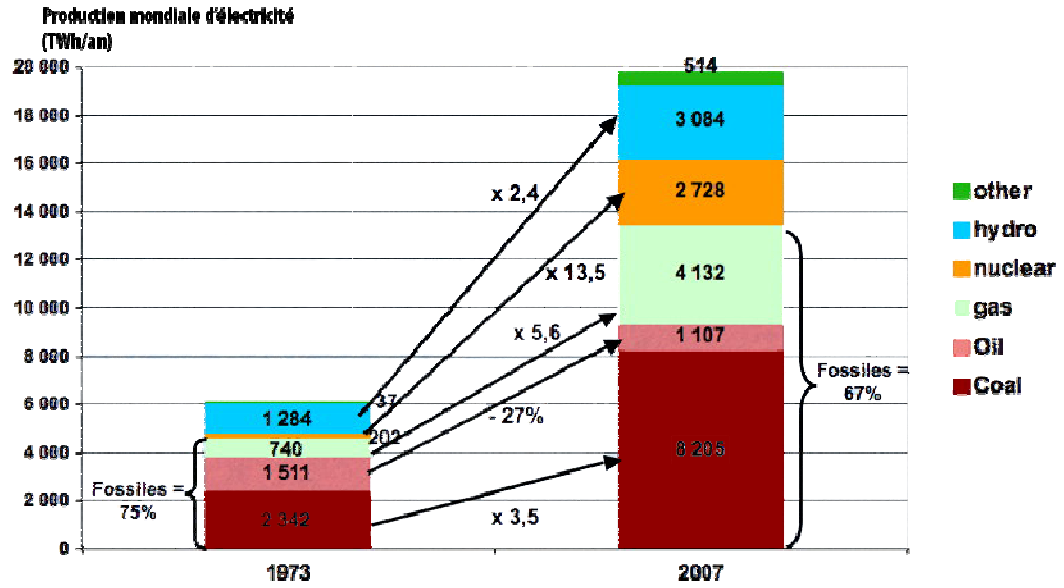
- ⇨ l'absence de pollution et de bruit et la consommation proportionnelle à la vitesse, mais obligera à installer des bornes.

Pour l'état et la planète : la réduction considérable du CO2 émis, à condition de fabriquer de l'électricité sans CO_2, comme actuellement en France.

C'est le sujet du prochain paragraphe.

4 L'énergie propre et décarbonnée nécessaire sera-t-elle disponible

Au niveau mondial, 70% de l'électricité est fabriquée avec du combustible et 40% avec du charbon.

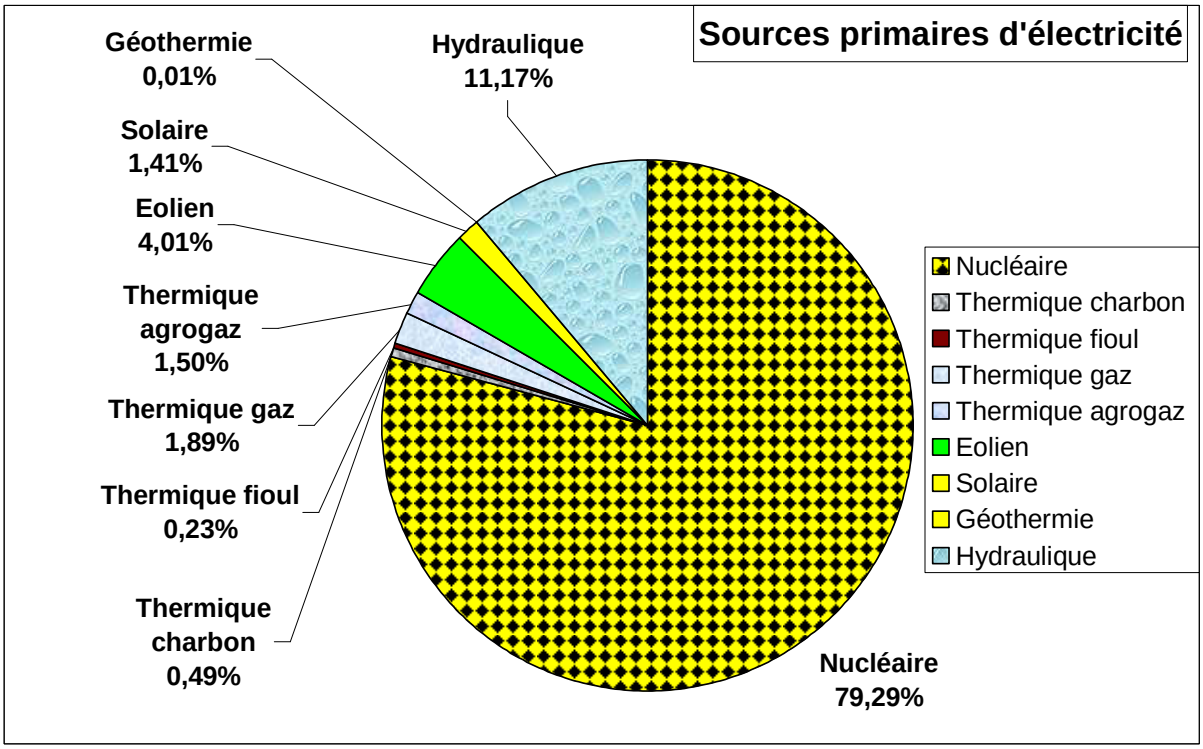


Source primaire de l'électricité (J.M.Jancovici)

Donc, l'électricité mondiale n'est pas propre, car elle émet à la fois du CO2 et de la pollution (notamment des microparticules) et quelques déchets nucléaires (dont une partie serait réutilisable comme combustible).

De plus, comme l'énergie propre (éolien + solaire) est fatale, si elle est présente, elle est nécessairement déjà utilisée (hors besoin de mobilité). Par conséquent, le surcroît de puissance appelée par les mobilités électrique se fera au mieux par de l'énergie hydraulique, mais en majorité par de l'énergie non renouvelable probablement carbonée.

En revanche, **en France, 98% de l'électricité est produite avec peu de CO_2,** peu de gaz toxique, peu de microparticules. Les déchets nucléaires devraient être, en partie aujourd'hui et en grande partie dans les années futures, réutilisables comme combustible (MOx) dans des réacteurs de 3ème ou 4ème génération.



Selon le Commissariat Général au Développement Durable ou le bilan RTE 2014 ou l'agence internationale de l'énergie (notamment)

Erreur ! Des objets ne peuvent pas être créés à partir des codes de champs de mise en forme.

Evolution (Commissariat Général au Développement Durable)

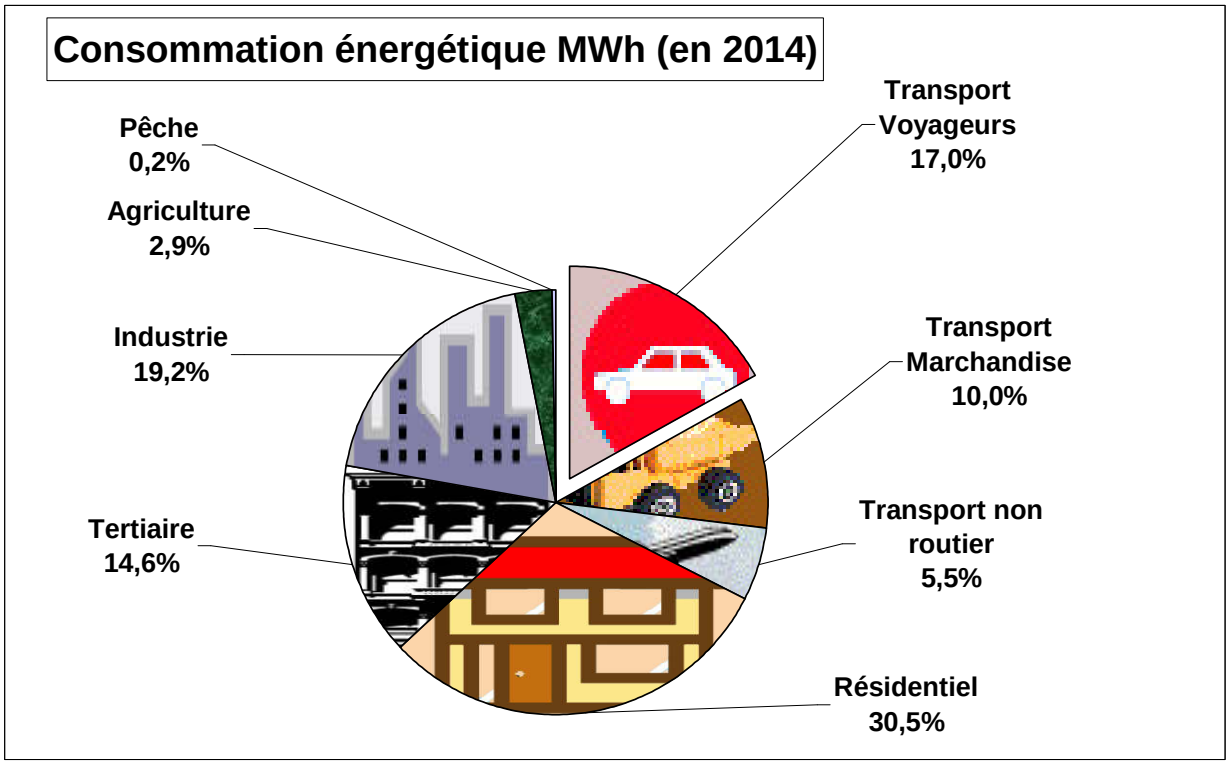
Cependant, la possibilité d'accroissement de la production électrique hydraulique a été réduit à presque rien par le Grenelle 2 de l'environnement.

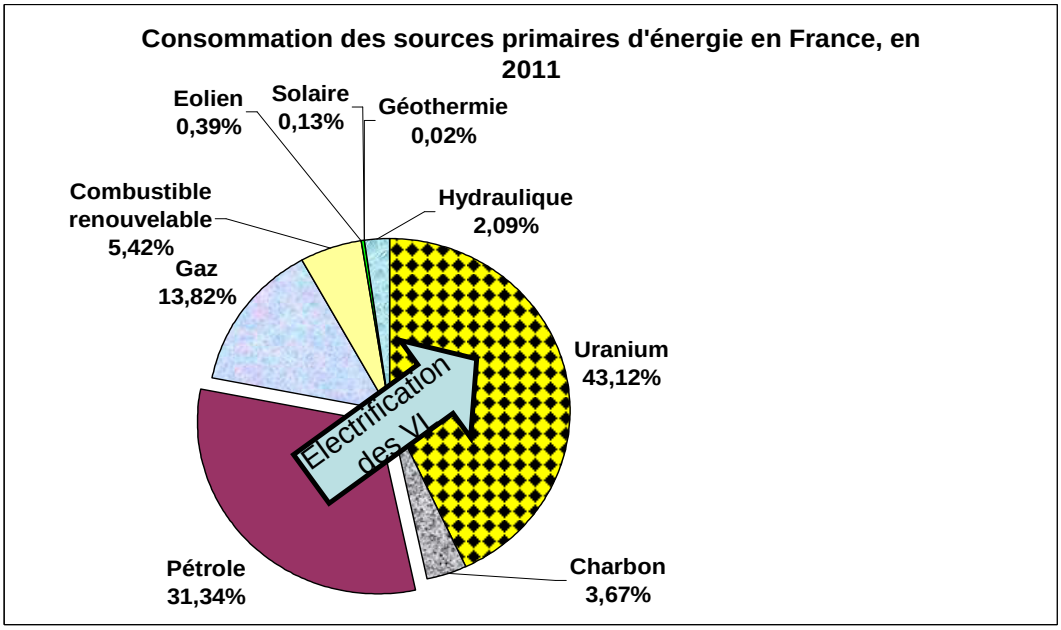
Il a été écrit dans la loi que la capacité de production du nucléaire ne dépasserait pas 63 GWh, c'est-à-dire approximativement la capacité actuelle, qui est d'autant plus nécessaire pour assurer l'équilibre du réseau électrique (production (t) = consommation (t), à tout moment ∀t) que le gouvernement a prévu d'arrêter les centrales à charbon (très polluantes).

4.1 Le besoin d'énergie pour passer tout le parc de véhicules en électrique

En France, le transport consomme 70% des besoins pétrolier et le pétrole représente 31% de la consommation d'énergie primaire. Les véhicules de transport de voyageurs (VL+cars) consomment 17% de l'énergie primaire, en combustible et le résidentiel + le tertiaire consomment 45% de l'énergie primaire.

L'alimentation en électricité complète du transport en remplacement du pétrole nécessiterait donc environ un transfert de 17% de l'énergie primaire, soit 50% de la consommation pétrolière .





Répartition de la consommation finale d'énergie par secteur en France en 2012 (Source : SOeS)

4.2 Quel serait la puissance appelée ?

En octobre 2016, au salon de l'automobile à Paris, Ségolène Royal annonçait un objectif d'un million de bornes en 3 ans, avec de nouvelles aides financières à la clé.

Le texte de la Loi sur la Transition Energétique pour une Croissance Verte prévoit l'installation de sept millions de bornes de recharge d'ici 2030.

Le but est d'alimenter un parc de plus de 6 millions de véhicules électriques (VE) et véhicules hybrides rechargeables (VHR). Le gouvernement actuel envisage même la transformation complète du parc soit environ 35 millions de véhicules.

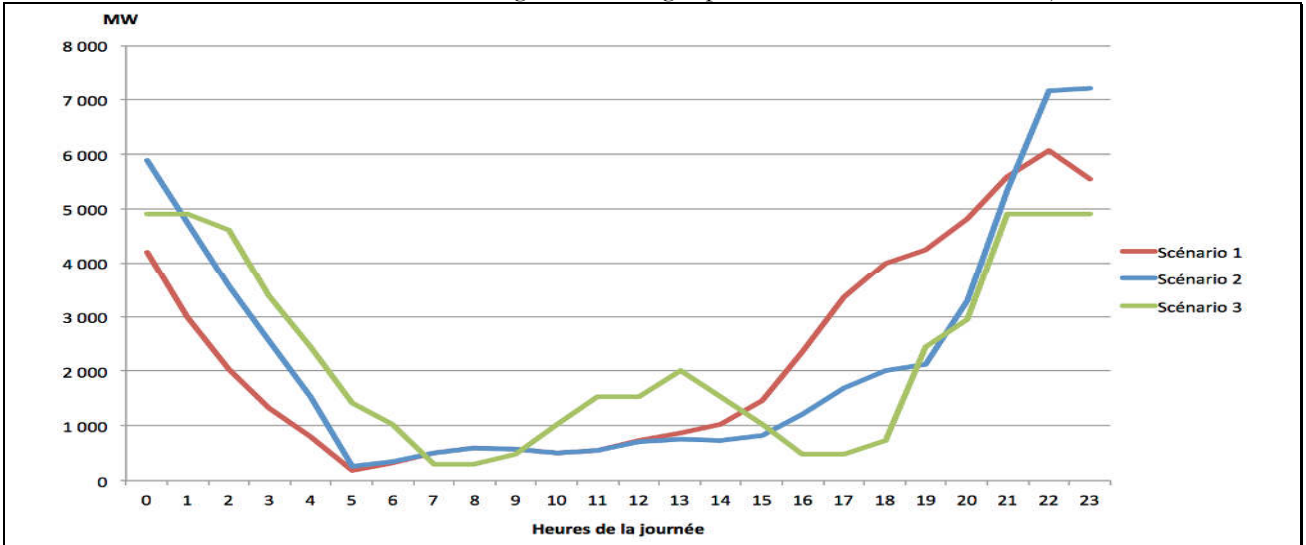
En fin de journée, en rentrant chez eux ou à leur lieu de travail, les utilisateurs ajouteront alors à leurs consommations habituelles les besoins de recharge de leur véhicule, augmentant la puissance électrique appelée sur le réseau.

Or il conviendrait faire des recharges dites intelligentes, à savoir, quand la puissance électrique sera disponible sur le réseau, notamment en retarder les recharges à une période plus tardive de la soirée ou au milieu de la journée,. Les systèmes d'asservissement, par signal tarifaire (comme c'est le cas aujourd'hui pour la majorité des chauffe-eaux électriques installés, avec un déclenchement automatique pendant les heures creuses) ou par « batterie intelligente », sont peu déployés actuellement sur les bornes électriques de recharge.

Cela suppose d'ailleurs que le véhicule puisse rester inutilisé en soirée.

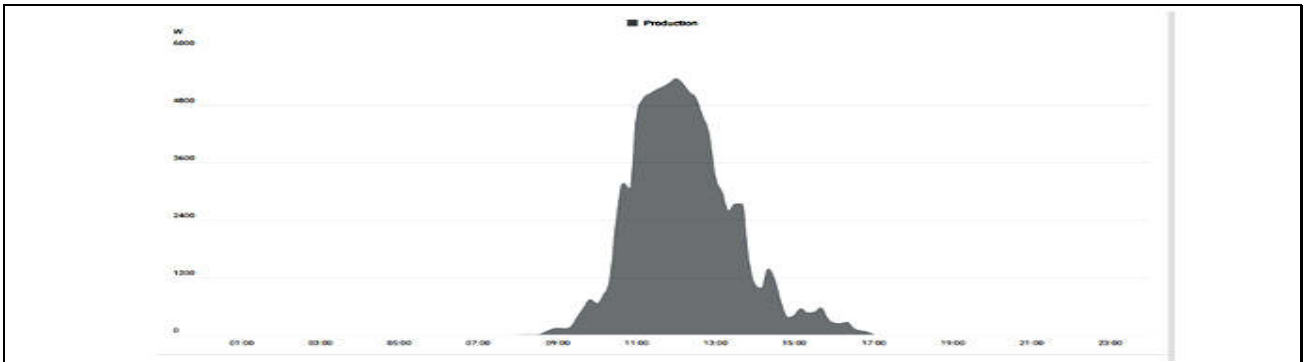
On peut même envisager d'utiliser l'énergie résiduelle en batterie pendant les périodes de pointes. Mais c'est ignorer que les batteries vieillissent d'autant plus vite qu'on leur fait subir des recharges profondes et fréquentes.
Trois scénarios sont proposés dans le graphique suivant :

- le premier couple 60 % de recharge « au fil de l'eau » et 40 % de signal tarifaire,
- le deuxième comprend 30 % de recharge au fil de l'eau, 60 % de signal tarifaire et 10 % de « batteries intelligentes »,
- le troisième, issu du Livre Vert, envisage des recharges plus nombreuses en milieu de journée.



Scénario 1 = scénario bâti selon les hypothèses du BP 2014 de RTE, hors scénario nouveau mix
Scénario 2 = scénario bâti selon les hypothèses du scénario « Nouveau mix » de RTE, BP 2014
Scénario 3 = scénario bâti selon les hypothèses du Livre Vert

Figure 1 : Puissance appelée sur le réseau électrique par un parc de 6,5 millions de VE+VHR



Relevé d'énergie fournie par les « toits en transition » en décembre 2017

Les recharges de véhicules (supposées lentes en majorité) se feront principalement en soirée et la nuit dans les bureaux ou dans les logements, après le retour des utilisateurs. Le scénario de la courbe bleue évite mieux le pic de 19 heures que celui de la courbe verte, laquelle l'évite mieux que celui de la courbe rouge. On voit que le besoin se produit précisément au moment où l'électricité solaire est manquante.

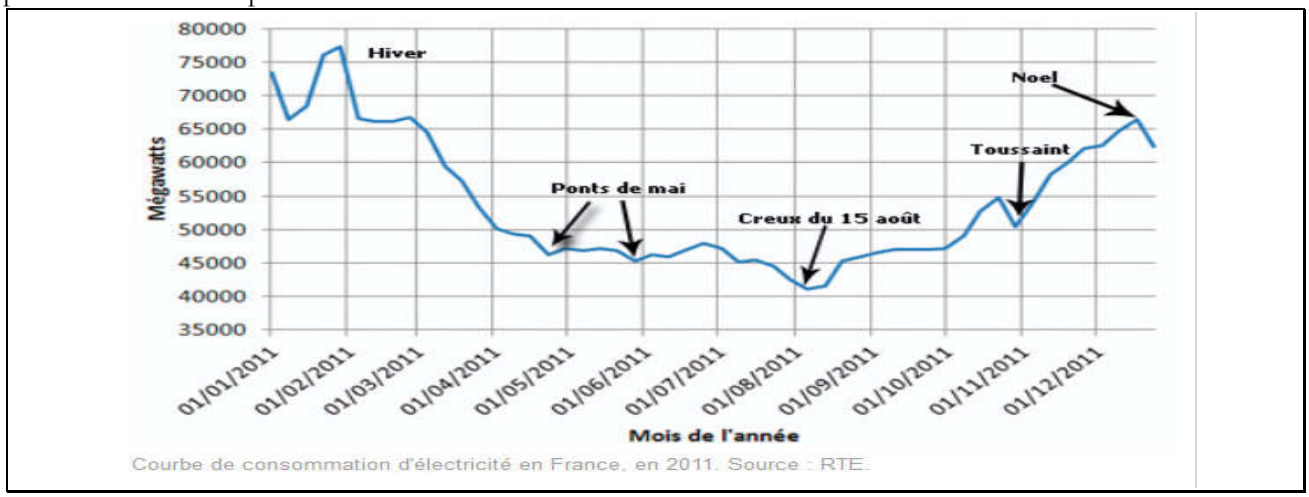
Quelle que soit l'hypothèse retenue, un parc de plus de 6 millions de véhicules électriques ou hybrides rechargeables engendrerait donc, dans ces conditions, un appel de puissance de 6 à 7 GW (1GW/M de véhicules) lors de la « pointe de 19 h », moment où le réseau présente déjà une certaine fragilité.

4.3 Le système électrique Français peut-t-il fournir la puissance appelée ?

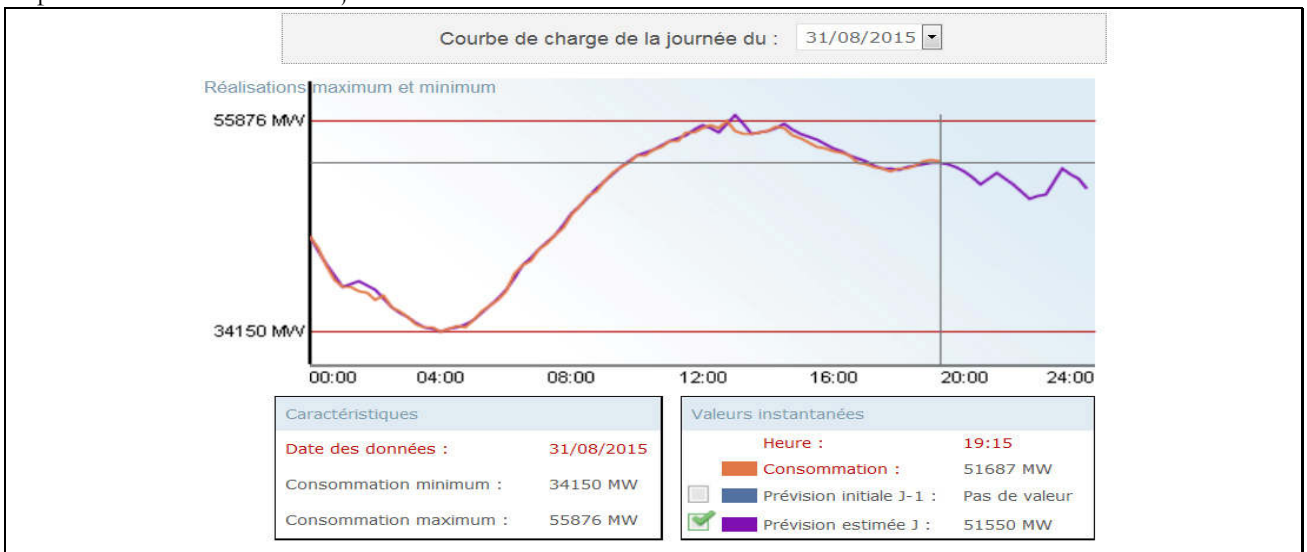
4.3.1. Peut-on disposer des périodes creuses ?

Pour disposer d'énergie, il est conviendrait de profiter des périodes creuses. Est-ce toujours possible ?

La consommation journalière varie du simple au double selon la période de l'année. La période de forte consommation, de 4 à 5 mois et va de mi-novembre à début avril. L'écart de puissance atteint (30 GW) entre une période froide et une période douce.

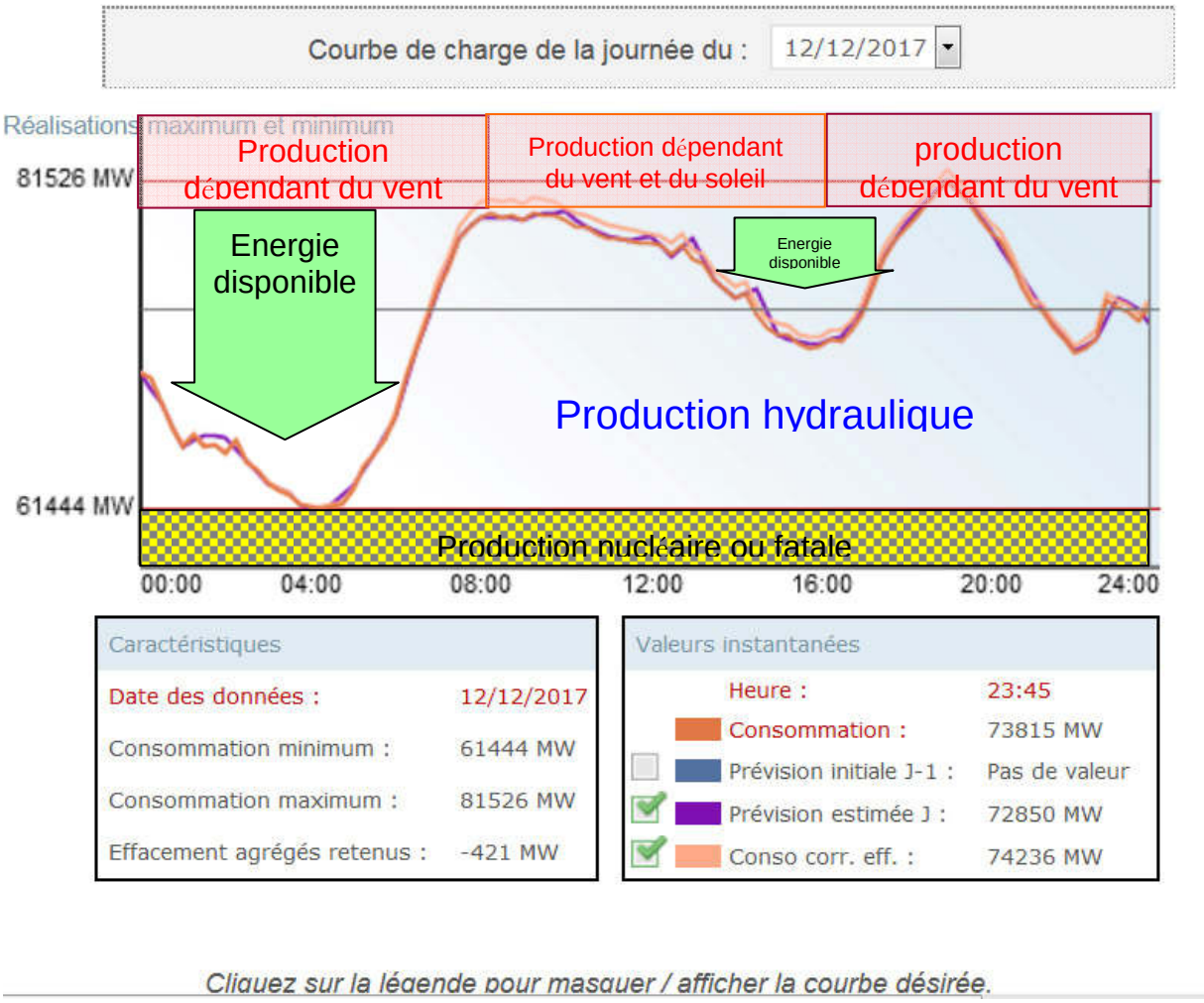


La production fluctue dans la journée de l'ordre de 20% à 50% selon les heures.



Site http://clients.rte-france.com/lang/fr/visiteurs/vie/vie_histo_courbes.jsp
Consommation en période chaude

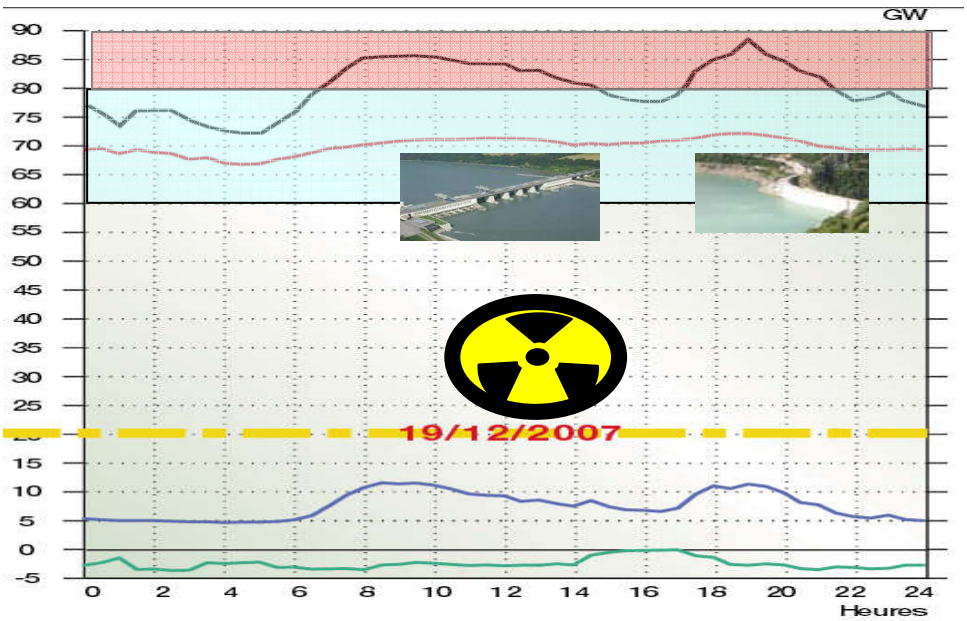
La production de base est assurée par l'énergie nucléaire et lorsqu'elles produisent par les productions fatales (Eolien et solaire).



http://clients.rte-france.com/lang/fr/visiteurs/vie/courbes.jsp

Consommation en période froide

Ces fluctuations laissent une possibilité de recharge nocturne une bonne partie de l'année, mais pas pendant les périodes froides et sans vent.



http://clients.rte-france.com/lang/fr/visiteurs/vie/vie_histo_courbes.jsp

Consommation en période très froide

La production d'énergie disponible les nuits d'hiver dépend essentiellement de la température (et marginalement de la disponibilité des centrales). Il existe des périodes chaudes où une quantité notable d'énergie est disponible. En revanche, en hiver, en l'absence de vent suffisant (80% du temps) de l'énergie propre n'est disponible que lorsque la consommation est inférieure à environ 80GW (nucléaire + hydraulique). Certains après-midi, soirs et nuits, la production disponible est de l'ordre de 20MW ou plus. Mais, même en favorisant les recharges lentes et nocturnes il existe aussi des heures de nuits d'hiver où il reste un peu d'énergie disponible ou même pas du tout ou même où il faut en importer. Donc dans l'état actuel, il n'est pas exclu que le surcroît d'appel énergétique provoque l'importation d'énergie produite au charbon, des « effacements » (coupures contractuellement acceptées) ou même une panne généralisée, à cause d'un appel de consommation supérieur à la puissance disponible.

La consommation électrique étant particulièrement thermosensible, lors des périodes de froid de Décembre à Mars, même de 20h à 7h du matin (périodes les plus creuses de la journée), une puissance électrique maîtrisable suffisante pour alimenter le réseau français n'est pas assurée pour fournir de l'électricité décarbonnée ou même la puissance électrique tout court demandée par les prises de recharge des véhicules électriques.

4.3.2. Se contenter de recharges lentes en majorité…

La puissance électrique appelée sur le réseau par un parc de véhicules électriques sera très sensible aux types de recharges utilisés.

La recharge d'un véhicule électrique peut se faire de façon lente (de 6 à 10 heures), semi-rapide (1 heure voire moins) ou rapide (certains annonçant une recharge en quelques minutes[1]).

Les recharges lentes présentent l'avantage d'une puissance électrique unitaire relativement faible, de l'ordre de quelques kilowatts. À contrario, les recharges rapides ou très rapides affichent des puissances appelées de plusieurs dizaines de kW (les bornes du constructeur Tesla peuvent aller jusqu'à 120 kW).

Pour éviter le renforcement des réseaux nécessaire aux puissances élevées, l'étude d'impact de la Loi relative à la transition énergétique pour une croissance verte (LTECV), votée en juillet 2015, préconise qu'au **moins 90 % des charges devront se faire de façon lente**, par : « une prise de recharge principale par véhicule »[2]. C'est ce que préconise également le Livre Vert sur les infrastructures de recharge ouvertes au public pour les véhicules « décarbonés », réalisé par Louis Nègre et publié en avril 2011[i].

4.4 Les économies de consommation électrique seront-elle suffisantes ?

Une solution pour disposer de plus de puissance serait de faire des économies. La loi sur la transition énergétique prévoit d'ailleurs 30% d'économies sur la consommation électriques. Quels sont les secteurs où des économies sont possibles et à quel niveau ?

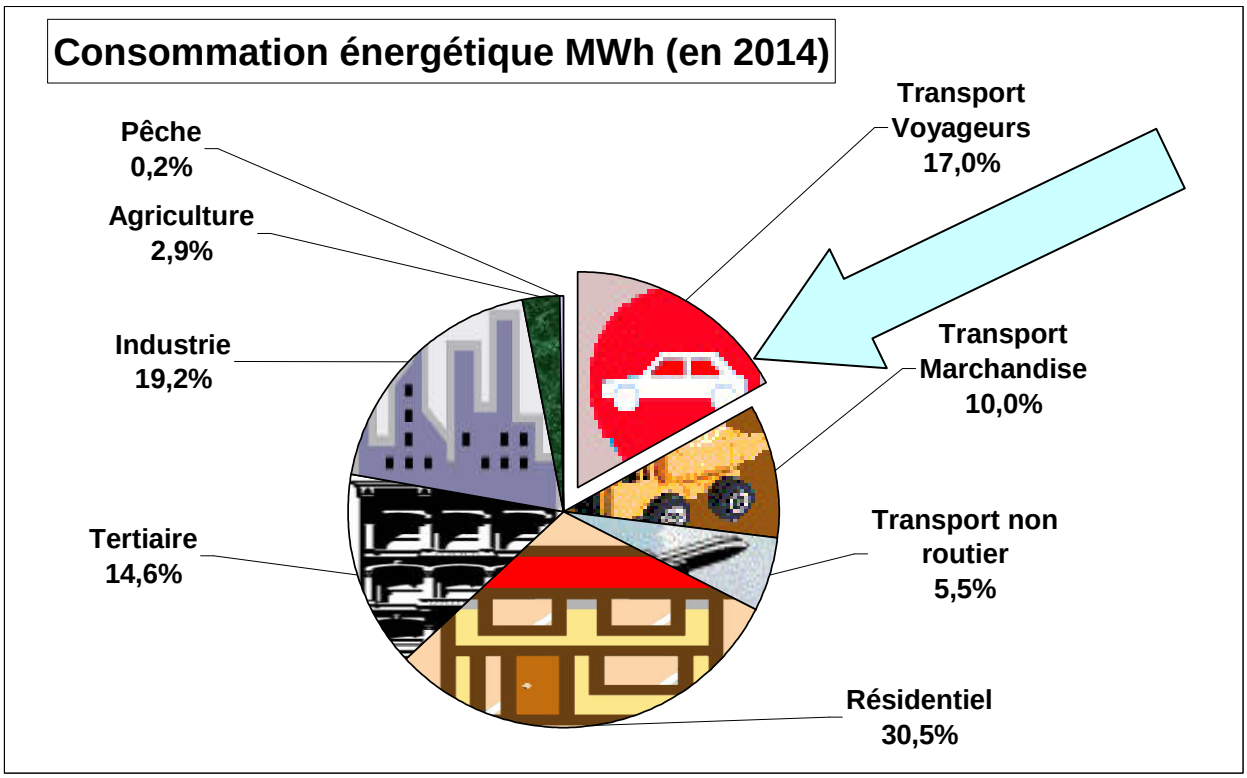
4.4.1. Les secteurs où des économies d'électricité sont possibles

Historiquement, la consommation électrique diminue faiblement. Cependant, le secteur où les économies ont été faites est le domaine industriel, mais essentiellement parce que l'industrie lourde qui demande beaucoup de main d'œuvre et d'énergie, quitte progressivement la France ! Il n'est guère souhaitable que cette diminution de la consommation des installations industrielles se poursuive, sauf par des économies, à production égale, ce qui restera limité.

L'autre secteur économique dans lequel on peut envisager des économies significatives est le chauffage des bâtiments, avec une meilleur isolation et des processus et sources améliorées.

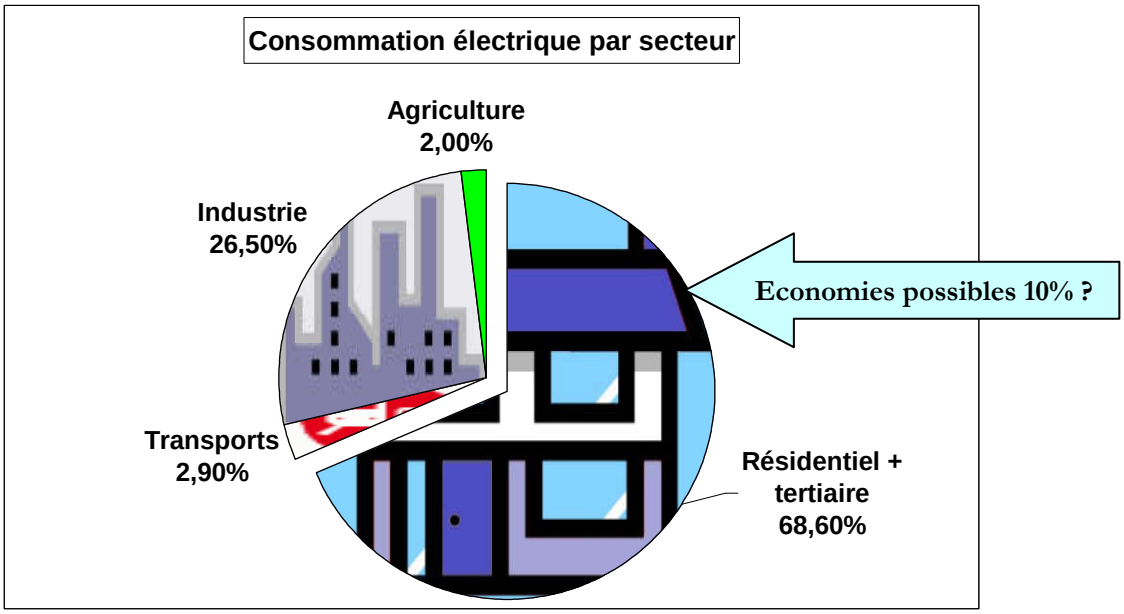
Avec la généralisation du numérique et de la robotique et l'accroissement du confort, les autres secteurs risquent au contraire de connaître une augmentation, malgré une amélioration de la consommation unitaire des appareils.
Les économies de chauffage découleront :

- ⇨ d'une meilleure isolation thermique du bâti,
- ⇨ d'une amélioration du chauffage électrique,
- ⇨ du recours au chauffage au bois.

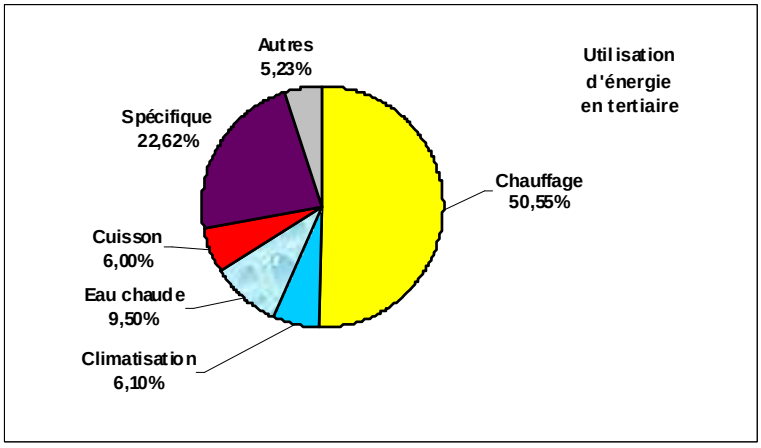


Statistiques SOeS/(2013)

La consommation électrique est très faible pour le transport.



34 % d'énergie primaire pour le chauffage dans le résidentiel et le tertiaire, mais 30% de la consommation électrique et 15% par carburant.



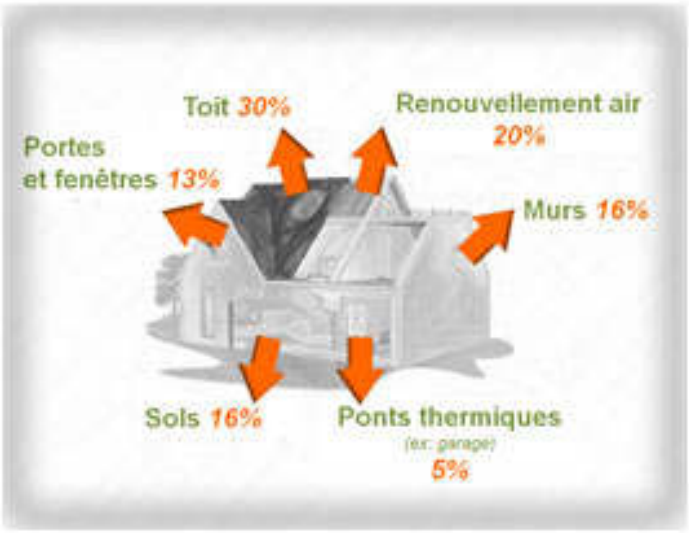
Selon EDF

Le résidentiel et le tertiaire, utilise 44% de la consommation primaire et 68% de la consommation électrique. La consommation électrique est consacrée pour moitié au chauffage, soit 34% environ de la consommation électrique.

4.5 Quel niveau d'économie l'électricité de chauffage est envisageable ?

4.5.1. Economies d'énergie par isolation thermique

L'isolation thermique permet d'espérer une réduction des besoins de chauffage très variable selon le type de bâtiment Une maison individuelle peut avoir des pertes thermiques 2 fois plus élevées qu'un immeuble. L'isolation du toit et des murs permettra d'espérer gagner dans un facteur de l'ordre de 50%. Dans un immeuble, supposons que les fenêtres soient déjà relativement isolées, le toit également. En isolant les murs d'un immeuble collectif existant, de l'ordre de 6 étages, on peut espérer gagner, au mieux, 30% en énergie en 2050. Mais en même temps, les dépenses énergétiques dues à la généralisation du numérique pourraient continuer à croître. Concernant les immeubles récemment construits, on parle d'immeuble à énergie nulle, mais avec un peu d'utopie.



Répartition des pertes de chaleur (pour une maison individuelle

Avec un certain optimisme, le potentiel de diminution de la consommation d'énergie électrique pour le chauffage du résidentiel et tertiaire est de l'ordre de 10% (30% de la moitié des 69% de la consommation électrique du bâti) que l'on pourrait espérer atteindre en 2050, soit environ 6% en 2030.

Le besoin d'électricité pour convertir la totalité du transport de voyageurs thermique en électrique est de l'ordre du double (17%) de ces économies réalisables (et dans des délais peut-être plus proches).

Cependant, si l'utilisation de voitures électriques en ville conduit à une économie d'énergie (pouvant approcher 50%), le compte peut être bon si un certain taux de véhicules est hybride.

4.5.2. Chauffage par pompe à chaleur

Concernant les modes de chauffage, il est beaucoup plus intéressant d'utiliser une pompe à chaleur qu'un radiateur. Généralement le système est réversible et permet aussi la climatisation. Dans ce cas, l'énergie dépensée est supérieure en été, mais à des moments où un surplus d'énergie non utilisé est disponible.

La difficulté est de disposer d'une source bonne froide, présentant un écart de température important avec la source chaude. C'est le cas de la Rize à Lyon, tant que peu d'immeubles de bureaux l'utilisent. Cette limitation peut expliquer qu'aucun encouragement n'est prévu pour orienter les utilisateurs dans cette voie, qui est la plus efficace d'un point de vue économique.

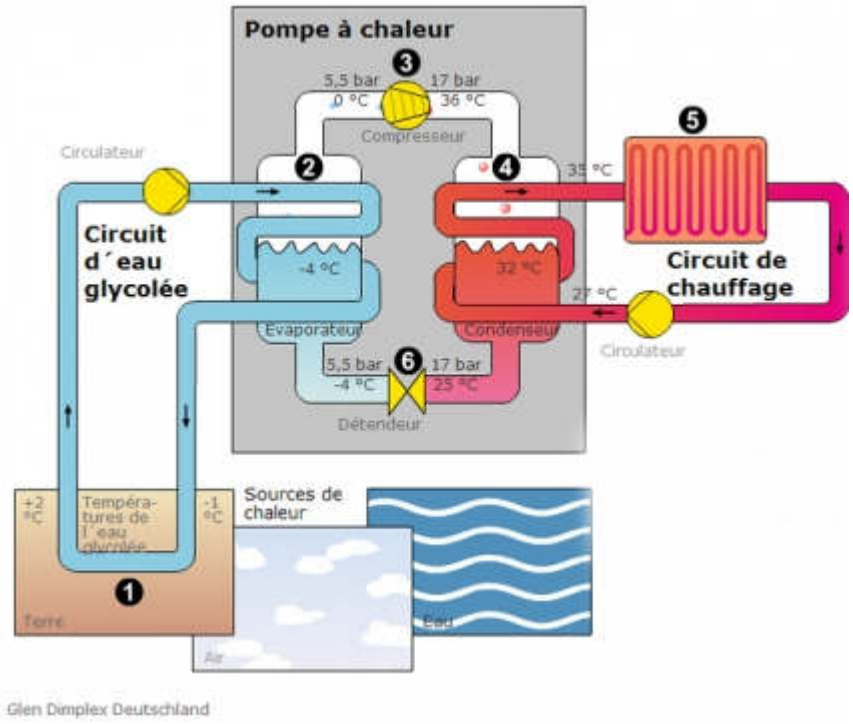
En présence d'une bonne source froide, l'accroissement de rendement du chauffage par rapport à de simples radiateurs est d'un coefficient qui vaut de 2 à 4,6[2]. Pour cela, en l'absence de nappe phréatique froide importante, il conviendrait que les villes qui le peuvent, c'est-à-dire traversées par des cours d'eau, mettent à disposition un réseau d'eau froide non potable pour la climatisation (voire d'autres usages). Mais ce n'est pas prévu.

---

[2] L'efficacité, selon le cycle de Carnot vaut : E=Tc / (Tc-Tf) les T étant des températures absolues en °Kelvin.

Par exemple, si Tc= 22°C = 295°K et Tf=0°C=273°K, E=295/22=14.

Concernant le chauffage par climatisation dans les conditions actuelles, il est cependant difficile de miser sur un taux d'adoption élevé de cette solution.



4.5.3. Recourir au chauffage au bois ?

Pour diminuer le chauffage électrique, il est envisageable de recourir à des cheminées fermées labellisée flamme verte*****. Cependant, à la sortie de la cheminée le taux de microparticules (~50 mg/m³) est 1000 fois supérieur au taux admis dans l'air. A notre avis, le chauffage au bois n'est donc pas souhaitable en ville, bien que subventionné. Il est d'ailleurs interdit en Ile de France. En tout cas, il importe que son utilisation ne dépasse pas un foyer sur 2 000, si l'on veut que le taux de particules reste dans les limites autorisées.

Dans ces conditions, il est illusoire de miser sur un taux de pénétration important du chauffage au bois pour diminuer la consommation électrique.

4.5.4. En résumé

Concernant l'énergie on est loin de pouvoir atteindre les 30% d'économie d'énergie prévus dans la loi sur la transition énergétique pour 2030.

Les économies potentielles d'énergie par isolation représentent 6% de l'énergie consommée en 2030 et 10 en 2050, alors que pour trouver l'énergie nécessaire à l'ensemble du parc de transport électrique des voyageurs, le besoin est de 17%, pondéré par le taux d'économie du passage au transport électrique en ville.

Les autres économies d'électricité sont difficilement prévisibles, et resteront probablement faibles.

Donc, les économies d'énergies ne suffiront pour alimenter que la moitié du parc possible.

4.6 En France l'énergie électrique rendue disponible sera-t-elle propre ?

Pour estimer l'impact sur les émissions de CO_2, des véhicules électriques, il faut également s'assurer que le taux de CO_2 de l'énergie complémentaire (marginale) demandée à son fournisseur est faible au moment du branchement. Au cours de l'usage, **les émissions de CO_2 générées dépendront des moyens de production d'électricité impliqués par le surcroît d'énergie nécessaire au rechargement des batteries**, de la performance intrinsèque du véhicule (sa consommation) et du rendement du chargeur.

Les énergies éolienne ou solaire étant aléatoires, on ne peut pas compter sur elles pour assurer le complément indispensable. Les nuits froides, sans vent, les batteries des véhicules seront pas rechargées avec de l'énergie propre, mais fabriquée par une centrale thermique. Comme la France a décidé de stopper les centrales thermiques au charbon et au fioul, l'énergie sera probablement fabriquée, alors, avec du charbon ou du lignite allemand.

Un stockage d'énergie pouvant aller jusqu'à 20 jours serait nécessaire pour maîtriser les énergies aléatoires. Les techniques actuelles de stockage d'énergie par batteries au plomb ou inertiel ou par « Stockage Temporaire d'Eau Pompée » ou par sels fondus, conduirait à un surcoût de l'ordre du coût de production, par journée de stockage. Cette solution est économique est trop cher dans l'état actuel de la technologie.

Plus le nombre de véhicules sera important, plus la probabilité de pouvoir les recharger avec de l'énergie propre est faible. Dit autrement :

Actuellement, l'énergie disponible ne peut satisfaire la consommation des véhicules électriques que les jours de température clémente et à condition que le parc reste faible.

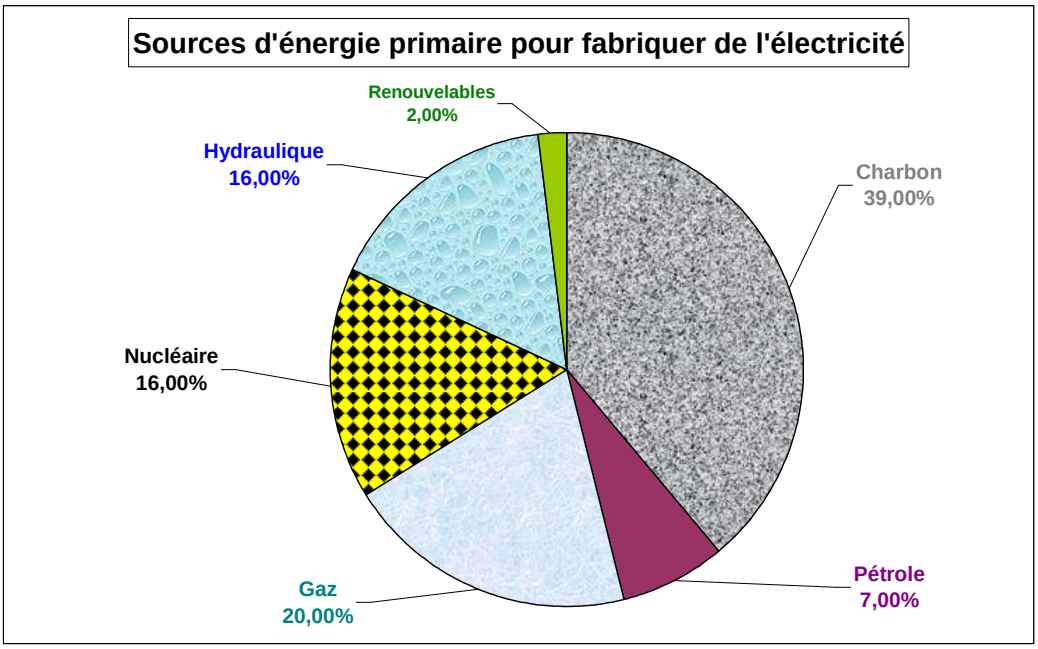
En France, à l'avenir, les économies progressives d'électricité de chauffage permettraient d'alimenter progressivement au maximum la moitié du parc automobile, à horizon 2050.

Elles seront donc insuffisantes pour assurer à coup sûr en saison froide, l'alimentation en énergie décarbonnée de la totalité du parc de véhicules électriques.

Selon les économies réalisées, il pourra donc falloir construire des moyens de production maîtrisable (de l'ordre d'une dizaine de centrales nucléaire ou hydraulique) générant l'énergie primaire supplémentaire pour alimenter en électricité le parc automobile désiré et pour cela, il conviendrait de libérer les contraintes législatives de la Loi sur la Transition énergétique et la croissance Verte.

4.7 Le CO_2 émis pour produire de l'électricité dans le monde

Comme le marché des véhicules est devenu mondial et l'effet du CO_2 également. Il convient donc de s'interroger sur le CO_2 émis pour alimenter les véhicules électriques à l'échelle mondiale. Le graphique ci-dessous donne la contribution des sources d'énergie primaire dans le monde. On note la prépondérance du charbon, qui est la source d'énergie qui émet le plus de CO_2.



Dans le monde, selon Jean Marc Jancovici (et la banque mondiale)

On va faire le calcul avec ces valeurs moyennes. Bien qu'il conviendrait de le faire avec des données marginales ; c'est-à-dire avec quelle source primaire sera produite l'électricité excédentaire imposée par les véhicules électriques. Les données manqueraient pour faire un calcul marginal, mais on peut supposer que les filières, comme le charbon, émettant le plus de carbone, mais étant les plus disponibles, le calcul fondé sur des données marginales serait pire que le résultat fondé sur des données moyennes.

Pour cela, il faut utiliser les données mondiales pour prendre en compte :

- ⇨ l'énergie primaire pour fabriquer l'électricité,
- ⇨ les rendements respectifs des filières électriques et thermiques[3].

Les *moteurs thermiques* ont des *rendements* assez faibles qui dépendent beaucoup de leur usage. En revanche il est semblable à celui des voitures électriques sur route

[3] Ce sujet est traité scientifiquement sur le site : http://eco-sceptique.over-blog.fr/article-26378967.html

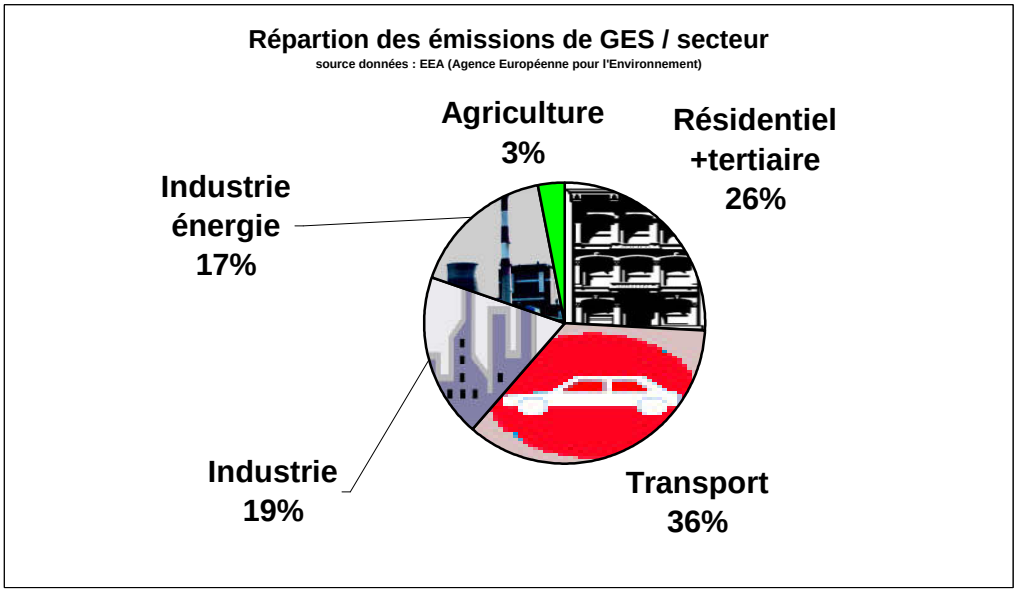
En conditions d'utilisation optimales, le *rendement* des moteurs thermiques peut dépasser 40% pour les meilleurs diesels et 30% à 35% pour l'essence. C'est le cas sur route et où les moteurs thermiques proposent une autonomie plus appropriée. Dans des conditions réelles de trafic en ville les *rendements* sont plutôt de 10 à 15%. En supposant que 50% des kilomètres sont effectués en ville, le tableau suivant montre que le *rendement* moyen en thermique est seulement de l'ordre de 15%, alors qu'en mobilité électrique, le rendement approcherait les 30%.

Rendement de chaque source primaire pour fabriquer de l'électricité

				Rendement de mise à disposition du combustible						Rendement électrique			Rendement de motricité			
	% mondial	Rendement moyen mondial	Rendement global d'utilisation	Extraction	Transport	Stockage	Raffinage	Livraison	...avant production	de production	de stockage	de transport et stockage	Charge, décharge	Moteur	Transmission	Total motricité
Charbon	39%	9%	22%					97%	95%	37%						
Pétrole	7%	1%	17%	95%	95%	99%	89%	95%	76%	37%						
Gaz	20%	6%	29%	95%	100%	100%	100%	97%	92%	50%		**92%**	85%	94%	85%	**68%**
Nucléaire	16%	3%	19%	99%	99%	99%	96%	99%	92%	33%						
Hydraulique	16%	10%	62%						100%	100%						
Énergies aléatoires	2%	1%	44%						100%	100%	70%	**64%**				
Total ou moyenne	100%	**29%**								**50%**		Ville	Route	50%		
Diesel	50%	**15%**	17%	95%	95%	99%	89%	95%	76%			20%	37%	28%	80%	22%
Essence	50%		14%	95%	95%				76%					23%	80%	19%

5 L'empreinte carbone sur la durée de vie

Le transport est le secteur économique le plus émetteur de CO_2.



Source données : EEA (Agence Européenne pour l'Environnement)

Pour mesurer l'impact sur les émissions de CO_2 d'un déploiement du véhicule électrique, il est nécessaire d'analyser son cycle de vie complet, depuis sa fabrication jusqu'à sa fin de vie, en incluant toute sa période d'utilisation. La fabrication de la batterie, très énergivore, entraîne des émissions de GES importantes (voir tableau 1), ce qui pénalise le bilan environnemental du véhicule électrique.

Le véhicule électrique part avec un handicap d'environ 20 gCO_2/km.

Par ailleurs, les batteries au lithium actuelles ayant des durées de vie limitées non seulement en fonction du nombre (quelques milliers) de charges décharges et de leur profondeur, mais aussi du temps, que le véhicule soit utilisé ou non, le volume total d'émissions de GES par kilomètre parcouru sera d'autant plus élevé que le véhicule électrique (ou hybride) sera peu utilisé.

L'ADEME a publié en décembre 2013 une analyse du cycle de vie comparant véhicule électrique et véhicule thermique[15]. Dans son scénario de référence, pour le mix électrique français de 2008, les résultats en matière d'émission de gaz à effet de serre (GES) de ces véhicules sont résumés dans le tableau ci-dessous. Le calcul est fait à partir d'un facteur moyen d'émission de 110 g CO_2/kWh produit, alors que ce facteur varie de 12 g CO_2/kWh (s'il est fourni en période creuse par de l'électricité d'origine hydraulique ou nucléaire) à 1 000 gCO_2/kWh en période tendue avec de l'énergie d'origine nucléaire, ce qui risque d'être majoritairement le cas, si la puissance nucléaire (ou hydraulique) n'est pas accrue. Les résultats ainsi obtenus sont très favorables aux véhicules électriques.

Émissions de GES (gCO2-eq/km)	Véhicule électrique	Véhicule diesel	Véhicule essence
Phase de fabrication et de fin de vie du véhicule	43	25	25
Phase d'utilisation (recharge de batterie ou carburant)[16]	15	122	159
TOTAL	**58**	**147**	**184**

Tableau 1 : Émissions de gaz à effet de serre sur le cycle de vie de véhicules électriques et thermiques, avec le mix électrique français de l'année 2008 (Source : ADEME15)

Dans une note réalisée par RTE et l'ADEME en 2007[18], pour les usages dits « de base » (les moins émetteurs de CO_2), ce contenu est évalué à 500g CO_2/kWh, pouvant évoluer vers 400g en 2020 ; soit quatre fois plus que le contenu moyen pris en compte dans l'étude ACV résumée dans le tableau précédent.

Par ailleurs, le véhicule thermique va lui aussi évoluer dans les prochaines années, visant, selon certains, une consommation de moins de 2 litres aux 100 km à l'horizon 2020[19]. Plus prudente, l'ADEME envisage une consommation comprise pour 100 kilomètres entre 3,2 litres pour les véhicules diesel et 4,5 litres pour les véhicules à essence, ce qui semble déjà ambitieux.

Dans cette hypothèse, le tableau précédent deviendrait :

Émissions de GES (gCO2-eq/km)	Véhicule électrique	Véhicule diesel	Véhicule à essence
Phase de fabrication et de fin de vie du véhicule	42	30	29
Phase d'utilisation[20] **(recharge de batterie ou carburant)**	2 à 60	53 à 85	48 à 107
TOTAL	**44 à 102**	**83 à 115**	**77 à 136**

Tableau 2 : Comparaison des émissions de gaz à effet de serre de véhicule à moteur électrique ou thermique à l'horizon 2020 avec utilisation de l'approche marginale

L'objectif de réduire de moitié les émissions de CO_2 de la France impliquerait que les contraintes législatives, sur la capacité maximale de l'énergie nucléaire, soient libérées, pour pouvoir passer de 60 à 80 GW, en conservant les REP en service tant qu'ils sont acceptés par l'ASN et en construisant une douzaine d'EPR (ou des ASTRID).

L'intérêt de ces réacteurs est d'utiliser comme combustible du plutonium, qui est le type de déchet nucléaire le plus encombrant, à cause de sa période longue, mélangé (à 6%) à de l'uranium appauvri (238), déchet de l'enrichissement.

L'électrification des véhicules permettra de réduire d'un facteur voisin de 2 à 3 leurs émissions de CO_2 (en France).

Cette stratégie est donc la seule qui permettrait de diviser par 2 les émissions de CO_2 en France.

Cependant, à l'échelle mondiale et en tenant compte de données réalistes, le résultat est très différent.

Emissions de CO2	Calcul des gCO2/kWh			Calcul des gCO_2/km		
	Emissions	Emissions / rendement	Moyenne mondiale	pour la fabrication	kWh/km	kWh/km / [émission/kWh] /[Rendement postproduction]
Charbon	1 000	1 472	390	40	0,15	177,01
Pétrole	800	1 178	56			
Gaz	600	883	120			
Nucléaire	12	18	2			
Hydraulique	10	15	2			
Énergies aléatoires	60	88	1			235,73
Total ou moyenne			571			178,19
Diesel	1 345			20	0,15	222
Essence	1 583			20	0,15	257

Emissions de CO2 (marginales)	Calcul des gCO2/kWh			Calcul des gCO_2/km		
	Emissions	Emissions / rendement	Moyenne mondiale	pour la fabrication	kWh/km	kWh/km * [émission/kWh] /[Rendement postproduction]
Charbon	1 000	1 472	390	40	0,15	280,07
Pétrole	800	1 178	56			
Gaz	600	883	120			
Nucléaire	12	18	2			
Hydraulique	10	15	2			
Énergies aléatoires	60	88	1			173,75
Total ou moyenne			571			277,94
Diesel	1 345			20	0,15	222
Essence	1 583			20	0,15	257

Au niveau mondial, le résultat dépendra beaucoup de la source d'énergie utilisée pour produire le surplus d'énergie. A mix énergétique constant, il serait émis moins de CO_2. Si le surplus était fabriqué avec de nouvelles centrales à charbon, les véhicules électriques provoqueraient un surcroît d'émission de CO_2. Si le surplus était fabriqué (marginalement) avec des centrales nucléaires (comme cela pourrait être le cas en Chine), la diminution des émissions de CO2 sera remarquable.

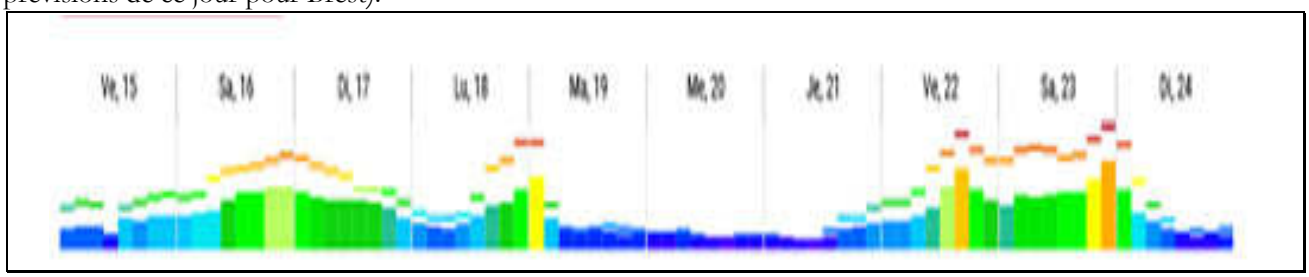
Une motivation pour utiliser des véhicules électriques en milieu urbain est de réduire la pollution par les NOx et les microparticules, qui provoquent en France 48 000 décès prématurés.

Si l'accroissement des capacités de production hydroélectriques et nucléaires pour assurer l'électrification des véhicules n'est pas appliqué, l'intérêt des véhicules électriques est seulement de limiter la pollution de proximité en ville, la promesse de passer au transport électrique est une utopie et l'objectif de réduction de CO_2 de la Loi sur la transition énergétique est inatteignable.

En milieu périurbain ou rural, l'utilisation de véhicules fonctionnant au gaz naturel d'origine renouvelable, produit à partir de déchets agricoles serait une meilleure solution, à court et moyen terme, pour assurer la mobilité individuelle des personnes et des marchandises, (méthanisation) ou d'excédents d'électricité renouvelable (méthanation).

6 Les surcoûts maîtrise de la production électrique par stockage

L'énergie solaire est maîtrisable au Sahara, moyennant un stockage nocturne. L'énergie éolienne est quasi permanente dans les Antilles. En revanche, en France métropolitaine, l'énergie solaire ne fournit que 15% de sa capacité maximale, dans les régions les plus ensoleillées. L'énergie éolienne terrestre ne fournit que 20% de sa capacité et il existe des périodes d'un mois sans vent. En moyenne, il fait du vent 1 jour sur 3 ou 4 (voir les prévisions de ce jour pour Brest).



Ces formes d'énergies sont légalement fatales, c'est-à-dire que l'on doit les consommer, même si l'on n'en a pas besoin et l'on a 80% de probabilité de ne pas en disposer lorsqu'on en a besoin.

Pour les rendre maîtrisables, c'est-à-dire utilisables quand on n'en a besoin, il faut pouvoir les stocker quand on n'en a pas besoin. Il faudrait donc pouvoir stocker l'énergie éolienne jusqu'à 20 jours. Ramener cette durée par exemple à 3 jours reviendrait à devoir faire appel fréquemment (près de 50% du temps probablement) à des centrales thermiques à gaz, notamment, pour suppléer aux absences de vent.

Hors les carburants, diverses techniques de stockage d'énergie existent, par exemple :

- ⇨ Batteries,
- ⇨ Volants tournants inertiels (en carbone et béton),
- ⇨ Stockage Temporaire d'Eau Pompée (STEP), dans des barrages hydraulique ou autre réservoirs,
- ⇨ Carburants chimique par génération de combustible (H_2, CH4, CH_3OH…),
- ⇨ Thermique par sels liquide, comme dans les fours solaires,
- ⇨ Thermique, sous forme de vapeur.

Mais, quelle que soit la technique utilisée, le coût du stockage de l'énergie stockage sur 1 jour coûte au moins autant que la production. Actuellement, stocker l'énergie éolienne pendant 3 jours multiplierait le coût de l'énergie par 4 et, de plus, l'énergie serait parfois fabriquée avec du gaz.

Or la Loi sur la Transition Énergétique prévoit aussi que l'énergie française doit être compétitive.

Actuellement, stocker l'énergie aléatoire pour la rendre maîtrisable, ne permet pas de la produire à un coût compétitif.

Cependant, il est possible que le coût des batteries chute dans un rapport 10 d'ici 10 ans, grâce à une révolution technologique apportée par le sodium.

7 Les variantes au stockage électrique

L'inconvénient des batteries est le poids de stockage de l'énergie.

Or, la densité de stockage des batteries au lithium est au moins 6 fois inférieure à la densité de stockage d'énergie sous forme d'hydrocarbure : 0,200 kWh/kg pour une batterie Li-ion contre 13 kWh/kg pour l'essence (Serge Pelletier).

Des variantes consistent soit à trouver d'autres modes de stockage d'énergie,

- ⇨ soit à bord du véhicule (air comprimé),
- ⇨ soit à fabriquer du carburant à partir d'électricité (hydrogène ou méthane ou méthanol),
- ⇨ soit à fabriquer du carburant à partir de plantes, donc d'énergie solaire.

La nouvelle réglementation européenne sur les carburants alternatifs, adoptée le 29 septembre dernier, invite les États membres à développer à la fois les véhicules roulant à l'électricité, à l'hydrogène et au gaz (GNL ou GNV Gaz naturel pour véhicule comprimé). Cependant, il faudrait choisir, car sinon, il faudrait investir des fortunes dans des infrastructures de recharge qui seront au final sous-utilisées.

Mais la solution de gaz biologique a des limites (10%) compte tenu des capacités agricoles.

7.1 L'air comprimé

L'air comprimé poserait probablement encore plus de problèmes d'autonomie et de recharge que les batteries, avec moins de perspective, mais aurait l'avantage de la légèreté.

7.2 L'hydrogène

L'hydrogène peut se fabriquer facilement avec de l'électricité éolienne.

Mais il doit être comprimé pour être liquide. A 700 bars, l'hydrogène possède une masse volumique de 42 kg/m^3 contre 0.090 kg/m^3 à pression et température normales. À cette pression, on peut stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 125 litres.

Aujourd'hui la majorité des constructeurs automobiles qui a exploré cette solution, a retenu la solution du stockage sous forme gazeuse à haute pression. Cette technologie permet de stocker la quantité d'hydrogène nécessaire à une voiture alimentée par une pile à combustible pour parcourir de 500 à 600 km entre chaque plein (selon Air-Liquide).

Tout un réseau de remplissage s'imposerait.

Cependant, les voitures à gaz sont en principe interdites en parking enterré, ce qui est très gênant en ville.

L'hydrogène est également utilisable dans les piles à hydrogène, qui génère de l'électricité et de l'eau, avec un rendement excellent Cependant, la réaction nécessite un catalyseur, qui est aujourd'hui du platine. Le platine est très coûteux. De plus, actuellement, les piles à combustible ont une faible longévité. La solution fonctionne, mais reste d'un coût excessif pour les automobiles. Des progrès sont imaginables, en utilisant les progrès des nanotechnologies pour améliorer la catalyse.

Quoi que coûteuse, la solution est acceptable pour stocker en période creuse l'excès d'énergie aléatoire des éoliennes et l'utiliser pour des transports de masse, peu impactés par le coût de l'énergie, comme les trains. C'est le cas en Allemagne par exemple, qui a développé excessivement les éoliennes.

7.3 Le méthanol ou le méthane

Les difficultés de stockage de l'hydrogène et les coût des piles à combustible peuvent être détournés en convertissant l'hydrogène en méthane ou méthanol, qui peuvent servir de combustible ou aussi dans des piles à combustible. Mais alors, le rendement de leur combustion dans les véhicules est réduit à d'environ 30% seulement. On perd alors grandement l'intérêt de la méthode chimique.

7.4 Conclusion

Dans un proche avenir, aucune variante à l'usage de batteries pour la voiture électrique, ne semble avoir de chance de s'imposer massivement.

---

[i] Cf : http://decrypterlenergie.org/le-vehicule-electrique-permet-il-de-reduire-les-emissions-de-co2