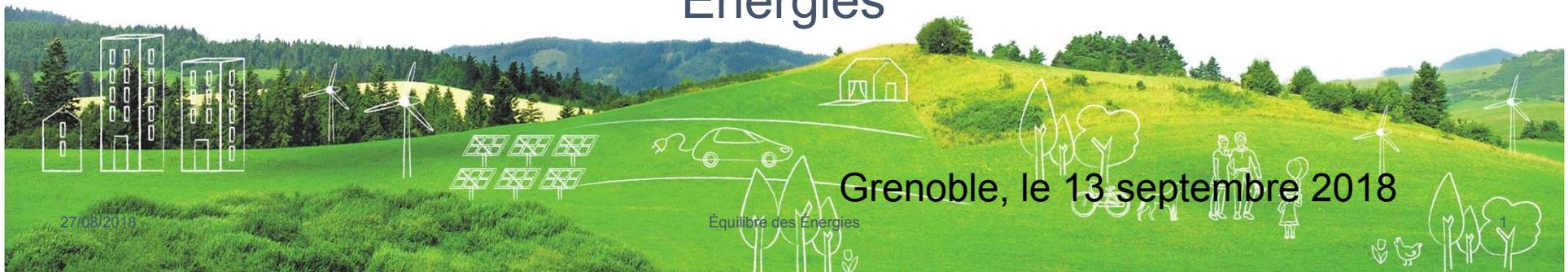


De la mobilité propre vers le véhicule autonome

Jean-Pierre Hauet

Président du Conseil scientifique d'Equilibre des
Energies



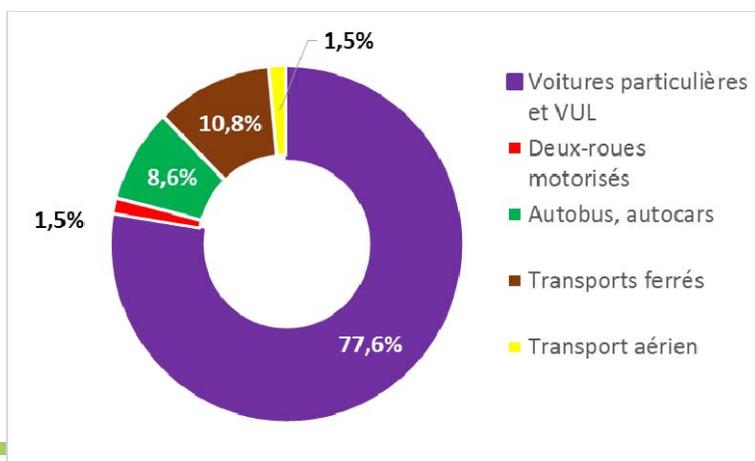
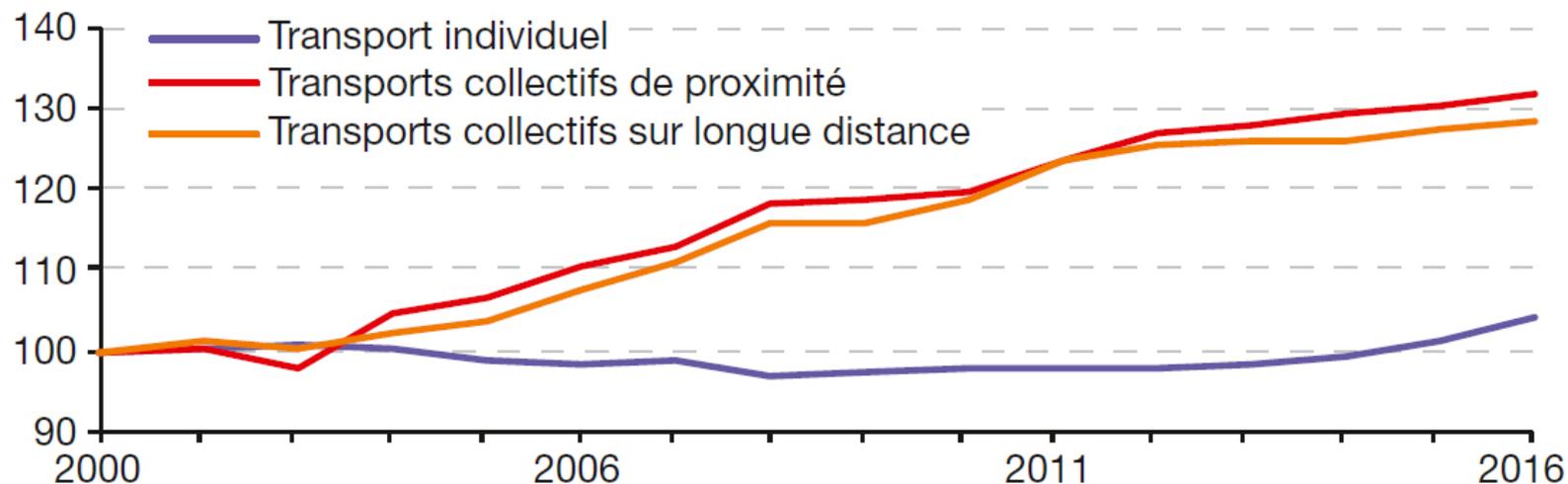


Panorama général

La mobilité : un secteur en croissance dominé par les transports individuel

- Evolution des transports intérieurs de voyageurs en France – Source : CCT 2018

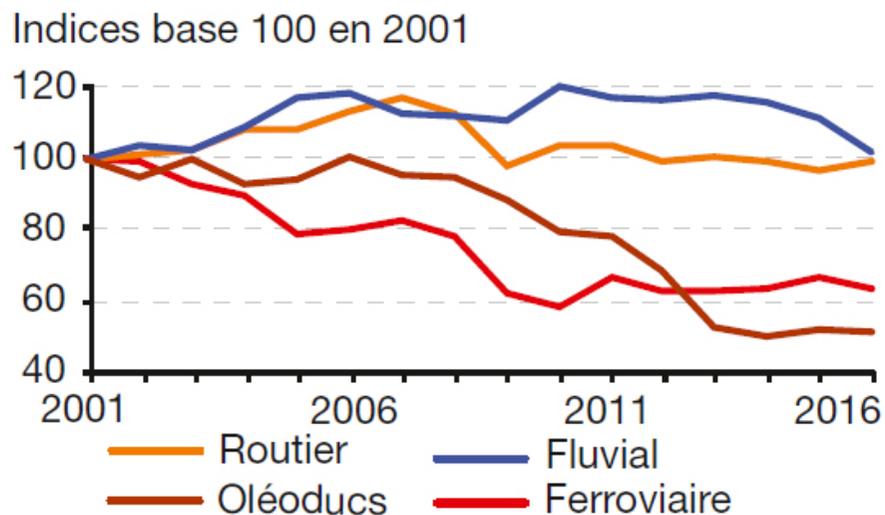
Indices base 100 en 2000



- Répartition des transports intérieurs par mode en 2013 en France - Source : CCT 2018

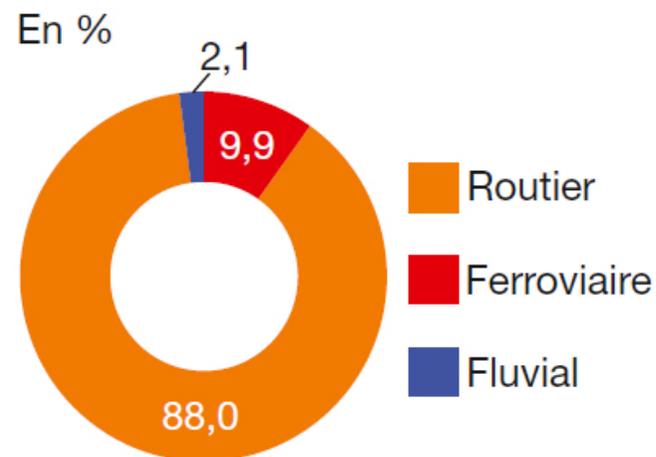
Le secteur des marchandises est quant à lui dominé par le trafic routier

- Evolution des transports intérieurs terrestres de marchandises

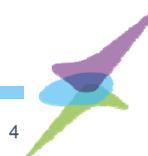


Sources : SDES ; CCTN 2017

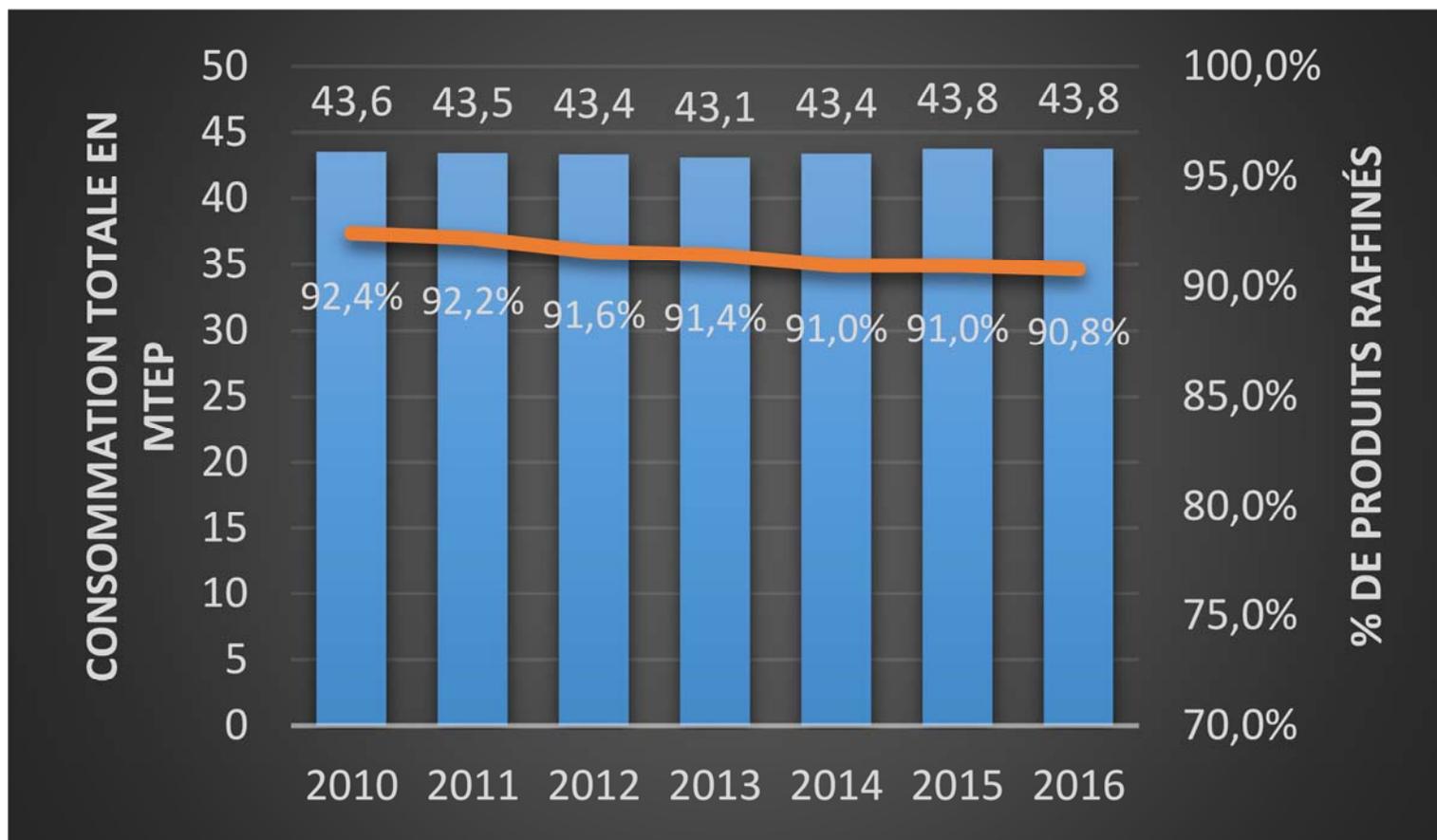
- Parts modales du transport terrestre de marchandises (hors oléoducs) en 2016



Sources : SDES ; CCTN 2017

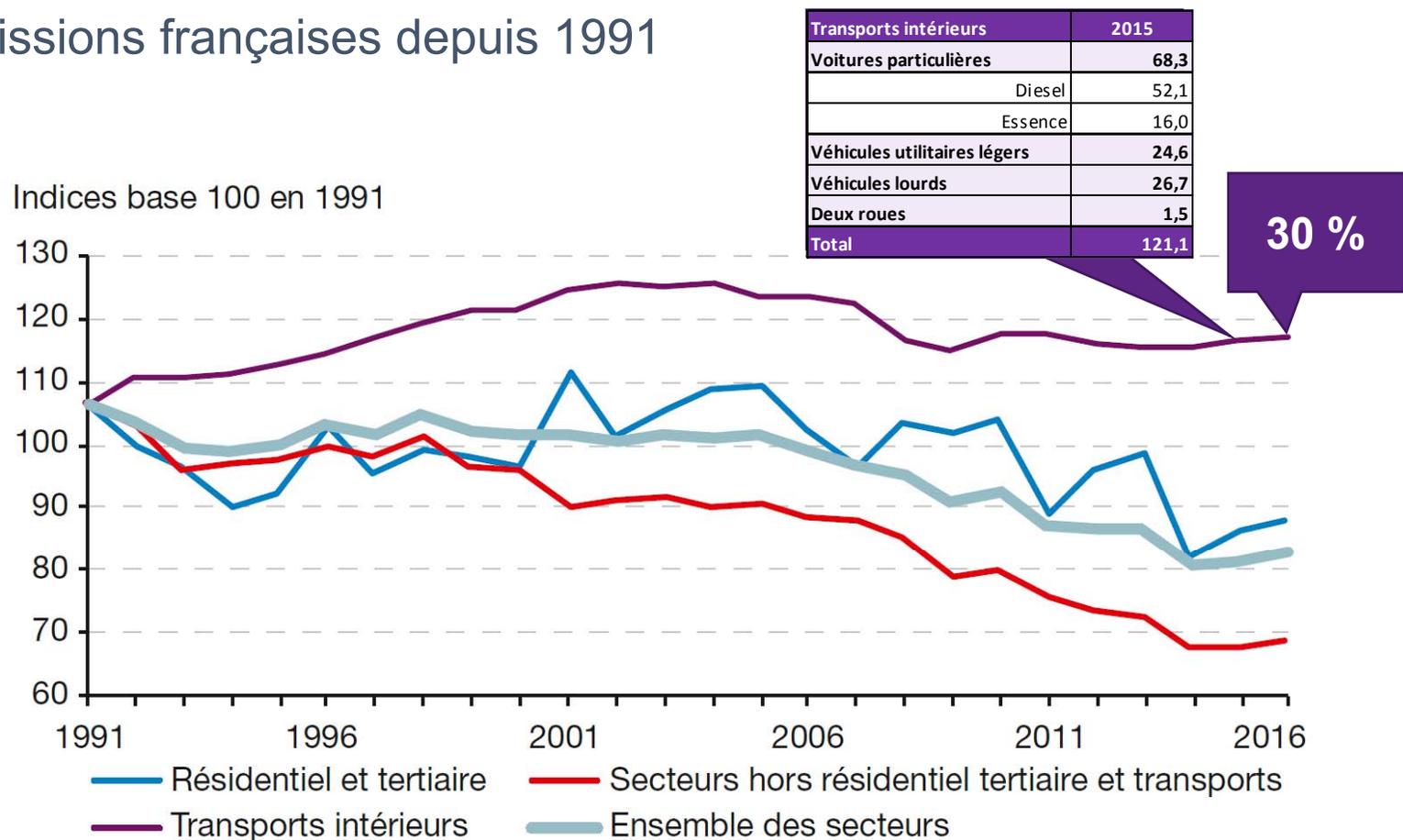


Les transports sont à l'origine d'une part importante des consommations d'énergie en France



Les transports sont à l'origine d'une part prépondérante des émissions de gaz à effet de serre

● Emissions françaises depuis 1991

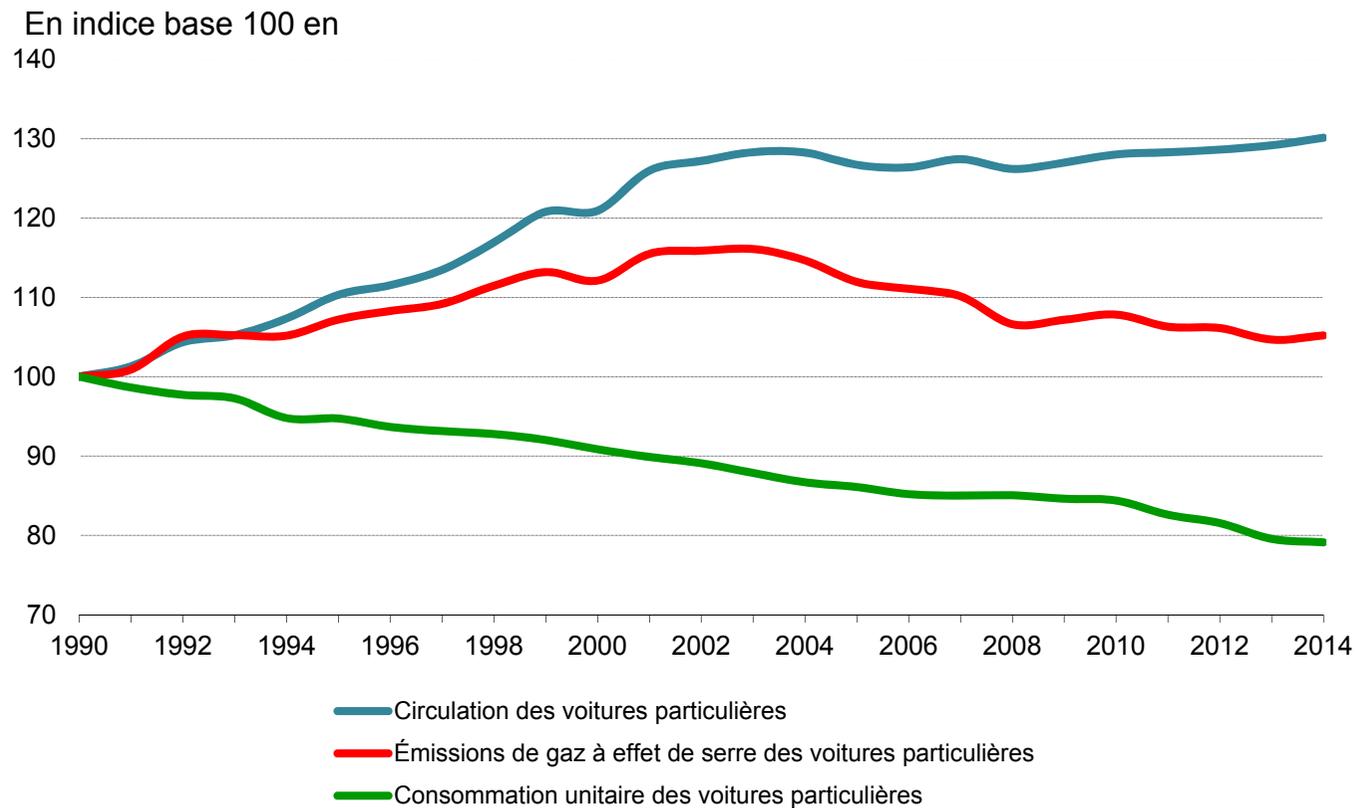


Sources : SDES ; CCTN 2017 d'après Citepa avril 2017 – Format Secten



Les émissions de CO₂ ne diminuent pas

- Evolution de la circulation, de la consommation et des émissions de gaz à effet de serre des voitures particulières

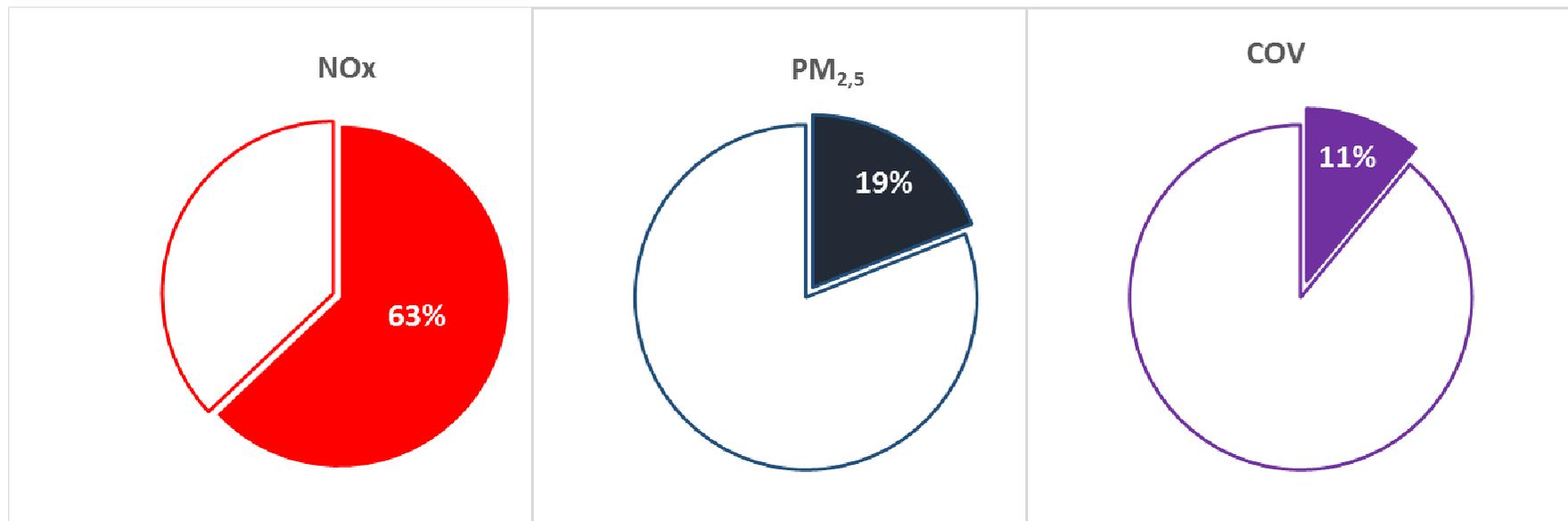


Source : SOeS mai 2016



Les transports sont aussi à l'origine d'autres pollutions

- Part des transports dans les émissions nationales de NOx, PM_{2,5} et COV

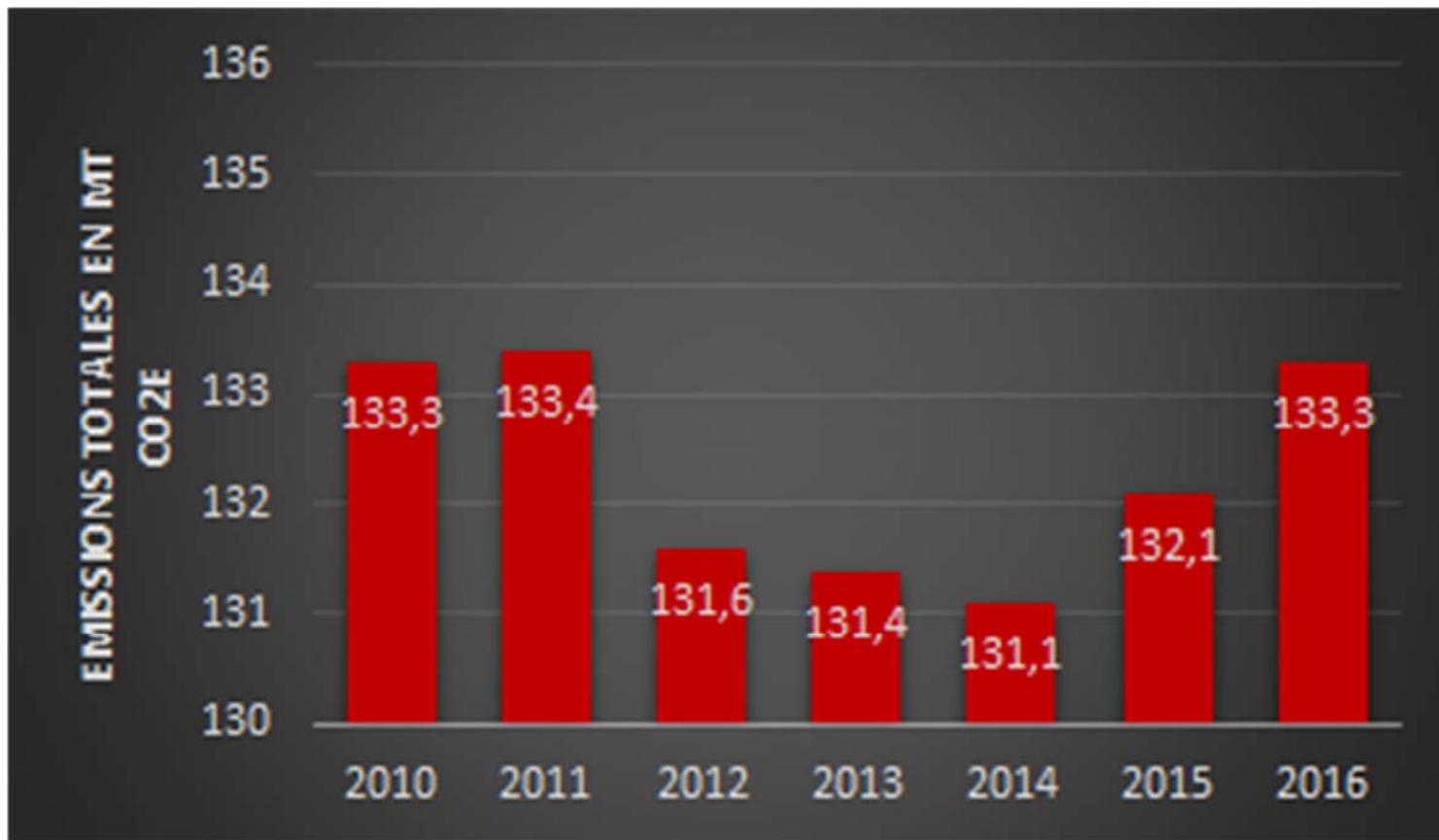


- Sans oublier les problèmes de bruit, d'encombrement de l'espace, de prélèvements sur les ressources naturelles, d'acidification, de déchets...



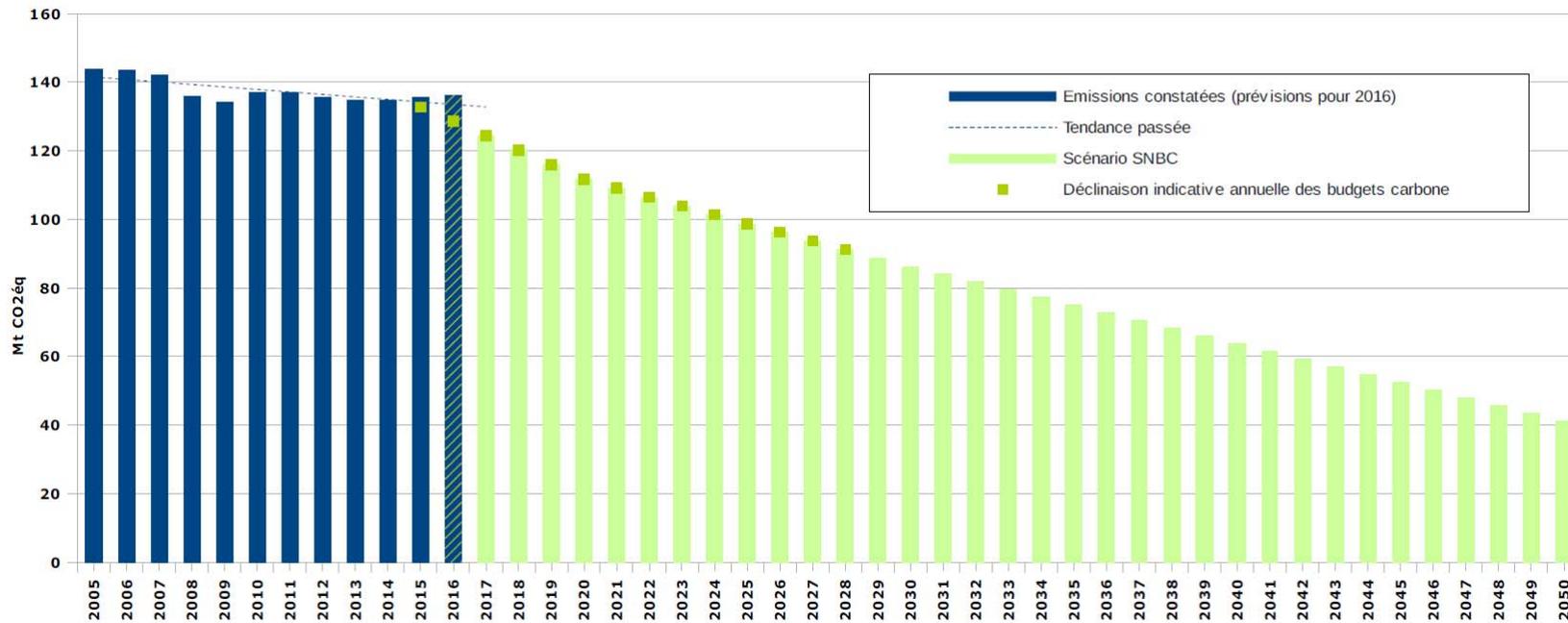
Une tendance à la reprise des émissions de CO₂

- Evolution des émissions de GES du secteur transport en France au cours des toutes dernières années



La stratégie nationale bas carbone n'est pas respectée

- A fin 2016, nous étions 6 % au dessus de l'objectif annuel de la SNBC dans le secteur des transports

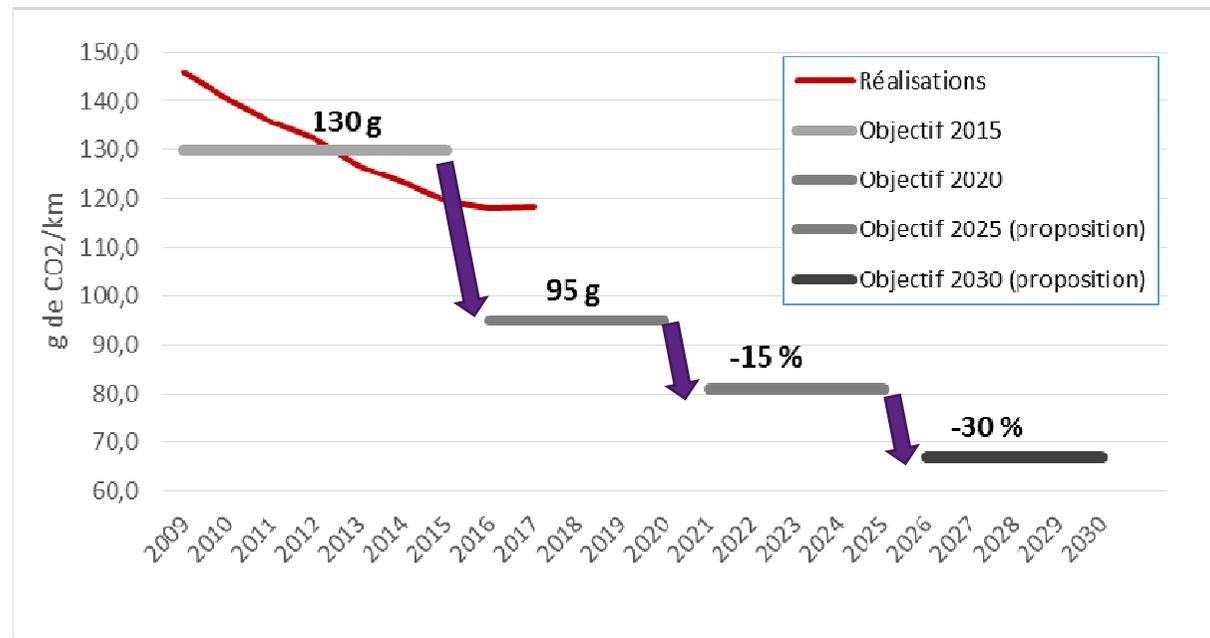




Les politiques publiques

La Commission européenne s'est saisie du problème

- A partir de 1990 : normes européennes Euro (0 à 6d) limitant les rejets polluants (NOx, CO, HC, particules fines)
- A partir de 2009 : normes d'émissions de CO₂ pour les voitures particulières

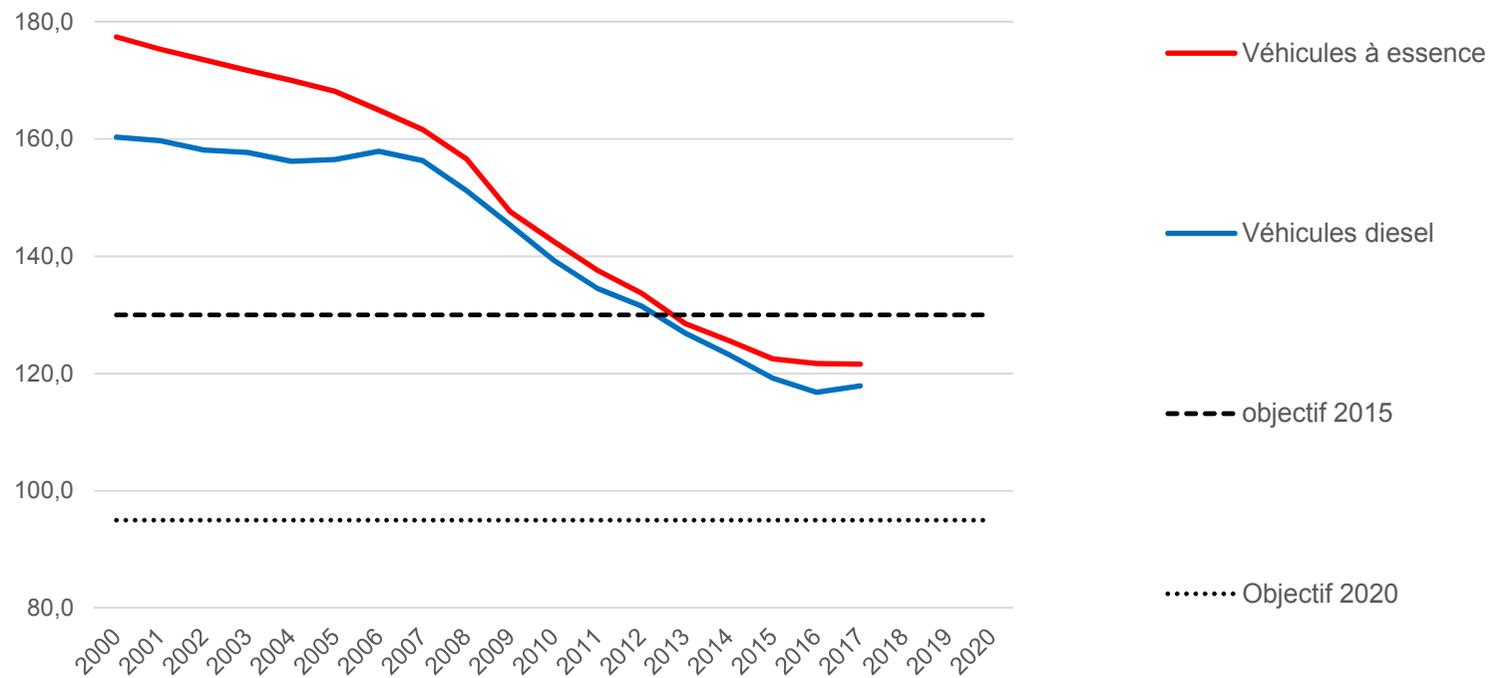


- Nouveau paquet « mobilité propre » de novembre 2017 en cours de discussion avec objectifs et pénalités renforcés



Des résultats importants ont été obtenus

- Emissions moyennes des voitures particulières neuves mises sur le marché en Europe

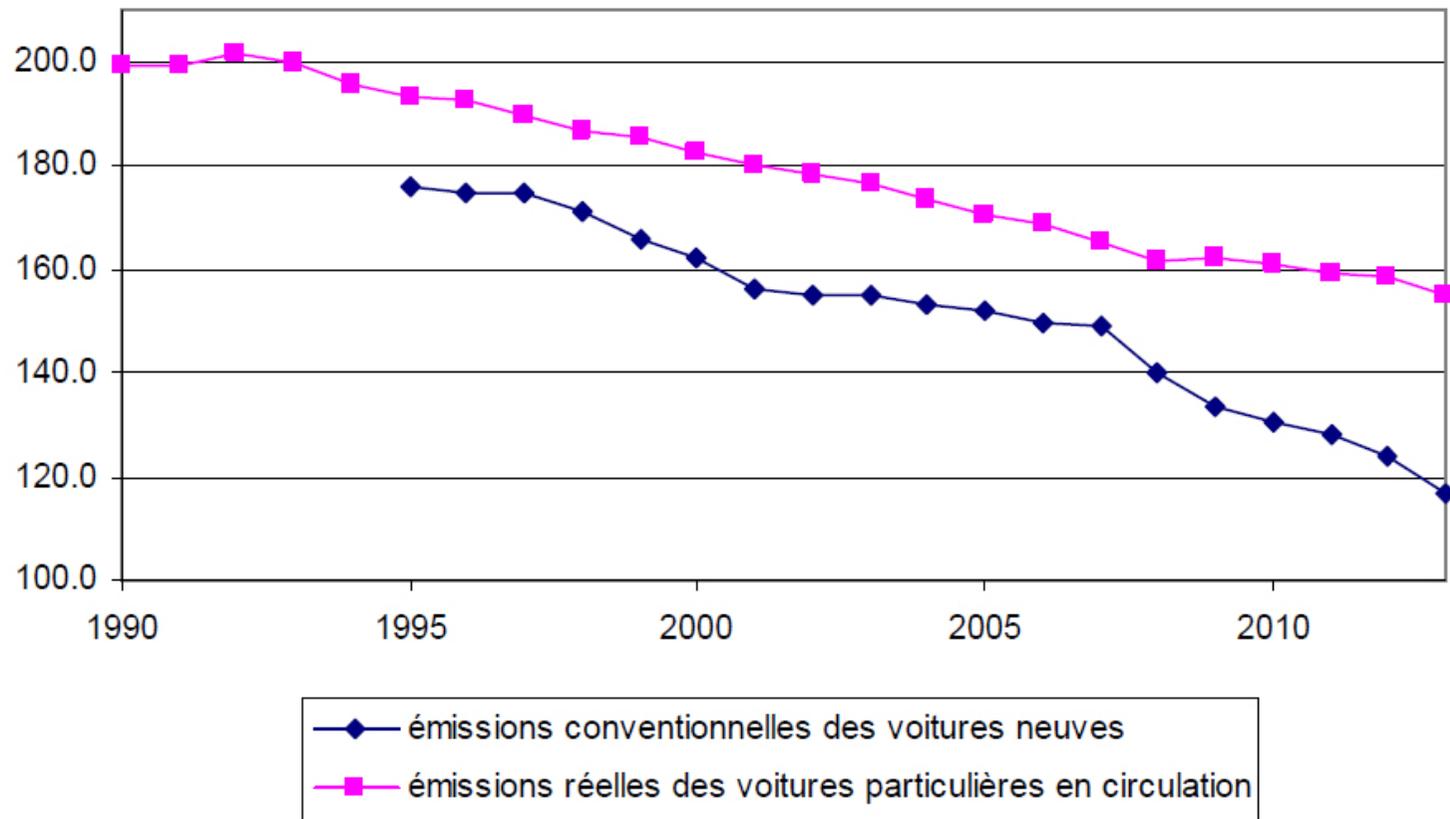


● Source : Agence européenne pour l'environnement



Les véhicules en circulation restent fortement émetteurs

- Emissions conventionnelles des voitures neuves et émissions réelles des voitures particulières en g de CO₂/km - Source : Citepa



En France, la politique s'articule en plusieurs étapes

- Engagements internationaux : Accord de Paris, Agenda 2030 des Nations-Unies, règlements et directives européennes
- Loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte – Article 40 : « L'Etat définit une stratégie pour la mobilité propre »
 - ➔ Stratégie nationale bas carbone (SNBC) (18 novembre 2015)
 - ➔ Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) (27 octobre 2016)
 - ➔ Stratégie de développement de la mobilité propre (SDMP) (annexe à la PPE)
- Assises de la Mobilité (décembre 2017)
- Loi d'orientation sur la mobilité (LOM) (à venir : automne 2018 ?)
- Programmation nationale de la mobilité propre (< fin 2019 puis tous les 5 ans, en cohérence avec la PPE)



Les Assises de la mobilité (septembre à décembre 2017)

- Cinq ateliers thématiques dont groupe « Mobilités plus propres » (président : Patrick Oliva) : 948 contributions reçues
- Quatre objectifs d'étude donnés à l'atelier « Mobilités plus propres » :
 - ➔ accélération de la transition vers des véhicules propres
 - ➔ encouragement des « mobilités actives »
 - ➔ essor des solutions de mobilités partagées (autopartage, covoiturage) et mobilité servicielle
 - ➔ maîtrise de la demande de transport, en s'appuyant sur les technologies et applications numériques.
- Les mesures proposées se retrouvent assez largement dans le projet de loi LOM
- Les deux derniers types de mesures seront facilitées par l'arrivée du véhicule autonome et connecté





Les véhicules propres

De nombreuses solutions

- Les véhicules électriques
- Les véhicules électriques rechargeables
- Les véhicules à hydrogène (piles à combustible)
- Les véhicules à gaz naturel véhicule (GNV)
- Les véhicules au BioGNV (biométhane)
- Les véhicules thermiques à biocarburants liquides

Chaque solution peut apporter une contribution à la mobilité propre, dans son domaine spécifique, dans des proportions plus ou moins grandes et à un horizon plus ou moins éloigné



Les véhicules à faibles et très faibles émissions

- Décrets du 11 janvier 2017

- ➔ VP (<3,5 t) à faibles émissions = < 60 g de CO₂/km (➔ GNV exclus)
- ➔ VP (<3,5 t) à très faibles émissions : VE, VH, HE, HH ou air comprimé
- ➔ VL (>3,5t) à faibles émissions : électricité, hydrogène, GNV, GPL, biocarburants avancés
- ➔ autobus et autocars : définition similaire mais plus complexe selon la nature du transport (urbain en territoire dense, urbain dans les autres territoires et non urbain)

- Ces définitions sont utilisées pour définir les politiques d'achat des organismes publics et définir les zones de circulation à faibles émissions

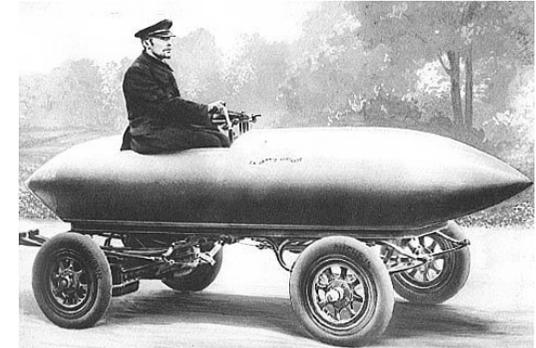


La mobilité électrique



Le véhicule électrique : une vieille histoire

- Des débuts prometteurs : après l'invention des batteries au plomb en 1869, le VE représente jusqu'à 38 % du marché automobile américain
- 1899 : la Jamais contente atteint 100 km/h
- 1908 : arrivée de la Ford T à essence – Début du déclin du VE
- A la suite des crises pétrolières, multiples tentatives de relance (batteries Cd-Ni)
- 1997 : première voiture hybride de Toyota (Prius)
- 2002-2003 : nouveau grand déclin – La plupart des constructeurs jettent l'éponge

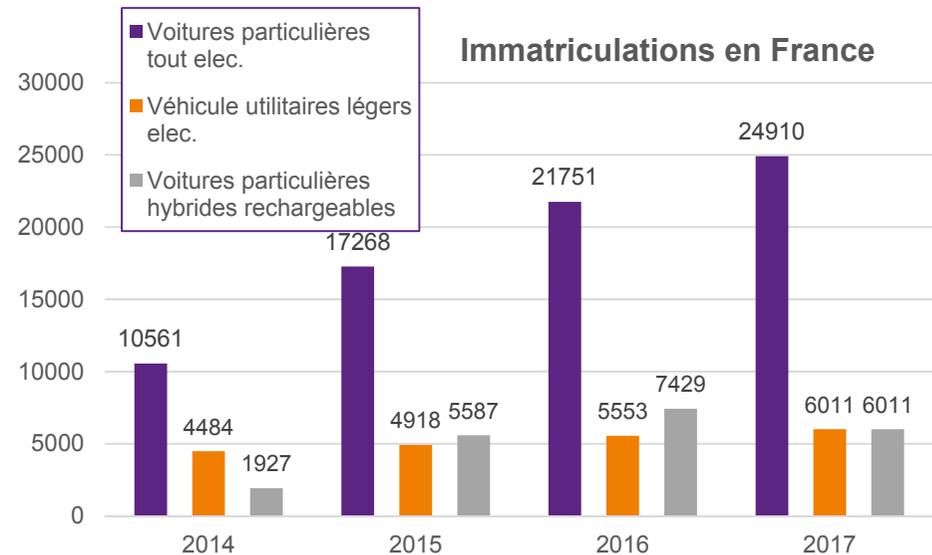


PEUGEOT 106 ELECTRIC : 1993



Aujourd'hui, le démarrage du véhicule électrique semble amorcé

- En France : croissance des immatriculations de 33 % par an mais tassement au 1^{er} semestre 2018
- 168 000 véhicules en circulation (premier parc d'Europe) au 30 avril 2018
- En Europe : la Norvège très en avance - démarrage du marché allemand
- Dans le monde : démarrage des marchés chinois et américain (effet Tesla)



% de VE dans les immatriculations (février 2018)

- Norvège : 44 %
- Suède : 6,7 %
- Pays-Bas : 3,1 %
- Allemagne : 1,9 %
- France : 1,8 %
- Chine : 4,5 % (mai 2018)



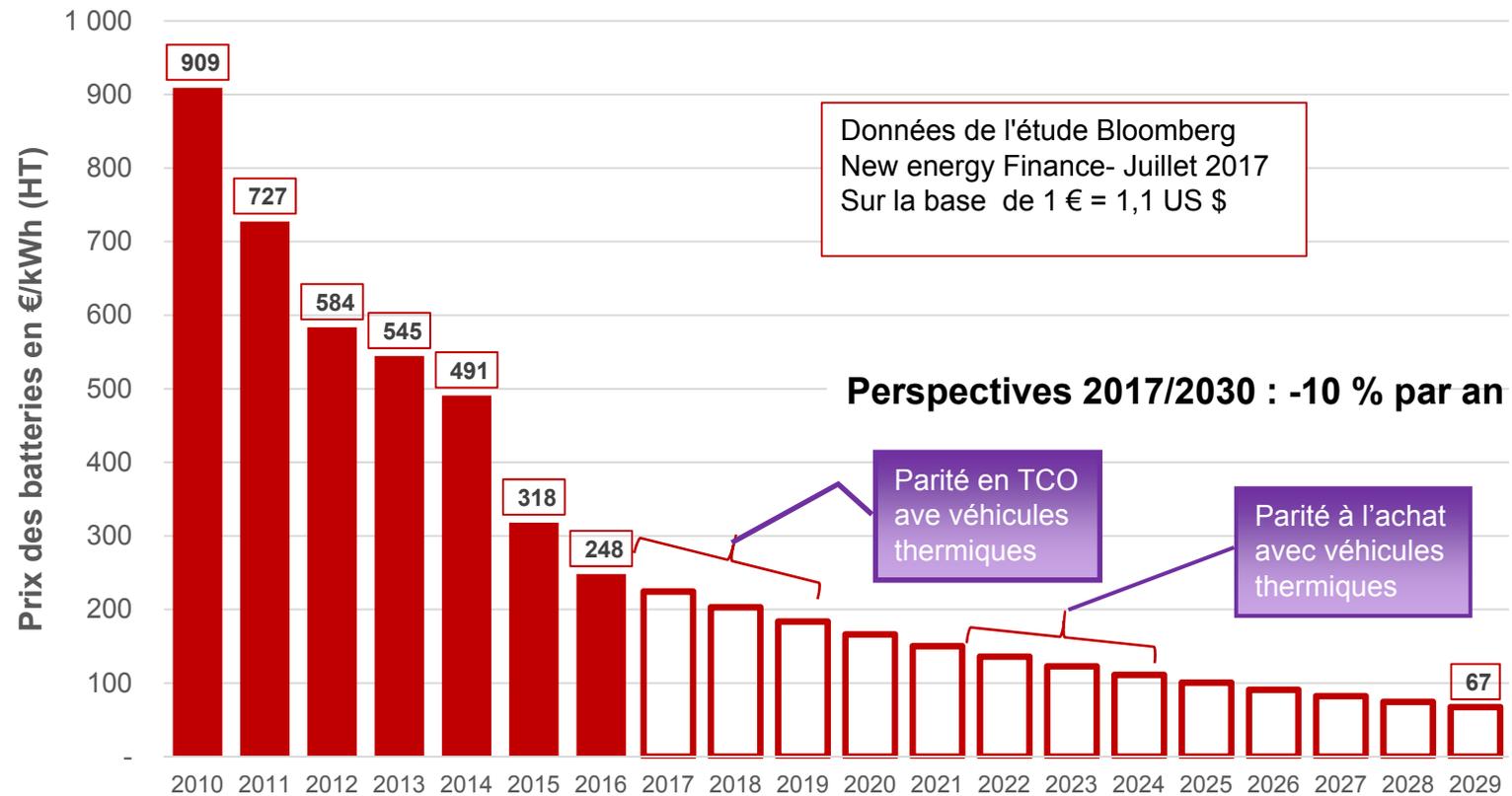
Les drivers actuels du véhicule électrique

- Une autonomie acceptable grâce à l'augmentation de la capacité des batteries Li-ion (50 à 60 kWh pour une citadine à partir de 2019, soit 300 km d'autonomie réelle)
- Une baisse continue du prix des batteries
- La lutte contre la pollution dans les villes (surtout en Chine)
- Les aides publiques (6 000 € + 2 500 € de prime à la conversion en France)
- **L'impact des règles communautaires sur les émissions et la nécessité pour les constructeurs d'éviter les pénalités**



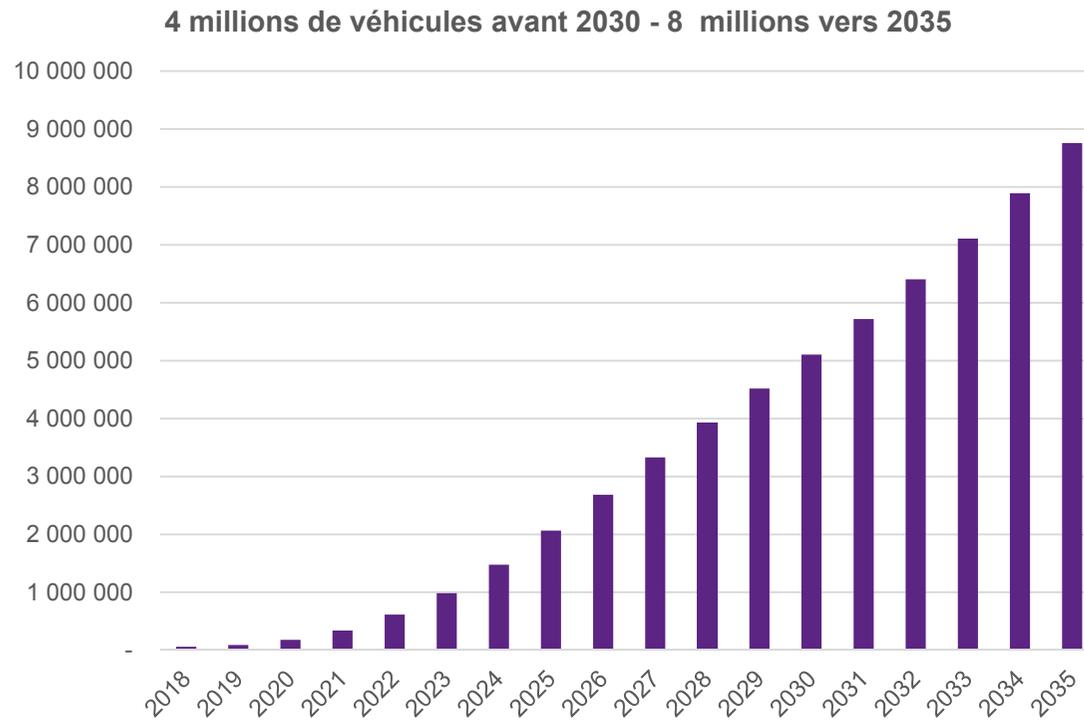
La baisse du prix des batteries Li-ion

Evolution du prix des batteries Li-ion



La marché de la mobilité électrique démarre mais encore timidement mais un véritable décollage est possible

- 4 millions de VE et VHR en circulation avant fin 2030 semblent possibles



Des problèmes restent à résoudre

- Les infrastructures de recharge
 - ➔ Privées (copropriétés, logements sociaux...)
 - ➔ D'accès public
- Le prix des véhicules et l'incertitude sur la stabilité des aides publiques
- La diversité des modèles
- La formation des personnels
- L'intégration avec le réseau électrique
- La fabrication et le recyclage des batteries
- La dépendance en métaux stratégiques (lithium et cobalt pour les batteries, certaines terres rares pour les aimants des moteurs)





La question des ressources et le bilan environnemental

Le contenu environnemental des batteries

- Les matières premières
- Les enjeux géopolitiques
- Le contenu CO₂
- Le recyclage des batteries



Matériaux composant les cellules d'une batterie

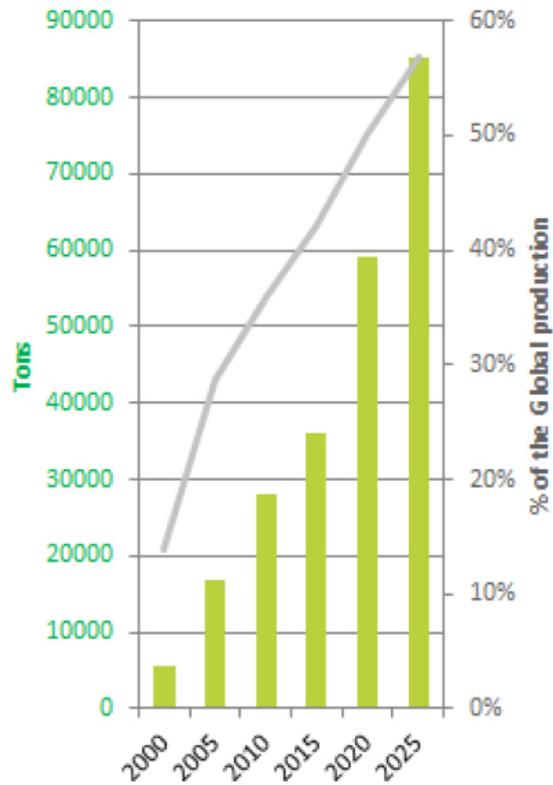
Matériau	% de la masse de la cellule	Coût (en \$/t)
Aluminium	16 %	1 600 \$
Graphite	14 %	10 000 \$
Acier	13 %	600 \$
Fer	9 %	74 \$
Cuivre	8 %	6 348 \$
Cobalt	6 %	27 000 \$
Nickel	6 %	10 000 \$
Manganèse	5 %	1 700 \$
Polyester	3 %	Nd
Lithium	2%	15 000 \$
Autres	18 %	Nd

- Ref : Chevrolet Volt – Source : ICCT février 2018

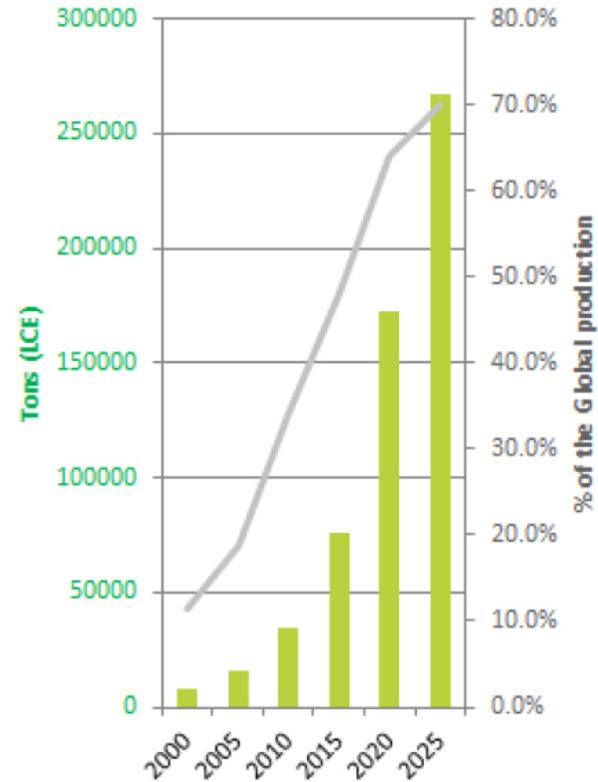


Cobalt et lithium sont les deux éléments les plus critiques

Cobalt



Lithium



Source : Avicenne Energy, 2017



Les enjeux géopolitiques

- Selon une étude de l'IFRI de janvier 2018 (« La transition énergétique face au défi des métaux critiques »), la localisation est resserrée autour de quelques pays :
 - ➔ Chine pour les terres rares (pas présentes dans les batteries mais utilisées dans les moteurs électriques (88% de l'offre, 56% de la demande)
 - ➔ R. du Congo pour le cobalt (65% de l'offre mondiale, et 93% de la demande chinoise)
 - ➔ Amérique latine, Australie, Chine pour le Lithium
- Conditions d'extraction environnementales et sociales à risques : comment les contrôler
- Comment se prémunir contre les risques stratégiques
 - ➔ Poursuivre la R&D sur les matériaux alternatifs (au cobalt notamment)
 - ➔ Rechercher d'autres sources d'approvisionnement : il en existe mais des incertitudes planent sur les gisements, les coûts, ...
 - ➔ Ouvrir de nouvelles mines en Europe (Suède, péninsule ibérique, Balkans) ?



Enjeux industriels : la Chine domine en 2018 le marché mondial des batteries

Nom des fabricants	Nationalité des fabricants	Ventes en GWh	Part en %
CATL	Chine	11,8	23,7%
Panasonic	Japon	10,0	20,1%
BYD	Chine	7,2	14,5%
OptimumNano*	Chine	5,5	11,0%
LG	Corée du Sud	4,5	9,0%
Guoxuan High-tech	Chine	3,2	6,4%
Samsung	Corée du Sud	2,8	5,6%
Beijing National Battery	Chine	1,9	3,8%
BAK	Chine	1,6	3,2%
Farasis	Chine	1,3	2,6%
Total des dix premiers fabricants mondiaux		49,8	100,0%

- ^[1] The Breakneck Rise of China's Colossus of Electric-Car Batteries (1 février 2018) : <https://www.bloomberg.com/news/features/2018-02-01/the-breakneck-rise-of-china-s-colossus-of-electric-car-batteries>
- * Pour des raisons de difficultés financières, cette société a arrêté en 2018 la fabrication de batteries pour automobile. Sa part de marché a été visiblement récupérée par CATL en 2018.

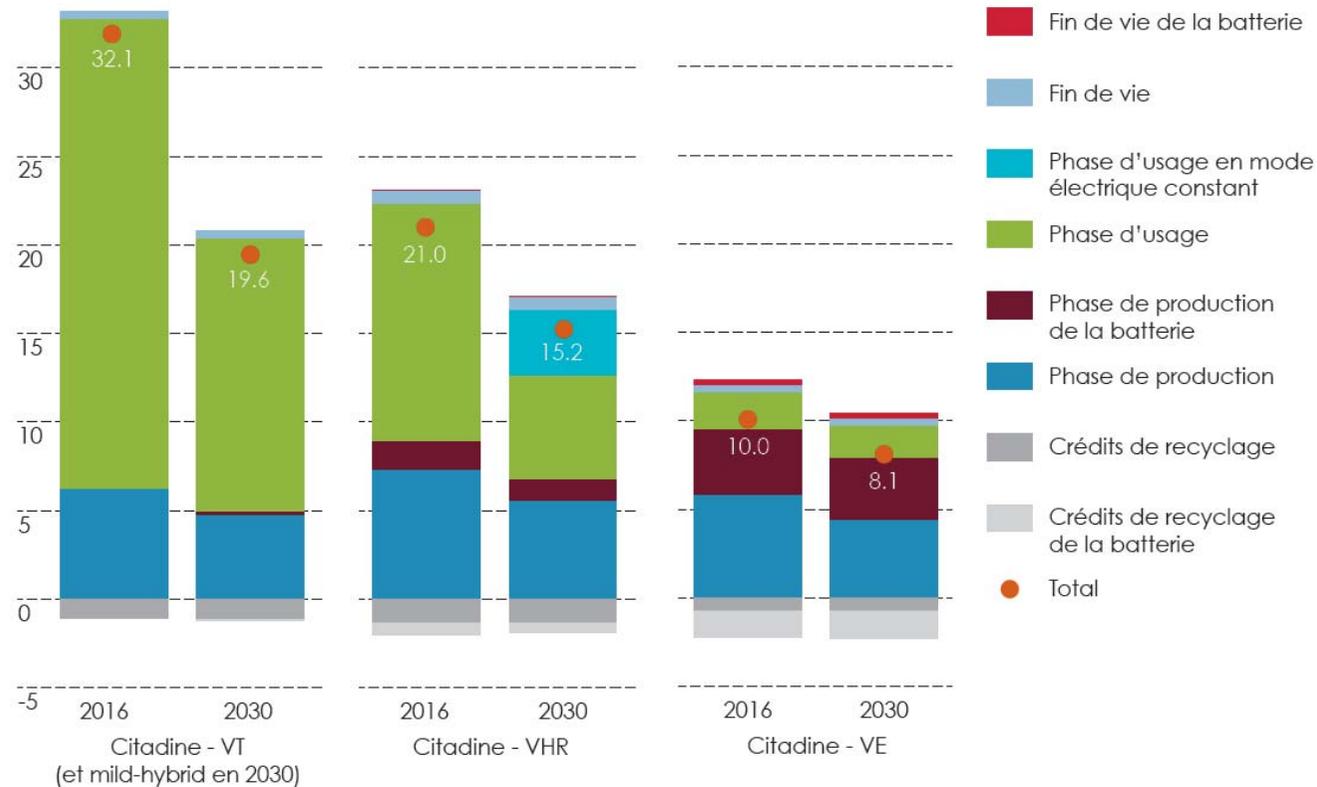


Les émissions de CO₂ liées au véhicule électrique

- L'analyse doit tenir compte du mix électrique
- Elle doit également intégrer le contenu en CO₂ des batteries
 - ➔ Une étude internationale fait autorité : « *Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions* » (ICCT – The International council on clean transportation – Février 2018)
 - Fait la synthèse de 11 études
 - ➔ En France : étude de Carbone 4 : « *Le véhicule électrique dans la transition écologique en France* » – Etude menée pour le compte d'European Climate Foundation et pour la Fondation pour la Nature et pour l'Homme (novembre 2017)



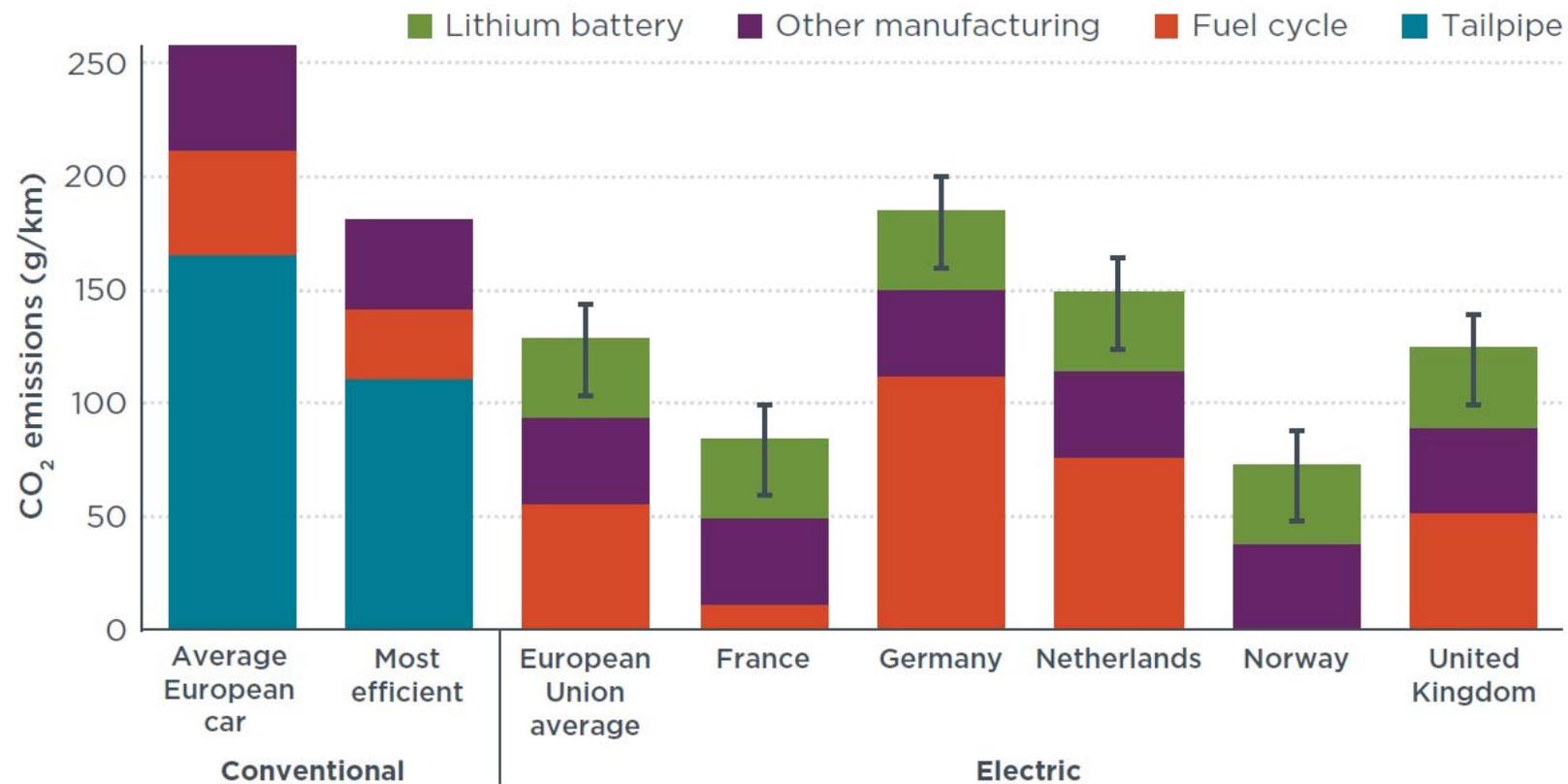
Bilan climatique comparatif base France



Bilan climatique comparatif (en t de CO2) de citadines à motorisation thermiques(VT), hybride rechargeable (VHR) et électrique (VE) – Source : Carbone 4 (2017).



Bilan climatique comparatif – Base Pays européens



Bilan climatique comparatif (en g de CO2 par km) des véhicules à motorisation thermique et électrique dans différents pays européens – Source : ICCT (2018).



Fin de vie des batteries

- La durée de vie des batteries semble plus longue qu'initialement prévue (>10 ans)
- Toutefois leur fin de vie doit être organisée :
 - ➔ Soit en organisant leur seconde vie (usages à demeure)
 - ➔ Recyclage : la directive 2066/66/CE, modifiée le 30 mai 2018 doit être adaptée au cas des batteries de véhicules électriques
 - ➔ Un plan européen de recyclage doit être mise en place; Des acteurs sont déjà en place



Les batteries et l'économie circulaire



● Source : SNAM





Le véhicule électrique et son insertion dans les réseaux

L'impact possible du véhicule électrique

- 4 millions de véhicules électriques ~ 10 TWh/an (soit 2 % de l'énergie électrique annuelle consommée en France) ;
- Comment gérer la recharge des VE pour ne pas provoquer d'appels de puissances intempestifs aux plans national et local (réseaux de distribution) ? 4 millions de véhicules à recharge non pilotée pourraient entraîner un appel de puissance supplémentaire à certaines heures de 4 à 8 GW selon les hypothèses
- **Bien géré, le VE peut**
 - ➔ **apporter une contribution positive à la régulation du système électrique**
 - ➔ **Contribuer à une meilleure utilisation des énergies renouvelables locales**

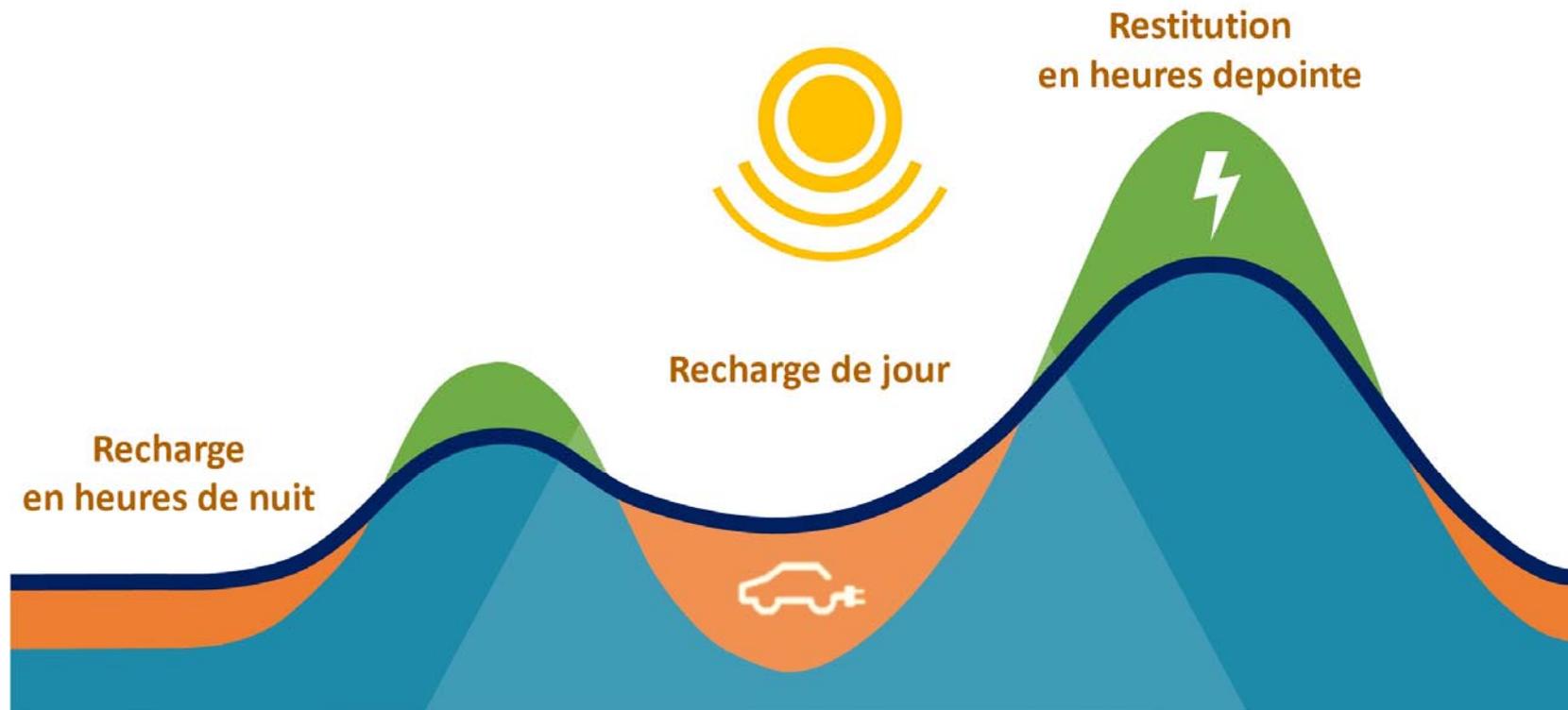


L'apport possible du véhicule électrique

- La gestion intelligente de la recharge peut s'envisager en plusieurs étapes :
 - ➔ La recharge en heures creuses à l'instar des chauffe-eau électriques
 - ➔ Le pilotage de la recharge pour éviter les pics de puissance sur le réseau ou mieux valoriser les énergies intermittentes
 - ➔ Le pilotage bidirectionnel des batteries de VE pour qu'elles viennent en soutien du réseau, lorsque nécessaire
- 4 millions de VE dotés de batteries de capacité moyenne de 50 kWh, représentent un stockage de 200 GWh. Si on admet que 20 % sont mobilisables pour un pilotage bidirectionnel, on met en évidence un potentiel de 40 GWh soit 20 GW sur 2 heures



Vision schématique de la gestion optimisée de la recharge



L'hydrogène



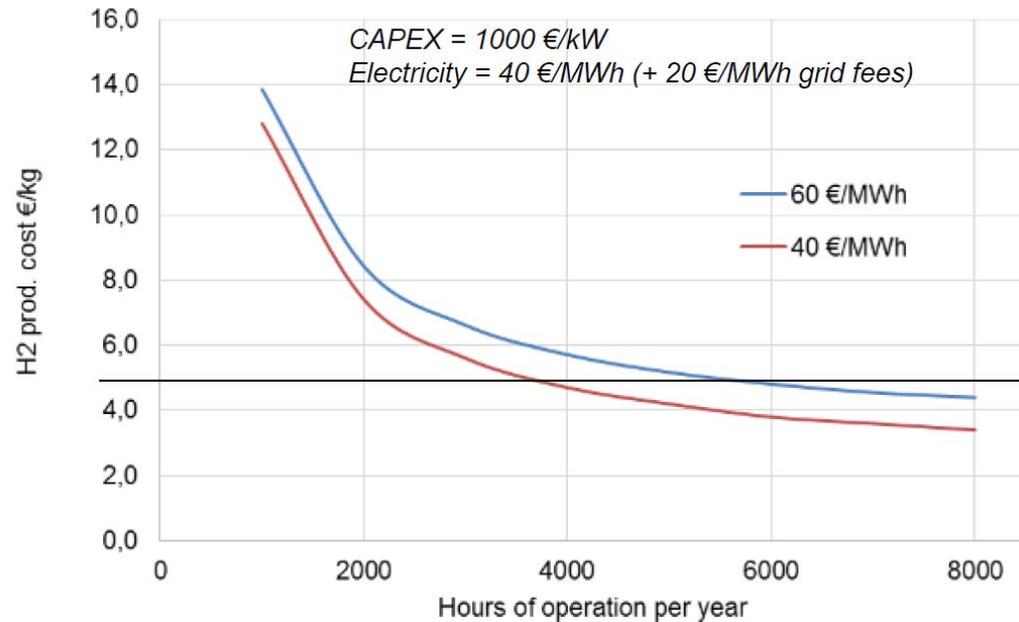
Données générales

- Aujourd'hui utilisé pour des applications industrielles (1 Mt en France) : métallurgie, électronique...
- Produit par vaporeformage d'hydrocarbures (méthane essentiellement)
 $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ puis $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$
- Procédé fortement émetteur de CO_2 (10 t de CO_2 par t d' H_2)
- Peut être produit par voie électrolytique (électrolyseurs à membranes)
- Présente alors des avantages, pour la mobilité notamment
 - ➔ Absence d'émissions de CO_2 à la production (si l'électricité est décarbonée) et à la combustion
 - ➔ Pouvoir calorifique massique élevé (2,5 fois le méthane)
 - ➔ Recharge rapide et autonomie très importante
- L'hydrogène est un autre mode de mobilité électrique



Les obstacles à l'utilisation de l'hydrogène

- Le coût de production de l'H₂ électrolytique : typiquement de 4 à 6 €/kg (2 € pour l'H₂ par reformage)
- Le stockage (350 ou 700 bars) et le moindre PC volumique (1/3 du méthane)
- La distribution (30 stations en Allemagne)
- Le rendement de la chaîne : 70 % pour l'électrolyse, 50 % pour la PAC PEM
- Les règles de sécurité



Où utiliser l'hydrogène électrolytique

- Les applications industrielles, lorsque sa pureté est un avantage
- La mobilité professionnelle : poids lourds, autobus, bateaux, locomotives, chariots... avec production et stockage sur place et manutention par des professionnels
- Dans le même temps, poursuivre les travaux sur :
 - ➔ L'abaissement des coûts de production
 - ➔ le stockage
 - ➔ Les piles à combustible
- L'avenir de l'hydrogène dépendra beaucoup de l'évolution de la fiscalité sur le carbone : à 300 €/t de CO₂, l'H₂ devient compétitif par rapport à l'H₂ SMR (Steam Methane Reforming).



Beaucoup d'autres formes nouvelles de mobilité

- Vélos électriques et dérivés
- Trottinettes électriques, hoverboards, gyroroues, e-skates, Segways



Vélo tricycle scooter



Vélo biporteur électrique Amsterdam



Sans oublier le vélo et le vélo électrique

- Les pouvoirs publics veulent faire repasser l'usage du vélo de 2,7 % dans les déplacements de 2,7 % actuellement à 9 % en 2024 (elle était de 10 % en 1970)
- Un plan vélo sera présenté à la rentrée 2018
- A noter que les ventes de vélos électriques en France ont doublé en 2017 (255 000 unités contre seulement 107 000 cyclomoteurs)



Les autobus

- Bus électriques et bus hybrides



- Bus à GNV et BIOGNV

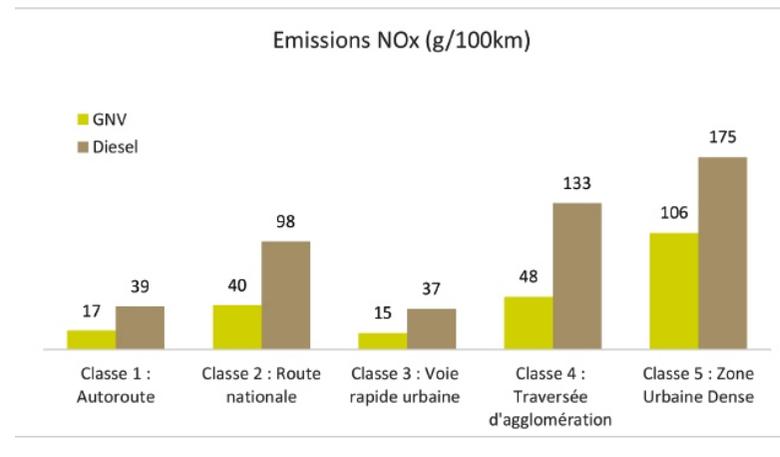
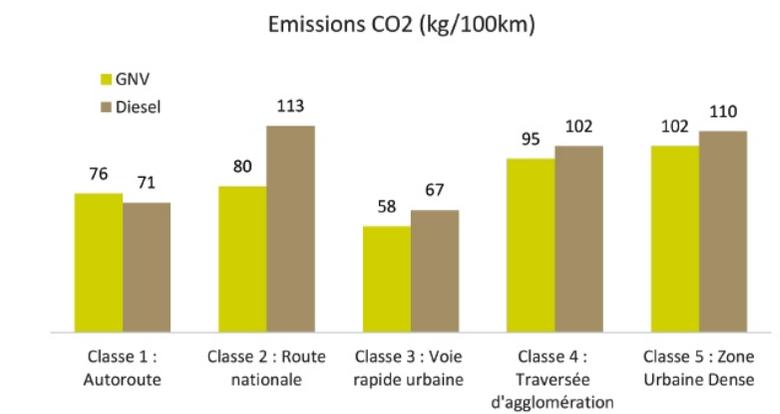


Bus à hydrogène



Les transports de marchandises – Le GNV

- Le GNV est une bonne solution mais surtout pour les NOx (-44 à 64 % par rapport au diesel. Le résultat est plus nuancé concernant le CO₂
- Le passage au BIO GNV est souhaitable, s'il est possible...



(Source : projet Equilibre avril 2018 – Tracteurs de 44 t)



Le transport de marchandises – Autres solutions

- Les solutions électriques



Camion Tesla à 800 km d'autonomie



Concept suédois d'e-Road

- Les solutions hybrides



Concept d'autoroute électrique - Scania

- Le camion à hydrogène



Expérimentation Toyota à Los Angeles





Le projet de loi d'orientation sur la mobilité

(indications provisoires sur la base du projet au 23 mai 2018)

Les objectifs

- Viendra peut-être en discussion au Parlement à l'automne 2018
- Projet de texte pas encore déposé.
- Objectifs généraux annoncés en juillet 2018
 - ➔ Fin de vente des véhicules émettant des gaz à effet de serre en 2040
 - ➔ Multiplication par six des ventes de véhicules à très faibles émissions d'ici 2023 par rapport à 2017
 - ➔ Multiplication par 15 des ventes de poids-lourds à faibles émissions d'ici 2025 par rapport à 2017



Les mesures envisagées (1)

- Un ensemble assez touffu de mesures organisationnelles mais peu de soutiens financiers
- Mise en place d'une gouvernance forte et établissement d'un panel de plans et de programmes
 - ➔ Programme national de mobilité propre
 - ➔ Plans de mobilité des « Autorités organisatrices de la mobilité »
 - ➔ Plans de mobilité « employeurs » et observatoire associé
 - ➔ Plans d'action commun dans les bassins de mobilité portant sur la mobilité de caractère social
 - ➔ Plan de mobilité des établissements scolaires
 - ➔ Plans visant à réduire les émissions dans les liaisons liées au fret
 - ➔ Plans d'exposition au bruit
 - ➔ Programmes incitatifs de lutte contre la congestion automobile
 - ➔ Création d'un registre national d'expérimentations d'innovation en mobilité



Les mesures envisagées (2)

- Délégation au niveau régional et local de larges responsabilités de programmation et d'organisation
 - ➔ Rôle accru donné aux Autorités organisatrices de la mobilité
 - ➔ Incitations à mettre en place des zones à faibles émissions
 - ➔ Possibilité de création de zones à trafic limité
 - ➔ Possibilité d'instaurer des péages sur certains axes routiers
 - ➔ Possibilité d'instaurer des péages urbains
 - ➔ Création d'un service numérique d'information sur les déplacements
 - ➔ Mise en place en milieu rural mal desservi de services de transports occasionnels par des conducteurs non professionnels
 - ➔ Création de services publics de covoiturage, réservation de certaines voies et certaines zones de stationnement
 - ➔ Etc.



Les mesures envisagées (3)

- Favoriser le développement des véhicules propres
 - ➔ Maintien du compte d'affectation spéciale bonus-malus (mais problème de la répartition entre PAC et primes au VE)
 - ➔ Abaissement du seuil de déclenchement du malus (-3 g de CO₂/km)
 - ➔ Etablissements d'un schéma national de déploiement des infrastructures pour carburants alternatifs
 - ➔ Augmentation de la prise en charge par les réseaux des frais de raccordement des bornes de recharge
 - ➔ Transposition de la directive du 30 mai 2018 (pré-équipement des places de stationnement)
 - ➔ Extension du suramortissement pour l'acquisition de poids lourds à faibles émissions
 - ➔ Soutiens au déploiement du GNV, aides à l'amorçage de la filière hydrogène



Ces mesures seront-elles suffisantes ?

- **La question de la saturation de l'espace, en milieu urbain essentiellement, reste primordiale**
- La notion de véhicule propre n'apporte pas une solution suffisante
- Le problème fondamental reste de satisfaire les besoins d'échanges et de rencontres en limitant les déplacements effectifs et en les rendant plus efficaces
- Les technologies numériques et le véhicule autonome et connecté peuvent y contribuer



Les apports des technologies numériques conventionnelles

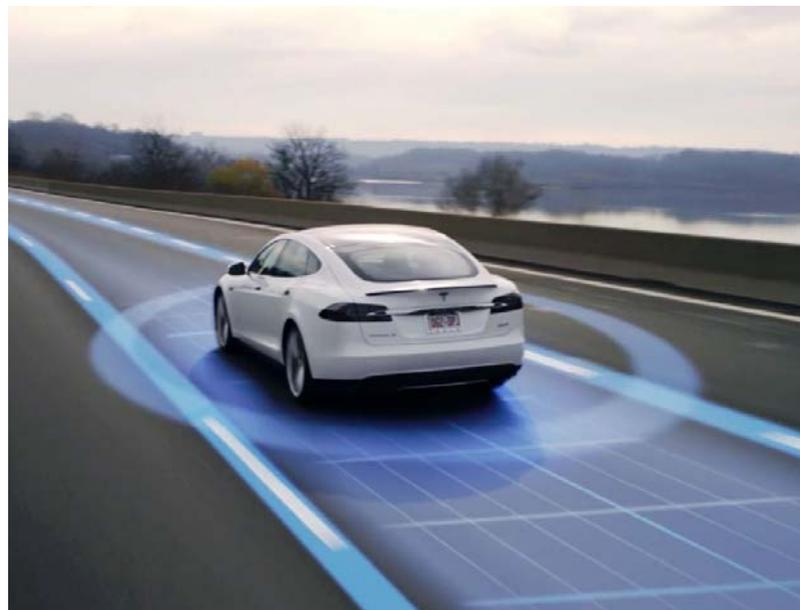
- Développement du télétravail
- Développement des vidéoconférences et autres moyens d'échange
- e-commerce (mais problème des livraisons → drones ?)
- e-santé
- Tous les services en ligne
- Gestion du covoiturage
- Systèmes d'autopartage
- Etc.

Toutes ces techniques prises isolément permettent de limiter les déplacements mais contribuent à la croissance économique et à l'augmentation des échanges (effet rebond)

Au total, leur apport global n'est pas encore mesuré

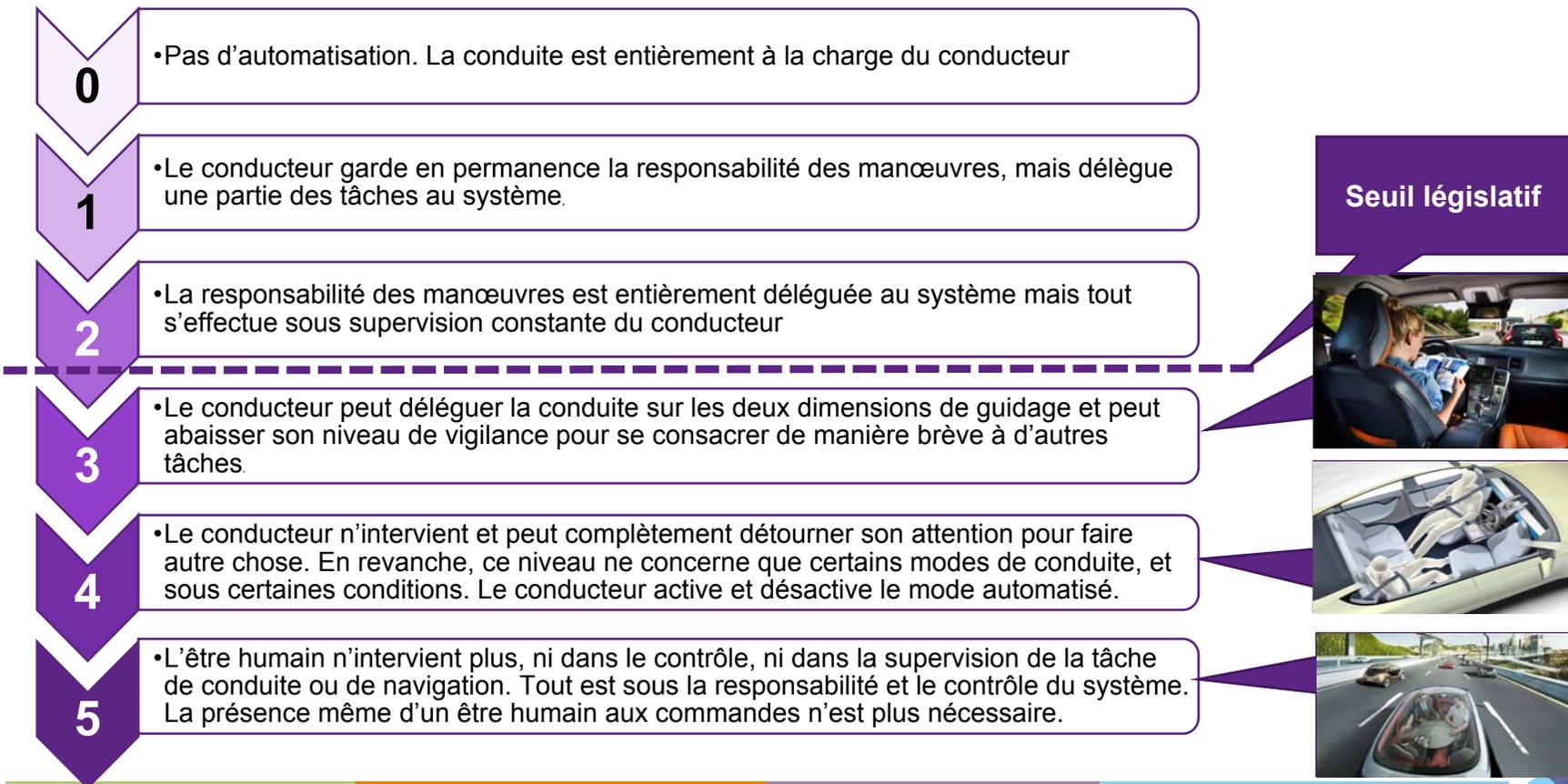


Le véhicule autonome



Le véhicule autonome

- Une révolution qui peut modifier profondément la mobilité
- Les six niveaux SAE du véhicule autonome – Le projet de loi LOM prévoit de rendre possible la circulation des VP de niveaux 3 et 4



Qu'attendre des véhicules autonomes pour la mobilité propre ?

- Les véhicules autonomes seront probablement électriques (facilité de pilotage et de recharge)
- Amélioration de la sécurité
- Optimisation de la conduite (moins de consommation)
- Aide à la navigation – Évitements des bouchons
- Meilleure occupation de la voirie, gestion optimale des feux, régulation du trafic
- Et surtout : **nouveaux services de mobilité**. Développement de l'autopartage sans chauffeur : robots taxis, voitures partagées... (Blablacar, Uber... sans chauffeur !). Les véhicules rouleront pendant un % très supérieur (comme aujourd'hui les avions), réduisant l'emprise moyenne au sol, permettant leur renouvellement plus fréquent et conduisant à une réduction des coûts,



Vers la « Mobility as a Service » ?

- La voiture autonome permettra-t-elle de réduire la limite entre transports publics et transports privés ?
- Les usagers seront-ils prêts à renoncer au « cocooning » de leur voiture personnelle, toujours plus confortable, toujours plus performante ?



Merci de votre attention

jp.hauet@equilibredesenergies.org

