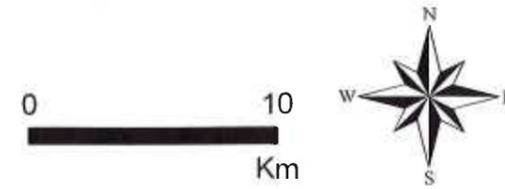


Communes dans une agglomération de 250.000 habitants pour la surveillance de la qualité de l'air

Arrêté du 28 Juin 2016



Reçu au Contrôle de légalité le 22 décembre 2017

Sources: Esri, HERE, DeLorme, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NRS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, ME

Etude comparative sur les différentes motorisations de bus

2017



Sommaire

I.	Motorisation Diesel thermique	4
a.	Technologie.....	4
b.	Coût de possession d'un véhicule 12 mètres Euro 6 thermique	6
II.	Motorisation Gaz Naturel pour Véhicules	7
a.	Principe de base	7
b.	S'équiper en véhicules au Gaz	8
c.	Les flottes gaz.....	8
d.	Infrastructure de charge	9
e.	Coût de possession d'un véhicule 12 mètres GNV hors infrastructure.....	9
III.	Motorisation Hybride	10
a.	Principe de base	10
b.	Coût de possession d'un véhicule 12 mètres hybride.....	11
IV.	Nouveaux carburants	12
a.	Principe de base	12
b.	Coût de possession d'un véhicule 12 mètres éthanol.....	13
V.	Synthèse des coûts	14
VI.	Focus sur les émissions polluantes	15
VII.	Motorisation Electrique	16
a.	Principe de base.....	16
b.	La recharge en bout de ligne par pantographe.....	17
c.	Le biberonnage : la recharge à chaque arrêt	18
d.	La recharge par induction : le système sans contact	19
e.	L'Hybride – sans émission.....	21
f.	Les véhicules PAC (Pile à combustible – Hydrogène).....	21
VIII.	Analyse économique de différents scénarios liés au véhicule électrique	22
a.	Achat ou location des batteries et recharge au dépôt (coût infrastructure inclus).....	22
b.	Achat ou location des batteries et recharge au dépôt (hors infrastructure).....	23
c.	Achat ou location des batteries et recharge par opportunité (avec infrastructure)	24
d.	Achat ou location des batteries et recharge par opportunité (hors infrastructure).....	25
IX.	Synthèse globale :	29
	Sources	31

Préambule

Après une première parution en 2014, la Centrale d'Achat du Transport Public (CATP) a mis à jour l'étude comparative sur les différentes motorisations de bus avec des données récentes pour comparer, sur des critères objectifs, les coûts de possession des véhicules à motorisations alternatives au diesel.

L'objectif de cette étude, réalisée en partenariat avec le Labo technique d'AGIR, est d'accompagner les acheteurs publics dans des achats performants, au meilleur coût et notamment de faciliter leur arbitrage vers l'énergie la plus adaptée pour leur réseau à partir de critères environnementaux, techniques et économiques.

Pour la réaliser, la CATP s'est principalement appuyée sur les données des constructeurs, obtenues dans le cadre des consultations de marchés publics qu'elle a menée depuis 2013 avec plus de 1 500 véhicules vendus ainsi que sur les retours des techniciens qui exploitent et entretiennent les véhicules. Enfin, elle a pris en compte diverses études et documents (ADEME, Cetim, etc.)

Les principales motorisations des véhicules y sont étudiées – Diesel thermique EURO 6, GNV, hybride, éthanol et électrique – sur trois critères économiques :

- Coût moyen d'acquisition : prix moyen constaté depuis 2013
- Coût moyen d'exploitation : issu des cycles SORT constructeurs
- Coût moyen de maintenance préventive : données issues des constructeurs

Les données de base pour l'étude comparative sont les suivantes :

- Bus standard 12 m
- Durée de vie : 15 ans pour les véhicules Diesel Euro6, GNV, Hybrides et fonctionnant aux nouvelles énergies conformément à l'amortissement économique et technique courant des véhicules et 20 ans pour l'électrique car la durée de vie du matériel estimée est supérieure
- Kilométrage : 40 000 km/an soit 480 000 km sur les 12 ans.

Cette comparaison multicritères permet d'obtenir une idée précise du coût global de possession d'un véhicule sur sa durée de vie et en prenant notamment en compte le coût des carburants.

Créée par des collectivités et au service des collectivités, la CATP partage leur volonté de diminuer la pollution générée par les transports publics, notamment en facilitant leurs achats de bus à énergies alternatives.

La CATP considère, néanmoins, que les coûts plus élevés de ces investissements ne doivent pas conduire à un ralentissement du renouvellement des véhicules les plus anciens ou à une réduction des parcs de bus limitant l'offre de transport alternative à l'automobile. Ces deux phénomènes seraient contraires aux objectifs de développement d'une mobilité plus durable et de report modal de la voiture vers les transports publics.

I. Motorisation Diesel thermique

a. Technologie

A la recherche d'une diminution des émissions polluantes, les premières normes imposées aux constructeurs de véhicules datent de 1990 (Euro 0). A mesure que les seuils de restrictions d'émissions ont été abaissés, les performances techniques des moteurs thermiques ont largement été améliorées.

La norme la plus récente, en vigueur depuis le 1^{er} Janvier 2014, est la norme Euro 6. Elle impose des seuils maximums d'émissions très faibles par rapport aux anciens véhicules :

- 0.4 g/kWh de NOx,
- 1.5 g/kWh de CO,
- 0.13 g/kWh de HC,
- 0.01 g/kWh de Particules.

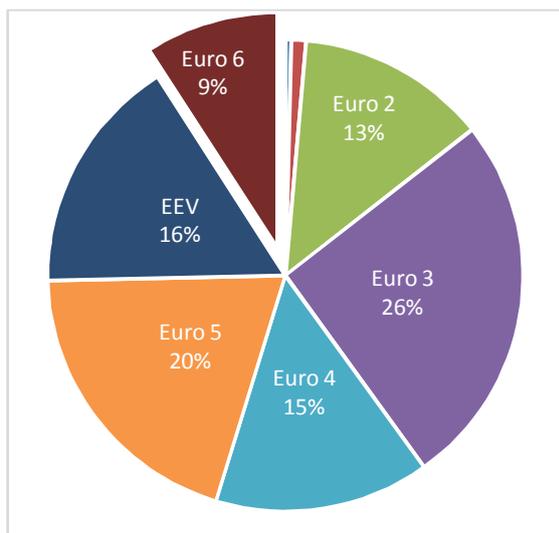
g/kWh	Euro 0 (1.10. 1990)	Euro 1 (1.10. 1993)	Euro 2 (1.10. 1996)	Euro 3 (1.10. 2001)	Euro 4 (1.10. 2006)	Euro 5 (1.10. 2009)	EEV	Euro 6 (1.01. 2014)
NOx Oxydes d'azote	14,4	9	7	5	3,5	2	2	0,4
CO Monoxyde de carbone	11,2	4,9	4	2,1	1,5	1,5	1,5	1,5
HC Hydrocarbures	2,4	1,23	1,1	0,66	0,46	0,46	0,25	0,13
PM Particules	Non mesuré	0,36	0,15	0,13	0,02	0,02	0,02	0,01

Fig : Evolution de la norme Euro

Au 1^{er} janvier 2016, le parc bus français (hors RATP) se décomposait de la façon suivante :

	Euro 0	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	EEV	Euro 6
Quantités	50	119	1587	3137	1785	2434	1986	1106
%	0,4%	1,0%	13,1%	25,8%	14,7%	20,0%	16,3%	9,1%

Fig : Répartition du parc en service selon la norme Euro du véhicule



On remarque que les véhicules €4 ou antérieurs représentent encore plus de la moitié du parc à fin 2015. Il n'y a que 9% du parc en Euro 6.

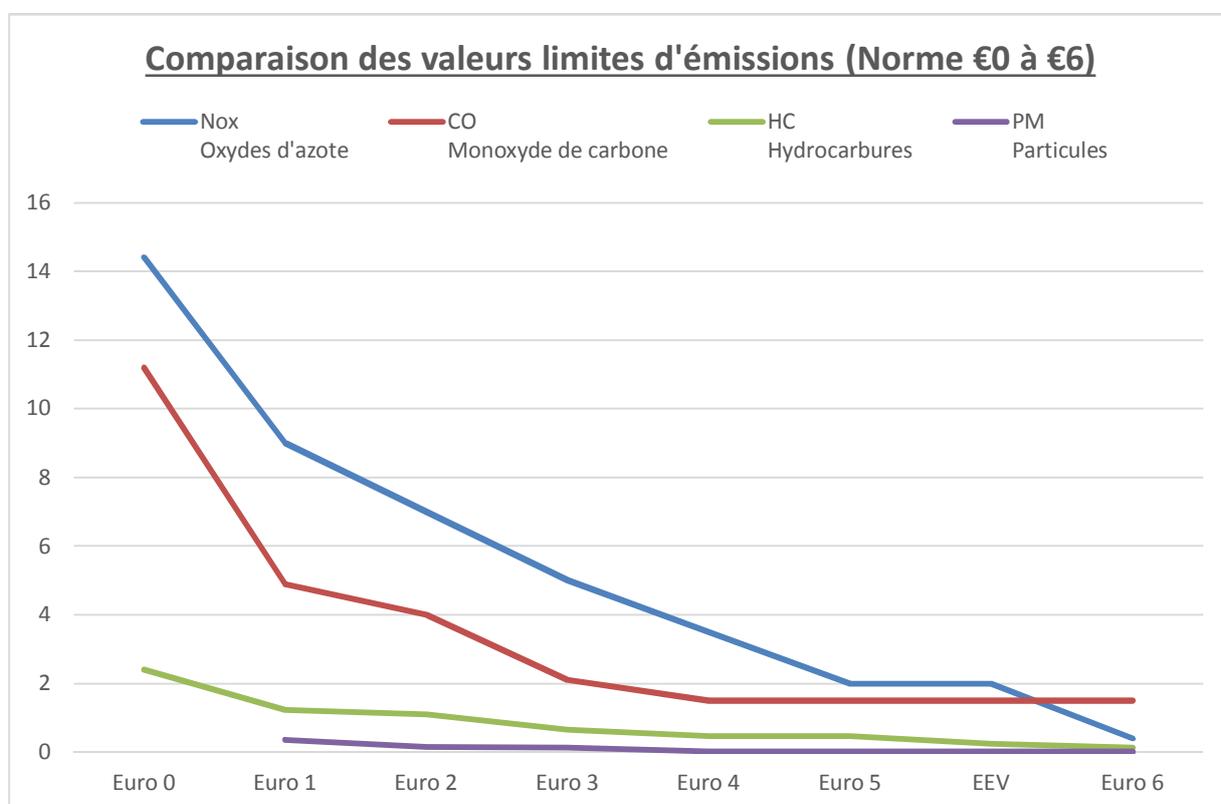


Fig : Comparaison des valeurs limite d'émissions (Normes €0 à €6)

En plus des améliorations liées à la réduction des émissions de NOx de 55 % et hydrocarbures de 25 % entre l'Euro 5 et l'Euro 6, la norme Euro 6 a permis aux constructeurs de développer des moteurs qui consomment moins de carburant. Une diminution de consommation de 5 % par rapport à l'Euro 5 était annoncée par la plupart des constructeurs. Après 2 ans d'exploitation pour les premiers Euro 6 livrés, le Labo Technique d'AGIR a constaté sur le terrain une **réduction effective de consommation de l'ordre de 5,9 %** entre les véhicules standards 12m Euro 5 et Euro 6.

b. Coût de possession d'un véhicule 12 mètres Euro 6 thermique

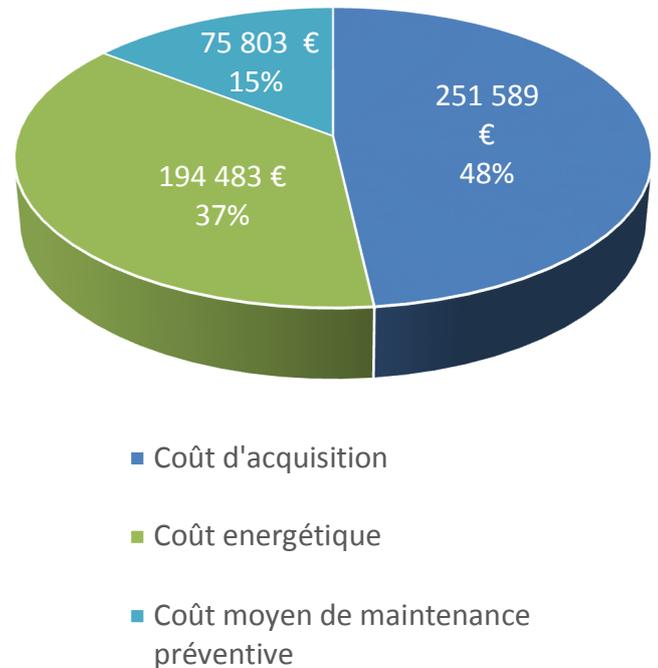
Coût moyen d'acquisition (options comprises) 251 589 € HT

- **Coût énergétique** : 194 483 €
Consommation moyenne 35,2 L / 100km, basé sur cycle SORT 2

- **Coût moyen de maintenance préventive**
 - 0,13 €/km ⇒ 75 803 € HT

- **Coût de possession total sur la durée de vie** (base SORT 2) : 521 87 € HT

Coût de possession sur 15 ans d'un véhicule thermique 12m €6 : 521 875 €



A noter que 37% du prix de possession sur les 15 ans est lié au prix du gasoil

II. Motorisation Gaz Naturel pour Véhicules

a. Principe de base

Les bus au gaz ont fait leur apparition en France au début des années 90 à titre expérimental mais c'est véritablement à partir de 1998 que les ventes de bus GNV ont progressé de manière significative.

Le gaz utilisé pour les transports publics peut être soit du gaz « naturel », composé de méthane à 93 %, soit du biogaz issu de la valorisation de déchets (fermentation de déchets ménagers, de boues d'épuration, etc.).

Le gaz est ensuite comprimé à 200-220 bars et stocké dans des bouteilles « réservoir » dans les véhicules.

Outre la réduction des Nox, Particules et Hydrocarbures, la combustion du gaz naturel ne produit également ni oxyde de soufre, ni plomb, ni poussières et peu d'oxydes d'azote.

Néanmoins, à faible vitesse, les émissions de CO et CO₂ des véhicules fonctionnant au GNV sont supérieures à celles d'un véhicule Diesel Euro 6 (cf. p15)

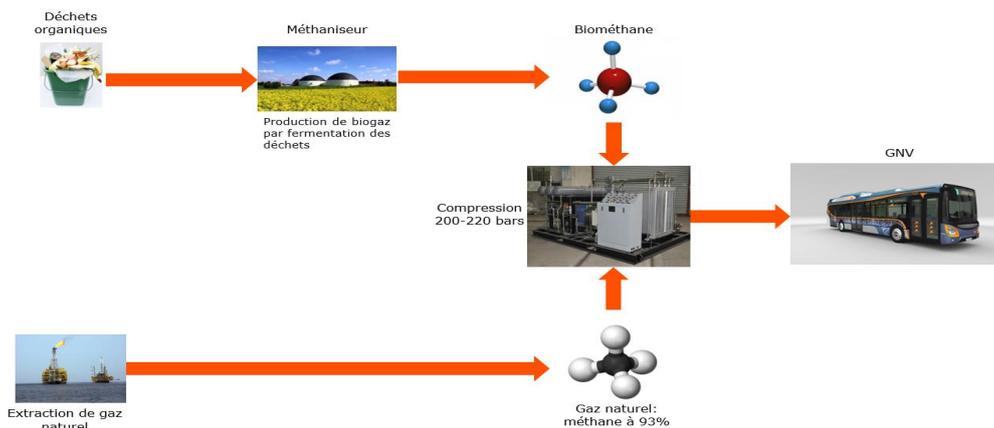


Fig : Principe de base du GNV

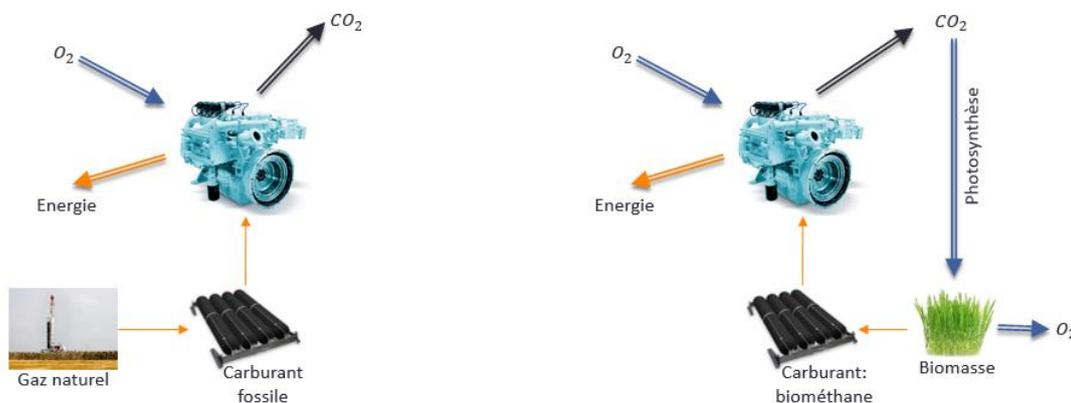


Fig : Cycle vertueux du carbone dans la combustion du biométhane

b. S'équiper en véhicules au Gaz

Un réseau décidant d'investir dans une flotte de véhicule au gaz doit prendre en compte le coût et les contraintes techniques spécifiques à l'aménagement d'un atelier/dépôt « gaz ».

Le méthane étant un gaz incolore et inodore, les atelier/dépôts doivent respecter des normes de sécurité (ventilations spécifiques, détecteur de gaz, outillages spécifiques, etc.)

De plus, une station de compression est indispensable pour assurer le remplissage en carburant des véhicules GNV. Le remplissage se fait généralement de nuit. Chaque emplacement de stationnement doit donc posséder une arrivée de gaz.



Fig : Atelier/Dépôt d'Atlanta (Tisséo - Toulouse), intégralement équipé pour les véhicules GNV

c. Les flottes gaz

Fin 2016, 2 903 véhicules circulaient au GNV, les plus grosses flottes se situant à Lille, Bordeaux, Nantes et Toulouse.

A titre d'exemple, en 2016, le réseau de Tisséo-Toulouse comptait une flotte de 248 véhicules au gaz. 50% des 24 millions de km du réseau étant effectués au gaz. Les week-ends, ce ratio passe pratiquement à 100%.

En Europe, la Russie (10 000 véhicules GNV) l'Arménie (17 300 véhicules) et surtout l'Ukraine (232 788 véhicules) disposent des flottes au gaz les plus importantes.

d. Infrastructure de charge

Le GNV nécessite la mise en œuvre d'une infrastructure dédiée de distribution. Le coût de cette infrastructure est sujet à des variations en tenant compte :

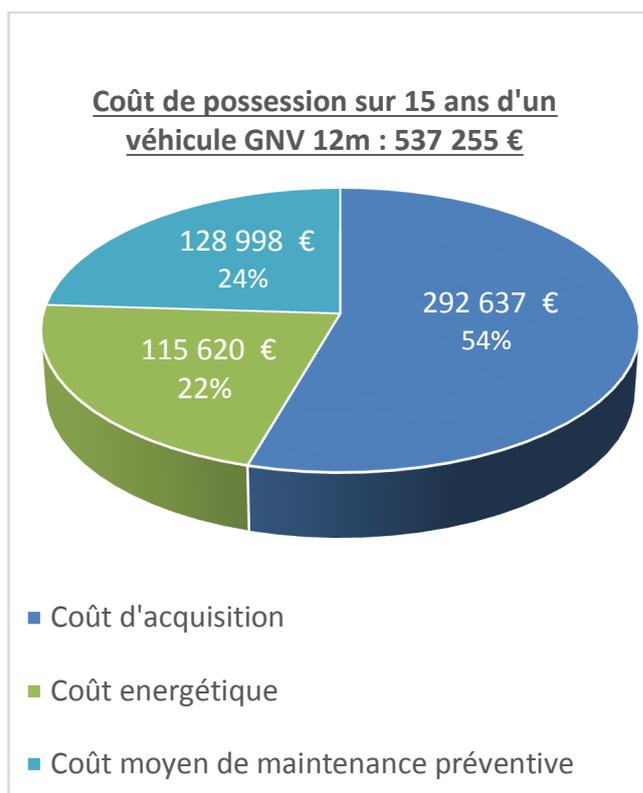
- du nombre de véhicules
- du type de charge (rapide, lente)
- de la présence ou non d'autres flottes captives publics (collecte des déchets, etc.)
- de l'ouverture ou non au public ou à d'autres flottes privées (transport de marchandises, etc.)

Pour les structures ne disposant pas à ce jour d'une installation :

- un coût de 20 000 € en moyenne par véhicule est mis en avant pour un parc de 20 bus soit un investissement de 400 000 € (source GRDF).
- d'autres solutions existent à des coûts moindres mais elles restent peu adaptées pour une flotte de transport public.

e. Coût de possession d'un véhicule 12 mètres GNV hors infrastructure

- **Coût moyen d'acquisition :**
292 637 €
- **Coût moyen énergétique :**
115 620 € (consommation moyenne 48,2 kg/100km, basé sur cycle 40% SORT1 et 60% SORT2)
- **Coût moyen de maintenance préventive :** 128 998 € soit 0,21€ /km
- **Coût de possession total :**
537 255 € HT



Sur une durée de 15 ans, les coûts d'un bus GNV sont, en moyenne, 3% plus élevés que ceux d'un Euro 6 thermique

III. Motorisation Hybride

a. Principe de base

Un véhicule hybride allie 2 voire 3 types de motorisation :

- un moteur diesel et un moteur électrique
- un moteur diesel et un moteur hydraulique
- un moteur diesel, un moteur électrique et un moteur hydraulique.

La combinaison de motorisation la plus répandue est l'hybridation diesel/électrique. Les véhicules hybrides disposent donc de deux sources d'énergie : carburant diesel et électricité.

Les premiers véhicules hybrides ont fait leur apparition en France en 2009, dans le cadre d'expérimentation. Au 1^{er} janvier 2016, ils représentent 2,4% du parc français avec des flottes importantes en région parisienne, à Dijon, à Bordeaux et à Toulouse.

Aujourd'hui, 2 types d'hybridation sont proposés sur le marché :

➤ **Hybride série**

Le moteur thermique est couplé à un générateur qui alimente un moteur électrique. L'énergie générée au freinage est récupérée et stockée dans des supercondensateurs qui peuvent la restituer. Le moteur thermique se coupe automatiquement à l'arrêt (fonction stop & start). Les supercondensateurs sont ensuite sollicités lors du redémarrage. Le moteur thermique n'est sollicité que pour fournir l'énergie nécessaire au générateur, lorsqu'il n'y a plus d'énergie électrique.

La motorisation thermique de ces véhicules est moins puissante que celles de leurs équivalents classiques.

L'intégralité de l'entraînement des roues est fournie par le moteur électrique.

➤ **Hybridation parallèle**

Le moteur thermique et le moteur électrique sont sur un même axe. Le moteur électrique assiste le moteur thermique lors des accélérations et récupère l'énergie en décélération / freinage. Le moteur thermique se met en route à partir d'une vitesse de 20 km/h environ.

Les deux moteurs fournissent de la puissance aux roues, avec la possibilité de plusieurs scénarii de répartition.

Le principal avantage de cette technologie est la réduction de la consommation de carburant ainsi que des émissions polluantes (CO₂ et NO_x) qui découle de cette optimisation de la gestion d'énergie.

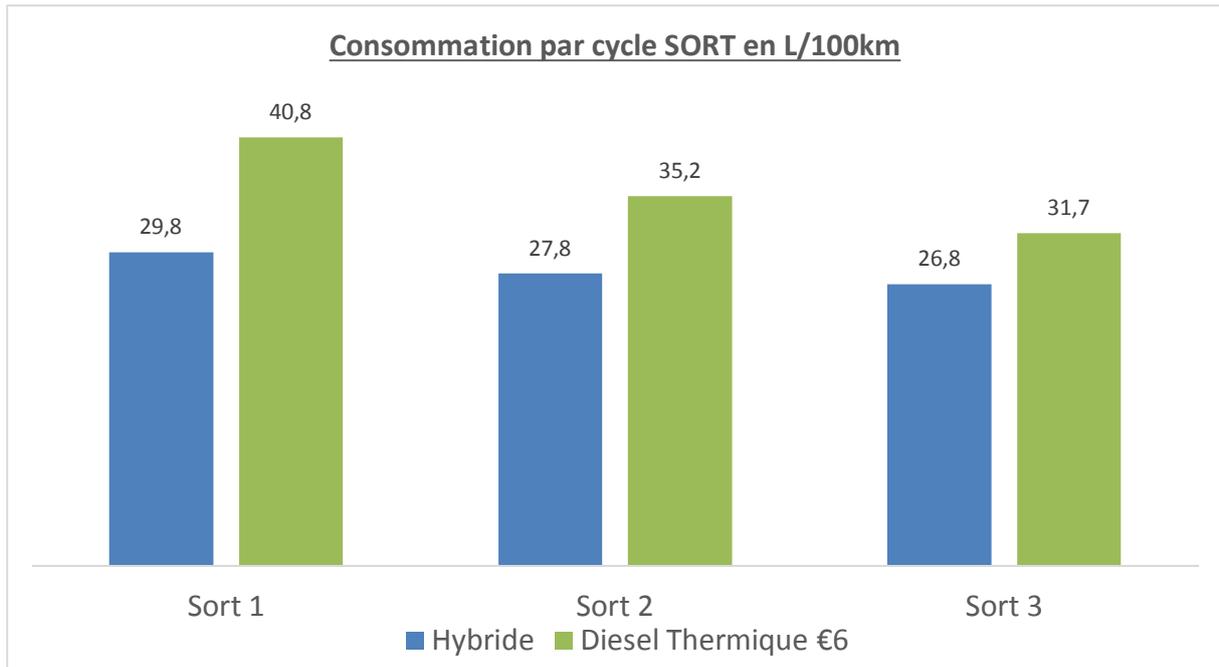
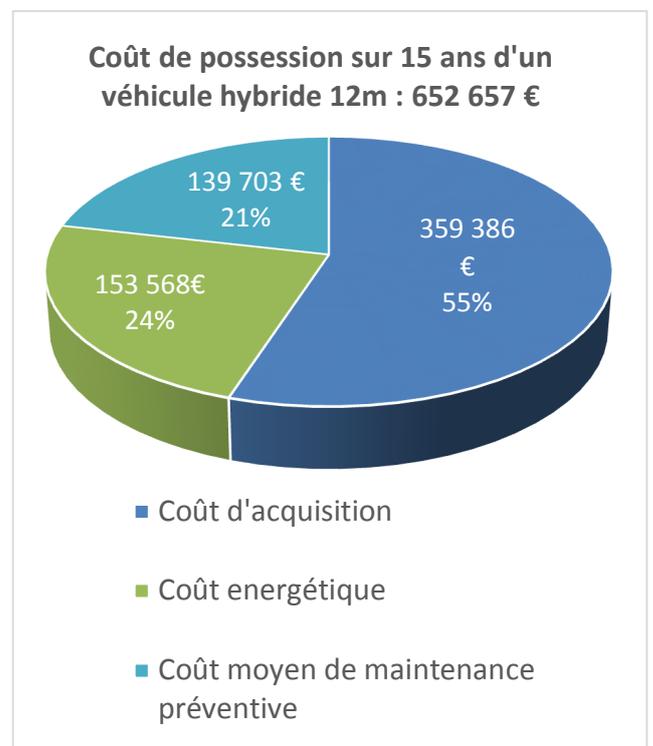


Fig : graphique comparatif des consommations par cycle SORT en fonction de la motorisation

b. Coût de possession d'un véhicule 12 mètres hybride

- **Coût moyen d'acquisition**
 - 359 386 €
- **Coût moyen énergétique :**
 - 153 568 € (consommation moyenne 27,8L/100km, basé sur cycle SORT 2).
- **Coût moyen de maintenance préventive**
 - 139 703 € soit 0,23€/km
- **Coût de possession total sur la durée de vie : 652 657 € HT**



Sur une durée de 15 ans, les coûts d'un bus hybride sont, en moyenne, 34% plus élevés que ceux d'un Euro 6 thermique

IV. Nouveaux carburants

a. Principe de base

Les nouveaux carburants permettent d'accompagner la transition énergétique. Ils permettent une réduction notable des différentes émissions de polluant (Nox, HC, CO, Particules).

Ils peuvent être classés en deux catégories :

➤ Les carburants substituables au diesel

Ces carburants fonctionnent avec un moteur identique à la technologie diesel. Cependant, en prenant en compte la réglementation et l'homologation des véhicules, il n'est pas possible, actuellement, d'intervertir les carburants durant la vie du moteur :

- Le Bio-diesel, ou B30, composé à 70% de Diesel et 30% de bio-diesel ;
- Le HVO, (Hydrotreated Vegetables Oils ou Huiles Végétales Hydro-traitées) né d'un hydrotraitement d'huiles (végétales, graisse animale, huiles usagées) avec de l'hydrogène qui permet une production d'hydrocarbure ;
- Le GTL, Gas-To-Liquid, qui consiste en la fabrication d'hydrocarbure à partir de gaz naturel. Ce carburant est autorisé en France depuis le 1er trimestre 2017.

➤ Les carburants non substituables au diesel et donc nécessitant un moteur adapté

C'est le cas par exemple de l'éthanol avec le carburant ED95, élaboré à partir de résidus de vinification (marc de raisin) ou de production sucrière (betterave) et homologué en France depuis janvier 2016. Son utilisation nécessite une étanchéité renforcée et une maintenance plus importante, ce qui augmente les coûts moyens de maintenance préventive de 20 % par rapport au véhicule Diesel Euro 6.

La consommation moyenne augmente également de 40% par rapport au véhicule Diesel Euro 6 mais compensé par un prix d'achat de carburant inférieur et une incitation fiscale avec un taux de TICPE réduit. Le coût d'acquisition moyen est identique à un véhicule Diesel Euro 6 car les technologies sont similaires.

Ces carburants nécessitent des infrastructures de stockage similaires à celles du diesel. Techniquement, elles diffèrent au niveau des matériaux utilisés puisque, pour l'éthanol par exemple, le risque de corrosion est accru. Il faut porter une attention toute particulière à l'étanchéité de la cuve et de la tuyauterie.

Ces produits sont encore en phase de développement en France, c'est pourquoi leur disponibilité ne peut être totalement assurée notamment pour des gros volumes.

Même si l'éthanol en est à ses débuts en France, il est déjà une réalité en Europe et notamment en Suède à Stockholm, depuis les années 90.

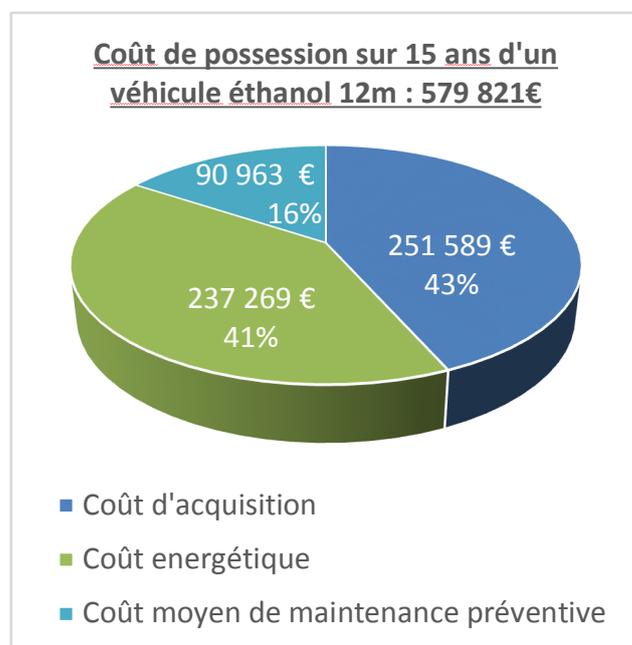
En 1990, trente bus à l'éthanol étaient testés dans la capitale suédoise permettant de parfaire la technologie (additif amélioré, conduites de carburant adaptées, etc.). Aujourd'hui, sur les 2 000 autobus en circulation, plus de 400 circulent à l'ED95.

Ce développement s'est inscrit dans une démarche volontaire de la municipalité pour atteindre un objectif de neutralité en matière d'émissions de CO2 à l'horizon 2050. Les pouvoirs publics apportent une aide financière aux sociétés de transports en commun pour concentrer leurs investissements dans des bus à carburants renouvelables, notamment à l'éthanol.

Dans les premiers temps du développement de cette énergie, l'éthanol était importé du Brésil, générant des coûts importants et un impact environnemental allant à l'encontre de l'objectif initial. La Suède, acteur du projet européen BEST (Bio Ethanol for Sustainable Transport) de 2006 à 2010, a ensuite développé la production locale d'éthanol à base de déchets recyclés de la production de pâte à papier.

b. Coût de possession d'un véhicule 12 mètres éthanol

- **Coût moyen d'acquisition**
 - 251 589 €
- **Coût énergétique**
 - 237 269 € (avec un coût de l'éthanol à 0,80€ / litre)
- **Coût moyen de maintenance préventive**
 - 90 963 €
- **Coût de possession total sur la durée de vie : 579 821 €**

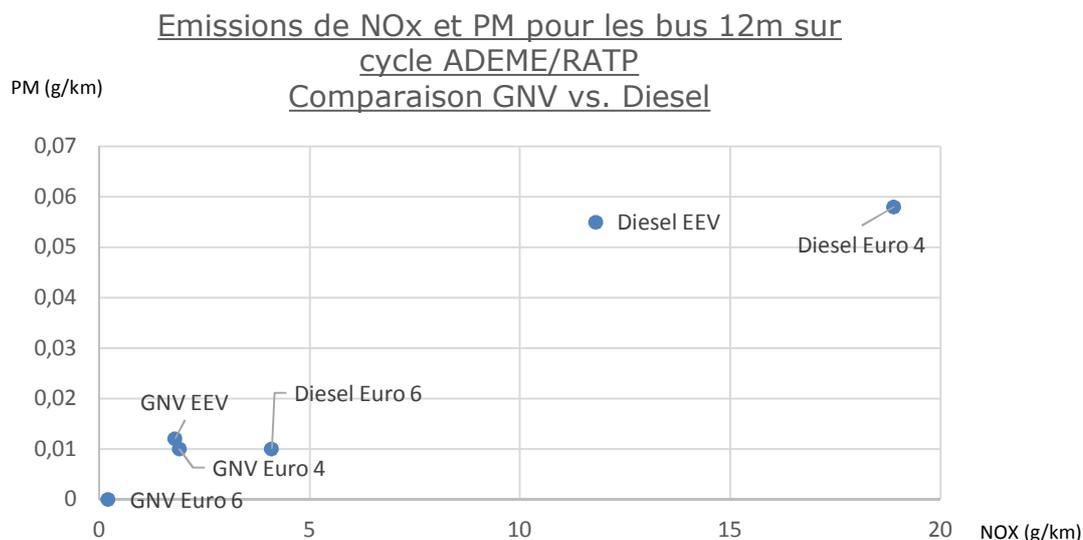


Sur une durée de 15 ans, les coûts d'un bus éthanol sont, en moyenne, 10% plus élevés que ceux d'un Euro 6 thermique

V. Synthèse des coûts

Technologies	Coût de possession sur 15 ans	Coût du véhicule pour 1 000km	Les +	Les -
Diesel €6	521 874 €	870 €/1 000km	Technologie connue et maîtrisée.	- Emissions Nox, HC, CO et particules- Image dégradée
GNV	+3 %	895 €/1 000km	Baisse des émissions, Coût énergétique.	- Emissions CO et CO2 à faible vitesse
GNV avec installation (base de 20 véhicules)	+ 7%	937 € / 1000km	Baisse des émissions, Coût énergétique.	- Emissions CO et CO2 à faible vitesse
Ethanol	+ 10 %	965 €/1 000km	Baisse des émissions, Economie circulaire.	- Consommation +40%, - Coût maintenance +20%
Hybrides	+ 20 %	1 088 €/1 000km	Coût énergétique.	- Coût de possession

VI. Focus sur les émissions polluantes

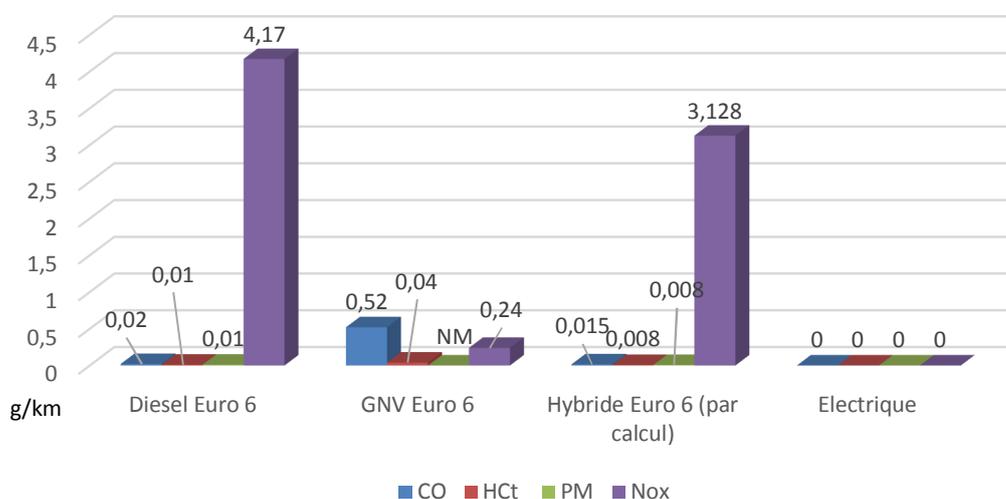


Ces résultats sont issus de tests réalisés par l'UTAC (Union Technique de l'Automobile du motorcycle et du Cycle – Organisme privé et indépendant, qui propose des services dans tous les domaines de la mobilité terrestre : réglementation et homologation, essais et expertise technique : environnement, sécurité, endurance-fiabilité, certification, etc.)

Selon l'ADEME, à faible vitesse, les émissions de CO₂ des véhicules gaz sont supérieures à celles des véhicules diesel. Cette différence tend à disparaître lorsque la vitesse moyenne augmente.

A noter par ailleurs, comme le montre le graphique ci-dessus, que les émissions d'oxydes d'azote (NOx) et particules (PM) sont bien inférieures sur les véhicules gaz que sur les véhicules Diesel.

Facteurs d'emissions par filière sur cycle ADEME/RATP
Mesures réalisées sur banc à rouleau UTAC ou VTT



VII. Motorisation Electrique

a. Principe de base

Les véhicules électriques se déplacent grâce à une chaîne de traction fonctionnant avec un moteur électrique qui peut être alimenté de trois façons :

- par la captation du courant à l'aide de perches comme pour un trolley
- par l'hydrogène
- par des batteries

Le stockage de l'énergie est assuré par des batteries d'accumulateurs au lieu du réservoir de carburant des véhicules thermiques. La puissance de ces moteurs électriques permet une utilisation urbaine.

Il existe trois stratégies d'acquisition concernant les batteries :

- Achat du pack batterie
- Location du pack batterie en full maintenance
- Véhicule en contrat d'entretien complet

La technologie des batteries a considérablement évolué ces dernières années. Elles peuvent aujourd'hui assurer une autonomie d'environ 200 km aux véhicules électriques. Cette autonomie est notamment améliorée grâce à un système de récupération de l'énergie cinétique pendant les phases de décélération ou de freinage.

L'électricité nécessite la mise en œuvre d'une infrastructure de distribution dédiée, en fonction du type de charge :

- Au dépôt, charge lente :
 - Borne individuelle. Le coût moyen des solutions actuelles est d'environ 50 000 € par véhicule
- Par opportunité, charge rapide pour relier le terminus opposé :
 - Par pantographe
 - Par induction

Les coûts de ces solutions sont proches de 350 000 € pour une station, hors génie civil.

b. La recharge en bout de ligne par pantographe

➤ Principe :

Ce système consiste à recharger un véhicule 100% électrique ou hybride électrique en bout de ligne pour lui permettre une autonomie suffisante sur la ligne exploitée.

Le véhicule se recharge donc rapidement (6 à 8 mn) à chaque terminus via un pantographe permettant des intensités électriques élevées. Plusieurs constructeurs se sont déjà lancés dans l'expérimentation des véhicules hybrides et/ou électrique rechargeables en bout de ligne.

➤ Projets en cours :

- Volvo développe un bus électrique hybride en Suède. Les réseaux de Göteborg et Stockholm participent à l'expérimentation avec, respectivement, 3 et 8 véhicules. L'autonomie annoncée par le constructeur est d'une dizaine de kilomètres.



Volvo 7900

c. Le biberonnage : la recharge à chaque arrêt

➤ Principe :

Ce système consiste à recharger un véhicule 100 % électrique à chaque arrêt. Le véhicule est équipé de supercapacités ce qui lui permet une recharge très courte (quelques dizaines de secondes) grâce à :

- Un bras articulé intégré au mobilier urbain
- Par induction au sol (enfouis sous la chaussée) ou sur le toit du véhicule

► **Projets en cours :**

- PVI (WATT) : durant l'année 2015, une navette aéroportuaire a assuré l'exploitation entre les 2 terminaux de l'aéroport de Nice. L'autobus de 12m se recharge via un bras articulé à chaque station.
- Solaris/Bombardier : la ville de Brunswick en Allemagne a mis en service commercial mi-2015 un véhicule qui se recharge par biberonnage lors de certains arrêts stratégiques le long du parcours. La charge se fait par induction haute puissance sous la chaussée.
- ABB : Le projet Tosa qui relie l'aéroport de Genève et Palexpo combine des recharges ultra rapides à certains arrêts (15 sec max) et une recharge plus importante en bout de ligne (4 min). La recharge est effectuée via un bras rétractable sur le toit du bus.
- Siemens : Ce bus articulé circulant en site propre fait le plein d'énergie à chaque station en une vingtaine de seconde grâce à un pantographe. Ce bus sera testé à Nîmes et Amiens dans les prochains mois.
- Bolloré : Bolloré développe le BlueTram. Ce véhicule est similaire à un BHNS électrique et se recharge, grâce au déploiement d'un bras automatisé, à chaque station. Il a été testé durant deux mois à Paris à la fin de l'année 2015.



Véhicule PVI WATT system de l'aéroport de Nice (à g.) et Bluetram de Bolloré (à d.)

d. La recharge par induction : le système sans contact

La recharge par induction est un système d'alimentation du véhicule sans contact, qui empêche tout risque d'électrocution. Le rendement de ce système est inférieur aux systèmes avec contact (recharge au dépôt / pantographe / biberonnage), ce qui implique un appel d'énergie supérieur pour une capacité de recharge équivalente. Ce système est également plus cher avec des coûts de mise en œuvre pouvant dépasser les 500 000 €. Ses principaux avantages sont la sécurisation de la recharge et l'absence d'impact visuel sur l'environnement et le patrimoine urbain (sites protégés, historiques, etc.)

Il existe deux types de technologies de recharge par induction :

- le véhicule s'abaisse pour s'approcher au plus près du système de recharge,
- le système de recharge se surélève pour s'approcher du véhicule.



Illustration d'un système de rechargement par induction avec véhicule Scania

e. L'Hybride – sans émission

➤ Principe :

Un nouveau type de véhicule hybride est en cours de développement par plusieurs constructeurs. Ces nouveaux hybrides auront la capacité de basculer en full électrique dans les zones « cœurs de ville » pour une courte distance (4 à 5 km). Ainsi, ces véhicules pourront être considéré comme « à faible émissions » selon les principes du décret n°2017-23 du 11 janvier 2017 sur la loi de transition énergétique.

➤ Projet en cours :

- 11 autobus standards Volvo 7900 hybrides électriques circulent sur le réseau urbain de Namur, exploité par l'entreprise TEC.

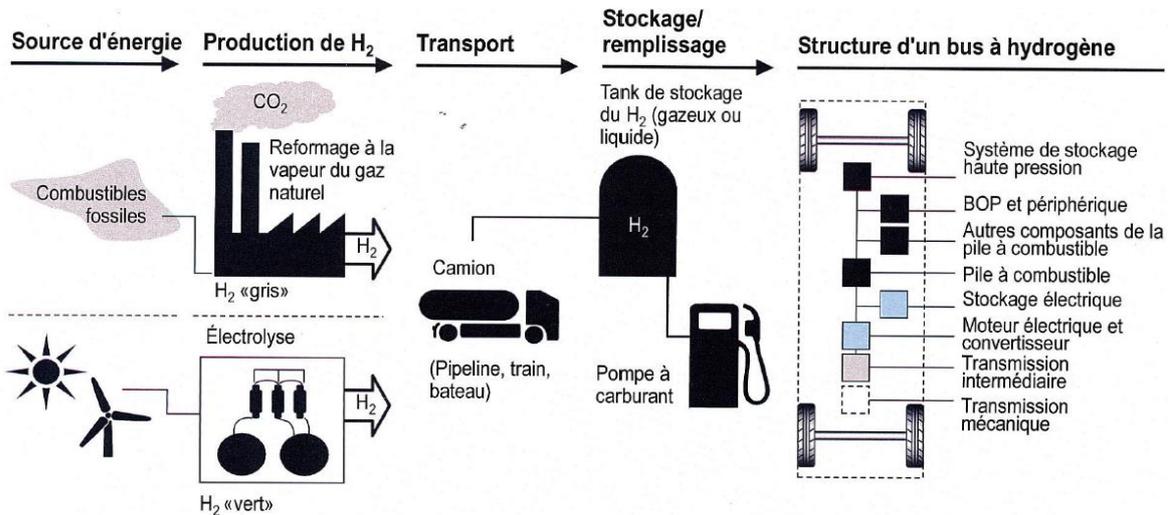
f. Les véhicules PAC (Pile à combustible – Hydrogène)

➤ Principe :

Un bus équipé d'une pile à combustible (PAC) est un véhicule électrique dont l'énergie est produite directement à bord. Du dihydrogène, sous forme gazeux, est contenu dans des réservoirs (bouteilles) dans le véhicule. L'énergie est créée en mélangeant ce dihydrogène avec le dioxygène présent dans l'air extérieur.

L'énergie est alors stockée dans une batterie Lithium-Ion qui alimente directement le moteur électrique du véhicule. Une autonomie de 400 km est annoncée par les constructeurs.

L'utilisation de la pile à combustible ne dégage que de la vapeur d'eau. C'est donc un mode de propulsion particulièrement performant en termes d'émissions de polluants.



Principe de fonctionnement – Autobus PAC

► Projets en cours :

Plusieurs constructeurs tels que Mercedes, Van Hool, Solaris ou Wrightbus ont développé des véhicules à PAC et sont aujourd'hui en exploitation en Europe (Hambourg, Oslo, Londres etc.).

De nombreux programmes de démonstration se sont déroulés en Europe au travers du projet CHIC (Clean Hydrogen In European Cities) de 2010 à 2016.

En 2015, 56 bus à hydrogène étaient en démonstration dans 9 villes européennes. Le projet JIVE (Join Initiative for Hydrogen Vehicles across Europe) qui s'inscrit sur la période 2017/2022 avec pour objectif une baisse de 25 % du prix des véhicules grâce à l'engagement de nouvelles collectivités. En atteignant un certain volume, les prix d'achat pourraient passer sous la barre des 625 000 € contre 850 000 € actuellement.



Van Hool équipé d'une pile à combustible UTC Power/Siemens

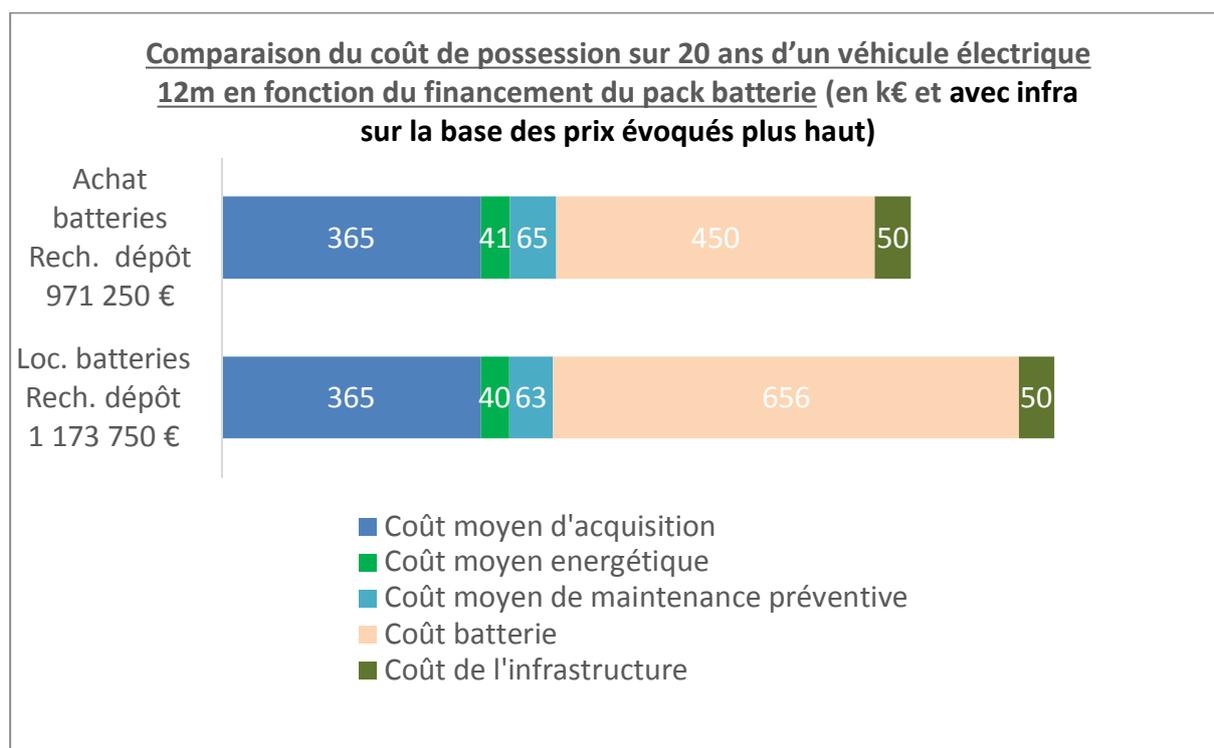
VIII. Analyse économique de différents scénarios liés au véhicule électrique

Pour définir un prix de revient, 4 scénarios ont été déterminés :

- Location des batteries et recharge au dépôt
- Achat des batteries et recharge au dépôt
- Location des batteries et recharge par opportunité
- Achat des batteries et recharge par opportunité

A noter que les coûts d'acquisitions pour cette filière sont le reflet d'une offre encore limitée. Chaque projet diffère et possède des spécificités propres dont les coûts ne peuvent être généralisés. Avec l'industrialisation des solutions, les coûts devraient devenir plus lisibles à moyen terme.

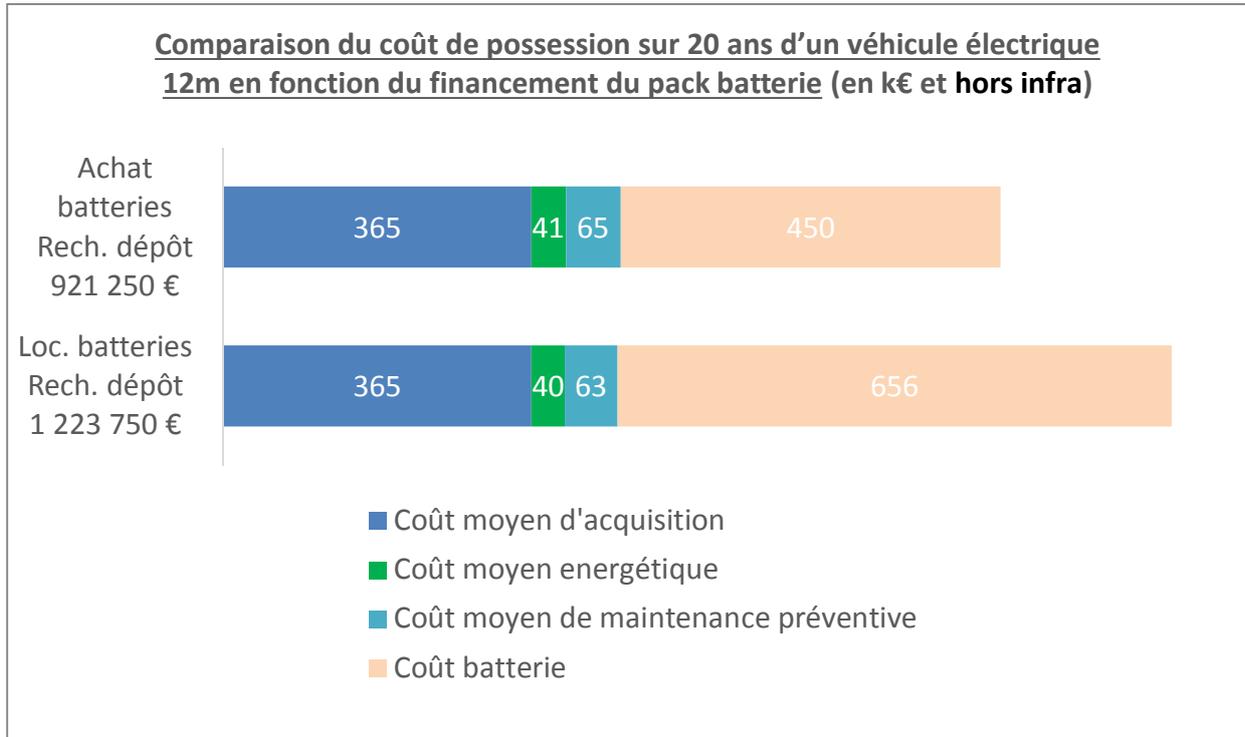
a. Achat ou location des batteries et recharge au dépôt (coût infrastructure inclus)



Le coût batterie dans le cas de l'achat prend en compte deux packs batterie sur la durée de vie du véhicule déterminée à 20 ans.

Le coût de location est plus important que celui de l'achat, car le constructeur intègre le risque industriel (remplacement du pack si nécessaire) et financier (financement de l'investissement).

b. Achat ou location des batteries et recharge au dépôt (hors infrastructure)

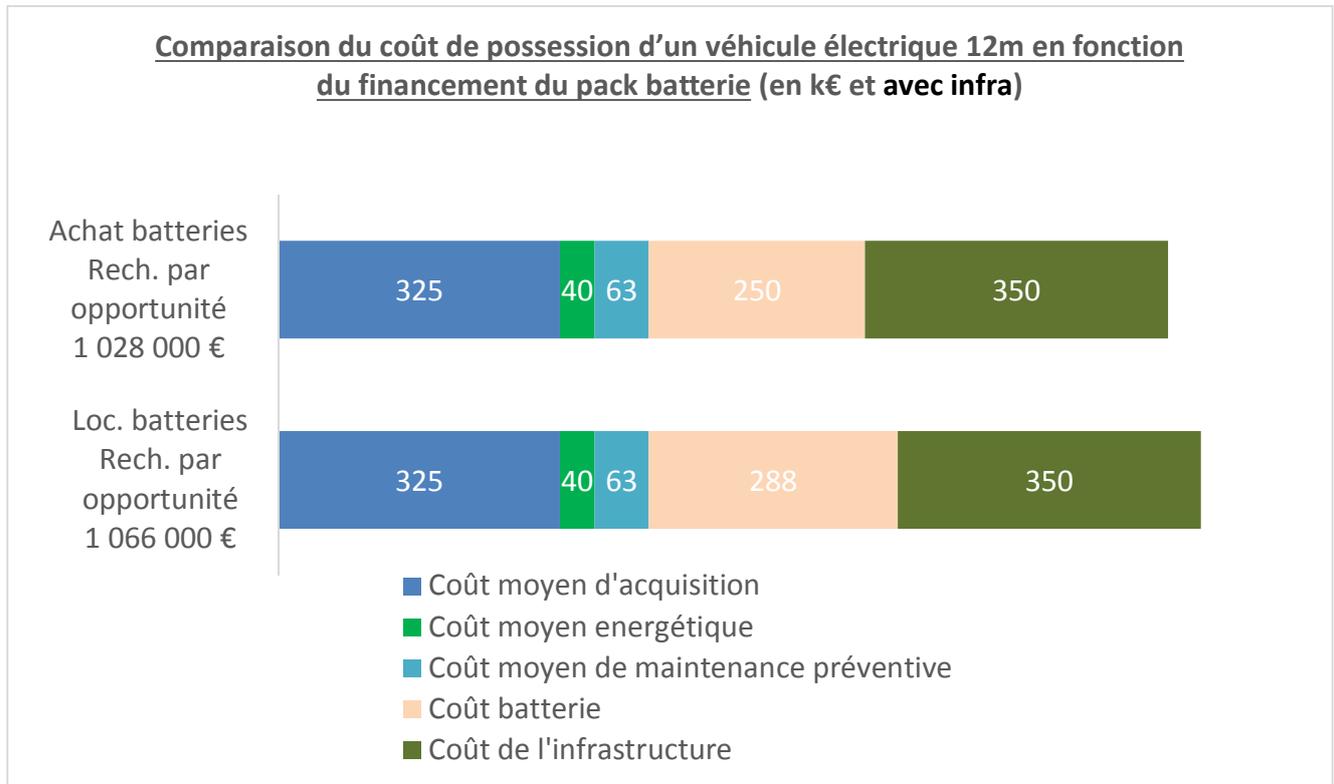


Le prix varie en fonction du mode d'acquisition des batteries. Sur 20 ans, il est provisionné deux packs batteries dans le coût d'acquisition du véhicule.

Comparaison entre achat et location :

- En choisissant l'achat, on privilégie un coût inférieur, mais l'autonomie et plus généralement les performances des batteries restant incertaines, cet investissement revêt un risque technologique.
- A contrario, la location permet de limiter le risque mais s'avère plus onéreuse sur la durée de vie du véhicule.

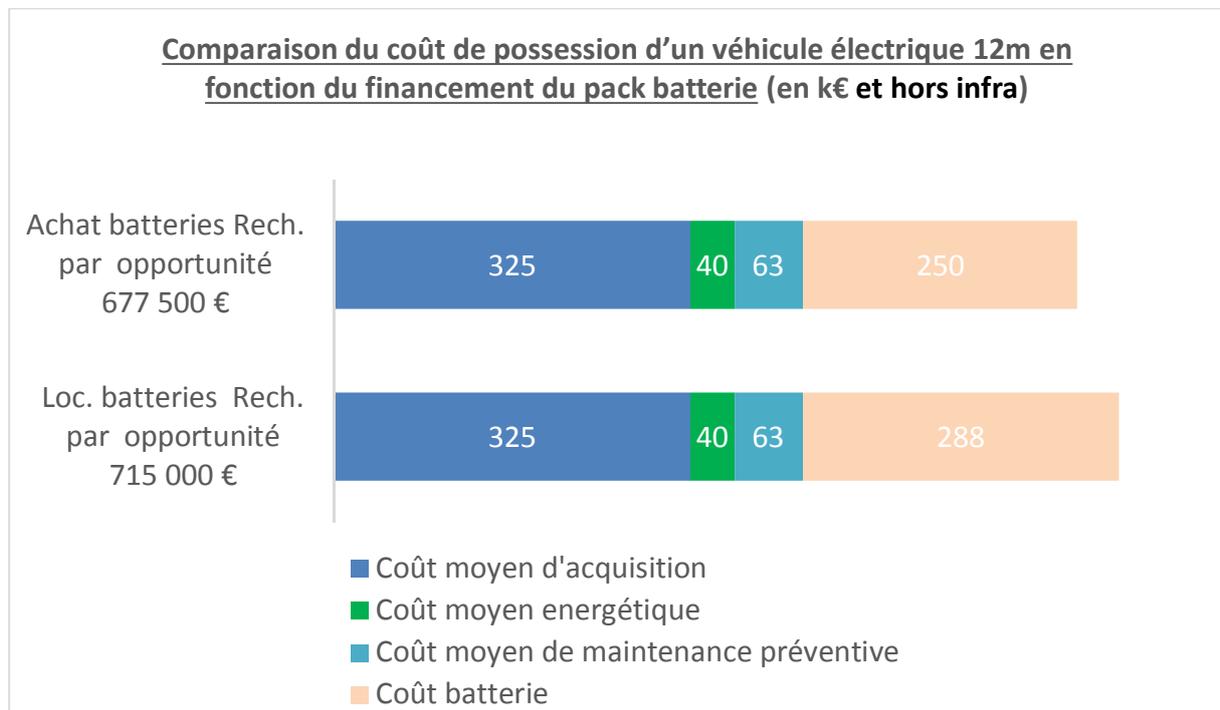
c. Achat ou location des batteries et recharge par opportunité (avec infrastructure)



On note une différence de prix concernant les batteries en fonction du type de charge. Dans le cas de la recharge par opportunité, les capacités de stockage de l'énergie sont inférieures du fait du rechargement durant le trajet ou au terminus. Le besoin est moindre et donc le prix inférieur.

Le coût de l'infrastructure à 350 000 € correspond à une station de charge, à mettre en place sur la ligne. Ce prix peut varier en fonction de la topographie, de la distance de la ligne et donc de la puissance à fournir au point de recharge. Le nombre de véhicules est aussi un paramètre important puisqu'il permet de répartir le coût de la station de charge comme le montre le graphique p28

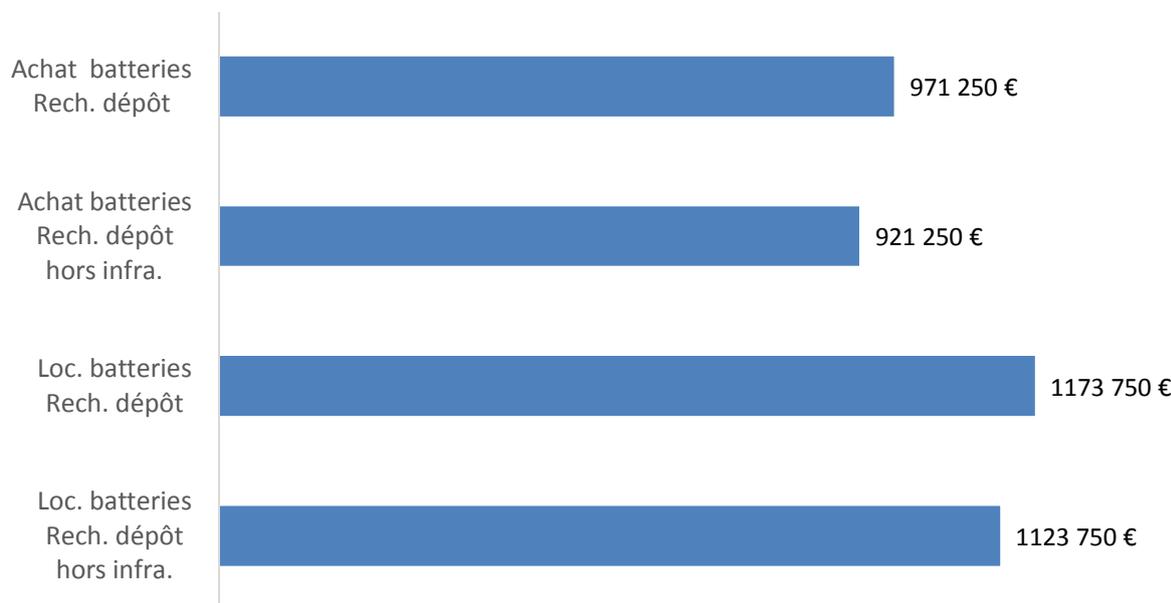
d. Achat ou location des batteries et recharge par opportu- nité (hors infrastructure)



Ce scénario est similaire à celui exposé dans le graphique b. p24. En effet, la variation du coût de possession provient des coûts liés aux batteries. La location des packs batteries, l'option la plus chère, permet de limiter le risque technologique. L'achat des packs batteries, l'option la moins chère, permet d'alléger le coût de possession au détriment de la garantie technologique.

Le graphique ci-dessous indique les coûts selon les scénarios de recharge au dépôt pour un véhicule :

Comparaison du coût de possession de véhicules électriques

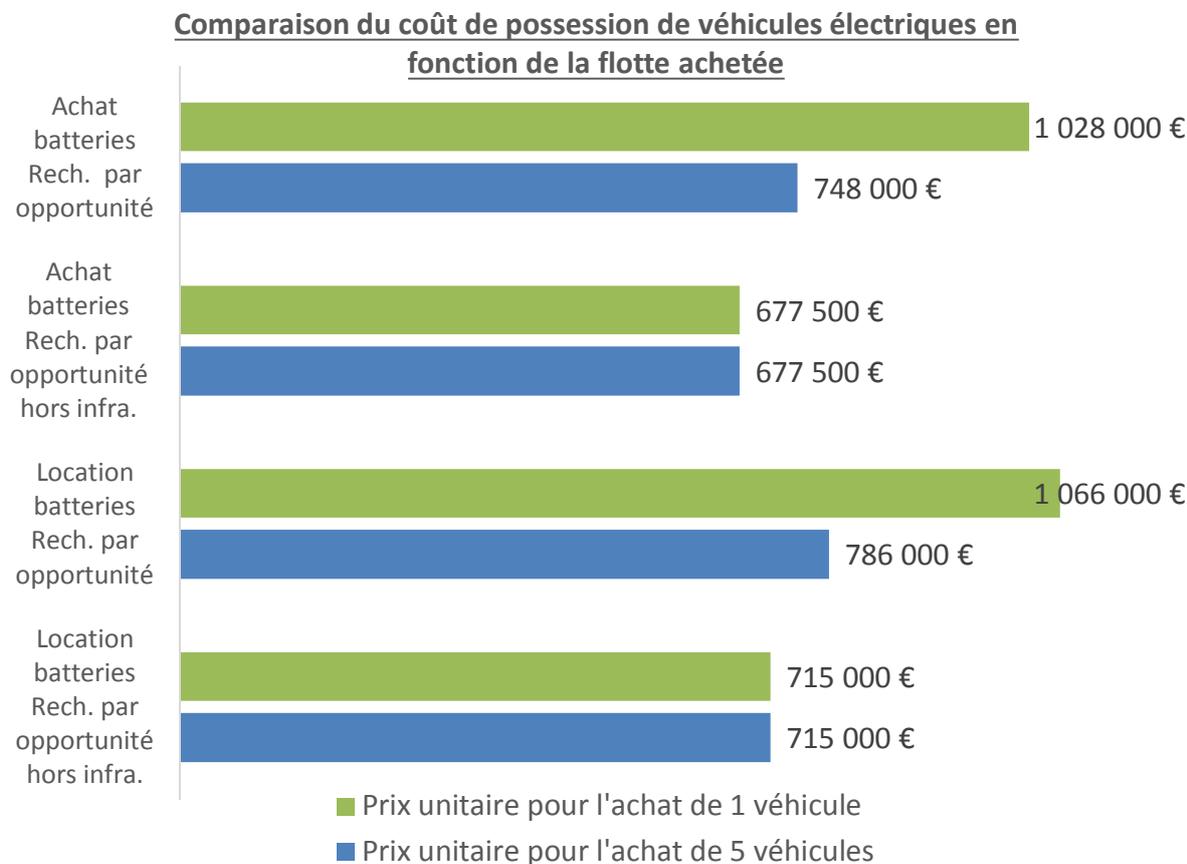


Le coût de possession d'un véhicule ne varie pas en fonction du volume acheté : il est identique pour un ou plusieurs véhicules car l'infrastructure de charge est propre à chaque unité. Cependant des solutions d'infrastructures mutualisées permettront de procéder aux chargements pilotés de plusieurs véhicules simultanément. Le but étant de délivrer l'énergie nécessaire au véhicule qui en a le plus besoin. Ce système prend donc en compte l'état de charge des autres véhicules.



Fig : Irizar i2e électrique – réseau RTM

Le tableau ci-dessous indique les coûts selon les scénarios de recharge par opportunité, pour 1 ou 5 véhicules



Le coût de l'infrastructure correspond à une borne de recharge en bout de ligne. Ce coût peut être réparti entre plusieurs véhicules, comme dans l'exemple ci-dessus avec l'achat de 5 véhicules, soit un coût de 70 000€ / Véhicule.

Attention selon le profil de la ligne, il peut y avoir la nécessité d'installer plusieurs stations, et donc une multiplication de ce coût unitaire.

Quelle solution électrique choisir ?

Quand une collectivité souhaite s'engager dans une démarche portant sur l'acquisition de solution de transport électrique, il convient de procéder à une analyse du besoin :

- Quelle est la topographie de la ligne ?
- Quelle est sa distance ?
- Quelles sont les capacités des infrastructures de transport de l'électricité présentes sur le territoire ?
- Quel niveau de confort ?

En fonction de ces premières réponses, l'orientation vers un mode de charge plutôt qu'un autre sera privilégié.

Le dimensionnement du nombre de véhicule à mettre en exploitation et des infrastructures de charge permettra une approche du coût de la solution.

La technologie évoluant et chaque territoire ayant ses caractéristiques, il est aujourd'hui difficile de donner des estimations de coûts qui soient transposables et précises.

IX. Synthèse globale :

La CATP avait choisi en 2014 de lancer une première étude comparative sur les motorisations afin de fournir aux collectivités et aux acheteurs publics une aide à la décision au-delà du lobbying des différentes filières. Depuis lors, le contexte général a fortement évolué :

- La loi sur la transition énergétique et les différents décrets d'application ont donné un cadre réglementaire
- La technologie a évolué :
 - o De nouveaux carburants sont apparus pour les moteurs thermiques
 - o Les véhicules électriques se sont diversifiés au niveau du gabarit mais aussi de la technologie des batteries et des systèmes de recharge
 - o La filière hydrogène se relance
- La CATP dispose grâce au labo AGIR de retours d'expérience de plus en plus nombreux forts des 1150 véhicules vendus depuis 2014

L'étude 2017 a ainsi permis de dégager quelques grandes tendances :

- Le diesel, bien que condamné à moyen terme, reste la technologie la mieux maîtrisée et économiquement la plus performante. A ce titre, la CATP a pu montrer à travers une étude de cas que le Diesel €6 offrait à court terme la meilleure voie pour engager la transition énergétique. Paradoxalement, parce qu'il est financièrement plus abordable, le diesel Euro 6 permet de remplacer plus rapidement les véhicules les plus anciens donc les plus polluants.
- Les nouveaux carburants substituables ou non au diesel tel que le GTL ou l'Éthanol permettent en outre une alternative de transition qu'il convient de suivre avec attention.
- Le GNV, offre un coût de possession proche du véhicule Diesel Euro 6. Les installations fixes nécessaires à son usage, notamment dans les ateliers, constituent cependant un budget conséquent prendre en compte. Le GNV présente un intérêt écologique réel même si à faible vitesse les émissions de CO et CO₂ posent problème. La filière biogaz autour de la méthanisation de proximité est enfin à suivre avec intérêt car elle pourrait constituer une évolution pertinente.
- La filière « hybride » tend à se développer plus spécifiquement dans sa version apte à circuler en mode électrique à l'intérieur zones urbaines voir des Zones à Circulation Restreinte. Cette orientation est sans doute une évolution permettant de renforcer cette filière alors que les coûts de possession sont plutôt élevés.

- Enfin la filière électrique progresse rapidement à la fois d'un point de vue technique et au niveau de son industrialisation. Pour autant, les retours d'expérience restent limités et les coûts élevés. Il faudra encore quelques années pour voir cette filière prometteuse être réellement opérationnelle. La pile à combustible (véhicules à hydrogène) constitue également une technologie complémentaire de la filière électrique pour laquelle il faudra vérifier que le regain d'intérêt se transforme véritablement en filière industrielle performante.

La CATP continuera à suivre les évolutions des différentes filières afin de garantir la meilleure information objective aux collectivités. De même, elle participera à l'amélioration des véhicules en travaillant avec ses différents fournisseurs à partir des retours d'expérience. Grâce à son expertise, la CATP est devenu un acteur de la transition écologique dans le secteur du transport public

Sources

- Consultations et marchés de véhicule de la CATP
- <http://www.transvéhicules.org/dossiers/gnv.html>
- ADEME : Panorama et évaluation des différentes filières d'bus urbains – août 2015
- Constructeurs : Bolloré, Heuliez, Irizar, Iveco, MAN, Mercedes, Scania, Solaris, Volvo, Yutong
- Producteur de carburant : Raisinor
- <http://www.cnr.fr/Indices-Statistiques/Espace-Gazole/Indicateurs-Gazole-France/#haut>
- <http://www.cetim.fr>
- <http://utp.fr/note-publication/le-parc-des-vehicules-des-services-urbains-au-1er-janvier-2016>
- <http://www.breezcar.com/actualites/article/bus-electrique-hydrogene-pile-a-combustible-France-0915>
- <http://www.transbus.org/dossiers/pac.html>
- Roland Berger – *Une vision écologique du transport – la commercialisation des bus à hydrogène en Europe* ; 15/10/2014

CENTRALE D'ACHAT DU TRANSPORT PUBLIC

Une offre diversifiée au service des réseaux de transport public

Bus et cars

Bus, cars, minibus et minicars, TPMR, trolleys, petits trains, etc Diesel et énergies alternatives.

Marques sélectionnées.

SAEIV Clé en main

- Navinéo d'Inéo Systrans



Système billettique standard



Colonne de lavage



Systèmes de lavage



Applications mobiles et sites web

- SCOOP



Billettique « légère »

- 2Place pour les lignes urbaines et interurbaines
- 2School pour les lignes scolaires



2Place



2School

Systèmes d'information voyageurs

- Seipra Score pour les girouettes
- Lumiplan pour les systèmes embarqués et au sol



Système de vidéoprotection



Carburants, lubrifiants et additifs

8 Villa de Lourcine

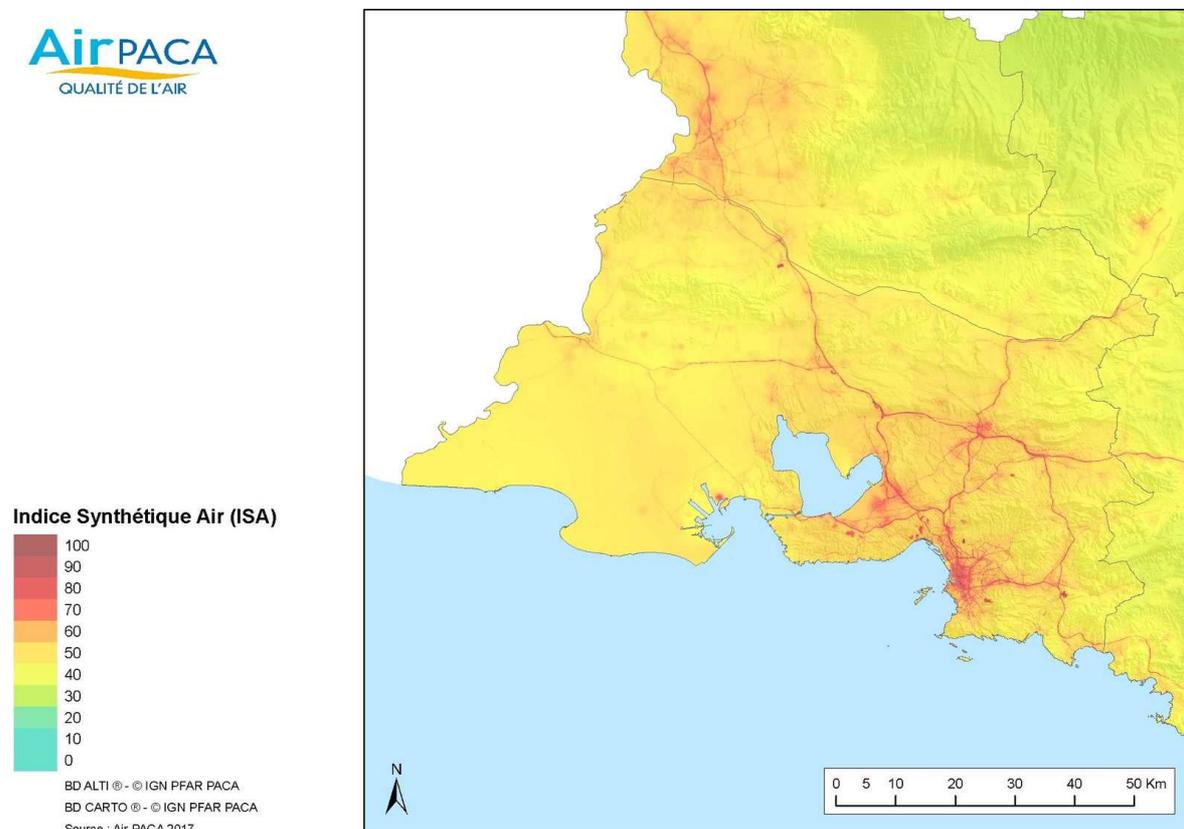
75014 PARIS

Tél : 01 53 68 04 21 <http://www.catp.fr>

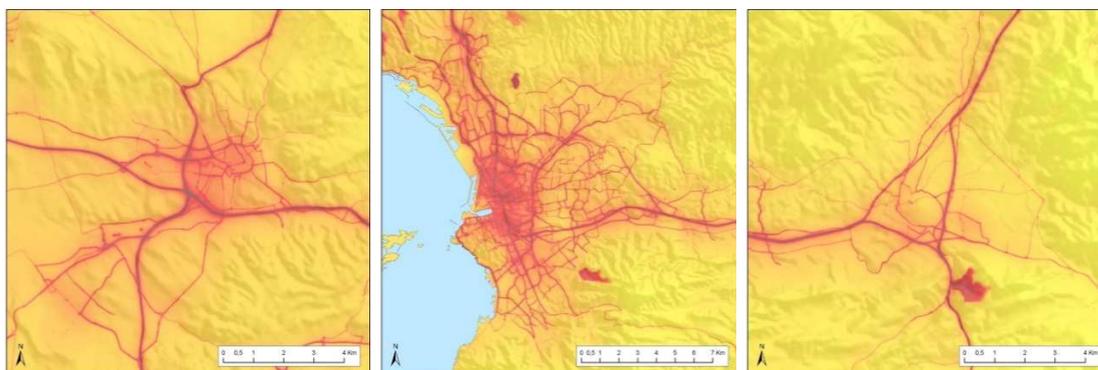
Métropole Aix-Marseille-Provence

Annexe 3 : La forte pollution chronique de l'air sur le territoire de la Métropole

L'Indice Synthétique Air (ISA) cumule les concentrations de particules fines PM10, dioxyde d'azote et ozone sur une année et permet de caractériser les zones les plus impactées par la pollution chronique.



Cartographie : exposition des populations à la pollution chronique dans les Bouches-du-Rhône (source : Air PACA 2017 – données 2015)



Cartographie : exposition des populations à la pollution chronique : zoom sur Aix, Marseille et Aubagne (source : Air PACA 2017 – données 2015)