Georges Sapy 25 Mai 2018

Peut-on négliger l'apport transitoire des voitures hybrides, rechargeables ou non, dans la course à la réduction des émissions de CO2 ?

0 – Résumé et conclusions

Il apparait de plus en plus que la pénétration des voitures 100 % électriques sera lente, en dépit des « contrats stratégiques de filière automobile » conclus entre les pouvoirs publics et les industriels : au terme de celui qui vient d'être signé le 22 mai 2018, les ventes devraient passer de 1 % actuellement à 6 % en 2022, en incluant les voitures hybrides rechargeables, les pouvoirs publics s'engageant de leur côté à faciliter, y compris fiscalement, l'installation de bornes de recharge, de 20 000 à 100 000 sur la même période. Pour atteindre en 2022 un parc estimé à 1 million de voitures électrifiées (dont 40 % d'hybrides rechargeables). Qui représenteront... 3 % des 35 millions de véhicules légers en circulation. La modestie de ce chiffre montre que la réduction des émissions de CO2 qui en résultera sera lente, très lente, trop lente, alors qu'il y a un double intérêt majeur à initier cette dernière le plus rapidement possible compte tenu : d'une part de la durée de vie des molécules de CO2 dans l'atmosphère, d'autre part des longs délais de remplacement d'un parc automobile dans son ensemble. Ce d'autant plus que les émissions du parc français sont actuellement à la hausse !

Il existe pourtant une solution, moins efficace à long terme mais beaucoup plus immédiate qui semble être négligée : l'hybridation électrique des voitures thermiques, qui n'impose aucune contrainte particulière aux utilisateurs, l'hybridation avec recharge en imposant de son côté moins que les véhicules 100 % électriques, car elle élimine les contraintes et risques d'autonomie insuffisante et n'a besoin que de structures de recharge plus légères, avec moins de recharges rapides. À condition bien sûr que ces solutions soient suffisamment efficaces en termes de réduction des émissions de CO2.

C'est à cette question que tente de répondre la présente étude, qui analyse les mesures de consommations des véhicules hybrides et hybrides rechargeables actuellement disponibles sur le marché (20 de chaque type) relevées en conditions réelles de circulation par la presse automobile, indépendamment des résultats des cycles d'homologation officiels, dont on connaît les limites et le peu de représentativité, l'objectif étant ici de coller au mieux à la réalité.

Plusieurs résultats sont mis en évidence concernant le potentiel de réduction des émissions de CO2 résultant d'une hybridation bien ciblée, comparativement aux émissions moyennes des voitures thermiques de même gamme :

- * La meilleure des voitures hybrides non rechargeables permet déjà une réduction de plus de 35 % des émissions de CO2 par rapport aux voitures thermiques de même gamme. Performance non négligeable qui devrait pouvoir être généralisée (en ordre de grandeur) à tous les véhicules hybrides,
- * Contrairement aux idées reçues, au marketing de leurs constructeurs et surtout malheureusement aux résultats des tests officiels d'homologation actuels (NEDC) toutes les voitures hybrides rechargeables ne sont pas systématiquement moins émettrices de CO2 que leurs homologues hybrides non rechargeables dans les conditions réelles de circulation : les plus performantes en émettent deux fois moins, les moins performantes deux fois plus ! Ces dernières, qui sont toutes des voitures haut de gamme surpuissantes, sont même des impasses écologiques : les plus émettrices d'entre elles (la moitié de l'échantillon) ne font pas mieux que leurs homologues diesel de même gamme en parcours réels diversifiés...
- * La faute en revient à la <u>règlementation actuelle fondée sur l'homologation NEDC qui ne délivre pas les bons signaux en homologuant SANS AUCUN MALUS des véhicules qui n'apportent aucun avantage en termes de réduction des émissions de CO2 en conditions réelles de circulation,</u>

- * La règlementation doit donc évoluer pour ne favoriser que les voitures hybrides rechargeables réellement performantes en termes de réduction des émissions de CO2, sous peine de consentir à une perte d'efficacité dans la réduction rapide des émissions du parc automobile. Sera-ce le cas de la future règlementation fondée sur l'homologation WLTP applicable à partir du 1^{er} janvier 2019 ? Réponse dans quelques mois...
- * Sous cette réserve, l'hybridation avec ou sans recharge est une solution efficace puisqu'on peut en attendre des réductions d'émissions d'au moins un tiers, pouvant selon les cas aller jusqu'à deux tiers par rapport aux véhicules thermiques actuels. Réductions très importantes quand elles sont appliquées à un parc qui pourrait grandir très rapidement à plusieurs millions de véhicules et constituer une génération intermédiaire,
- * D'autant plus que les technologies actuelles sont suffisamment matures pour permettre un déploiement sans délai. À condition que les constructeurs, français notamment, proposent (enfin !!!) dès que possible des véhicules de ce type à des coûts accessibles au plus grand nombre. Ce qui n'a rien d'impossible au vu des productions actuelles de certains constructeurs étrangers, asiatiques essentiellement. L'obligation faite aux constructeurs européens de ne pas dépasser 95 g de CO2/km sur l'ensemble de leurs gammes à partir du 1^{er} janvier 2021 devrait également favoriser cette évolution rapide...

Sommaire:

- 1 L'hybridation électrique de véhicules thermiques, en attendant la généralisation de véhicules 100 % électriques (P3)
- 2 Conditions d'une hybridation performante (P3)
- 3 Analyse des performances environnementales des principales voitures hybrides et hybrides rechargeables actuellement disponibles sur le marché (P4)
 - * Analyse des consommations des 20 hybrides étudiées (P4)
 - * Analyse des consommations des 20 hybrides rechargeables étudiées (P4)
 - * La course à la puissance est une impasse écologique... (P4)
- 4 Les impacts de la règlementation sur les choix des constructeurs (P6)
 - * La règlementation européenne concernant les émissions de CO2 des véhicules particuliers (P6)
 - * L'impact du nouveau cycle d'homologation WLTP (P6)
 - * Une homologation des hybrides rechargeables pour le moins contestable... (P7)
- 5 Des gains très variables mais globalement importants par rapport aux véhicules thermiques de même gamme... (P8)
 - * Voitures de moyenne gamme (P8)
 - * Voitures haut de gamme (P8)
 - * Interprétation des résultats et conclusions (P8)

Annexe 1 : consommations et émissions réelles des véhicules étudiés (P9)

<u>Annexe 2</u>: Simulations de circulation pour différentes répartitions entre : trajets domicile-travail et trajets loisirs (P12)

Annexe 3: Principales différences entre les cycles d'Atkinson et de Beau de Rochas (P14)

Sources:

- * Presse automobile (Auto Plus et autres)
- * Wikipédia (pour annexe 3)

1 – <u>L'hybridation électrique de véhicules thermiques, en attendant la généralisation de</u> véhicules 100 % électriques

Les voitures **hybrides** (non rechargeables) et **hybrides rechargeables** (qui n'effraient pas les consommateurs du fait de leur autonomie identique à celle des voitures thermiques et qui peuvent se contenter d'infrastructures de recharge plus légères que des voitures 100 % électriques) apparaissent comme des solutions i**ntermédiaires** permettant de **commencer à réduire sans délai les émissions de CO2**.

À condition bien sûr qu'elles s'accompagnent de réductions importantes de consommation. Est-ce bien le cas des nombreux modèles récemment apparus sur le marché de l'automobile (une vingtaine de chaque catégorie, actuellement) ? Sachant qu'il s'agit ici de véhicules dont le mode de traction principal reste thermique, l'hybridation électrique n'intervenant qu'en complément, les batteries restant en conséquence de capacités modestes, typiquement 1,5 kWh pour une voiture hybride non rechargeable et de 8 à 15 kWh pour une voiture hybride rechargeable, ce qui limite les coûts des batteries.

À l'inverse, l'hybridation fondée sur une traction principalement électrique complétée par un prolongateur d'autonomie thermique, l'offre est pour l'instant quasi-inexistante, probablement pour des raisons de coûts trop importants. Car il faut alors partir d'une batterie similaire à celle d'une voiture 100 % électrique, de capacité beaucoup plus importante, de l'ordre 40 kWh ou plus, beaucoup plus lourde et plus surtout coûteuse, qu'il faut renchérir par une motorisation thermique de prolongation.

2 – Conditions d'une hybridation performante

Une motorisation hybride étant obtenue par l'association d'une motorisation thermique et d'une motorisation électrique, les conditions de sa performance dépendent de plusieurs facteurs clés :

- * Le rendement de la motorisation thermique, qui doit être la plus élevée possible. De ce point de vue, les constructeurs les plus avancés en véhicules hybrides non rechargeables utilisent tous des moteurs à essence à cycle d'Atkinson (voir annexe 3) qui permettent d'obtenir des rendements maximums de l'ordre de 40 %, pour seulement 36 % au maximum avec un cycle classique dit de Beau de Rochas (appelé Otto en Allemagne),
- * Le rendement de la chaîne électrique, en fourniture d'énergie mais également en récupération d'énergie, qui joue un rôle essentiel puisque c'est la seule façon de charger la batterie, donc de faire fonctionner l'hybridation,
- * Un fonctionnement optimal de l'association des deux motorisations, permettant de faire fonctionner la motorisation thermique le plus souvent et le plus longtemps possible au plus près de son rendement maximal. C'est un point majeur puisque un moteur à essence classique qui peut atteindre 36 % de rendement maximal à son régime optimal a un rendement moyen de l'ordre de 25 % en conditions réelles de circulation, du fait des changements de régime qui l'éloignent de son fonctionnement optimal. La qualité de la gestion conjointe des deux motorisations en fonction des conditions de circulation et des sollicitations du conducteur est alors un point clé,
- * Enfin, une voiture hybride est une voiture comme... une autre! La réduction de sa consommation, surtout sur autoroute et accessoirement sur route, passe par conséquent par un très bon coefficient de pénétration dans l'air (faible Cx) mais aussi par un faible maître couple (faible SCx, au total). Une faible masse est également un atout, même si l'énergie cinétique de la voiture est récupérée au ralentissement. Car elle ne l'est jamais complètement. Donc, plus la masse est importante, plus la perte entre l'énergie de mise en vitesse et l'énergie récupérée est importante.

Ces différents paramètres orientent clairement vers les berlines, au détriment des monospaces et SUV, dont les SCx et les masses sont nécessairement plus importants... Mais permettent a contrario d'installer plus facilement des batteries de plus grande capacité, donc de passer plus facilement à des voitures hybrides rechargeables capables de rouler quelques dizaines de km en mode électrique pur.

3 – <u>Analyse des performances environnementales des principales voitures hybrides et</u> hybrides rechargeables actuellement disponibles sur le marché

Cette étude s'appuie sur les enquêtes récemment réalisées par la revue automobile **Auto Plus** qui a mesuré de façon indépendante les consommations des principales voitures hybrides et hybrides rechargeables actuellement sur le marché (20 de chaque catégorie) dans deux types de circulation représentatives d'une circulation réelle à la fois **en ville** et sur route et autoroute, en tenant compte des limitations de vitesse et des arrêts aux péages dans ce dernier cas. Ce qui, combiné aux parcours en ville, permet de définir une consommation moyenne **mixte**.

Les résultats de ces mesures sont présentés en annexe 1 :

- * Tableau 1 pour les voitures hybrides : consommations en ville et consommation mixte,
- * Tableau 2 pour les voitures hybrides rechargeables : consommation en ville et consommation mixte lorsque la batterie a été vidée, complétée par la mesure de l'autonomie réelle en mode électrique pur.

Ces résultats sont également comparés à deux autres séries de résultats :

- * Tableau 3 pour les consommations des **berlines essence** de la gamme de la **Prius IV**, l'hybride la plus sobre du marché, qui en constitue donc la référence,
- * Tableau 4 pour les consommations des voitures diesel de la même gamme que les hybrides rechargeables.

> Analyse des consommations des 20 hybrides étudiées (valeurs en I/100 km)

- * Les consommations en ville s'échelonnent d'un minimum de 3,7 à un maximum de 7,8, pour une moyenne de 5,6. Ce qui est un résultat assez satisfaisant si l'on excepte deux cas qui égalent ou dépassent 7. Ce résultat reflète avant tout la performance de récupération de l'énergie,
- * Les consommations mixtes s'échelonnent d'un minimum de 4,6 à un maximum de 8,9, pour une moyenne de 6,1. Ce qui est encore un résultat assez satisfaisant si l'on excepte cinq cas qui égalent ou dépassent 7. Ce résultat reflète en outre les qualités aérodynamiques des véhicules,
- * Si maintenant l'on compare la consommation mixte de la meilleure voiture hybride, la TOYOTA Prius IV, soit 4,6 à la moyenne des consommations mixtes de berlines à essence qui lui sont équivalentes en taille, masse et puissance, soit 7,3 (Tableau 3) on peut se faire une idée du potentiel d'économie de l'hybridation des berlines « compactes » à essence. L'économie moyenne de carburant peut en effet atteindre :

$$7,3 - 4,6 = 2,7 / 7,3 \approx 37 \%$$
 (par rapport à la moyenne actuelle)

Ce qui est considérable si on applique ce pourcentage à un parc important. Car il n'y a aucune raison pour que d'autres constructeurs, français notamment, ne fassent pas aussi bien...

Analyse des consommations des 20 hybrides rechargeables étudiées (valeurs en I/100 km)

Il faut commencer par séparer ces véhicules en deux catégories : ceux qui sont directement dérivés de voitures hybrides non rechargeables (la TOYOTA Prius IV, la HYNDAI Ioniq Plug-in et le KIA Niro Plug-in) et tous les autres, qui n'ont pas d'équivalent direct en hybride. Ceci pour une raison simple : les trois voitures dérivées d'hybrides non rechargeables conservent des consommations inférieures à celles de ces dernières même quand elles ont vidé leurs batteries. Et leur autonomie en électrique pur est conséquente (de l'ordre de 40 km) ce qui leur procure un double avantage écologique.

Par contre, TOUTES les autres ont des consommations nettement plus élevées que celles des hybrides non rechargeables dès que leur batterie est épuisée. Ceci ressort clairement des chiffres suivants :

- * Les consommations en ville s'échelonnent d'un minimum de 3,7 à un maximum de 12,2 pour une moyenne de 8,3 (moyenne hors des trois voitures dérivées d'hybrides). Et ces consommations égalent ou dépassent 7 dans 12 cas sur 19, ce qui est un résultat bien moins bon que celui des hybrides non rechargeables,
- * Les consommations mixtes s'échelonnent d'un minimum de 4,4 à un maximum de 11,9, pour une moyenne de 8,8 (moyenne hors des trois dérivées d'hybrides). Et ces consommations égalent ou dépassent 7 dans 14 cas sur 19, ce qui est à nouveau un résultat bien moins bon que celui des hybrides non rechargeables,
- * L'autonomie électrique apportée par les batteries rechargeables n'est pas toujours au rendez-vous : celle-ci s'échelonne d'un minimum de 18 km à un maximum de 50 km, pour une moyenne de 30 km, 4 cas sur 19 se situant entre 18 et 20 km : dérisoire pour ces derniers...
- * Si maintenant l'on compare les consommations **mixtes** des hybrides rechargeables **ayant vidé leurs batteries** (moyenne de **8,8**) à celles de véhicules **diesels** des mêmes gammes en taille, poids et puissance, on constate que les diesels font... mieux en moyenne : **7,8** (Tableau 4) !

Ces résultats sont d'autant plus décevants qu'ils concernent majoritairement des véhicules haut, voire très haut de gamme, qui mesurent près de 5 m de long, pèsent en moyenne de 2 à 2,5 tonnes et ne sont en aucun cas les mieux adaptés pour circuler en ville où ils pourraient tirer profit de leur autonomie purement électrique. Ce sont en réalité majoritairement de grandes routières (13 sur 19 sont de catégorie 3 et 3+, voir Tableau 2) destinées aux longs voyages, durant lesquels les 30 km moyens en électrique pur ne pèseront pas grand-chose...

Il y a donc là une inadéquation flagrante entre les caractéristiques de ces hybrides rechargeables et leur usage ! Qui conduit à s'interroger sur la pertinence même de ces véhicules dans une optique de réduction massive des émissions de CO2...

La course à la puissance est une impasse écologique...

Comment la consommation évolue-t-elle quand la puissance des véhicules augmente ? Il va sans dire qu'elle augmente en moyenne, mais de combien ? Les graphiques des consommations des différents types de véhicules sont représentés en annexe 1 sur les Figures 1 (voitures hybrides), 2 (voitures hybrides rechargeables) et 3 (voitures diesel de la gamme des voitures hybrides rechargeables). Ils confirment dans tous les cas, ce qui n'est pas surprenant, une augmentation de la consommation avec la puissance. Ce qui signifie qu'il n'y a pas de « solution technologique » miracle à attendre, les lois de la physique s'imposant : la technologie ne permettra pas de transporter un humain de 75 kg dans un véhicule de 2,5 tonnes sans consommer beaucoup d'énergie !!!

Utiliser des puissances de plusieurs centaines de ch (7 sur 19 ont plus de 300 ch dont 4 dépassent les 400 ch !) est donc à l'évidence une impasse écologique : l'expérience actuelle des voitures hybrides rechargeables ou non les plus sobres, montre que des véhicules ne dépassent pas 150 ch et 1,5 tonne (ordres de grandeur pour fixer les idées) devraient pouvoir répondre à la majorité des besoins de mobilité et constituer le gros de futurs parcs permettant des réductions massives des émissions de CO2.

Pour revenir aux consommations batteries vides, élevées voire très élevées, des voitures hybrides rechargeables de l'échantillon, on peut penser qu'elles ne se comportent pas comme de simples hybrides quand elles ont vidé leur batteries, autrement dit qu'elles ne tirent pas correctement partie de l'association de leurs chaînes électriques et thermiques. Cette hypothèse tenant à deux raisons :

- * Les trois voitures qui ont des équivalents hybrides non rechargeables (la TOYOTA Prius IV, la HYNDAI Ioniq Plugin et la KIA Niro Plug-in) **font toutes mieux en version rechargeable après avoir épuisé leur charge initiale.** Ce qui peut logiquement s'expliquer par le fait que leur capacité accrue de stockage d'électricité permet à leurs chaînes électriques de davantage se substituer à leurs motorisations thermiques,
- * Le fait que les **autres** hybrides rechargeables **fassent moins bien que des motorisations... diesel !** Tout semble donc se passer **comme si elles se comportaient comme de simples voitures à essence** lestées par le poids de leurs chaînes électriques quand leur batterie est vide (elles fonctionnent toutes avec ce carburant, sauf une).

Pourquoi alors les constructeurs de véhicules haut de gamme lancent-ils ces monstres de puissance qui, non seulement constituent une impasse écologique, mais sont pour la plupart d'entre eux voués à rester des véhicules de niche, compte tenu de leurs prix (de 70 000 à 120 000 €, voire parfois beaucoup plus) ?

La raison profonde est peut-être à chercher du côté de la règlementation...

4 – Les impacts de la règlementation sur les choix des constructeurs

La règlementation européenne concernant les émissions de CO2 des véhicules particuliers

Le Parlement européen a voté en 2014 la règlementation actuelle qui impose aux constructeurs automobiles commercialisant des véhicules dans l'Union d'atteindre dans leurs gammes, avec quelques ajustements selon les situations, un niveau moyen de 95 grammes de CO2 émis par kilomètre d'ici le 1er janvier 2021.

Si les constructeurs ne parviennent pas à 95 g (soit l'équivalent d'une consommation de 4,1 litres d'essence ou de 3,6 litres de gazole aux 100 km), ils devront en principe s'acquitter de 95 euros par voiture et par gramme de CO2 excédentaire. Cette somme, appliquée à des milliers de véhicules pouvant représenter des pénalités potentielles considérables...

Depuis ce vote du Parlement européen, le scandale du « dieselgate » a éclaté (moteurs diesels truqués du groupe Volkswagen). Ses conséquences ont contribué à détourner les consommateurs de cette technologie. Ajouté à la mode des SUV, il en résulte des augmentations des émissions de CO2...

Des assouplissements ont alors été décidés à l'instigation du Conseil des ministres de l'UE : en 2020, seuls 95 % des véhicules neufs produits par chaque constructeur seront pris en compte, leur permettant d'exclure les modèles émettant le plus de CO2. Ce n'est qu'à partir du 1er janvier 2021 que la totalité de la production devra être comptabilisée.

Autre concession valable jusqu'en 2023 : si une voiture rejette moins de 50 g/km de CO2 (cas des électriques ou des hybrides rechargeables), elle sera décomptée pour... deux voitures, tout au moins dans un premier temps, sans que des quotas obligatoires de véhicules à émissions nulles ou faibles soient imposés par ailleurs.

Tout cela est donc de nature à inciter les constructeurs, surtout les spécialistes des grosses voitures fortement émettrices de CO₂, à inclure dans leurs catalogues des voitures électriques et hybrides rechargeables dans le but de ramener leurs émissions moyennes au-dessous de 95 grammes de CO₂ par kilomètre...

L'impact du nouveau cycle d'homologation WLTP

Ce nouveau cycle est entré en vigueur depuis le 1er septembre 2017 pour tous les **nouveaux modèles** de véhicules particuliers mis sur le marché à cette date et s'imposera à tous les **véhicules neufs** immatriculés à partir du 1er janvier 2019. Or, il plus contraignant, car plus proche des conditions réelles de circulation, que l'ancien cycle NEDC. Ce qui a toutes chances **d'augmenter mécaniquement les émissions de CO2 mesurées pour la plupart des véhicules**. Les constructeurs européens sont semble-t-il inquiets à cet égard ! **Et cela impactera également les montants des malus qui s'appliqueront en France au 1er janvier 2019...** Ce qui concernera bien sûr les futurs acheteurs au premier chef, mais perturbe aussi dès maintenant les constructeurs dans leurs prévisions de ventes. Il est cependant fortement probable que le barème du malus sera réévalué à la baisse, au moins temporairement, pour éviter une explosion des montants, mais aucune information n'a filtré pour l'instant, le gouvernement ne s'étant pas encore prononcé sur ce point. Selon la presse automobile, certains constructeurs européens semblent aussi s'interroger sur la pérennité des modalités actuelles d'évaluation des émissions de CO2 des voitures hybrides rechargeables... Car elles posent effectivement question.

Une homologation des hybrides rechargeables pour le moins contestable...

Mieux qu'un long discours, un exemple concret éclairera le sujet : celui de la Mercedes GLE 500e 4 Matic, lanterne rouge de l'échantillon d'hybrides rechargeables étudié par Auto Plus, avec ses consommations réelles de

12,2 en parcours urbain et **11,9** en parcours mixte, lorsqu'elle a vidé ses batteries au bout de **18 km** seulement (30 km selon données constructeur, mais 20 km réels mesurés par une autre revue automobile, Motor legend, ce qui valide tout à fait les 18 km mesurés par Auto Plus).

Si maintenant l'on compare ces chiffres à ceux de son homologation selon l'ancien cycle NEDC, on obtient les résultats suivants :

Type de mesures	Selon cycle	Mesures réelles Auto Plus
	d'homologation NEDC	batterie vide
Consommation mixte (I/100 km)	3,3	11,9
Émissions de CO2 (g/km)	78	≈ 280 (*)
Autonomie sur batterie seule (km)	30 (donnée constructeur)	18

(*) Calcul au prorata de 11,9/3,3

Le moins que l'on puisse dire est que l'homologation ne reflète en rien la réalité! Ce véhicule de 2,5 tonnes n'ayant d'évidence strictement rien d'écologique dès qu'il a vidé sa batterie, ce qui intervient très vite sur un parcours Paris-Côte d'Azur ou même Paris-Deauville pour lequel il a été conçu... Ce résultat interroge clairement sur la pertinence de la règlementation d'homologation des véhicules hybrides rechargeables...

Le résultat provient du fait que le cycle d'homologation NEDC ne prévoit qu'une seule phase, alors qu'il devrait logiquement en comporter deux : la première pour mesure l'autonomie électrique pure (exprimée en km) la seconde pour mesurer la consommation de carburant au-delà, lorsque la batterie est vide. Ce qui serait en outre pédagogique pour le conducteur : il saurait si son trajet quotidien, domicile-travail notamment, est réalisable sur la seule autonomie de la batterie. Et connaitrait ensuite la consommation de sa voiture pour les longs voyages.

Au lieu de quoi les deux phases ont été confondues par un artifice de calcul, pour semble-t-il disposer d'un chiffre unique : la consommation mesurée officiellement l'est avec une batterie chargée à fond sur une distance égale à l'autonomie électrique théorique du véhicule, à laquelle le législateur ajoute arbitrairement une distance de 25 km. Dans l'exemple ci-dessus, le chiffre officiel de 3,3 litres aux 100 km signifie qu'au-delà des 30 km d'autonomie électrique théorique, parcourus sans brûler une goutte de carburant, la voiture a consommé 7,6 l/100 km sur les 25 kilomètres restants du cycle, lors de son homologation. Ce qui confirme en outre au passage la sous-estimation systématique des consommations du cycle NEDC...

L'estimation des consommations **réelles** est en outre rendu très complexe par le fait qu'elles sont **très sensibles à** l'usage du véhicule, comme le montrent les **simulations** réalisées en annexe 2 (Tableaux 5 à 10) qui, en dépit d'un inévitable arbitraire résultant des choix retenus, permettent néanmoins de dégager des tendances, notamment :

- * Dans le cas évoqué ci-dessus (Mercedes GLE 500e 4 Matic) la consommation réelle varie de 6,9 à 10,6 selon l'usage et le nombre de recharges journalières (une ou deux selon les cas) pour une moyenne générale (calculée sur 5 simulations différentes) de 8,8. On est donc à des années-lumière des 3,3 de l'homologation NEDC...
- * Dans tous les cas de figure, les véhicules hybrides rechargeables les plus gourmands font nettement moins bien que la meilleures des hybrides non rechargeable. Certes, ces véhicules ne jouent pas dans la même gamme, mais si l'on privilégie la réduction des émissions de CO2, le choix est clair,
- * Inversement, les voitures hybrides rechargeables actuellement les plus performantes (autonomie en électrique pur de **40 km** environ, consommation inférieure à **7** une fois la batterie vidée) sont dans tous les cas plus performantes que la meilleure des hybrides non rechargeable, ce qui est parfaitement logique,
- * Pour les trajets domicile-travail, la possibilité de recharger la batterie sur le lieu de travail pour le trajet de retour a un impact très important sur la diminution des émissions de CO2, une autonomie électrique pure supérieure ou égale à la distance domicile-travail étant évidemment la situation idéale dans ce cas.

5 – <u>Des gains très variables mais globalement importants par rapport aux véhicules</u> thermiques de même gamme...

Les comparaisons qui suivent sont issues des résultats des tableaux 3 et 4 (annexe 1) et 10 (annexe 2).

> Voitures de moyenne gamme

Véhicule	A : Meilleur	B : Hybride	Meilleur	Voiture
	hybride	rechargeable	hybride non	« moyenne »
Emissions	rechargeable	« performant »	rechargeable	à essence
Emissions moyennes de CO2 (g/km)	58	90	107	169
Réduction des émissions de CO2 (%)	- 66 %	- 47 %	- 37 %	100 %

Voitures haut de gamme

Véhicule	Meilleur hybride non	C : Hybride rechargeable	D : Hybride rechargeable le	Voiture « moyenne »
Emissions	rechargeable	« moyen »	moins performant	diesel
Emissions moyennes de CO2 (g/km)	107	125	204	206
Réduction des émissions de CO2 (%)	- 48 %	- 39 %	- 1 %	100 %

> Interprétation des résultats et conclusions

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de ces résultats concernant les **réductions des émissions de CO2** que les voitures hybrides, rechargeables ou non, sont susceptibles d'apporter, par comparaison aux émissions moyennes des voitures thermiques de même gamme :

- * La **meilleure** des voitures hybrides **non rechargeables** permet déjà une réduction de l'ordre de **37** % qui devrait pouvoir être **généralisée à d'autres véhicules hybrides**, au moins en ordre de grandeur,
- * Les voitures hybrides rechargeables les plus performantes sont celles qui sont directement dérivées de voitures hybrides non rechargeables. Elles permettent en moyenne sur des parcours variés des réductions d'émissions bien supérieures pouvant atteindre 47 % et même 66 % pour l'hybride rechargeable la plus performante, ce qui est considérable,
- * Le remplacement d'une voiture thermique « moyenne » par une voiture hybride rechargeable « moyenne » apporte encore dans tous les cas, même en haut de gamme, un gain sur une moyenne de parcours variés qui peut atteindre 39 %. C'est donc toujours une évolution positive pour l'environnement.
- * À condition toutefois de limiter la course à la puissance des voitures hybrides rechargeables haut de gamme les plus fortement émettrices de CO2 en conditions réelles de circulation, qui constituent clairement des impasses écologiques: en utilisation sur des parcours variés, ces voitures émettent en effet en moyenne davantage, voire bien davantage (jusqu'au double!) de CO2 que la meilleure des voitures hybrides non rechargeables de moyenne gamme...

La faute en revient largement à la <u>règlementation actuelle qui ne délivre pas les bons signaux en homologuant SANS AUCUN MALUS des véhicules haut de gamme dont les plus polluants (la moitié de l'échantillon) émettent pratiquement autant de CO2 que les véhicules diesels de la même gamme ! Et n'apportent donc aucun progrès environnemental.</u>

Laisser perdurer cette aberration dans la nouvelle règlementation WLTP applicable à partir du 1^{er} janvier 2019 conduirait donc à <u>une perte d'efficacité dans la réduction rapide des émissions de CO2 du parc automobile</u>.

Globalement, l'hybridation et plus encore l'hybridation avec recharge constituent donc des solutions efficaces en attendant la généralisation de véhicules électriques.

Annexe 1 : consommations et émissions réelles des véhicules étudiés

Tableau 1 : Consommations des voitures <u>hybrides</u> (Source : Auto Plus N° 1547 du 27-04-2018)

Marque et modèle	Puissance	Carburant	Consommation	Consommation	Rang
	totale ch		en ville	mixte	Ville - Mixte
TOYOTA Prius IV (2)	<mark>122</mark>	E	<mark>3,7</mark>	<mark>4,6</mark>	<mark>1 - 1</mark>
SUZUKI Baleno (1)	90	Е	5,4	5,5	7 - <mark>2</mark>
TOYOTA Yaris (1)	100	Е	4,1	5,6	<mark>2 - 3</mark>
SUZUKI Swift (1)	111	E	5,4	5,6	6 - 4
LEXUS CT 200 (2)	136	E	4,5	5,7	3 - 5
TOYOTA Auris Touring (2)	136	E	4,7	5,7	4 - 6
TOYOTA Auris (2)	136	E	4,8	5,7	5 - 7
RENAULT Scénic 1.5 dCi (2+)	123	D	6,1	5,8	11 - 8
TOYOTA Prius + (2+)	136	Е	4,8	5,9	5 - 9
HYNDAI Ioniq (2)	141	E	5,7	5,9	7 - 10
KIA Niro (2+)	141	E	6,1	6	11 - 11
TOYOTA C-HR (2+)	122	E	5,1	6,1	6 - 12
RENAULT Gd Scénic 1.5 dCi (2+)	123	D	6,1	6,1	11 - 13
SUZUKI Ignis (1)	90	E	5,8	6,4	8 - 14
Ford Mondeo (2)	187	E	6,4	6,5	12 - 15
LEXUS IS 300h (2)	223	Е	6	7	10 - 16
TOYOTA Rav4 (2+)	197	E	6,6	7,8	13 - 17
LEXUS NX 300h (3)	197	E	7	8	14 - 18
INFINITY Q 50 (3+)	364	E	7,8	8,8	15 - 19
LEXUS RX 450h (3)	313	E	5,9	8,9	9 - 20
MOYENNE	-	-	<mark>≈ 5,6</mark>	<mark>≈ 6,1</mark>	-

<u>Tableau 2</u>: Consommations des voitures <u>hybrides rechargeables</u> (Source : Auto Plus N° 1547 du 27-04-2018)

Marque et modèle	Puissance totale ch			Consommation batterie vide		Rang Ville - Mixte
		_	En ville	mixte	(km)	
TOYOTA Prius IV rechargeable (2)	122	E	3,7	<mark>4,4</mark>	<mark>38</mark>	<mark>1 - 1</mark>
HYNDAI Ioniq Plug-in (2)	<mark>141</mark>	E	<mark>4,5</mark>	<mark>53</mark>	<mark>41</mark>	2 - 2
KIA Niro Plug-in (2+)	141	E	<mark>5,8</mark>	<mark>5,8</mark>	<mark>43</mark>	4 - 3
Mini Countryman SE (2)	224	E	5	6,9	40	3 - 4
Audi A3 Sportback e-tron (2)	204	E	5,8	6,9	34	5 - 5
VW Golf GTE (2)	204	E	5,8	6,9	34	5 - 6
BMW 330e (3)	252	E	7 , 5	7,1	35	11 - 7
VW Passat GTE (3)	218	E	6,6	7,2	39	7 - 8
BMW 530e (3)	252	E	6,5	7,2	29	6 - 9
BMW 225xe Active Tourer (2+)	224	E	7	8,1	38	9 - 10
Mercedes E 350e (3)	286	E	8,5	8,5	20	13 - 11
Volvo XC60 T8 Twin Engine (3+)	407	E	7	8,9	27	9 - 12
Mitsubishi Outlander PHEV (3+)	200	E	8,2	8,9	30	12 - 13
Porsche Panamera E-Hybrid (3+)	462	E	8 <i>,</i> 7	9	50	14 - 14
Volvo XC90 T8 Twin Engine (3)	407	E	7,4	9,3	24	10 - 15
Audi Q7 e-tron Quattro (3+)	373	D	11	9,9	37	16 - 16
Mercedes C 350e Break (3+)	279	E	11,5	10,2	18	17 - 17
BMW X5 x Drive 40e (3+)	313	E	11,6	10,7	26	18 - 18
Mercedes GLC 350e 4 Matic (3+)	320	E	10,4	11,3	20	15 - 19
Mercedes GLE 500e 4 Matic (3+)	442	E	12,2	11,9	18	20 - 20
MOYENNE (*)	-	-	<mark>≈ 8,3</mark>	≈ 8,8	<mark>≈ 30</mark>	-

^{(1):} Citadines; (2): Compactes (Berlines) – (2+): Compactes (Breaks, monospaces ou SUV)

^{(3):} Routières (Berlines) – (3+): Routières (Breaks, monospaces ou SUV)

^(*) Hors TOYOTA Prius IV, HYNDAI Ioniq Plug-in et KIA Niro Plug-in

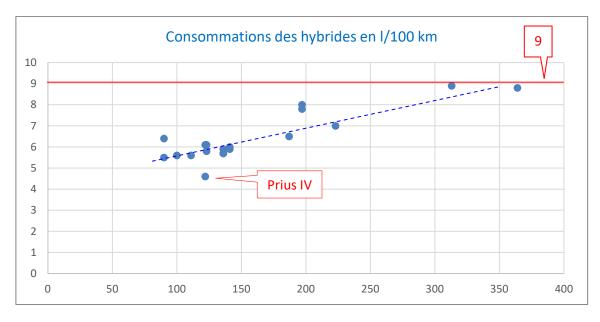
<u>Tableau 3</u> : Consommations des <u>berlines essence</u> de la même gamme que la Prius IV non rechargeable (Source : **Auto Plus** N° 1502 du 16-06-2017)

Marque et modèle	Puissance ch	Carburant	Consommation mixte (I/100 km)	Emissions de CO2 (g/km)
TOYOTA Auris1.2 T	116	Е	6,8	158
KIA Cee'd 1.0 T	120	Е	7	162
Seat Leon 1.4 TSI	122	E	7	162
Citroën C4 1.2 Pure Tech	120	E	7	162
Opel Astra 1.4 Turbo	125	E	7,1	165
VW Golf 1.2 TSI	110	E	7,1	165
HYUNDAI i30 1.0 T	120	E	7,2	167
PEUGEOT 308 Pure Tech	130	E	7,2	167
RENAULT Mégane 1.2 TCe	130	E	7,7	178
Fiat Tipo 1.4 T. Jet	120	E	8,2	190
MOYENNE	121	Е	≈ 7, 3	169

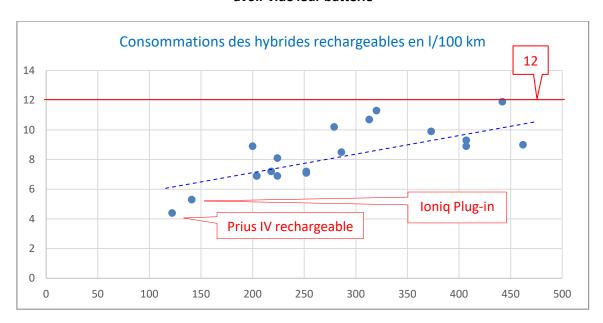
<u>Tableau 4</u>: Consommations des <u>voitures diesel</u> de la même gamme que les hybrides rechargeables (Source: Auto Plus N° 1502 du 16-06-2017)

Marque et modèle	Puissance ch	Consommation mixte	Emissions de CO2
		(I/100 km)	(g/km)
VW Golf7 2.0 TDI (2)	150	5,9	156
Mini Clubman Cooper SD BVA (2)	190	6,1	161
Audi A3 Sportback 2.0 TDI BVA (2)	150	6,5	172
VW Passat 2.0 TDI BVA (3)	150	6,6	174
Mercedes C220d BVA 4x4 Break (3+)	170	6,6	174
Volvo S60 D4 BVA (3)	181	6,6	174
Mercedes E220d Break (3+)	194	6,9	182
Mitsubishi Outlander 2.2 DI-D (3+)	150	7,2	190
VW Passat 2.0 TDI Biturbo 4 Motion BVA (3)	240	7,2	190
BMW 330d Grand Turismo (3)	258	7,5	198
Mercedes E 350d BVA (3)	258	7,5	198
BMW 530d Grand Turismo (3)	258	7,6	201
Mercedes GLC 250d (3+)	204	8	211
BMW 220d Grand Tourer BVA (2+)	190	8,1	214
BMW X5 25d 4x4 (3+)	218	8,6	227
Volvo XC90 D5 (3+)	225	8,9	235
Mercedes GLE 350d (3+)	258	9,2	243
Audi Q7 3.0 V6 TDI BVA (3+)	272	9,2	243
BMW X5 40d (3+)	313	9,2	243
Porsche Cayenne Diesel (3+)	262	9,7	256
Porsche Cayenne S Diesel (3+)	382	10,1	267
MOYENNE	230	≈ 7,8	206

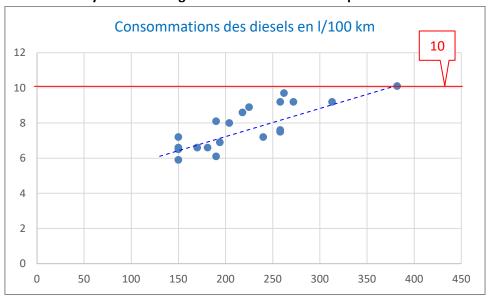
Figure 1 : Consommations des voitures hybrides en fonction de leur puissance cumulée



<u>Figure 2</u> : Consommations des <u>voitures hybrides rechargeables</u> en fonction de leur puissance cumulée après avoir vidé leur batterie



<u>Figure 3</u>: Consommations des <u>voitures diesel</u> de la gamme des hybrides rechargeables en fonction de leur puissance



<u>Annexe 2</u>: Simulations de circulation pour différentes répartitions entre : trajets domicile-travail et trajets loisirs

* Types de véhicules hybrides rechargeables étudiés dans l'échantillon :

A: le plus performant (Toyota Prius hybride rechargeable): 38 km en électrique - 4,4 l/100 km

B: représentatif des véhicules « performants »: 40 km en électrique - 7 l/100 km

C: représentatif des véhicules « moyens »: 30 km en électrique – 8,8 l/100 km

D: le moins performant (Mercedes GLE 500e 4 Matic): 18 km en électrique – 11,9 l/100 km

Base de comparaison : meilleur hybride non rechargeable (Toyota Prius hybride)

- Consommation moyenne réelle mixte : 4,6 l/100 km

- Emissions moyennes réelles de CO2 : 107 g/km

* Hypothèses d'usage :

- Usage professionnel: 210 jours travaillés/an; deux distances domicile-travail pour profession sédentaire: 20 km (≈ moyenne nationale) et 35 km (≈ haut de la fourchette nationale) avec 1 (aller) ou 2 (aller + retour) recharges/jour; 1 seule recharge/jour pour profession itinérante avec trajet moyen de 180 km/jour
- **Usage loisirs et voyages**: 95 jours/an; 1 recharge/jour (au point de départ); 12 000 km/an en régime thermique pur (pour voyages moyens à longs)
- Non utilisation du véhicule : 60 jours/an (1 jour/semaine + 1 semaine entière)

Tableau 5: simulation pour distance domicile - travail de 20 km avec 1 recharge/jour

Véhicule	Α	В	С	D
Consommations				
Autonomie électrique pure	38	40	30	18
Circulation AR travail en électrique	38 x 210 = 7 980	40 x 210 = 8 400	30 x 210 = 6 300	18 x 210 = 3 780
Circulation loisirs en électrique	38 x 95 = 3 610	40 x 95 = 3 800	30 x 95 = 2 850	18 x 95 = 1 710
Circulation totale en électrique	11 590	12 200	9 150	5 490
Circulation travail régime thermique	2 x 210 = 420	0	10 x 210 = 2 100	22 x 210 = 4 620
Circulation loisirs régime thermique	12 000	12 000	12 000	12 000
Circulation totale régime thermique	12 420	12 200	14 100	16 620
Consommation unitaire (I/100 km)	4,4	7	8,8	11,9
Consommation annuelle (I/an)	546	854	1 241	1 978
Circulation totale	24 420	24 200	23 250	22 110
Consommation moyenne (I/100 km)	2,2	3,5	5,3	8,9
Emissions moyennes de CO ₂ (g/km)	51	81	123	206

Tableau 6: simulation pour distance domicile - travail de 20 km avec 2 recharges/jour

Véhicule	Α	В	С	D
Consommations				
Autonomie électrique pure	38	40	30	18
Circulation AR travail en électrique	40 x 210 = 8 400	40 x 210 = 8 400	40 x 210 = 8 400	36 x 210 = 7 560
Circulation loisirs en électrique	38 x 95 = 3 610	40 x 95 = 3 800	30 x 95 = 2 850	18 x 95 = 1 710
Circulation totale en électrique	12 010	12 200	11 250	9 270
Circulation travail régime thermique	0	0	0	4 x 210 = 840
Circulation loisirs régime thermique	12 000	12 000	12 000	12 000
Circulation totale régime thermique	12 000	12 000	12 000	12 840
Consommation unitaire (I/100 km)	4,4	7	8,8	11,9
Consommation annuelle (I/an)	528	840	1 056	1 528
Circulation totale	24 010	24 200	23 250	22 110
Consommation moyenne (I/100 km)	<mark>2,2</mark>	3,5	4,5	6,9
Emissions moyennes de CO ₂ (g/km)	51	81	104	160

^{*} Simulations d'usages : voir tableaux 5 à 9 ci-après

Tableau 7: simulation pour distance domicile - travail de 35 km avec 1 recharge/jour

Véhicule	Α	В	С	D
Consommations				
Autonomie électrique pure	38	40	30	18
Circulation AR travail en électrique	38 x 210 = 7 980	40 x 210 = 8 400	30 x 210 = 6 300	18 x 210 = 3 780
Circulation loisirs en électrique	38 x 95 = 3 610	40 x 95 = 3 800	30 x 95 = 2 850	18 x 95 = 1 710
Circulation totale en électrique	11 590	12 200	9 150	5 490
Circulation travail régime thermique	32 x 210 = 6 720	30 x 210 = 6 300	40 x 210 = 8 400	52 x 210 = 10 920
Circulation loisirs régime thermique	12 000	12 000	12 000	12 000
Circulation totale régime thermique	18 720	18 300	20 400	22 920
Consommation unitaire (I/100 km)	4,4	7	8,8	11,9
Consommation annuelle (I/an)	824	1 281	1 795	2 725
Circulation totale	30 310	30 500	29 550	28 410
Consommation moyenne (I/100 km)	2,7	4,2	6,1	9,6
Emissions moyennes de CO2 (g/km)	63	97	141	222

<u>Tableau 8</u>: simulation pour distance domicile - travail de 35 km avec 2 recharges/jour

Tableau 8 . Simulation pour distance domicile - travail de 35 km avec 2 recharges/ Jour						
Véhicule	Α	В	С	D		
Consommations						
Autonomie électrique pure	38	40	30	18		
Circulation AR travail en électrique	70 x 210 = 14 700	70 x 210 = 14 700	60 x 210 = 12 600	36 x 210 = 7 560		
Circulation loisirs en électrique	38 x 95 = 3 610	40 x 95 = 3 800	30 x 95 = 2 850	18 x 95 = 1 710		
Circulation totale en électrique	18 310	18 500	15 450	9 270		
Circulation travail régime thermique	0	0	10 x 210 = 2 100	34 x 210 = 7 140		
Circulation loisirs régime thermique	12 000	12 000	12 000	12 000		
Circulation totale régime thermique	12 000	12 000	14 100	19 140		
Consommation unitaire (I/100 km)	4,4	7	8,8	11,9		
Consommation annuelle (I/an)	528	840	1 240	2 278		
Circulation totale	30 310	30 500	29 550	28 410		
Consommation moyenne (I/100 km)	1,8	2,8	3,7	8,0		
Emissions moyennes de CO2 (g/km)	42	65	86	185		

Tableau 9: simulation pour travail itinérant de 180 km/jour en moyenne (37 800 km/an) avec 1 recharge/jour

Véhicule	Α	В	C .	D
Consommations				_
Autonomie électrique pure	38	40	30	18
Circulation AR travail en électrique	38 x 210 = 7 980	40 x 210 = 8 400	30 x 210 = 6 300	18 x 210 = 3 780
Circulation loisirs en électrique	38 x 95 = 3 610	40 x 95 = 3 800	30 x 95 = 2 850	18 x 95 = 1 710
Circulation totale en électrique	11 590	12 200	9 150	5 490
Circulation travail régime thermique	142 x 210 =	140 x 210 =	150 x 210 =	162 x 210 =
	29 820	29 400	31 500	34 020
Circulation loisirs régime thermique	12 000	12 000	12 000	12 000
Circulation totale régime thermique	41 820	41 400	43 500	46 020
Consommation unitaire (I/100 km)	4,4	7	8,8	11,9
Consommation annuelle (I/an)	1 840	2 898	3 828	5 476
Circulation totale	53 410	53 600	52 650	51 510
Consommation moyenne (I/100 km)	3,4	5,4	7,3	10,6
Emissions moyennes de CO2 (g/km)	79	169	169	246

Tableau 10: Moyennes des consommations et émissions tous types de trajets confondus

·			,, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,			
	Véhicule	Α	В	Meilleur hybride non	С	D
Performances				rechargeable		
Consommation moyenne (I/100 km) 2,5		2,5	3,9	4,6	5,4	8,8
Emissions moyennes de CO2 (g/km)		58	90	107	125	204

Le cycle d'Atkinson est une variante du cycle classique, dit de Beau de Rochas. Il lui est très proche, à l'exception d'un paramètre : au lieu de fermer la soupape d'admission dès le premier point mort bas, cette soupape reste ouverte pendant un certain temps. Pendant cette phase, le piston refoule donc une partie de l'air hors du cylindre via la soupape d'admission. La soupape d'admission se ferme ensuite.

Le piston poursuit ensuite sa course jusqu'au point mort haut, en provoquant une **compression adiabatique** (sans échange de chaleur) de l'air admis. Après injection d'essence et allumage au voisinage du point mort haut, la chaleur produite par la combustion de l'essence **échauffe l'air à volume constant** jusqu'à la **température T1**. La pression, proportionnelle à la température absolue, augmente alors. À noter que la quantité d'air admis étant plus faible dans le cycle d'Atkinson, la quantité d'essence à injecter doit être réduite dans la même proportion, les pressions et températures avant et après allumage restant inchangées.

La détente adiabatique s'effectue ensuite sur la totalité du volume balayé par le piston, comme dans un cycle classique. Mais, la quantité initiale de gaz à détendre étant moindre dans le cycle d'Atkinson, cette détente est plus complète. Il en résulte une augmentation du rendement explicable de deux façons différentes :

- * Pour une même quantité d'air admise, une détente plus complète fournit davantage de travail. Ce qui accroit la différence de travail entre la phase de détente et la phase de compression, donc le rendement,
- * Avec une détente plus complète, la **pression** et la **température T2 finale sont moindres** à l'ouverture de la soupape d'échappement. Le rendement thermodynamique de Carnot, qui s'exprime par : R = 1 T2/T1 augmente par conséquent puisque T2 est plus faible que dans un cycle classique.

Les constructeurs automobiles qui utilisent le cycle d'Atkinson revendiquent un rendement de **40** %, à comparer à un rendement maximum de **36** % pour un cycle classique à essence. Soit un **gain relatif de 11** % par rapport à ce qui se fait de mieux avec un cycle classique. Il est difficile d'en savoir plus, mais un tel gain n'est pas négligeable : sans que le recours au cycle d'Atkinson soit un passage obligé pour une voiture hybride, il semble peu judicieux de s'en priver...

Ce n'est cependant pas le seul facteur de gain : l'autre, le plus important, résulte de l'assistance apportée par la motorisation électrique, qui permet au moteur thermique de fonctionner plus souvent et plus longtemps au plus près de son rendement maximal.

L'inconvénient du cycle d'Atkinson est, pour une même cylindrée, une diminution de puissance par rapport à un cycle classique : la quantité d'air et d'essence admise étant plus faible, la puissance est réduite dans les mêmes proportions. Cette réduction est cependant en partie compensée par l'amélioration du rendement.