



# La propulsion électrique des motos en 18 questions

Avec des prix compris entre 20 000 et 32 000 €, une autonomie ne dépassant pas 100 kilomètres si vous taquinez la poignée, et souvent un poids autour des 300 kg, les motos électriques ne cochent pas encore toutes les cases pour séduire. Bilan et perspectives...

D'après un texte de Jürgen Stoffregen, traduit et adapté par Klaus Nennewitz.  
Photos Stoffregen, BMW, Energica, Harley-Davidson, Kawasaki, Zero.

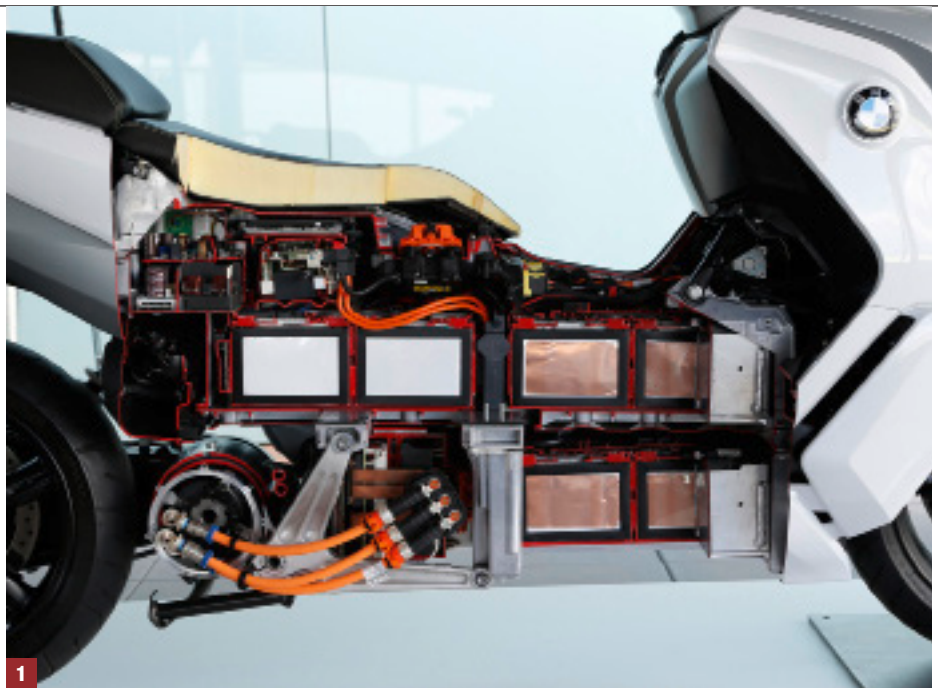
Kawasaki vient de se lancer aussi dans la course à l'électrique. Cette vue dépouillée montre la taille des batteries par rapport au moteur.

**M**algré une certaine volonté politique et environnementale, les motos électriques de „grosses cylindrées“ n’ont guère joué de rôle dans les statistiques d’immatriculation jusqu’à présent. La part de marché des machines électriques de plus de 11 kW est d’un peu moins de 1 % des nouvelles immatriculations en Europe. Moins de 10 000 machines sont ajoutés chaque année à la liste des nouvelles motos et des nouveaux scooters en Europe ; ce n’est pas beaucoup, avec un total d’environ 1 million de nouvelles immatriculations de motos par an. Et si certains y voient le seul avenir, il est intéressant de se pencher sur cette technologie composée de batteries, de moteurs électriques et de leur efficacité, ainsi que l’autonomie, les coûts et le poids. Une photographie à l’instant T mais aussi une prospection pour étudier les axes de développement qui pourront peut être augmenter l’autonomie, baisser le prix et le poids.

## 1 Comment est fait une batterie ?

Une batterie de véhicule n’est pas un bloc de batterie unique, mais se compose de centaines de cellules individuelles, semblables à celles que vous connaissez de votre foyer. Seulement ici, les cellules individuelles sont environ 50 % plus grandes. Ces cellules sont interconnectées pour former des paquets, appelés modules. La batterie du véhicule, prête à être installée, est composée de plusieurs de ces modules, qui sont ensuite combinés dans un boîtier. Cette conception modulaire permet de remplacer les modules individuels en cas de défaut de la batterie, ce qui réduit considérablement les coûts de réparation. Et plus il y a de modules et donc de cellules dans une batterie de véhicule, plus sa capacité est élevée. Idéalement, la batterie devrait être conçue de manière à pouvoir être facilement adaptée à différents véhicules et à différentes capacités, ce qui ouvre des possibilités de réduction des coûts. Le boîtier de la batterie fait également office d’enceinte de sécurité et contient des éléments électroniques qui contrôlent l’interaction des différentes cellules, surveillent la température et déconnectent temporairement les cellules individuelles ou les packs de cellules du circuit si les courants de charge ou de décharge autorisés sont dépassés. Cela permet de protéger la batterie contre la surchauffe et les dommages consécutifs, y compris l’incendie et la destruction.

Le type d’interconnexion détermine à la fois la capacité et la tension. La pile au lithium individuelle a une tension nominale de 3,7 volts. Rien que pour cela, il est absolument



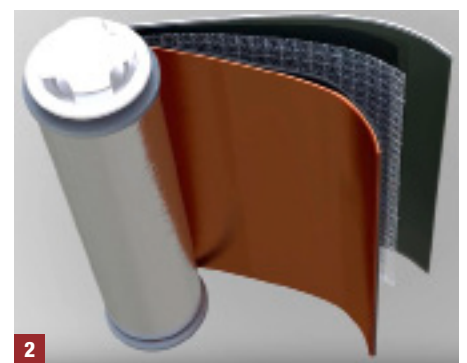
nécessaire d’interconnecter un grand nombre de cellules individuelles pour un véhicule, car dans une moto électrique plus performante, des tensions comprises entre 130 et 400 V sont généralement nécessaires. Cela s’explique par la puissance qui, comme on le sait, résulte du produit de la tension et du courant. Pour une puissance de 35 kW, le courant nécessaire est déjà de 250 A lorsqu’on travaille avec une tension de système de 140 V. Avec cet ampérage, on pourrait faire fondre et souder du fer. Pour une puissance plus élevée, il faut donc aussi des tensions plus élevées, sinon les courants deviennent trop élevés. Pour 11 kW, en revanche, des tensions bien inférieures à 100 V sont suffisantes.

## 2 Pourquoi des batteries si coûteuses ?

Le prix des systèmes de batteries est actuellement encore très élevé. Il est compréhensible que tous les constructeurs automobiles hésitent à fournir des informations concrètes sur les prix. Tout ce que l’on sait, c’est que le prix de la batterie pourrait bien représenter à lui seul plus des deux tiers du coût du véhicule.

Pour les piles au lithium pur, les sources accessibles indiquent un prix de marché compris entre 160 et 200 €/kWh en 2018. Le système de batterie complet est considérablement plus cher, mais les coûts supplémentaires ne peuvent être qu’estimés et sont sujets à une grande incertitude. Avec une estimation approximative de plus de 6 000 € pour une batterie prête à l’installation et d’une bonne autonomie de 200 km, on ne se trompe probablement pas entièrement. Des prévisions optimistes disent que le prix des piles au lithium diminuera de moitié à partir du milieu de la décennie. Au niveau de la cellule et éventuellement aussi du module, l’industrie des motocyclettes peut certainement profiter des

effets de nombre d’unités que la production de masse apportera à l’industrie automobile, peut-être aussi à l’électronique. La standardisation des modules, des batteries, de l’électronique et l’intégration des pièces et des fonctions ouvriront certainement d’autres possibilités de coûts. Mais même les boîtiers de batterie sont très dépendants de la conception globale de la moto, de son package et de l’espace d’installation limité disponible. Ici, la normalisation ne devrait être possible qu’au sein de la gamme de modèles d’un fabricant, mais guère entre les modèles ou même entre les fabricants. La batterie restera donc un composant très coûteux pendant les dix prochaines années, ce qui déterminera dans une large mesure le prix supplémentaire des motos électriques.



**1** BMW a installé les batteries dans le plancher de son scooter. Ce qui n’a pas entaché l’encombrement.

**2** Une batterie au lithium est une superposition de couches.

**3** Avec 251 kilos sur la balance la Harley-Davidson LiveWire est dans la tranche haute. En comparaison la Ducati Diavel affiche 233 kilos pleins faits.

**4** L’intérieur d’une pile au lithium permet les échanges entre les électrodes



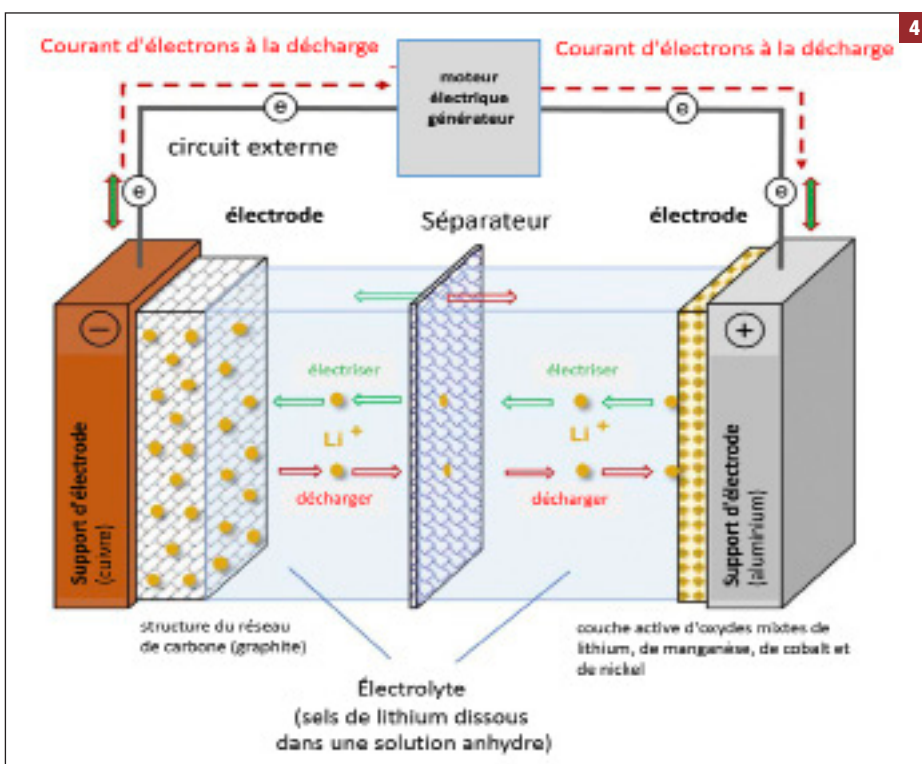
3

### 3 Pourquoi un poids si élevé ?

Comme nous l'avons vu, en raison de la densité énergétique relativement faible, un très grand nombre de cellules est nécessaire pour atteindre des plages acceptables. Cela augmente automatiquement le poids d'une batterie. Les supports d'électrode sont constitués de feuilles d'aluminium et de cuivre ; avec un poids spécifique de 8,9 g/cm<sup>3</sup>, le cuivre fait partie des métaux lourds et pèse plus que le fer en comparaison. Il est inutile que le lithium soit le métal le plus léger avec 0,53 g/cm<sup>3</sup> et même spécifiquement plus léger que l'essence (0,76 g/cm<sup>3</sup>). D'autant plus qu'il n'est utilisé que comme un composé d'oxyde plus lourd et que les couches actives pour le stockage de l'électricité

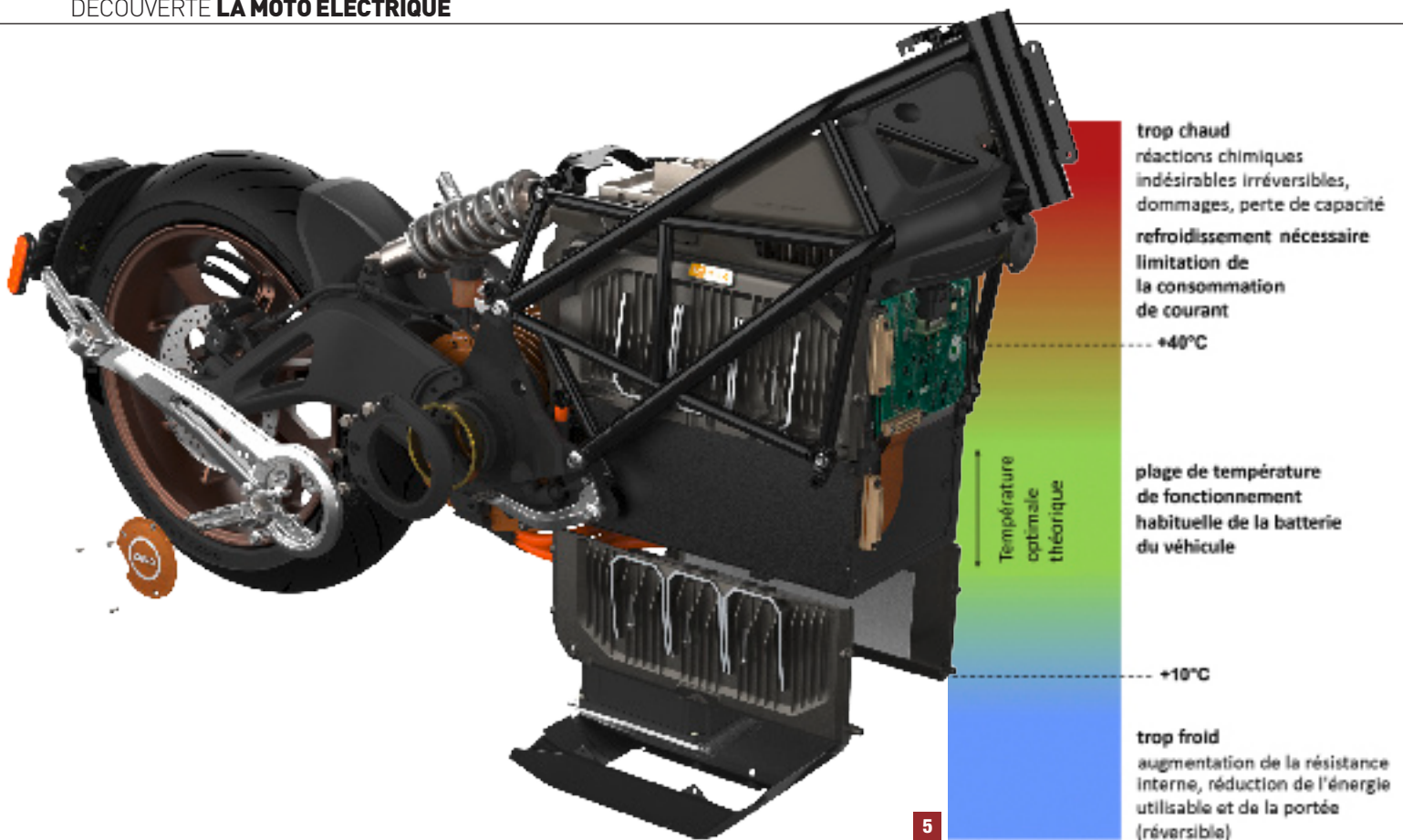
ne forment de toute façon qu'une fine couche sur les électrodes. En outre, il y a les dispositifs de sécurité déjà mentionnés, l'électronique et le boîtier, qui ne peuvent pas être trop légers en raison des exigences de résistance et de sécurité. Elle doit être suffisante pour éviter les déformations en cas d'accident, de sorte qu'aucun court-circuit interne ou incendie ne se produise. La chaleur excédentaire générée lors de la décharge, mais surtout lors de la charge, doit être dissipée par le boîtier de la batterie. C'est pourquoi il faut des ailerons, parfois même un système de refroidissement séparé. Toutes ces exigences et les équipements supplémentaires augmentent encore le poids de l'ensemble du système de batteries. Le rapport entre le contenu énergétique et le poids des piles prêtes à l'emploi d'aujourd'hui est inférieur

à 0,2 kWh par kilogramme. Si l'on suppose une consommation comprise entre 8 et 10 kWh/100 km pour un style de conduite sobre (similaire au cycle WMTC), on arrive à un poids de batterie d'environ 50 à 55 kg pour une autonomie de 100 km. La plupart des batteries actuellement installées sont encore plus lourdes en proportion. La quantité de carburant pour 100 km (consommation 5 ltr/100 km) ne pèse que 3,8 kg. Si l'on ajoute le réservoir et le système de carburant avec pompe, tuyaux, etc., le poids est d'environ 10 kg. La batterie pèse donc environ 5 fois plus pour la même autonomie. Le rapport se détériore de plus en plus avec l'autonomie, car avec un moteur à essence, seul le poids de l'essence supplémentaire est ajouté, alors que le poids de la batterie augmente à peu près proportionnellement à l'autonomie.



### 4 Electrochimie Késako ?

Un accumulateur fonctionne électrochimiquement selon le principe de l'échange de charges électriques. Sous l'influence du courant de charge, des changements de matière ont lieu dans le matériau actif de l'électrode, par lesquels des particules chargées électriquement (électrons négatifs et ions chargés positivement) sont libérées. Ces derniers peuvent migrer d'un endroit à l'autre entre les électrodes. Une différence de potentiel s'accumule dans la batterie chargée par des processus physico-chimiques. L'énergie stockée dans cette différence de potentiel est libérée sous forme de courant électrique lors de la décharge par un circuit externe, qui peut être utilisé tant que la différence de charge existe. Les processus électrochimiques et les changements de matériaux dans la batterie sont réversibles. Les piles peuvent donc être rechargées et déchargées encore et encore. Toutes les batteries de propulsion modernes



pour les véhicules sont aujourd'hui basées sur des composés chimiques du métal lithium comme matière active et cela restera ainsi pendant longtemps. Le lithium a le potentiel électrique le plus élevé de tous les matériaux pratiquement utilisables. Le nom de batterie au lithium-ion est dérivé du fait que les ions de lithium (Li+) peuvent se déplacer librement entre les électrodes de ce type de batterie.

## 5 De quoi a besoin une batterie ?

La plage de fonctionnement réelle des batteries lithium-ion s'étend de 10°C à 40°C. En dessous de 10°C, la puissance de sortie peut diminuer légèrement selon la conception, mais la batterie ne sera pas endommagée. En raison de son auto-échauffement à une consommation de courant plus élevée, cette limitation disparaîtra d'elle-même après peu de temps. À des températures ambiantes plus élevées, la batterie doit être refroidie, car il existe un risque de dommages irréversibles si les températures de fonctionnement élevées sont maintenues pendant une longue période (l'auto-échauffement est ajouté). Sur les motos, le refroidissement se fait automatiquement par le courant d'air, soutenu par les nervures du logement de la batterie. Si la batterie est encore trop chaude, le système de gestion de la batterie (Battery Management System - BMS) réduit le débit de courant et la moto a temporairement moins de puissance. Lors d'une charge rapide, le chauffage de la batterie peut nécessiter une limitation du courant de charge, notamment en été. Le

système de gestion des batteries doit également intervenir pendant la charge s'il y a une variation de la capacité des cellules pour éviter la surcharge, car les cellules ne peuvent pas le tolérer. Il est évident que, si l'on regarde tous les détails, une propulsion électrique c'est plus qu'une batterie, il y a aussi deux câbles, une unité de commande et un moteur électrique.

## 6 Quels sont les avantages de la récupération ?

Un autre avantage de l'entraînement électrique est la récupération. Il s'agit de la possibilité d'inverser la polarité du moteur électrique afin qu'il fonctionne comme un générateur en mode de poussée et récupère l'énergie du mouvement du véhicule. En termes d'effet, il est similaire au «frein moteur» classique, sauf qu'à présent, lorsque l'on roule en roue libre devant un feu de signalisation, lorsque l'on décélère modérément en conduisant ou dans les pentes, on produit de l'électricité qui s'écoule dans la batterie et la charge. Cela augmente mathématiquement l'énergie utilisable et, en pratique, entraîne une augmentation de l'autonomie, en fonction du style de conduite. Sur la base du cycle de conduite normalisé WMTC («World-wide harmonised Motorcycle Emissions Test procedure»), qui simule de manière réaliste un style de conduite quotidien modéré, une moto à essence à grand volume consomme un peu plus de quatre fois la quantité d'énergie aux 100 km qu'un véhicule électrique comparable. Converti en consommation de carburant que

nous connaissons tous, un motorcycle électrique comparable aurait alors une valeur de consommation d'environ 1,1 L/100 km. Si l'on tient compte de toutes les pertes de transmission, y compris celles qui surviennent lors de la charge à la prise («tank-to-wheel»), la consommation convertie est encore sensationnellement faible, à un peu moins de 1,3 L/100 km. Un sacré avantage !

## 7 La batterie miracle, c'est pour quand ?

Le principe électrochimique n'offre pas, en principe, des densités de stockage de l'énergie aussi élevées que celles du pétrole, par exemple. La capacité de stockage de chaque batterie est limitée par le fait que - pour dire les choses très simplement - seul un nombre limité de charges peut être généré et déposé sur les électrodes. Cela concerne entre autres la quantité et la structure chimique des matières actives. En outre, il existe des processus de répulsion entre les particules de même charge, qui ne permettent qu'une «densité de tassement» limitée au niveau des électrodes. Cette limitation est due aux lois de la nature. Bien qu'il puisse être considérablement amélioré par d'autres matériaux et des technologies plus développées, il ne peut («jamais») être complètement éliminé. Tous les nouveaux matériaux examinés récemment sont également soumis aux mêmes lois naturelles. La batterie lithium-souffre tant vantée peut théoriquement stocker jusqu'à 10 fois l'énergie d'une batterie lithium-ion tout aussi lourde,

mais elle a un volume de construction beaucoup plus important et, pour cette raison, ne convient pas à elle seule aux applications sur les motos.

Aujourd'hui, il n'existe pas de meilleurs principes pour les applications pratiques en électromobilité que le stockage électrochimique de l'électricité dans une batterie avec toutes ses limites (la pile à combustible est un autre sujet, nous l'excluons délibérément ici). Cela ne changera pas, même dans une période prévisible de 20 ou 30 ans. Toutes les substances chimiques adaptées au stockage de l'électricité dans une batterie de véhicule doivent également répondre aux exigences d'une utilisation mobile : Stabilité du cycle et durée de vie longue, faible autodécharge, capacité de chargement rapide, stabilité chimique, potentiel de danger contrôlable, capacité à basse température, poids acceptable et faible espace d'installation, disponibilité des matériaux de base, recyclage, production de masse stable et économique, et bien plus encore. Jusqu'à présent, les systèmes de batteries alternatifs présentant le même problème de base n'ont répondu que de manière inadéquate ou pas du tout à ces exigences. Il ne faut donc pas s'attendre à une batterie miracle dans 10 ou 20 ans, et il est peu probable qu'elle soit disponible dans un avenir lointain prévisible. Pour la batterie lithium-ion actuelle, les chercheurs optimistes parlent d'un doublement, voire d'un triplement de la capacité

de stockage dans les 10 à 15 prochaines années. Ce qui serait une énorme avancée pour la batterie, cependant, c'est encore peu de chose par rapport à l'essence, comme nous le verrons dans un instant.

## 8 De quoi dépend l'autonomie ?

L'autonomie est inextricablement liée au faible contenu énergétique de la pile (bien qu'il s'agisse d'un accumulateur, le terme de pile s'est imposé).

## 9 L'essence est elle meilleure ?

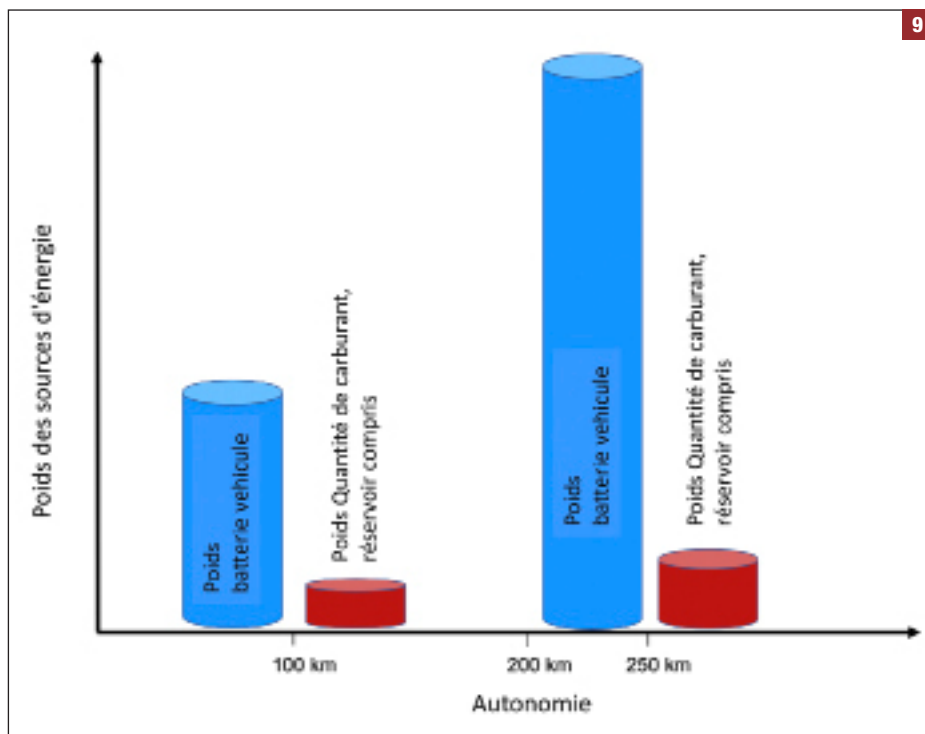
Les carburants à base d'hydrocarbures, comme notre essence habituelle, contiennent un potentiel énergétique spécifique par unité

10

de poids beaucoup plus élevé qu'une batterie. La molécule de carburant contient un grand nombre d'atomes de carbone et d'hydrogène très proches les uns des autres, ce qui explique en partie la forte teneur en énergie spécifique. Cette forte « densité de tassement » est possible grâce aux propriétés de la structure moléculaire. L'énergie contenue est presque entièrement libérée lors de la combustion avec l'oxygène et de nouvelles substances sont créées avec le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau comme produits finaux de la combustion. Et comme on le sait, le processus de combustion est irréversible. Si vous regardez exclusivement le contenu énergétique et le rapportez à la masse respective, alors seulement environ 2% de l'énergie par kg est contenue dans les cellules de batterie Li-ion comme dans la quantité comparable d'essence. En raison des pertes internes lorsque des centaines de cellules sont interconnectées, des dispositifs de sécurité et du poids des connexions et du boîtier de la batterie, le rapport énergie/poids de la batterie du véhicule prête à être installée peut se détériorer de plus de 30 %. La batterie d'un véhicule actuel n'a alors qu'environ 1,5 % de l'énergie de l'essence, si on la rapporte au poids. Un doublement, voire un triplement futur de la capacité de stockage des batteries semble encore modeste malgré tous les progrès.

## 10 La propulsion électrique gagne t'elle en efficacité ?

Si c'était le seul facteur, l'entraînement électrique aurait déjà perdu désespérément face à l'essence. Mais dans la seconde étape du processus électrique, la conversion de cette énergie par le moteur électrique pour faire avancer le véhicule est largement supérieure. Le moteur électrique a un rendement énergétique trois fois supérieur à celui du moteur à combustion. Alors que dans le meilleur des cas, le moteur à combustion atteint un rendement de 33 à 35 %. Alors qu'avec les moteurs électriques, il peut atteindre jusqu'à 95 % dans pratiquement toute la plage de fonctionnement (...les ingénieurs électriciens parmi les lecteurs sont priés d'être indulgents si nous ne considérons



9

**5** La vue déshabillée de la Zéro montre la complexité de la technologie électrique avec les batteries, mais aussi le refroidissement, le moteur, l'électronique. **9** Comparaison entre le thermique et l'essence entre le poids et l'autonomie. **10** Le moteur électrique offre 95 % de son rendement sur toute sa plage de fonctionnement, alors que le thermique atteint seulement 35 %.



11

pas ici quelques subtilités...). Le rendement des moteurs à essence, en revanche, chute bien au-delà de son maximum dès que l'on passe en charge partielle. Il n'est souvent que de 10 à 20 % lorsque nous roulons sur les routes de campagne et en ville. Si vous en tenez compte et que vous examinez l'énergie utile (c'est-à-dire, en fin de compte, l'énergie mécanique que le moteur fournit pour la propulsion), la comparaison semble beaucoup plus favorable pour la propulsion électrique.

## 11 Quels sont les avantages réels du moteur électrique ?

Le moteur électrique est le deuxième élément central. Le principal avantage de celui-ci a déjà été mentionné. Son rendement élevé, qui peut dépasser 95 % et offre une disponibilité sur une très large plage de fonctionnement. La plage de vitesse des moteurs électriques s'étend à bien plus de 10 000 tr/min (jusqu'à 40 000 tr/min en Formule E) et le couple complet est disponible pratiquement dès le premier tour (...ici aussi, nous ne voulons pas entrer dans les détails...).

La propulsion électrique ne nécessite donc pas d'embrayage ni de boîte de vitesses manuelle. Selon la conception, une transmission fixe à un étage peut être utilisée pour adapter le moteur au véhicule et à sa vitesse maximale prévue. Toutefois, à quelques exceptions près, le pignon de la chaîne ou la petite roue de la courroie crantée est généralement entraîné directement sur les motos actuelle.

Un moteur électrique est beaucoup plus simple

dans sa construction ainsi que dans la production et l'assemblage des pièces qu'un moteur à combustion de même puissance. Un moteur à combustion interne pour motocyclettes se compose de plus de 1 000 pièces individuelles, dont beaucoup sont encore fabriquées avec des tolérances très précises allant jusqu'au millième de millimètre. Un moteur à combustion n'est pas seulement très complexe sur le plan mécanique, il est également soumis à une forte contrainte thermique et nécessite donc un refroidissement complexe et une alimentation en huile sophistiquée.

Les spécifications relatives au nombre de pièces pour les moteurs électriques varient considérablement, mais on peut certainement trouver des centaines de pièces individuelles. Dans l'ensemble, cependant, le nombre de pièces et la complexité sont beaucoup plus faibles que pour le moteur à combustion. Les exigences de précision ne concernent que certaines pièces et ne peuvent être comparées à celles des moteurs à combustion.

## 12 L'électronique joue-t-elle un rôle ?

Le contrôle complexe de la puissance et de la vitesse du moteur sont indispensables à l'utilisation du véhicule. En outre, le courant continu de la batterie est converti en courant alternatif pour le moteur, la récupération et le contrôle du courant de charge. Tout cela nécessite un contrôle électronique complexe dans l'interaction entre le moteur et la batterie.

Souvent, il n'est pas suffisamment clair que nous avons affaire à un système électrique de véhicule à haute énergie, avec une haute tension allant jusqu'à 400 V et des courants parfois bien supérieurs à 200 A. Une telle moto contient des composants électroniques et électriques de haute performance qui doivent répondre aux normes de protection et de sécurité les plus strictes. Il ne faut pas oublier que de nombreux composants d'une moto sont plus ou moins librement accessibles et sont exposés à toutes sortes d'influences environnementales. En raison des exigences différentes des différents types de motocyclettes et des circonstances et situations d'installation individuelles, la normalisation ne fait que commencer. Avec les quantités encore très faibles, cela fait augmenter les coûts. Aujourd'hui, l'électronique de puissance représente environ 20 % des coûts de fabrication d'une moto électrique. Les composants ne deviendront moins chers que lorsque l'augmentation de la demande entraînera une hausse des chiffres de production.

## 13 Électriques/thermiques : la comparaison en chiffres

Les moteurs électriques sont imbattables en ce qui concerne le couple de sortie avec des valeurs de crête nettement plus élevées ainsi que l'espace d'installation nécessaire. Zéro indique un diamètre de 130 mm, avec une puissance nominale de 40 kW (puissance de pointe de 82 kW). Le moteur de la BMW C evolution de 26 kW de puissance continue a



12

**11** Une accélération démoniaque, voici l'un des gros points forts de l'Energica. **12** L'électronique est également un élément important pour gérer la technologie électrique et permettre de gérer l'autonomie. **13** Le diagramme permet de constater les besoins en énergie d'un moteur électrique par rapport et thermique, et surtout l'énorme déperdition de ce dernier.

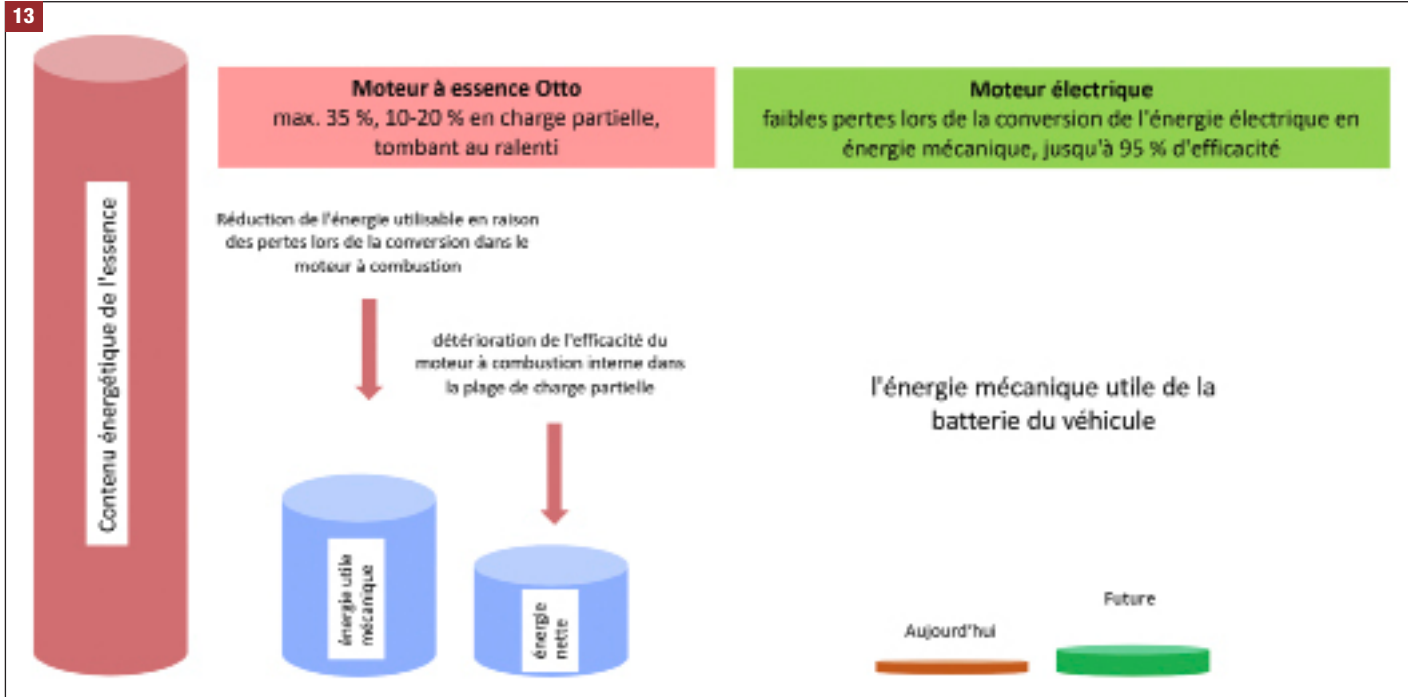
un diamètre de 163 mm pour une longueur de 380 mm. Avec l'augmentation de la puissance, la taille du moteur augmente, mais seulement de façon disproportionnée. La vitesse de rotation joue également un rôle, les moteurs à rotation élevée sont plus petits. Malheureusement, l'espace libéré dans la moto est «rongé» à nouveau par la très grande batterie. Le moteur électrique, d'autre part, a également besoin d'une gestion de la chaleur. À l'exception de Zero (refroidissement par air), les moteurs actuellement sur le marché des motos hautes performances sont refroidis par liquide. En plus de cette dissipation de chaleur, le contrôle actuel garantit également le maintien des températures admissibles pour les composants du moteur. Si le moteur est trop chargé et que les températures dans le moteur deviennent trop élevées, l'électronique régule la puissance de sortie vers le bas. Les moteurs électriques peuvent être surchargés presque deux fois plus pendant un

temps limité sans subir de dommages. Il est utilisé, par exemple, pour fournir une puissance supplémentaire aux processus d'accélération pendant une courte période. Comme ces conditions de conduite durent rarement plus de 10 à 20 secondes, un moteur électrique peut généralement y faire face sans problème. Vous trouverez donc toujours deux spécifications de puissance, la puissance nominale et une puissance de crête jusqu'à deux fois plus élevée. Seule la puissance nominale peut être délivrée en permanence par le moteur et le véhicule est alors homologué. Comme la vitesse maximale permanente est peu importante pour les motos électriques en raison de l'autonomie qui diminue alors rapidement, la capacité de surcharge des moteurs électriques offre la possibilité d'utiliser des moteurs plus petits et donc plus légers, sans réduction majeure des performances ni perte de plaisir de conduite. Une puissance de 30 kW est facilement suffisante pour les

déplacements habituels sur les routes de campagne, sur l'autoroute elle suffirait même pour plus de 160 km/h. Si vous pouvez mobiliser 60 kW pendant une courte période pour accélérer, vous n'êtes pas l'un des plus lents sur la route de campagne. Le poids spécifique des moteurs électriques de la technologie actuelle est d'environ 0,5 kg/kW. Dans le meilleur des cas, un moteur électrique de 80 kW ne pèserait donc pas beaucoup plus que 45 kg, soit environ 10 à 15 % de moins que les moteurs à deux cylindres les plus légers avec embrayage, transmission et carburant intégrés. Zéro indique un poids de 25 kg pour son moteur de 40 kW (puissance nominale), ce qui confirme la valeur du poids spécifique. En ce qui concerne les coûts, les avantages du moteur électrique ne sont pas encore perceptibles à l'heure actuelle et les déclarations de prix des fabricants n'existent pas ou restent très vagues. Pour l'avenir, des prix inférieurs à 10 €/kW pourront tenir la comparaison contre des moteurs électriques, ce qui le rendrait nettement moins cher qu'un moteur à combustion tout aussi puissant.

## 14 Quel est l'avenir ?

Le temps joue définitivement en faveur du moteur électrique. Avec l'utilisation massive des voitures, il y aura une baisse des prix et la moto bénéficiera de toutes les innovations et réductions de coûts qui existent dans la voiture particulière. En contrepartie, les moteurs à combustion interne deviendront de plus en plus chers à l'avenir, car l'effort de purification des gaz d'échappement et éventuellement d'autres mesures de réduction du bruit augmenteront à l'avenir. En tout cas, les moteurs électriques

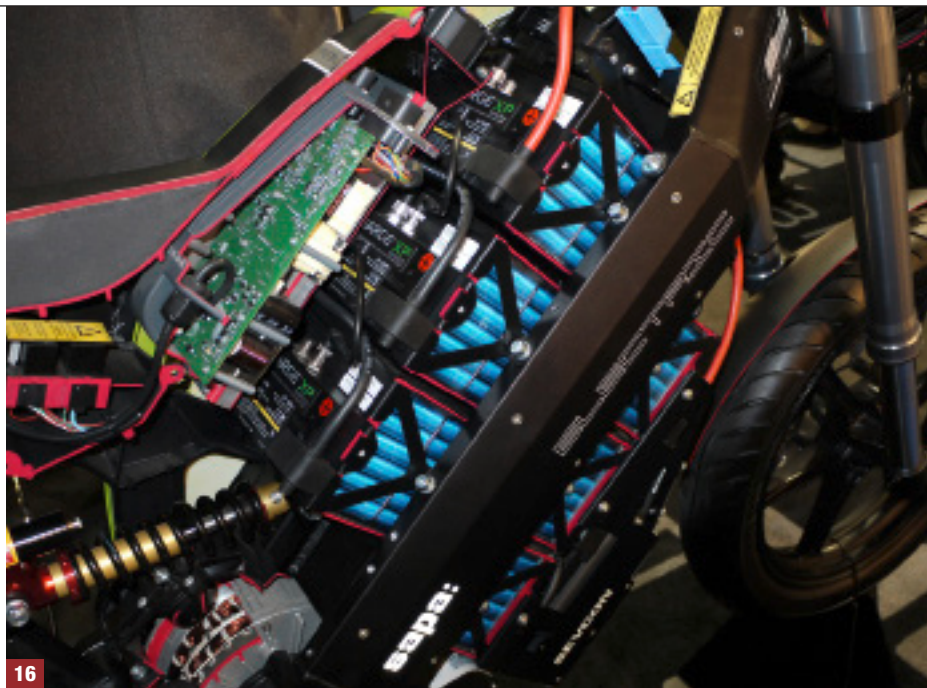




n'ont pas l'attrait de la mécanique ingénieuse. Presque sans vibrations, tournant constamment de manière régulière, silencieuse et puissante, ils le font tous. Ce qui est parfait pour la conduite en moto en termes purement rationnels, ne réchauffe malheureusement que légèrement le cœur de l'amateur de moto traditionnel. Mais il faut encore mentionner quelques points concernant le moteur électrique. Aujourd'hui, ce sont surtout les machines synchrones sophistiquées, sans entretien et sans usure, à excitation permanente par aimants permanents, qui sont utilisées. Ils se caractérisent par un haut degré d'efficacité et sont relativement légers. Les aimants à haute performance utilisés, qui contiennent des métaux de terres rares (par exemple le néodyme), contribuent de manière significative à cette efficacité élevée. Comme leur nom l'indique, les matériaux nécessaires à la fabrication de ces aimants ne se trouvent qu'en petites quantités dans la croûte terrestre, ce qui les rend onéreux. Afin de réduire les coûts des moteurs, le développement s'oriente donc vers des moteurs à excitation externe. Des bobines de cuivre traversées par le courant remplacent les aimants et fournissent le flux magnétique. Cependant, ces moteurs sont encore un peu plus lourds et moins efficaces.

## 15 À quand une baisse des prix ?

Si vous mettez tout cela ensemble, l'électronique et l'électricité à haute tension coûteuses avec leurs exigences de sécurité élevées, la batterie encore plus chère et le moteur électrique, qui n'est pas très bon marché pour le moment, alors le prix supplémentaire de 10 000 euros et plus, qui est encore payable pour les motos électriques aujourd'hui, devient apparent. Les coûts élevés ne peuvent actuellement être



16

répercutés que sur de très petites quantités. Il reste à voir comment les composants moins chers dérivés de la production de masse prévue des automobiles affecteront les prix des motos électriques. Les prévisions sont soumises à une grande incertitude, mais des prix supplémentaires de 25-30%, peut-être même plus, semblent tout à fait réalistes à l'avenir.

## 16 À quand une baisse du poids ?

La prévision est plus facile. Le poids supplémentaire de la propulsion électrique, principalement dû à la batterie lourde, sera maintenu. Les progrès que les piles plus puissantes offriront à l'avenir seront probablement utilisés par les fabricants pour des portées plus longues au lieu de réduire le poids. Pour une autonomie sûre de 200 km selon le cycle WMTC, une batterie d'environ 20 kWh est nécessaire. En tant que système

complet prêt à être installé, il pèse actuellement plus de 100 kg. En prenant 220 kg comme poids de référence pour une puissante moto de milieu de gamme (cela correspond approximativement à une Ducati Monster prête à rouler), il ne reste que 120 kg pour tous les autres composants. Même le moteur électrique plus léger et l'absence de réservoir et d'échappement ne peuvent pas compenser le poids supplémentaire de la batterie. Après tout, tous les autres composants de la moto ont le même poids que sur une moto classique. Si vous additionnez tout, 280 kg est exactement la fourchette de poids des motos électriques puissantes (spécification d'usine Energica Esse Esse 9 : 270 kg, mesuré 290 kg). Des progrès dans le poids de tous les composants peuvent apporter des améliorations, mais il sera très difficile de descendre en dessous de 250 kg avec une portée raisonnable.

## 17 Quelles solutions pour réduire coût et poids ?

Le fait est qu'à mesure que l'autonomie requise augmente, la batterie et donc le poids du véhicule augmentent de manière disproportionnée, comme cela a déjà été souligné. Mais la conclusion inverse est intéressante : si l'on limitait consciemment à la fois la puissance et la vitesse de pointe, peut-être même la capacité d'accélération, on amorcerait une spirale inverse. Avec une puissance nominale de seulement 30 à 40 kW, voire moins, et un contrôle intelligent de la puissance produite (modes de conduite optimisés en termes de consommation comme dans les voitures électriques), on pourrait également se débrouiller avec une batterie plus petite. C'est plus léger et moins cher. La capacité de surcharge du moteur permet également d'accélérer. Le domaine de la propulsion électrique est celui des courtes



17

**16** Les constructeurs vont devoir redoubler d'efforts pour gagner en poids et en place dans rogner sur l'autonomie. Une équation pas si évidente. **17** Les systèmes de charges rapides sont une solution pour réduire la taille des batteries mais il faut que les bornes soient universelles. **18** L'interdiction d'accès aux moteurs thermiques dans les centre-villes peut offrir une opportunité de taille pour l'électrique.



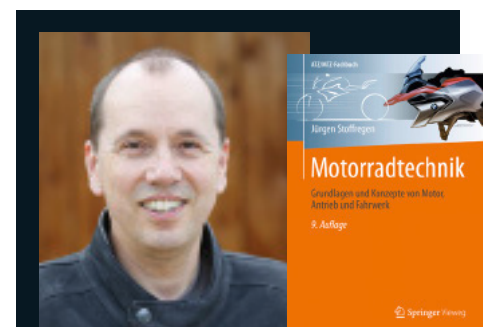
18

distances, de la ville et des environs est aussi ne solution. Pour les motos de longue distance telles que les grands trails ou les puissantes motos de tourisme, la propulsion électrique ne sera donc guère adapté dans un avenir proche. Ces motos deviendraient tout simplement trop lourdes avec la très grande batterie nécessaire et auraient toujours un désavantage d'autonomie par rapport au moteur à essence. Le domaine d'application de la propulsion électrique est plutôt utile pour le plaisir de conduire sur la route de la maison au travail, pour les roadsters et les concepts de type scooter pour la ville et les environs. Dans le cas de la «mobilité urbaine», comme on l'appelle aujourd'hui, le nombre presque ingérable de deux-roues électriques de performances et de conception différentes, soit nouveaux, soit présentés dans des études, nous montre où le voyage se dirige. Dans les centres-villes, la propulsion électrique peut déployer tous ses avantages : une accélération inégalée, des émissions nulles et une faible consommation de carburant sont des atouts qu'aucun moteur à combustion interne ne peut offrir. L'autonomie limitée ne joue guère de rôle s'il y a suffisamment de points de recharge, de sorte que la batterie peut être petite, ce qui permet d'économiser du poids et des coûts. Ce n'est probablement qu'une question de temps avant que le moteur à combustion soit complètement remplacé par la propulsion électrique dans cette catégorie de deux roues. Dans 10 ans, le moteur à combustion s'éteindra probablement ici, et il ne manquera plus à personne là-bas.

## 18 La conduite d'une moto peut-elle être différente ?

Cela nous amène au dernier point, une perspective interrogative sur un scénario possible et au moins partiellement différent pour les motos de demain. La génération future de motards qui vient de naître va grandir avec des restrictions publiques plus diverses que les nôtres en matière de circulation routière. Qu'il s'agisse d'interdictions de circuler dans les zones à faibles émissions, de limitations de vitesse encore plus nombreuses ou d'autres restrictions dans la circulation individuelle pour des raisons environnementales réelles ou seulement simulées. Ce sera probablement tout à fait normal pour cette génération. Il sera probablement aussi accepté sans réserve, contrairement à nous. Dans ce contexte, une «restriction» due à une courte portée sera-t-elle encore perçue comme un problème majeur ? Peut-être que dans 15 ou 20 ans, 1 ou 2 heures de conduite avec une distance ne dépassant pas 150 km jusqu'à une pause entre amis suffiront aux nouveaux nés dans 15 ou 20 ans pour leur plaisir à moto. En attendant, la batterie sera chargée. Peut-être que cette génération se rendra aussi en voiture ou en train et louera simplement sa moto électrique dans un hôtel pour un tour de 150 km. Il se pourrait donc que le problème de l'autonomie soit résolu d'une manière totalement différente, parce que la longue distance n'est plus le point de mire de la prochaine génération de motards, mais d'une

seule, et que les batteries seront de plus en plus performantes. Pour tous ceux qui peuvent encore s'enthousiasmer pour la mécanique astucieuse et les beaux sons de ce merveilleux moteur à combustion «à l'envers», il y aura les bonnes «vieilles» motos pendant au moins les 20 prochaines années ou plus, car il ne sera pas possible de les interdire aussi rapidement. Alors les motos électriques seront simplement une offre supplémentaire en constante augmentation avec son propre charme. Et si les prévisions sont correctes, il y aura encore assez de pétrole en 2050 pour pouvoir en distiller de l'essence. Alors la moto électrique a assurément un avenir mais l'électrique n'est assurément pas l'avenir de la moto.



**Jürgen Stoffregen est ingénieur allemand qui a collaboré de nombreuses années avec BMW sur le thermique comme l'électrique. Il donne également des conférences sur l'ingénierie de la moto à l'université technique de Dresde. Il a publié également le manuel «Motorradtechnik» en 1995, dont la neuvième édition a été publiée en 2018.**