

2 Technologie hybride DME

Généralités

Alors que le stockage d'énergie électrique sous sa forme immédiate dans des condensateurs (Super-caps) ou sous forme chimique (batteries nickel-métal hydrure ou lithium-ion) n'offre actuellement pas de solution pleinement satisfaisante en termes d'autonomie et d'encombrement, la combinaison d'un moteur thermique comme fournisseur d'énergie mécanique et d'un moteur électrique comme source de motricité ou d'énergie électrique, en particulier sur les trajets courts, offre une réelle alternative.



Technologie hybride DME

Généralités	49	Adaptations spécifiques à l'hybride	75
Principes de base de la technologie hybride	51	Disparition de composants	75
Évolutions historiques	51	Accessoires moteur électriques	75
Arguments en faveur de l'hybride	52	Compresseur de climatisation	76
Moteurs électriques	53	Autres accessoires supplémentaires	77
Moteurs à courant continu	53	Module hybride	78
Moteurs à courant alternatif	55	Embrayage	79
Moteurs triphasés	57	E-Machine	82
Moteurs asynchrones	59	Électronique de puissance	84
Moteurs synchrones	59	Batterie haute tension	86
Puissance et travail électrique	60	Gestion de la batterie (BMS)	87
Conversion de tension	61	Boîtier électronique	87
Onduleur à MLI	62	Gestion thermique	88
Conversion CC/CC	63	Commande	92
Batteries haute tension	64	Affichages	92
Batteries nickel-métal hydrure	65	Démarrage du véhicule	94
Batteries lithium-ion	66	Véhicule à l'arrêt	94
Variantes de la technologie hybride	67	Modes de fonctionnement hybrides	94
Le moteur micro-hybride	68	Conduite électrique	95
Le moteur semi-hybride	68	Cruising	96
Le moteur hybride intégral	69	Récupération d'énergie	96
Motorisation hybride série	69	E-Boost	98
Motorisation hybride à dérivation de puissance	70	Déplacement du point de charge	99
Motorisation hybride série à dérivation de puissance	70	Fonction Stop-Start	100
Motorisation hybride parallèle	71	Démarrage du moteur	100
Transmission	75	Arrêt du moteur	101
		Fonctions spéciales	102
		Consommation de carburant	104

Les atouts d'un concept purement électrique

- Rendement élevé
- Faible encombrement
- Couple à partir d'un régime dès 0 1/min

peuvent ainsi s'ajouter à la grande autonomie d'un moteur thermique. Porsche est ainsi le premier constructeur à mettre parallèlement sur le marché un véhicule totalement hybride.

Le concept de transmission du Porsche Cayenne S Hybrid offre les performances sportives d'un moteur 8 cylindres avec les valeurs de consommation et d'émissions polluantes d'un moteur 6 cylindres.

Consigne de sécurité

Respecter impérativement les consignes de sécurité pour toutes les interventions sur le Cayenne S Hybrid.

Tous les travaux sur les véhicules hybrides doivent être exclusivement réalisés par un personnel bénéficiant des qualifications adéquates.

Informations supplémentaires, voir

- « Information Technique Cayenne S Hybrid », chapitre « Sécurité liée à la haute tension »

et

- « Système d'informations PIWIS ».

Principes de base de la technologie hybride

Évolutions historiques

Moteur intégré au moyeu de roue

En 1893, à l'âge de 18 ans, le professeur Ferdinand Porsche fit ses premiers pas à la Vereinigten Elektrizitätswerke AG Béla Egger à Vienne, qui deviendra plus tard Brown Boveri. Il y développa un moteur électrique intégré dans le moyeu des roues, breveté en 1896. Le véhicule ainsi équipé faisait penser à un véhicule électrique, car le moteur des moyeux des roues était la seule source de motricité de ce véhicule. La NASA utilisa plus tard cette idée lorsqu'elle construisit son véhicule lunaire Lunar Rover.

Électromobile Lohner-Porsche

Trois ans plus tard, en 1899, Ferdinand Porsche développa pour k. u. k. Hofwagenfabrik Ludvig Lohner & Co. de Vienne l'électromobile Lohner-Porsche.

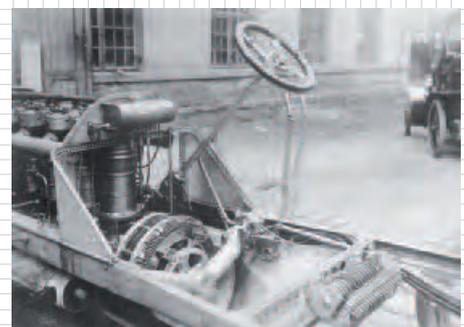
Le véhicule possédait deux moteurs électriques intégrés dans les moyeux de roues de l'essieu avant et atteignait alors une vitesse de pointe de 50 km/h impressionnante pour l'époque. Sa batterie au plomb de 410 kg offrait une autonomie de 50 km. Ce véhicule fit grande sensation à l'exposition universelle de Paris en 1900.

À la demande du britannique E.W. Hart, souhaitant remporter courses automobiles et records, il construisit en 1900 une version course en plus dotée de moteurs dans les moyeux de roues de l'essieu arrière. C'est ainsi qu'en septembre 1900 apparut le premier véhicule à transmission intégrale au monde.

Lohner-Porsche Mixte

Pour effacer les désavantages des batteries au plomb au niveau poids, Porsche associa un moteur entièrement électrique à un moteur 4 cylindres de 15 ch, qu'il coupla à une dynamo de 80 volts. Ce générateur fournissait le courant pour les moteurs électriques intégrés aux moyeux des roues avant – soit directement, soit par le biais de la batterie qu'il alimentait parallèlement.

La Lohner-Porsche Mixte fut présentée en 1902 et devint ainsi la première automobile à motorisation hybride.



Arguments en faveur de l'hybride

Une courbe caractéristique de couple d'un moteur thermique atteint son maximum dans la plage de régime médiane, un couple très faible au ralenti, qui suffit pour accélérer le véhicule pour le mettre en mouvement.

À la différence d'un moteur thermique, la courbe d'un moteur électrique atteint son maximum à un régime de 0 1/min. Il n'a pas besoin d'un régime de ralenti, ne consomme pas d'énergie et ne rejette pas d'émissions à l'arrêt, comme un moteur thermique tournant au ralenti.

Le moteur électrique peut soutenir le moteur thermique là où sa conception présente quelques faiblesses : dans la plage de régime inférieure.

L'assistance du moteur électrique permet au moteur thermique d'utiliser sa plage d'efficacité optimale. Le déplacement du point de charge augmente le degré d'efficacité du concept de transmission. Les points forts de l'association de ces deux variantes de transmission s'expriment justement en cycle urbain, où les processus de démarrage sont fréquents et les phases de pleine charge rares.



Moteurs électriques

Tous les moteurs électriques se composent d'un stator, la partie fixe, et du rotor, qui tourne dans le stator. Le mouvement de rotation du rotor est créé par l'interaction des champs magnétiques du rotor et du stator, qui génèrent ensemble un couple. En fonction du type de moteur, les bobinages se situent dans le stator, dans le rotor ou les deux. Dans la figure, le champ magnétique du rotor est généré par exemple par un aimant permanent, ce qui simplifie grandement la structure de l'ensemble du système.

En fonction du câblage et de la disposition des bobinages dans le stator ou le rotor, les caractéristiques du moteur varient :

- Moteur à courant continu, alternatif ou triphasé
- Courant de démarrage
- Comportement de charge
- Commande de sens de rotation et commande de régime

N'importe quel moteur électrique ne peut pas être utilisé comme alternateur.

Si l'on souhaite éviter de monter deux composants (un moteur électrique et un alternateur) dans le véhicule, ce trait essentiel limite fortement le choix des types de moteurs utilisables dans le secteur hybride.

Moteurs à courant continu

Les moteurs à courant continu se distinguent par de bonnes caractéristiques de démarrage et une bonne capacité de régulation. Le régime du rotor dépend directement de la valeur de tension d'alimentation et peut donc être facilement réglé.

La conception typique d'un moteur à courant continu prévoit pour le stator un aimant permanent, tandis que le bobinage du rotor est alimenté avec la tension de service par le biais des balais de charbon. Lors de la mise sous tension, le rotor tourne jusqu'à ce que son champ magnétique se soit aligné avec celui du stator. Pour que le rotor continue de tourner, la polarité, et donc la direction du champ magnétique dans le rotor, doit changer. Cette modification est assurée par le commutateur (collecteur). Dans l'exemple ci-avant, la polarité change ainsi à 180° de rotation du rotor afin qu'il continue de tourner. Pour un moteur à 2 pôles et un moteur à 4 pôles, ceci provoque un net déséquilibre pendant le fonctionnement, de sorte qu'en pratique il est préférable d'utiliser un nombre de pôles bien plus élevé. Le commutateur génère la polarité adaptée pour permettre la rotation du rotor.

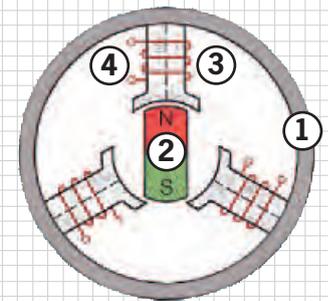
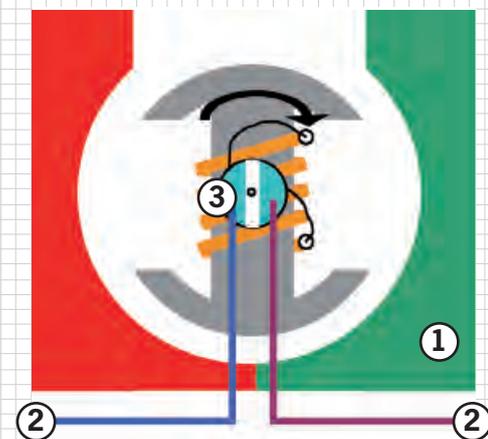


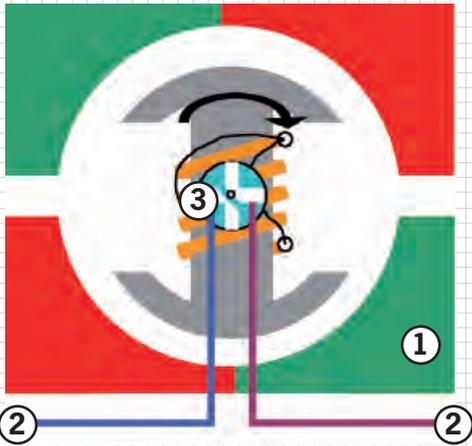
Schéma de principe du moteur triphasé

- 1 Stator
- 2 Rotor
- 3 Un des 3 bobinages du stator
- 4 Connecteurs de bobinage



Moteur à 2 pôles

- 1 Stator
- 2 Commutateur et balais
- 3 Connecteurs



Moteur à 4 pôles

- 1 Stator
- 2 Commutateur et balais
- 3 Connecteurs

Les différentes situations de conduite en mode hybride telles que :

- Changements de charge
- Variations fréquentes de régime
- Fonctionnement en tant que moteur et alternateur
- Puissance relativement élevée

nécessitent une structure beaucoup plus complexe que celle représentée.

Pour réaliser notamment un changement de sens de rotation et une fonction d'alternateur, l'électronique de puissance doit pouvoir appliquer une mise en circuit variable du bobinage du rotor et du stator. Même si le changement de sens de la tension continue fournie par la batterie haute tension disparaît avec la tension alternative ou tension triphasée, la valeur de tension doit tout de même être adaptée pour disposer de différents régimes et différents couples.

À ceci s'ajoutent certains problèmes liés à l'usure et l'abrasion des balais ou des couronnes.

Dans l'ensemble, l'argumentaire précédent tend à démontrer que l'utilisation de moteurs à courant continu n'est pas envisageable dans les véhicules hybrides.

On trouve toutefois des moteurs à courant continu dans les véhicules automobiles :

- Moteurs d'essuie-glace
- Moteurs de ventilateur
- Actionneurs
- Moteur de démarreur

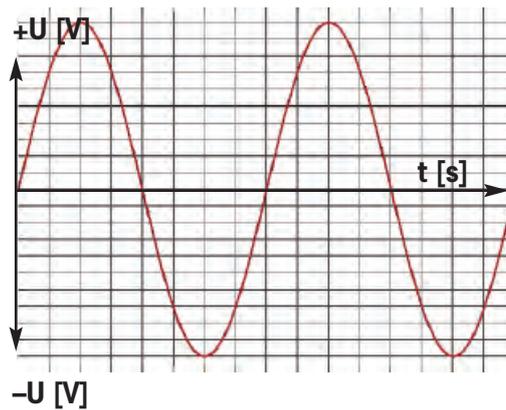
En raison de leur couple de démarrage élevé et de la simplicité de la commande de régime (via la tension de service), ils sont généralement utilisés comme moteurs d'entraînement pour les véhicules ferroviaires ou partout où la seule source d'énergie est le courant continu et où les contraintes ne nécessitent pas de conversion en courant alternatif/continu.

Moteurs à courant continu sans balais

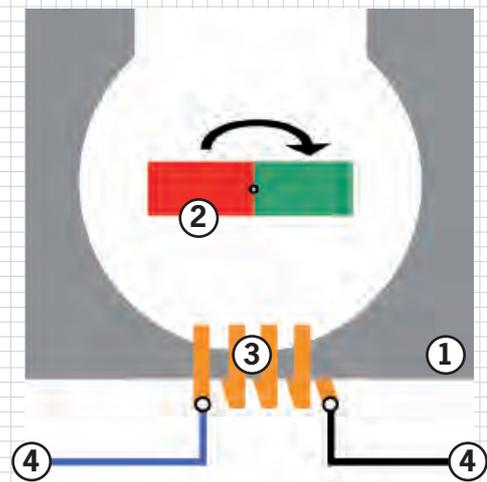
Les moteurs à courant continu sans balais sont, au niveau conception, identiques aux moteurs synchrones (voir ci-après). Ils ne nécessitent cependant pas d'électronique de commande intégrée, qui convertit le courant continu en un courant alternatif ou un courant triphasé adapté. Le moteur synchrone à courant triphasé utilisé en technologie hybride peut aussi, avec son électronique de puissance, être appelé « moteur à courant continu sans balais ».

Moteurs à courant alternatif

Dans le cas d'un moteur à courant alternatif, le changement de pôle nécessaire du champ magnétique du rotor se produit automatiquement grâce aux changements de polarité de la tension alternative appliquée au bobinage du stator (voir figure).



La disparition du commutateur et l'alimentation appliquée au niveau du bobinage du stator permettent de se passer des couronnes et des balais nécessaires pour un moteur à courant continu. Si le rotor est en mouvement ne serait ce qu'une fois, son régime dépend de la fréquence de la tension alternative, dont la valeur définit la puissance applicable. La tension alternative appliquée ne suffit pas seule pour mettre en mouvement la structure illustrée ci-dessus. Ce moteur de lancement a besoin d'une première impulsion (« poussée ») pour partir vers la gauche ou la droite.



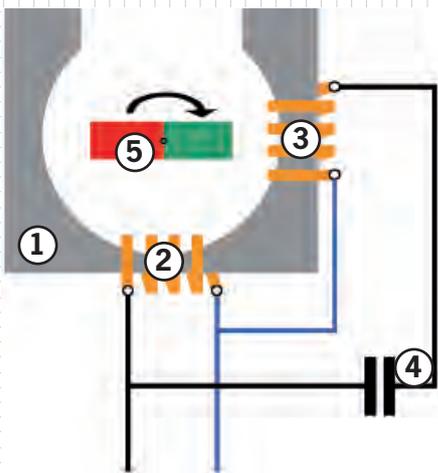
Moteur à courant alternatif (moteur de lancement)

- 1 Stator
- 2 Rotor
- 3 Bobinage de stator
- 4 Connecteurs

Une augmentation du nombre de pôles est obtenue en répartissant le bobinage autour du stator. Le régime nominal est ainsi généré dans tous les moteurs à courant alternatif/triphasé avec :

$$n = \frac{f \text{ (Hz)} * 60 \left(\frac{\text{s}}{\text{min}} \right)}{p}$$

Où f = fréquence et p = nombre de paires de pôles. À une fréquence $f = 50$ Hz, le régime nominal d'un moteur avec un nombre de paires de pôles de 2 → $n = 1\ 500$ 1/min. Le régime d'un moteur à courant alternatif ou triphasé doit donc suivre la variation de la fréquence.



Moteur triphasé avec phase auxiliaire

- 1 Stator
- 2 Bobinage de stator
- 3 Bobinage de stator pour phase auxiliaire
- 4 Condensateur
- 5 Rotor

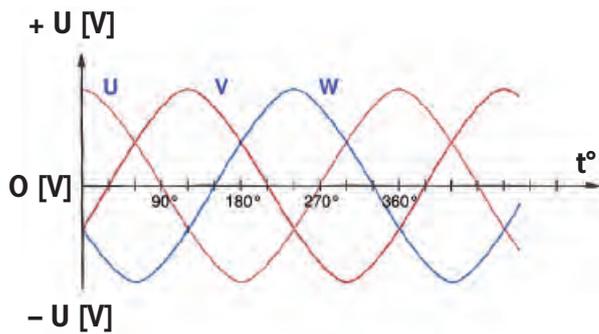
Pour obtenir la mise en marche autonome d'un moteur triphasé, un champ tournant entraînant le rotor doit être créé. Pour un moteur triphasé simple, ceci est possible avec une phase auxiliaire, créée à l'aide d'un condensateur. Cette « seconde » tension de service ainsi créée est appliquée à un autre bobinage de stator et permet la mise en mouvement automatique et la détermination du sens de rotation. Le « moteur à condensateur » trouve son utilité dans presque tous les appareils électriques alimentés par une tension secteur de 230 V. Il se caractérise par une structure simple, mais n'est pas adapté pour les puissances élevées.

Moteurs triphasés

Le courant triphasé ou courant alternatif à 3 phases est généré par des alternateurs disposant de trois bobinages éloignés de 120° dans le stator. Au niveau des bornes de connexion des bobinages du stator se trouvent donc trois tensions alternatives décalées de 120° possédant la même fréquence.

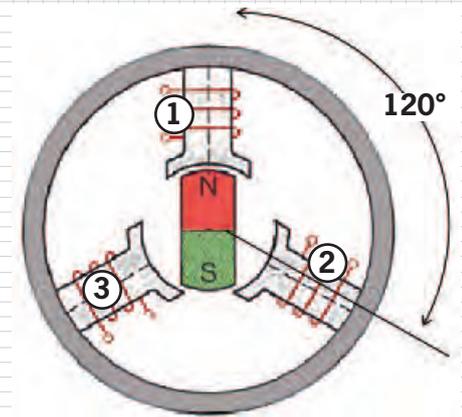
En technique automobile/hybride, ces trois phases sont appelées u, v et w. Les connecteurs de ces trois bobinages sont par conséquent souvent appelés u1, u2, v1, v2 et w1, w2.

Dans le diagramme tension-temps apparaît la courbe suivante, où le décalage de phase est très nettement visible. Le temps t est ici indiqué en degrés. Le cercle complet de 360° correspond donc à une période complète de la courbe sinusoïdale du signal.



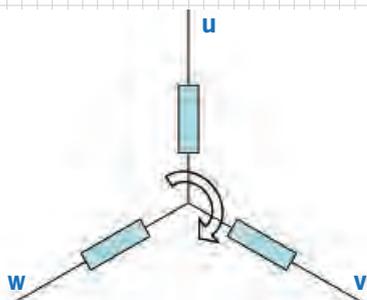
La phase auxiliaire qui est nécessaire pour le moteur à courant alternatif ne l'est plus avec le moteur triphasé, grâce à ce décalage de phases. Le champ tournant effectif du stator entraîne le rotor, de sorte que le régime dépend du nombre de pôles et de la fréquence (p/r . moteur à courant alternatif).

En technologie hybride, le régime du moteur triphasé est déterminé par la variation de la fréquence. La plage de fréquence nécessaire de l'électronique de puissance dépend ainsi du nombre de paires de pôles du stator (valeur fixe) et du régime maximal du moteur thermique, éventuellement associée à une démultiplication ou une réduction. Le sens de rotation d'un moteur triphasé est défini très simplement par la séquence de phases u, v, w. Si on inverse 2 des 3 phases, le sens de rotation s'inverse (cf. figures Étoile → vers la droite, Triangle → vers la gauche).

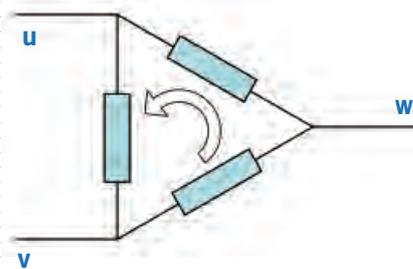


Moteur triphasé

- 1 Bobinage de stator u (Connecteurs u1, u2)
- 2 Bobinage de stator v (Connecteurs v1, v2)
- 3 Bobinage de stator w (Connecteurs w1, w2)



Branchement étoile



Branchement triangle

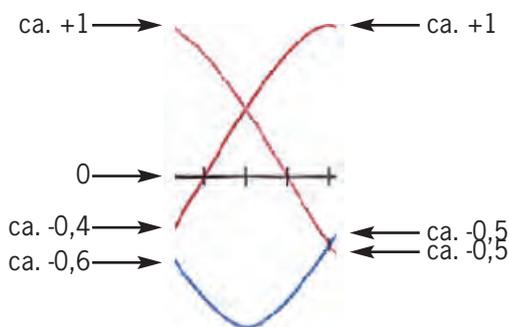
Diagramme tension-temps

- 1 Tension de bobinage, montage étoile
- 2 Tension de bobinage, montage triangle

Deux versions (branchements étoile ou triangle) sont disponibles pour le couplage des 6 connecteurs de bobinages d'un moteur triphasé. Elles ont pour avantage que seulement 3 câbles doivent être passés vers le moteur ou l'alternateur :

Branchement étoile :

L'Addition des 3 tensions u, v, w dans le diagramme tension-temps montre que la somme des trois tensions est toujours égale à zéro.

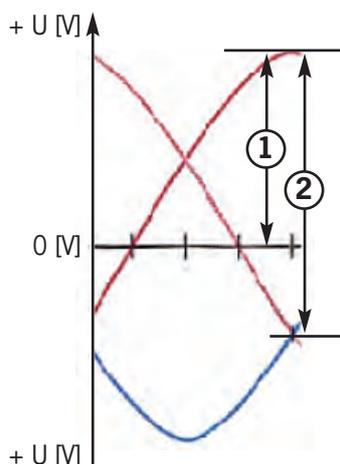


Un côté de tous les bobinages peut donc être court-circuité comme point d'étoile. Les différents bobinages sont alors à une tension correspondant à l'écart à la ligne zéro.

Branchement triangle :

Avec un montage triangle, les bobinages sont branchés en série. Chaque bobinage est alors à une tension correspondant à l'écart de deux phases.

Le diagramme tension-temps indique que les tensions sont beaucoup plus élevées que pour un montage étoile.



Résultat : le courant et la tension des moteurs/alternateurs des branchements triangle augmentent du facteur 1,73 (racine de 3) par rapport au branchement étoile. La puissance en branchement triangle est donc triplée.

Les modules hybrides utilisés par Porsche comprennent généralement des bobinages montés en triangle.

Moteurs asynchrones

Les moteurs les plus courants sont des moteurs asynchrones exploitant la technique de courant alternatif ou triphasé. Le moteur à condensateur triphasé dont nous avons déjà parlé appartient à ce groupe. L'avantage repose dans sa construction simple et sa fiabilité de fonctionnement.

Le terme asynchrone désigne la différence entre le régime du champ tournant et le régime du rotor. Les deux régimes sont asynchrones l'un par rapport à l'autre. Plus la charge mécanique sur l'arbre du moteur est élevée, plus la différence de régime est élevée (glissement en %), ainsi que la consommation électrique des bobinages du moteur. Sans cette variation de régime, le moteur asynchrone ne développe aucun couple. Dans le même temps se justifie ici le besoin d'un courant de démarrage élevé. Les plages de puissance des moteurs asynchrones vont des petits moteurs triphasés des maquettes de trains électriques aux mégawatts dans les grandes industries.

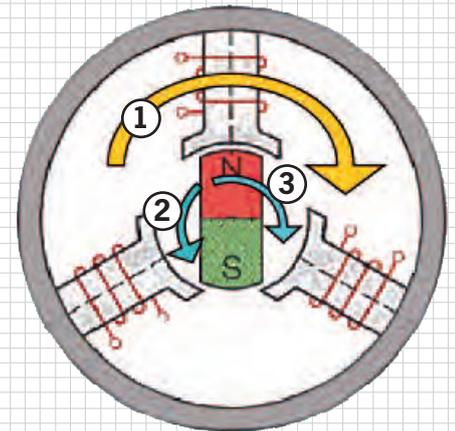
L'inconvénient des moteurs asynchrones est les courants de démarrage élevés ainsi que, dans le cas de la technologie hybride, leurs mauvaises propriétés pour jouer le rôle simultané d'alternateur.

Moteurs synchrones

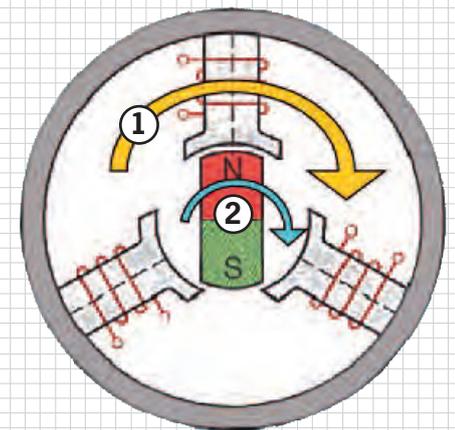
Ce que l'on appelle moteurs synchrones se révèle être le mieux adapté pour le domaine hybride. À l'inverse du moteur asynchrone, le régime de rotor est égal au régime de champ tournant. Cette caractéristique est obtenue en modifiant légèrement la structure des bobinages et la disposition des pôles d'aimants. Le régime de rotor est ainsi exclusivement déterminé par le nombre de paires de pôles et la fréquence (glissement = 0).

L'inconvénient des moteurs synchrones réside dans leur faible tolérance à la surcharge. Si la charge mécanique est trop élevée, le régime du rotor baisse sous le régime de champ tournant. Le moteur est hors synchronisme et s'arrête. C'est pourquoi un moteur synchrone ne démarre pas seul.

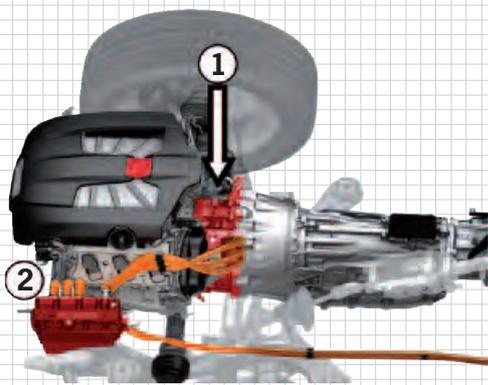
Ce comportement doit être corrigé par la gestion moteur. Dans le Porsche Cayenne S Hybrid, l'électronique de puissance réalise une adaptation de la fréquence. Le démarrage du moteur est obtenu en augmentant la fréquence de 0 Hz jusqu'au



- 1 Régime de champ tournant
- 2 Différence de régime, glissement
- 3 Régime de rotor moindre



- 1 Régime de champ tournant
- 2 Régime de rotor



- 1 Module hybride
- 2 Électronique de puissance

régime souhaité. Un moteur synchrone ne peut donc pas fonctionner sans électronique de commande.

Un moteur synchrone a pour avantages d'être très compact et de se prêter sans problème au rôle d'alternateur. Dans la figure, le module hybride complet du Porsche Cayenne S Hybrid, composé d'un embrayage à sec et d'un moteur électrique/alternateur, entre le moteur thermique et la boîte de vitesses. Le module complet mesure presque 150 mm de long et fournit une puissance globale de 38 kW.

Même les dynamos triphasées de l'industrie automobile sont des alternateurs synchrones !

Puissance et travail électrique

La puissance électrique ($P = \text{Power}$) est définie comme le produit du courant et de la tension ($P = U \times I$). Elle est mesurée en watts (W), voire en kilowatts (kW). La batterie nickel-métal hydrure du Porsche Cayenne S Hybrid possède une puissance électrique maximale de 38 kW pour une tension continue de 288 volts. Par conséquent, on en déduit par calcul que le courant continu maximal est $I=131,9 \text{ A}$.

Une consommation de courant est possible sur une courte durée. Les courants d'impulsion maximaux sont de +120 A (charge) et/ou de -180 A (décharge). La surveillance est assurée par la gestion de la batterie. Ce calculateur fait partie du système de gestion batterie (BMS) et est placé directement sur la batterie haute tension, dans la partie arrière du véhicule.

Si une puissance électrique P est fournie ou consommée sur une période ($t=\text{Time}$), le travail électrique ($W=\text{Work}$) a été exécuté. Le travail électrique W est par conséquent le produit de la puissance et du temps ($W = P \times t$). Il est également appelé réserve d'énergie, car il constitue une mesure de l'énergie consommable.

Pour les batteries de 12 volts, le travail électrique W en wattheures (Wh) ou en kilowattheures (kWh) n'est pas indiqué. Elles portent la capacité électrique C en ampèreheures (Ah). La signification est la même. Si on multiplie la capacité électrique par la tension de la batterie, on obtient le travail électrique ($W = C \times t$).



À titre de comparaison :

La batterie AGM de 12 volts du Porsche Cayenne S Hybrid possède une capacité électrique de 80 kW ampèreheures (Ah) à 12 volts.

Il en résulte un travail électrique ou une réserve d'énergie de :

960 wattheures (Wh), c.-à-d. env. 1 kWh pour une tension nominale de 12 V.

La batterie nickel-métal hydrure haute tension à l'arrière du véhicule présente une réserve d'énergie totale **d'env. 1,7 kWh pour une tension nominale de 288 volts.**

Elle fournit une puissance **d'env. 38 kW et a une capacité d'env. 5,5 Ah.**

Rendement

Le rendement est le rapport entre la puissance restituée et la puissance absorbée. L'un des principaux arguments en faveur des moteurs électriques est le rendement élevé de tous les composants.

Tandis que pour les moteurs thermiques, on peut escompter des rendements inférieurs à 50 %, les rendements du moteur électrique, de l'alternateur et de la batterie sont d'env. 90 %!

Conversion de tension

Les différentes tensions utilisées dans le réseau de bord et le moteur électrique demandent des conversions de tensions, qui doivent remplir les rôles suivants :

- Conversion du courant triphasé fourni par l'alternateur en tension continue pour recharger la batterie haute tension par le biais de l'onduleur à MLI ou pour alimenter le compresseur haute tension de la climatisation.
- Conversion de la tension continue de la batterie haute tension en tension continue plus basse pour le réseau de bord de 12 V.
- Conversion de la tension continue de la batterie haute tension en courant triphasé pour le moteur électrique (MLI).
- La charge de la batterie haute tension avec un chargeur de 12 volts nécessite également une conversion. Cette variante n'est pas comprise dans le concept hybride de Porsche. Pour la recharge de la batterie haute tension par une source externe, il existe un chargeur haute tension.



Quand la batterie 12 V est déchargée, le véhicule ne peut plus fonctionner, car les calculateurs sont alimentés en tension par le réseau de bord de 12 V. La recharge peut être effectuée de manière conventionnelle.



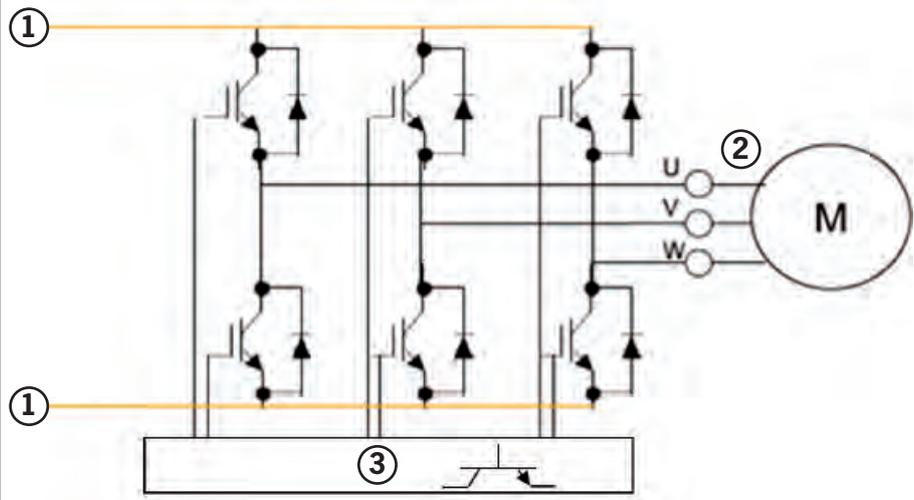
Onduleur à MLI

- 1 Connecteurs de tension continue
- 2 Courant triphasé
- 3 Commande de micro-processeur

Onduleur à MLI

La conversion du courant continu en courant triphasé et inversement se fait par un couplage appelé selon le cas convertisseur abaisseur ou convertisseur élévateur.

La combinaison des deux est appelée onduleur à MLI.



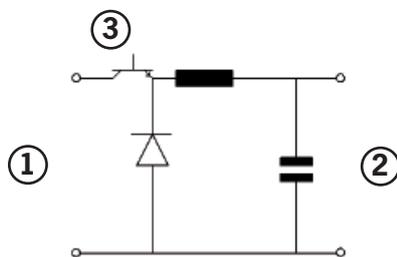
Tandis la configuration supérieure (convertisseur élévateur) s'applique aux demi-ondes positives, le couplage inférieur (convertisseur abaisseur) génère les demi-ondes négatives. Les transistors sont activés plusieurs fois par seconde par une commande de micro-processeur. À la sortie, il est quasiment possible d'obtenir les valeurs de tension et les fréquences voulues. Si le moteur électrique fonctionne comme alternateur, cette conversion de la tension triphasée en la tension continue nécessaire pour recharger la batterie haute tension ou alimenter le compresseur haute tension de la climatisation.

Conversion CC/CC

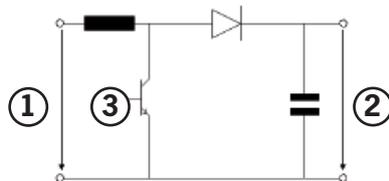
Tandis que pour les tensions triphasées, la modification de la valeur de tension est très simple - presque sans perte - grâce à l'usage d'un transformateur, dans le domaine de la tension continue on utilise des couplages de base composés d'une bobine, d'une diode et d'un condensateur.

Couplages utilisés :

Convertisseur abaisseur → Diminution de la tension continue



Convertisseur élévateur → Augmentation de la tension continue
(non compris dans le concept hybride de Porsche)

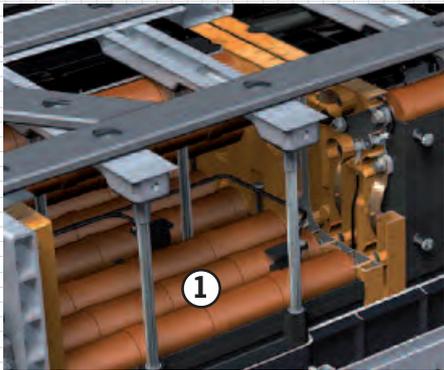


Les couplages sont activés et désactivés rapidement par le biais d'un transistor (commutateur). Le rapport cyclique de ces processus de commutation détermine le degré d'augmentation ou de diminution de la tension.

Le convertisseur CC/CC et l'onduleur à MLI sont les deux composants principaux de l'électronique de puissance. Le couplage rapide des transistors de puissance utilisés génère de la chaleur, qui doit être évacuée par un circuit de refroidissement par liquide. Pour cela est installé un circuit basse température spécifique, utilisé également pour refroidir l'échangeur air-air à l'intérieur du module de suralimentation du moteur V6 de 3,0 l DFI.

Conversion CC/CC

- 1 Tension d'entrée
- 2 Tension de sortie
- 3 Activation (côté masse)



Construction interne de la batterie nickel-métal hydrure haute tension du Porsche Cayenne S Hybrid

1 Cellule de batterie individuelle

Batteries haute tension

Principes de base

La question du stockage de grandes quantités d'énergie électrique n'a actuellement pas trouvé de solution satisfaisante. Si le stockage direct n'est possible que dans des condensateurs, l'électricité est stockée sous forme d'énergie chimique dans toutes les batteries. Ce « détour » est actuellement beaucoup plus important que le type de condensateur. Même dans les « Supercaps » (super-condensateurs), le stockage n'est possible que pour des quantités d'électricité très limitées. La tension d'une seule cellule de batterie a une base chimique et se trouve dans la plage < 2 volts. Pour obtenir des tensions plus élevées, plusieurs cellules sont couplées en série dans toutes les batteries haute tension. La batterie haute tension du Cayenne S Hybrid contient des modules de 6 cellules en série (7,2 V). 40 de ces modules sont à leur tour couplés en série, produisant une tension totale de 288 V.

La densité énergétique est une donnée essentielle pour déterminer l'adéquation d'un matériau accumulateur, elle est indiquée en wattheures par kilogramme (Wh/kg).

Plus cette valeur est élevée, plus le matériau accumulateur est léger (donc petit) à capacité égale. La technologie de condensateur actuelle permet d'atteindre aujourd'hui des densités énergétiques de 10 Wh/kg au maximum.

Les batteries courantes telles que la batterie nickel-métal hydrure du Porsche Cayenne S Hybrid atteignent une densité énergétique d'environ 80 Wh/kg.

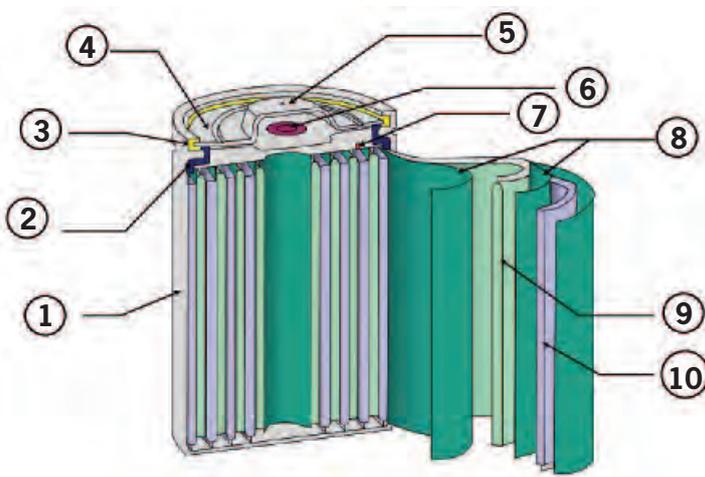
En raison de la décharge spontanée relativement élevée d'un condensateur, les condensateurs ne sont « encore » pas une option envisageable, au moins pour le stockage longue durée de l'énergie.

À titre de comparaison:

La densité énergétique de l'essence réside aux alentours de 12 000 Wh/kg !

Batteries nickel-métal hydrure

Sur une batterie NiMH, la force électromotrice de la source d'une seule cellule est générée par un excédent de particules d'hydrogène chargées sur une électrode. L'électrode positive est constituée d'un alliage Nickel-Oxygène-Hydrogène (hydroxyde de nickel). L'électrode négative quant à elle est en alliage métallique, capable d'accumuler de l'hydrogène de manière réversible.



Structure d'une batterie NiMH

- 1 Boîtier et connexion
- 2 Isolant
- 3 Matériau joint
- 4 Couvercle
- 5 Connecteur +
- 6 Soupape de sûreté
- 7 Thermistance CTP
- 8 Séparateur
- 9 Électrode positive
- 10 Électrode négative

Lors de la charge, les particules d'hydrogène de l'électrode négative se déplacent vers l'électrode positive et s'allient au matériau de l'électrode. Le processus de décharge se déroule dans le sens inverse.

Une cellule NiMH dispose de 2 mécanismes de sûreté. Une thermistance CTP limite le débit de courant à températures élevées. Une soupape de sûreté permet de contrôler l'évacuation de la pression générée.

Les batteries nickel-métal hydrure ont donc supplanté les batteries nickel-cadmium utilisées auparavant. Parmi les trois formes basiques de cellules des systèmes de batterie (cellule plate, cellule ronde/cylindrique et cellule prismique), Porsche a opté pour la forme cylindrique, car elle est très stable d'un point de vue mécanique, peu coûteuse à produire et, qui plus est, d'une densité énergétique élevée. En outre, le refroidissement d'une cellule cylindrique est plus facile à mettre en œuvre du fait des espaces entre les cellules. La densité énergétique d'une batterie nickel-métal hydrure avoisine généralement 80 Wh/kg. Il est impossible qu'elle augmente à l'avenir.



Une forte décharge, suivie d'une recharge complète pour la « récupération de l'énergie », n'est possible et judicieuse qu'avec un accumulateur nickel-cadmium.

Batteries lithium-ion

Sur une batterie lithium-ion, la force électromotrice d'une seule cellule est générée par le déplacement d'atomes de lithium (= ions lithium) positifs. L'électrode positive est composée d'oxyde de lithium (composé Lithium-Oxygène), l'électrode négative est souvent en graphite.

Lors du processus de charge, les ions lithium positifs se déplacent de l'électrode positive vers les couches de graphite de l'électrode négative. Il en résulte un excédent de charge, pouvant être mesuré comme force électromotrice de la source de chaque cellule. Le processus de décharge se déroule dans le sens inverse.

Le lithium est hautement réactif et réagit beaucoup plus facilement que le nickel avec d'autres matériaux. Par conséquent une batterie lithium-ion possède d'une part une densité énergétique beaucoup plus élevée (env. 150 Wh/kg), elle nécessite d'autre part des mesures de protection interne importantes visant à éviter une forte décharge. Dans la phase de démarrage du développement, des problèmes isolés sont ainsi apparus dans le domaine de l'électronique de loisirs, en raison de l'insuffisance des mesures de protection qui avaient été prises.

Les batteries lithium-ion sont actuellement largement utilisées dans l'électronique de loisirs. En tant qu'accumulateurs d'énergie haute tension pour la technologie hybride, la batterie nickel-métal hydrure possède encore quelques atouts grâce à sa nette avance en matière de développement, ses avantages au niveau sécurité et son plus faible coût.

Les deux formats de batterie décrits sont très sensibles à la surcharge ou à la forte décharge. Les processus chimiques qui s'opèrent à l'intérieur des cellules sont irréversibles. Dans le cas de la batterie lithium-ion, des liaisons conductrices apparaissent en cas de forte décharge, elles peuvent entraîner la surchauffe de la batterie (voir ci-dessus). La capacité globale disponible de la batterie nickel-métal hydrure baisse progressivement avec chaque processus de charge/décharge dépassant certaines limites. Pour ces raisons, la gestion de la batterie doit généralement limiter le « hub » (largeur de bande utilisée de la capacité d'énergie totale). L'altération de la batterie haute tension est très lente et imperceptible pour le conducteur. Dans les moteurs hybrides de Porsche, la batterie haute tension est conçue pour durer toute la vie du véhicule.

Les batteries atteignent leur puissance maximale dans une plage de température déterminée, comprise entre +10°C et +37°C pour la batterie haute tension du Porsche Cayenne S Hybrid. La batterie est protégée des températures trop basses de par son emplacement de montage. En outre, une charge/décharge à impulsions est appliquée activement à la batterie haute tension afin d'atteindre sa température de fonctionnement optimale. La protection contre les températures élevées est assurée par un refroidissement par air.



Technologie hybride DME

2

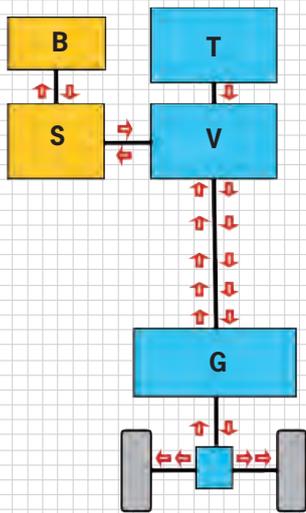
Variantes de la technologie hybride

Par motorisations hybrides s'entend une combinaison de deux groupes propulseurs différents, fonctionnant selon des principes distincts. Actuellement, le terme de technologie hybride sous-entend l'association d'un moteur thermique et d'un moteur électrique. En fonction de l'orientation de cette conception basique, on obtient trois types de moteurs hybrides :

- le moteur micro-hybride,
- le moteur semi-hybride,
- le moteur hybride intégral.

Types d'hybride (plage de puissance)	Micro-hybride (env. 2 - 10 kW)	Semi-hybride (env. 15 - 30 kW)	Hybride intégral (env. 20 - 75 kW)
Fonctions			
Start-Stop	X	X	X
Freinage avec récupération de l'énergie	X	X	X
Boost		X	X
Conduite électrique			X
Avantages clients			
Réduction de la consommation	X	X	X
Comportement dynamique		X	X
Conduite électrique			X

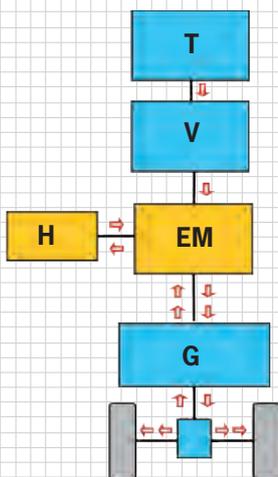
Différents constructeurs ont mis sur le marché des exemples pour toutes les variantes. Mais seul l'hybride intégral est capable d'allier tous les avantages de l'association d'un moteur thermique et d'un moteur électrique. La technologie d'hybride intégral parallèle sur un arbre utilisée par Porsche représente actuellement le summum de la technologie de motorisations hybrides.



- T Réservoir de carburant
- V Moteur thermique
- G Boîte de vitesses
- S Démarreur
- B Batterie 12 volts

Le moteur micro-hybride

Dans ce concept de motorisation, le composant électrique (démarreur électrique/alternateur) assure simplement la mise en œuvre d'une fonction Stop-Start. Une partie de l'énergie cinétique peut être réutilisée comme énergie électrique lors du freinage (récupération). Il est impossible de rouler sous alimentation purement électrique. Les caractéristiques du démarreur et de la batterie de 12 volts sont adaptées aux démarrages fréquents du moteur.



- T Réservoir de carburant
- V Moteur thermique
- EM Moteur électrique
- G Boîte de vitesses
- H Batterie haute

Le moteur semi-hybride

Le moteur électrique assiste le moteur à combustion. C'est pourquoi la batterie haute tension est aussi appelée batterie de traction. Il est impossible de rouler sous alimentation purement électrique. Avec le moteur semi-hybride, une grande partie de l'énergie cinétique issue du freinage est récupérée et accumulée sous forme d'électricité dans la batterie haute tension. La batterie haute tension est les composants électriques sont conçus pour recevoir une tension élevée et donc pour une puissance élevée. Parallèlement à la batterie haute tension peuvent également être présents une batterie de 12 volts et un démarreur conventionnel. L'assistance offerte par le moteur électrique permet au conducteur de disposer d'un couple de boost supplémentaire.

Le moteur hybride intégral

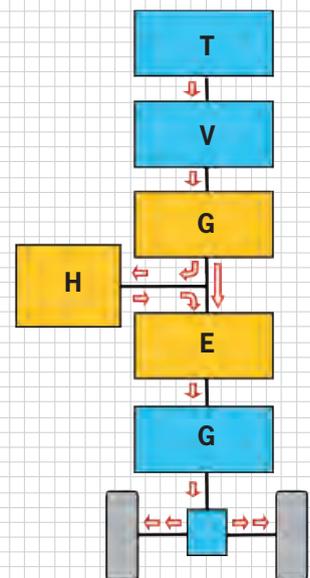
Un moteur électrique puissant est associé à un moteur thermique. La conduite tout électrique est possible. L'autonomie dépend uniquement du dimensionnement de la batterie haute tension (batterie de traction). Le moteur électrique soutient le moteur thermique lorsque le couple demandé par le conducteur l'exige. Il est possible de rouler lentement avec une alimentation entièrement électrique. Le moteur thermique est arrêté dès qu'il n'est indispensable. Le module de gestion hybride détermine quand il doit être remis en marche. La récupération de l'énergie au freinage est utilisée pour recharger la batterie haute tension.

Les moteurs de type hybride intégral se répartissent en trois groupes :

- Hybride série
- Hybride à dérivation de puissance
- Hybride parallèle

Motorisation hybride série

Cette variante de motorisation est depuis longtemps utilisée dans une forme similaire par les locomotives électriques-diesel et les bateaux par exemple. Le moteur thermique n'a pas de liaison à la roue. La motricité du véhicule est assurée par le moteur électrique. Le moteur thermique peut fonctionner dans la plage de fonctionnement optimale en permanence et produit une énergie mécanique pour l'alternateur. Le moteur électrique est alimenté soit directement à partir de l'alternateur, soit par le biais de la batterie haute tension. Si la capacité de la batterie haute tension est trop faible, le moteur thermique démarre et charge la batterie par le biais de l'alternateur.



T Réservoir de carburant

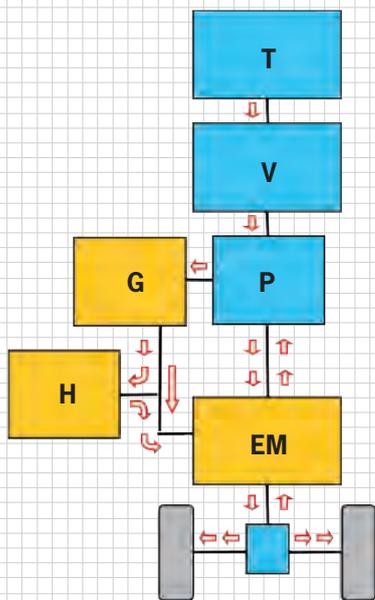
V Moteur thermique

G Alternateur

E Moteur électrique

G Boîte de vitesses

H Batterie haute



- T Réservoir de carburant
- V Moteur thermique
- P Boîte à trains épicycloïdaux
- EM Moteur électrique
- G Alternateur
- H Batterie haute tension

Motorisation hybride à dérivation de puissance

Le moteur hybride à dérivation de puissance possède, outre un moteur thermique, un alternateur et un moteur électrique. Tous sont montés sur l'essieu avant. La motricité est assurée par le moteur thermique par le biais d'une boîte à trains épicycloïdaux ou par le moteur électrique sur la transmission qui lui est parallèle. En fonction de l'activation de la boîte à trains épicycloïdaux, il est possible de commuter entre le mode de fonctionnement série et parallèle. Contrairement à la construction hybride parallèle, ce moteur ne permet pas d'appliquer la somme des puissances des deux types de moteur au niveau de la roue. Pour rouler, il est toujours converti en puissance électrique une partie de la puissance fournie par le moteur thermique par le biais de l'alternateur, puis cette puissance est restituée par le moteur électrique au niveau de la roue. La puissance motrice maximale est la somme de la puissance du moteur thermique et de la puissance de la batterie.

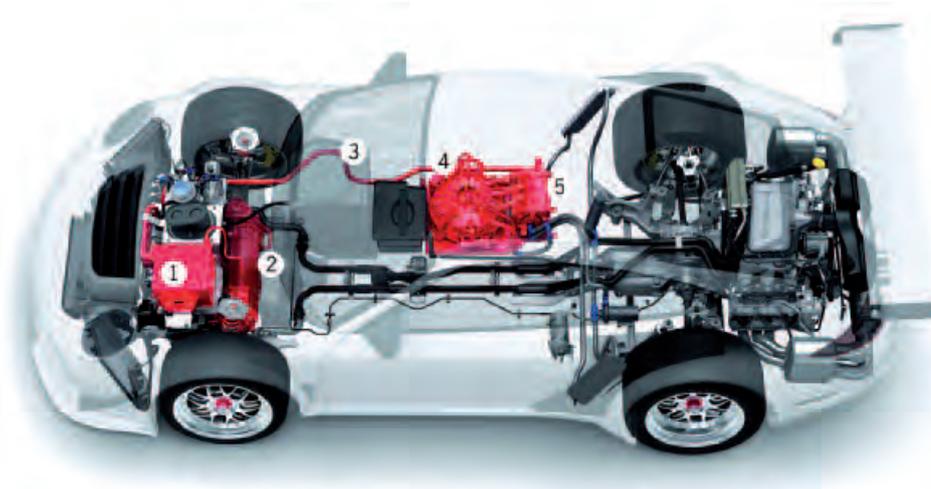
Motorisation hybride série à dérivation de puissance

Pour les véhicules à transmission intégrale, il est possible d'utiliser une combinaison des types de motorisation susmentionnés. Le moteur hybride série à dérivation de puissance possède un moteur thermique et deux moteurs électriques. Le moteur électrique 2 peut être couplé au besoin pour entraîner l'essieu avant.

Porsche exploite ce concept en compétition automobile GT, proches des modèles de série. L'essieu avant de la nouvelle Porsche 911 GT3 R est entraîné par 2 moteurs électriques d'une puissance totale de 120 kW en plus des 480 ch du moteur 6 cylindres à plat placé à l'arrière. À la place de la batterie haute tension conventionnelle est utilisé un volant d'inertie accumulateur électrique. Les deux moteurs électriques produisent de l'énergie au freinage, qui est convertie en énergie de rotation dans le volant d'inertie accumulateur. Lors de dépassements ou d'accélération pour sortir de virages, le volant d'inertie accumulateur opère comme un alternateur et entraîne par l'énergie qu'il renferme les deux moteurs électriques au niveau de l'essieu avant.



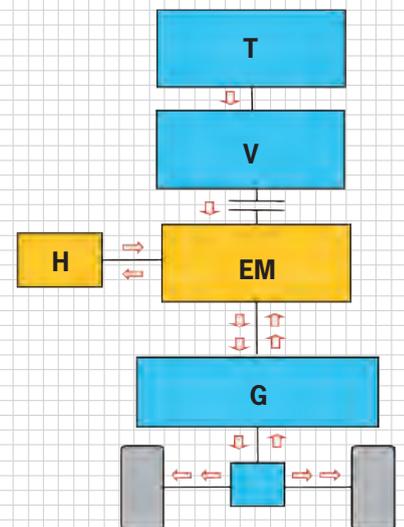
Technologie hybride DME



- 1 Électronique de puissance 1
- 2 2 moteurs électriques
- 3 Câble haute tension
- 4 Volant d'inertie accumulateur
- 5 Électronique de puissance 2

Motorisation hybride parallèle

La conception parallèle se distingue par sa simplicité. Elle est souvent utilisée quand un véhicule existant doit être « hybridisé ». La plupart des pièces existantes peuvent alors être reprises, sans généralement nécessiter de nouveau développement. Cette simplicité s'explique par la compacité du module hybride (seulement 15 cm env. sur le Cayenne S Hybrid).

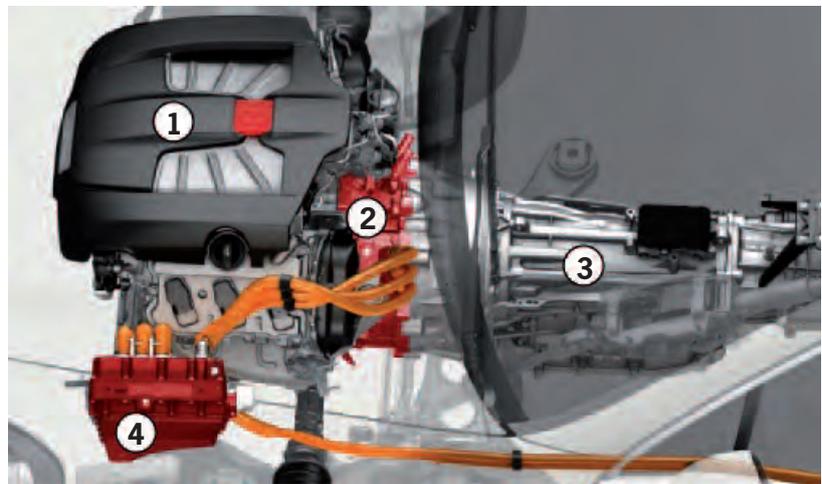


- T Réservoir de carburant
- V Moteur thermique
- P Boîte à trains épicycloïdaux
- EM Moteur électrique
- G Boîte de vitesses
- H Batterie haute

Le concept de motorisation du Porsche Cayenne S Hybrid correspond à une motorisation hybride parallèle sur un arbre.

Le module hybride se trouve derrière entre le moteur thermique et la transmission sur un arbre commun et ne mesure que presque 15 cm. Il intègre un embrayage. Avec la commande par la gestion hybride, il est ainsi possible de couper l'adhérence entre le moteur thermique et le moteur électrique.

- 1 Moteur thermique
- 2 Module hybride avec embrayage
- 3 Boîte de vitesses
- 4 Électronique de puissance





Technologie hybride DME

2

Le concept de motorisation hybride parallèle de Porsche offre en tout 6 modes de conduite spécifiques à l'hybride. Ceux-ci peuvent être adaptés à la situation en cours par le biais du module de gestion hybride intégré à l'EMS Bosch MED 17.1.6 :

1) Conduite tout électrique

- L'embrayage est ouvert et le moteur thermique est coupé. Seul l'E-Machine (en tant que moteur électrique) anime le véhicule.

2) Boost

- L'embrayage est fermé, le moteur thermique et l'E-Machine (en tant que moteur électrique) entraînent le véhicule au maximum de puissance. Les régimes et les puissances s'ajoutent pour obtenir une puissance totale.

3) Conduite thermique avec déplacement du point de charge

- Variante 1 : l'embrayage est fermé, le moteur thermique charge la batterie et entraîne le véhicule (élévation du point de charge).
- Variante 2 : l'embrayage est fermé, le moteur thermique entraîne le véhicule et est assisté par le moteur électrique (abaissement du point de charge).

4) Cruising (roulage sans force motrice jusqu'à 156 km/h)

- L'embrayage est ouvert et le moteur thermique est coupé. Le moteur électrique fonctionne presque sans frottement. Le véhicule roule sans couple de freinage notable.

5) Freinage régénératif (récupération de l'énergie)

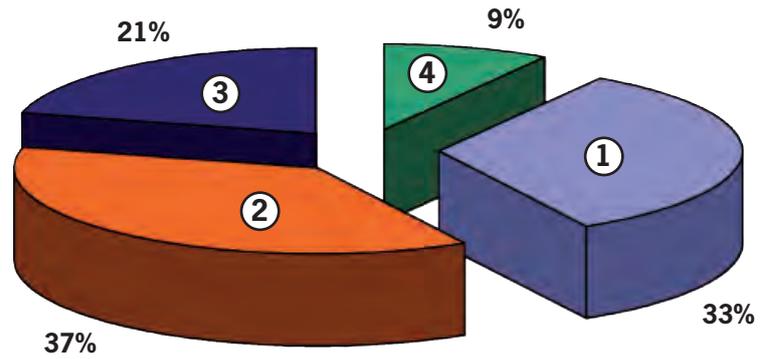
- L'E-Machine (en tant qu'alternateur) génère du courant, qui servira à charger la batterie haute tension et à alimenter le réseau de bord.

6) Fonction Stop-Start

- Le démarrage et l'arrêt du moteur thermique sont exclusivement commandés par le module de gestion hybride. Le conducteur n'a aucun moyen d'influencer directement ce comportement.

- 1 Moteur thermique, arrêt
- 2 Moteur thermique, démarrage
- 3 Conduite en mode électrique
- 4 Récupération

Dans le nouveau cycle de conduite européen (NEDC), les états de conduite se répartissent selon la figure suivante.



Les états de fonctionnement « Boost » et « Cruising » ne sont pas pris en compte dans le NEDC.

Transmission

Adaptations spécifiques à l'hybride

Disparition de composants

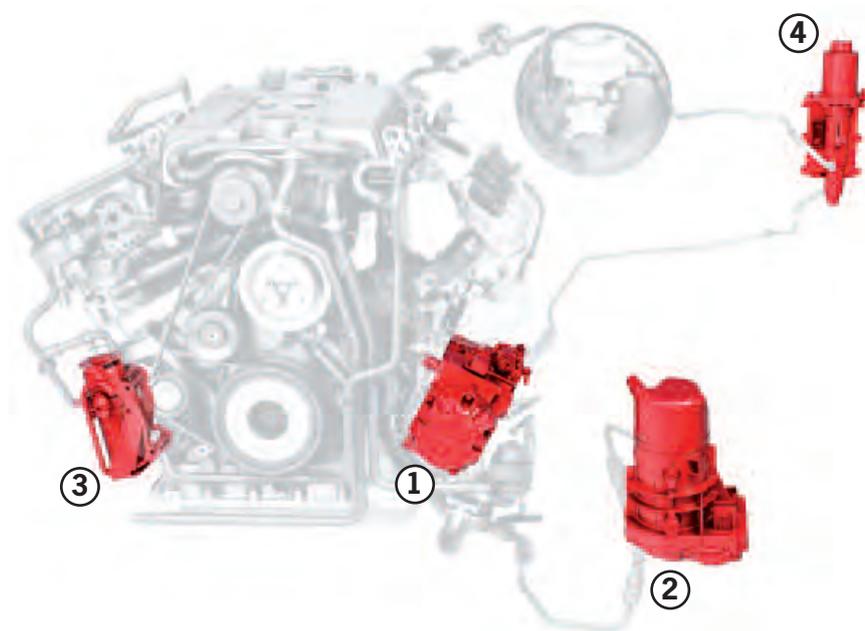
La mise en œuvre de l'hybride a permis de supprimer 2 accessoires du moteur thermique :

- Le démarreur conventionnel n'est pas utilisé. L'E-Machine assure le démarrage après actionnement de l'embrayage.
- Disparition de l'alternateur de 12 V. Le réseau de bord est alimenté via le convertisseur CC/CC de l'électronique de puissance, qui abaisse la tension de la batterie haute tension au niveau du réseau de bord.

Accessoires moteur électriques

Pour assister certaines fonctions du véhicule lorsque le moteur thermique est arrêté, certains composants ont été rendus électriques ou des composants électriques supplémentaires ont été utilisés :

- Compresseur de climatisation électrique haute tension pour la climatisation de l'habitacle
- Pompe d'assistance électro-hydraulique pour l'assistance de direction
- Pompe à dépression électrique supplémentaire pour l'assistance de freinage
- Pompe à huile électrique supplémentaire pour la lubrification de la boîte de vitesses
- Deux pompes à eau électriques supplémentaires (l'une pour le circuit haute température, l'autre pour le circuit basse température)
- Actuateur électro-hydraulique pour la commande de l'embrayage

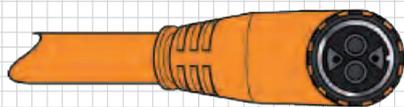
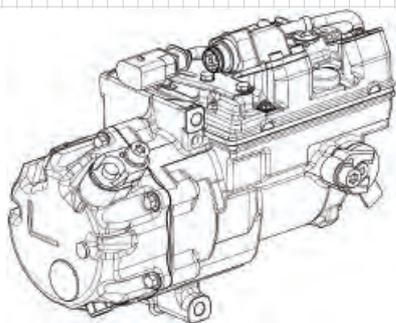


Pour de plus amples informations, voir « Moteur », « Transmission » et « Châssis ».

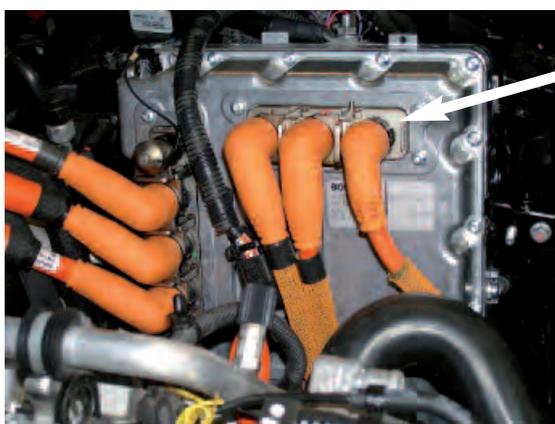
- 1 Compresseur de climatisation haute tension
- 2 Pompe d'assistance (assistance de direction)
- 3 Pompe à dépression (assistance de freinage)
- 4 Actuateur (embrayage)

Compresseur de climatisation

Accessoire consommant 3,2 kW maximum, le compresseur de climatisation a été raccordé au réseau de 288 volts de la batterie NiMH. Un câble haute tension relie le compresseur de climatisation dans un premier temps à l'électronique de puissance, qui transmet la tension continue de la batterie. À l'intérieur de l'électronique de puissance se trouve un fusible du compresseur de climatisation.



Pour de plus amples informations, voir le sous-ensemble « Climatisation ».



Alors que toutes les liaisons à l'électronique de puissance sont assurées par des câbles à un conducteur, le câble de liaison au compresseur de climatisation en compte quatre et possède, outre les deux pôles d'alimentation en tension continue, deux câbles pilotes pour garantir l'intégrité du système dans son ensemble.

Le moteur du compresseur de climatisation est un moteur triphasé (moteur à courant continu sans balai). La tension continue est convertie au niveau du compresseur en tension triphasée de 3x 280 volts.

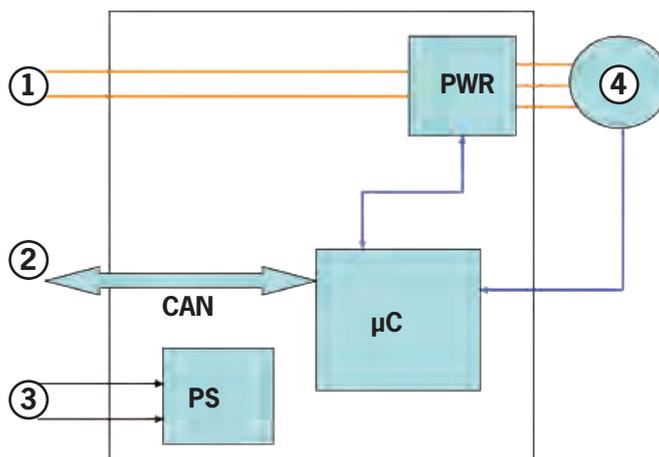
Schéma fonctionnel

Commande du compresseur de climatisation haute tension

- 1 288 V DC
- 2 Liaison CAN (calculateur d'airbag)
- 3 Borne 15 et borne 31
- 4 Moteur triphasé
- PS Portion de réseau interne
- PWR Onduleur à MLI
- μC Calculateur

↔ Informations

— Câble haute tension





Autres accessoires supplémentaires

Pour que l'assistance de direction soit assurée même en l'absence du moteur thermique, la pompe d'assistance de direction est également électrique (tension nominale 12 V DC).

La pompe à huile électrique supplémentaire alimentant la boîte de vitesses garantit que les changements de rapport restent possible même quand le moteur thermique est arrêté et que les pièces mobiles reçoivent suffisamment d'huile.

Grâce aux éléments de pompe électriques, l'assistance de direction et l'assistance de freinage restent à même de remplir leur rôle par exemple en conduite tout électrique.

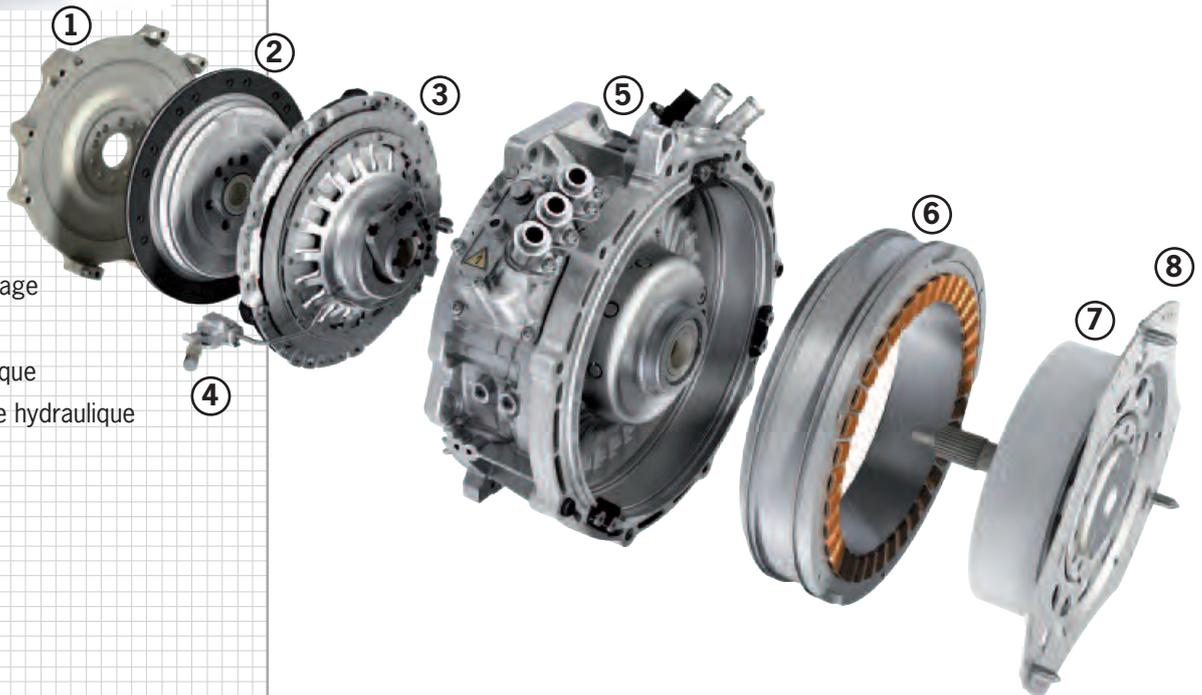
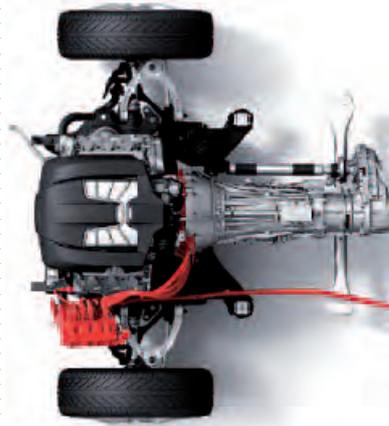
Étant des composants puissants de la transmission hybride, l'E-Machine et l'électronique de puissance doivent elles aussi être refroidies lorsque le moteur thermique est arrêté. À cette fin sont utilisées deux pompes à eau électriques.



Pour de plus amples informations, voir les sous-ensembles correspondants.

Module hybride

Le module hybride est situé, selon un principe modulaire, entre le moteur thermique et la boîte de vitesses. Le module complet (E-Machine et embrayage) ne mesure que 147,5 mm de long et pèse environ 53 kg. Cette compacité a permis son intégration sans modifications importantes de la transmission.



- 1 Volant moteur
- 2 Disque d'embrayage
- 3 Cale de pression
- 4 Raccord hydraulique
- 5 Boîtier du module hydraulique
- 6 Stator
- 7 Rotor
- 8 Plaque flexible



La dépose et la repose du module hybride et des différents composants demandent un outillage spécial. Le flexible hydraulique ne doit en aucun cas être endommagé ou tordu lors des travaux.

Voir le Manuel d'atelier !

Il se compose d'un embrayage côté liaison au moteur thermique et à l'E-Machine, l'adhérence avec la boîte de vitesses étant assurée par une plaque flexible. Le rotor de l'E-Machine avec la plaque flexible assure la liaison côté BV du module hybride avec le convertisseur de la boîte automatique à 8 rapports. Les composants de l'E-Machine ne peuvent être remplacés qu'en tant qu'ensemble, mais ceux de l'embrayage volant moteur, disque d'embrayage et cale de pression peuvent l'être séparément.

Embrayage

L'embrayage assure l'adhérence entre le moteur thermique et le module hybride et permet des couplages et des découplages rapides et confortables dans les transitions entre les modes de fonctionnement spécifiques à l'hybride. Lors de la transition entre la conduite électrique et la conduite sous moteur thermique, l'embrayage se ferme en env. 70 ms et en parfaite adéquation avec le couple.

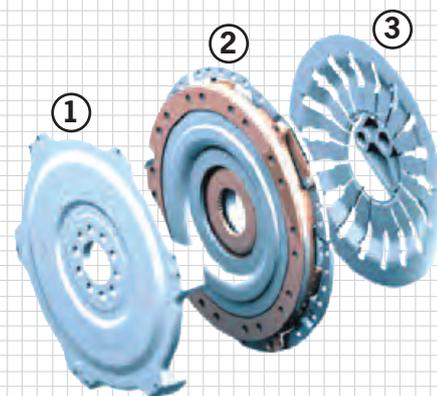
L'embrayage est fermé dans tous les modes nécessitant l'adhérence entre le moteur thermique et la transmission. Il assure que la force du moteur thermique peut être rapidement, et sans nuire au confort, être transmise à l'E-Machine, à la boîte de vitesses, et de là sur la route.

L'embrayage est soumis aux contraintes suivantes :

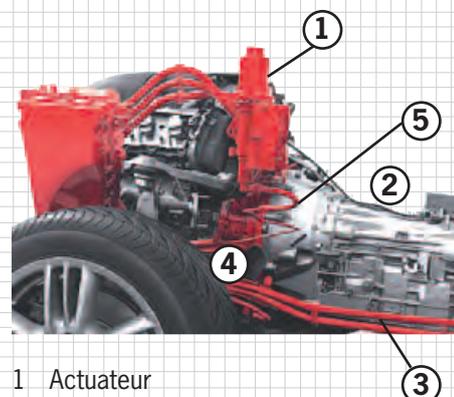
- Capacité de transmission du couple moteur avec une adéquation élevée avec le couple
- Grand agrément de conduite
- Fiabilité élevée
- Assurance de l'absence de couple de rattrapage en conduite électrique, embrayage ouvert
- Grande résistance

L'embrayage est un embrayage à sec composé d'un volant moteur, d'un disque d'embrayage et d'une cale de pression. Le volant moteur fait la liaison avec le module hybride côté moteur et réduit les variations de régime grâce à son inertie.

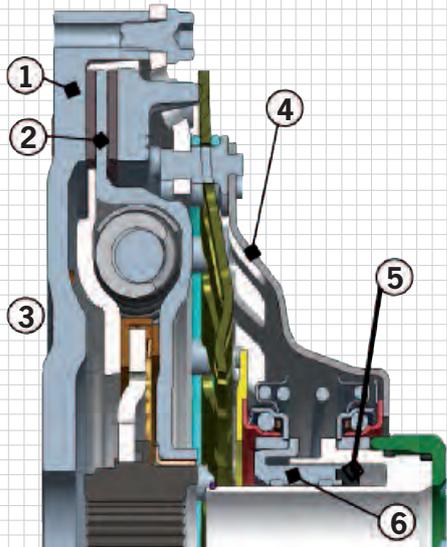
En outre, l'embrayage comporte un amortisseur à ressort coudé, absorbant les vibrations torsionnelles à la manière d'un volant bi-masse. La masse côté secondaire est représentée par le rotor de l'E-Machine et le pignon de pompe du convertisseur de couple.



- 1 Volant moteur
- 2 Disque d'embrayage
- 3 Cale de pression



- 1 Actuateur
- 2 Boîte de vitesses
- 3 Câbles haute tension
- 4 Module hybride
- 5 Canalisation hydraulique vers le module hybride



Au niveau de la cale de pression de l'embrayage est monté le raccord de canalisation hydraulique menant à l'actuateur (une unité de commande hydraulique). L'ouverture et la fermeture de l'embrayage s'effectuent par le dispositif de débrayage central également hydraulique, commandé par l'actuateur.

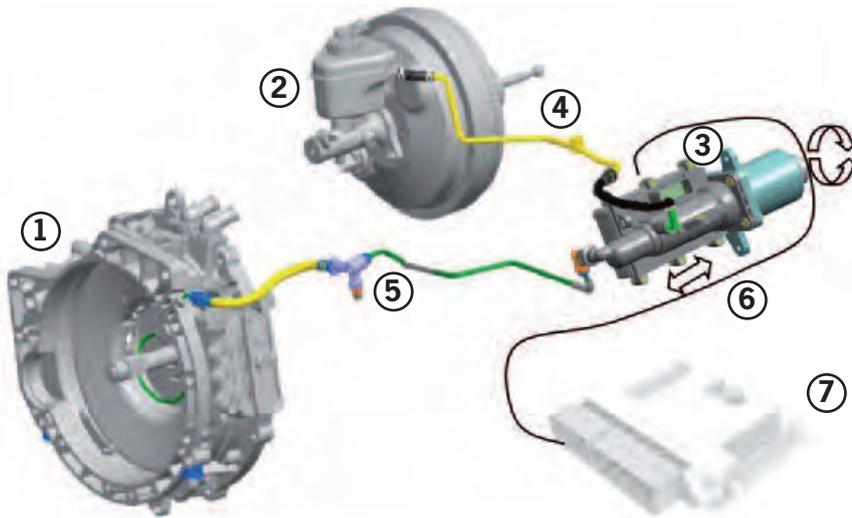
Lors du couplage, le disque d'embrayage est pressé (2) par la cale de pression (4), via la force de la rondelle Belleville contre le volant moteur (1) et crée ainsi l'adhérence.

- | | |
|---------------------------|---------------------------------------|
| 1 - Volant moteur | 4 - Cale de pression |
| 2 - Disque d'embrayage | 5 - Chambre de pression hydraulique |
| 3 - Côté moteur thermique | 6 - Actuateur piston Ouvert ← → Fermé |

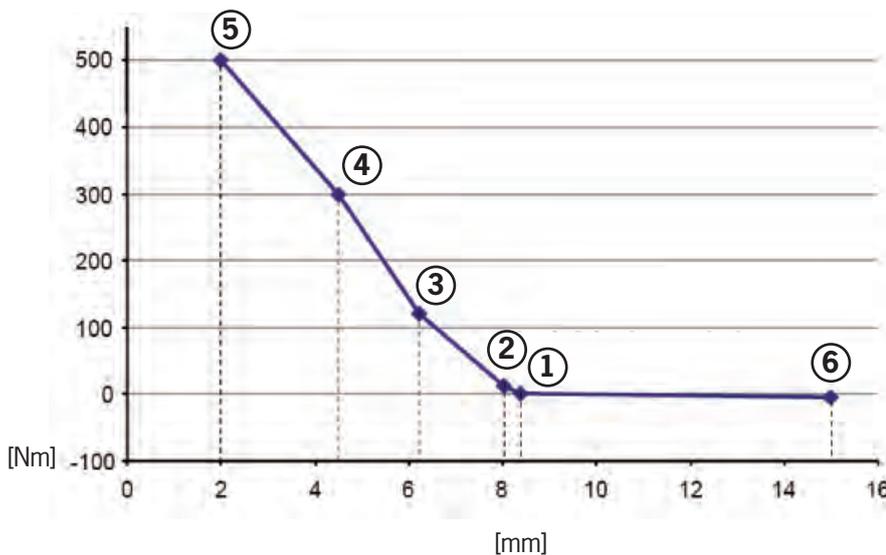
Mode de fonctionnement

Le module de gestion hybride est intégré au boîtier du calculateur DME Bosch MED 17.1.6 et commande l'actuateur grâce au bus CAN Hybride en fonction de la situation de conduite voulue. Il permet ainsi le changement permanent entre les modes de conduite spécifiques à l'hybride.

À l'intérieur de l'actuateur, une tige filetée conique convertit la rotation du servomoteur électrique en translation dans le cylindre émetteur. L'alimentation hydraulique du système est assurée par la biais du réservoir de compensation de liquide de frein.



- 1 Boîtier du module hybride
- 2 Réservoir de compensation de liquide de frein
- 3 Actuateur avec calculateur (CCU)
- 4 Canalisation de retour
- 5 Canalisation haute pression vers le module hybride
- 6 Commande via CAN Hybride
- 7 Module de gestion hybride dans le calculateur DME Bosch MED 17.1.6



- 1 Point de contact physique
- 2 Nouveau point de contact déterminé par l'adaptation
- 3 Adaptations du démarrage
- 4 Adaptations hybrides
- 5 Embrayage entièrement fermé
- 6 Embrayage ouvert

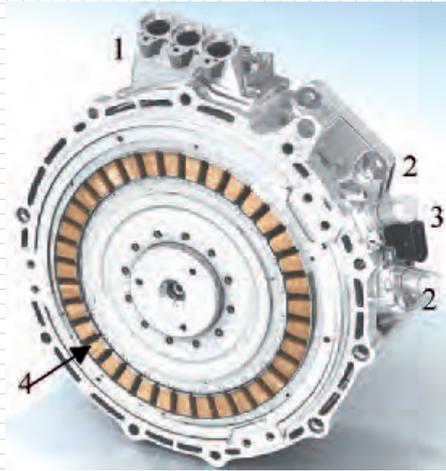
Le diagramme ci-dessus présente le couple en fonction de la course de réglage de l'actuateur. L'actuateur de l'embrayage est commandé grâce au **Porsche Hybrid Clutch Management (PHCM)** intégré au module de gestion hybride.

Les stratégies PHCM s'orientent sur les points :

- Compensation (température, régime, ...)
- Adaptation (vieillesse, sel d'épandage sur les composants, usure, ...)
- Diagnostic (glissement, couples, dynamique, ...)
- Position zéro (jeu de reniflard, vitesse de réglage, prétension, ...)



La purge du système hydraulique et le réglage de base sont effectués à l'aide du testeur PIWIS via des fonctions guidées. Le système peut être soumis à un diagnostic.



- 1 Connecteur triphasé
- 2 Raccord d'eau de refroidissement
- 3 Connecteur de sondes
- 4 Bobinages du stator

E-Machine

Le carter en fonte d'aluminium coulée sous pression du module hybride, d'une longueur de 70 mm, est placé entre le moteur thermique et la boîte automatique. Il comporte les connecteurs triphasés permettant de relier directement le module à l'électronique de puissance. L'E-Machine fournit ou reçoit du courant via ces câbles de 288 volts.

La conduite tout électrique est possible sur une chaussée plane jusqu'à 50 km/h environ et en mode E-Power jusqu'à 60 km/h environ.

La température est surveillée grâce aux sondes de température intégrées aux bobinages de stator, dont les valeurs sont transmises par le bus CAN au module de gestion hybride. Le connecteur correspondant se trouve entre les raccords de durits de refroidissement.

Le tableau suivant fournit les caractéristiques techniques de l'E-Machine.

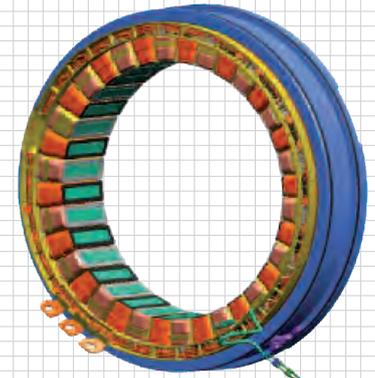
Caractéristique	Valeur/Descriptif
Type de moteur	E-Machine synchrone triphasé, rotor interne, sans balai avec aimants permanents
Refroidissement	Refroidissement par eau (intégré dans le circuit haute température)
Puissance	38 kW électrique/34 kW mécanique
Couple	285 (max. 300) Nm
Tension nominale	288 V AC
Rendement	env. 90 %
Dimensions	Diamètre de stator 300 mm, longueur de l'E-Machine 70 mm

Stator/Rotor

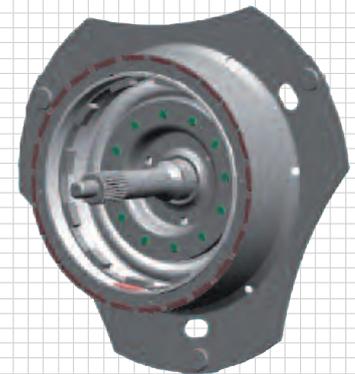
Le stator, partie extérieure de l'E-Machine, possède 36 bobinages à empreinte unique en fil de cuivre. Il est vissé dans une position spécifique au carter de l'E-Machine. Les capteurs de position du rotor placés dans le stator permettent de déterminer la position actuelle du rotor et la transmettent dans l'électronique de puissance dans le calculateur. Ces données autorisent la régulation de la fréquence, de manière à atteindre le régime voulu, et l'alimentation des bobinages en courant triphasé.

Le rotor est monté en position intérieure, ses aimants permanents néodyme-fer-bore génèrent un champ magnétique. Il est fixé sur l'arbre d'entraînement est ajusté au stator de manière à autoriser sa rotation. Sur la face arrière du rotor est fixée la plaque flexible, qui assure la liaison à la boîte de vitesses.

En mode moteur, l'E-Machine consomme une puissance maximale de 38 kW à une tension de 288 volts, ce qui au rendement indiqué d'env. 90 % permet de restituer environ 34 kW sous forme de puissance mécanique. Cette puissance est fournie par l'E-Machine en continu sur presque toute la plage de régime, jusqu'à peu avant d'atteindre la limite de régime du moteur thermique. En mode Boost, les puissances totales du moteur thermique et de l'E-Machine s'additionnent de sorte que la courbe de puissance de l'ensemble du système présente les caractéristiques d'un moteur thermique.



Stator



Rotor

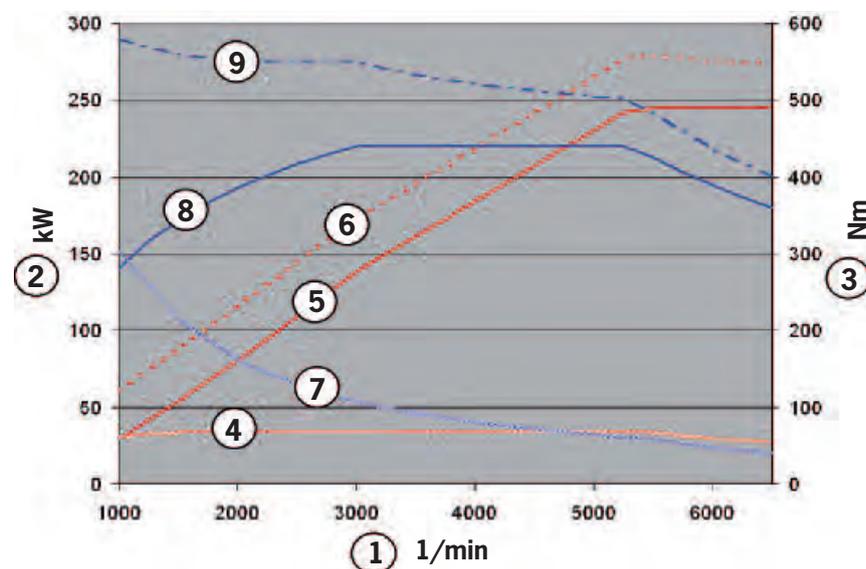
Diagramme de puissance Cayenne S Hybrid

- 1 Régime
- 2 Puissance
- 3 Couple
- 4 Puissance moteur électrique
- 5 Puissance moteur thermique
- 6 Puissance combinée
- 7 Couple moteur électrique
- 8 Couple moteur thermique
- 9 Couple combiné

Les moteurs électriques sont capables de fournir leur couple maximal dès l'arrêt. Associés à un moteur thermique, ils offrent des possibilités d'amélioration évidentes, en particulier à bas régime.

- En boost, le couple maximal s'ajoute avec des conséquences, en particulier au démarrage.
- L'E-Machine est capable d'accélérer le véhicule, même départ arrêté, par une pression douce sur l'accélérateur.

Le couple de 285 Nm peut être augmenté jusqu'à 300 Nm pendant environ 3 secondes (Boost) si le régime est inférieur à 1 150 1/min, par ex. au démarrage.



Électronique de puissance

L'électronique de puissance se trouve dans un boîtier en aluminium à l'avant gauche du compartiment moteur, entre le moteur thermique et le passage de roue. Le module pèse environ 14 kg.

L'électronique de puissance englobe différents composants :

- Onduleur à MLI (PWR) 288 V DC ↔ 288 V AC
- Convertisseur CC/CC 288 volts → 12 volts
- Calculateur d'électronique de puissance
- Tableau de distribution haute tension avec protection du compresseur de climatisation



- Connexions pour :
 - Courant triphasé vers E-Machine (1)
 - Tension continue (+ et -) vers batterie haute tension à l'arrière du véhicule (2)
 - Connecteur haute tension du compresseur de climatisation (3)
 - Raccords d'eau de refroidissement du circuit basse température (4)
 - Connecteur de commande hybride (5)
 - Connecteurs basse tension pour le réseau de bord 12 volts (potentiel + sur le raccord vissé en haut à gauche, masse en haut sur le boîtier)
 - Connecteur pour liaison équipotentielle (à droite sur le boîtier ; plus d'infos sur la liaison équipotentielle dans le groupe 9)

Onduleur à MLI (PWR)

Pour pouvoir exploiter le courant continu de la batterie de traction pour la motricité dans le moteur électrique, le courant doit être converti en courant triphasé. Si l'E-Machine est en mode alternateur lors de la récupération au freinage, le courant alternatif généré est reconverti en courant continu afin d'être restocké dans la batterie. Ces deux fonctions sont assurées par un onduleur à MLI. En mode moteur électrique, l'E-Machine peut temporairement fournir jusqu'à 370 A, et entre 100 A à 150 A en fonctionnement normal.

Convertisseur CC/CC

Le convertisseur CC/CC convertit les 288 volts de tension continue de la batterie haute tension en 12 volts pour le réseau de bord, afin d'assurer l'alimentation des accessoires moteur et d'autres consommateurs du réseau de bord et de pouvoir charger la batterie 12 volts.

La chaleur qui se dégage alors est dissipée grâce à l'intégration du composant dans le circuit basse température du moteur thermique.

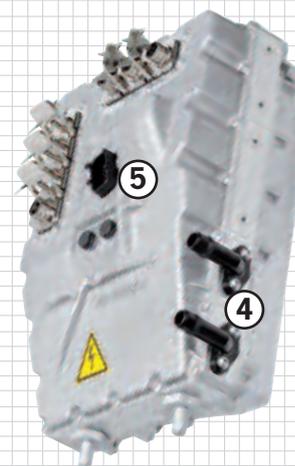
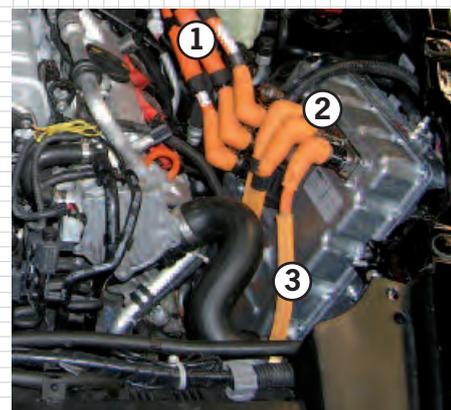
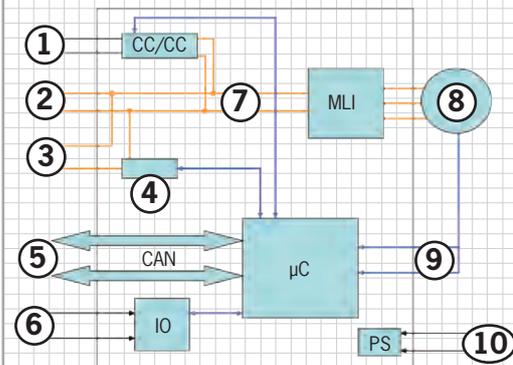


Schéma fonctionnel de l'électronique de puissance

- | | |
|-------------------------------------|--|
| 1 - Bornes 30 et 31 | 7 - 288 V DC |
| 2 - 288 V DC de la batterie HT | 8 - E-Machine |
| 3 - 288 V DC au compresseur | 9 - Sonde de température et capteur de position du rotor |
| 4 - Fusible | 10 - Bornes 15 et 30 |
| 5 - CAN Hybride et CAN Transmission | μC - Calculateur d'électronique de puissance |
| 6 - Bornes 15 et 50 | IO - Groupe E/S |
| | PS - Partie réseau interne |

↔ Informations

— Câble haute tension



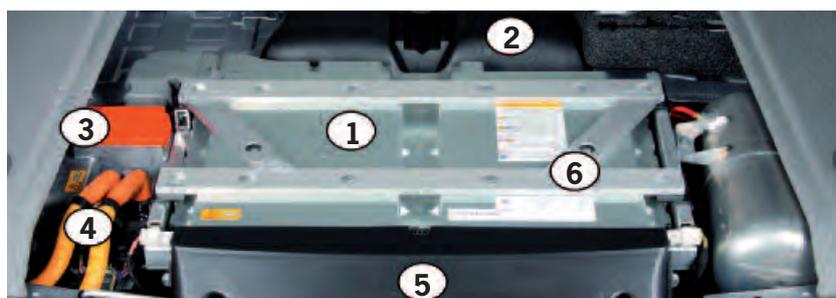
- 1 Batterie haute tension
- 2 Conduits d'arrivée d'air (de l'habitacle)
- 3 Connecteur de service (sur le boîtier électronique)
- 4 Connecteurs haute tension
- 4 Connecteurs basse tension
– pour ventilateurs électriques
– pour commande/bus CAN
- 5 Boîtier de 2 ventilateurs électriques
- 6 Cadre du boîtier de protection

Batterie haute tension

Le Cayenne S Hybrid bénéficie d'une batterie nickel-métal hydrure spécialement conçue en ayant à l'esprit la sécurité du fonctionnement, la durabilité et le coût. Elle présente une technologie éprouvée. La batterie NiMH est placée dans le logement de la roue de secours au-dessus de l'essieu arrière.

Le sous-ensemble batterie comprend les éléments suivants :

- Batterie haute tension (dans le boîtier de protection)
- Boîtier électronique avec connecteur de service (permet la mise hors tension des autres composants hybrides)
- Gestion de la batterie (sur le côté du boîtier électronique)
- Système de ventilation (refroidissement de la batterie)
- Connecteur de câble haute tension
- Capteurs de la batterie haute tension (température, tensions du module)



La batterie est organisée en 2 fois 140 cellules pour des raisons de sécurité. Chaque bloc de 10 cellules est regroupé en un module. On obtient ainsi 2x 144 volts, reliés en série par le connecteur de service, ce qui représente une tension totale de 288 volts.

Les autres caractéristiques de la batterie haute tension sont indiquées dans le tableau suivant.

Caractéristique	Valeur/Descriptif	Caractéristique	Valeur/Descriptif
Type de batterie	nickel-métal hydrure	Poids	env. 80 kg
Puissance	38 kW (électrique)	Plage de fonctionnement à puissance max.	10 - 38 °C (pour démarrage moteur seul > 30 °C)
Capacité	1,7 kWh	Dimensions	Longueur 347 mm Largeur 633 mm Hauteur 291 mm
Tension	288 V	Rendement	env. 90 %
Nombre de cellules	240 (de 1,2 volts)	Refroidissement	Air de refroidissement de l'habitacle



La batterie possède une capacité totale de 1,7 kWh. La plage de fonctionnement où l'énergie est effectivement exploitable pour la motricité est à env. 30 % - 70 %. La capacité effective de la batterie s'étend sur une plage de 0 % à 100 % dans l'écran du combiné d'instruments et du PCM et elle est appelée état de charge relatif. En fait, l'affichage correspond à env. 40 % (0,68 kWh) de la capacité totale de 1,7 kWh, disponibles pour la conduite tout électrique et comme volume de charge pour la récupération d'énergie. Cette plage de fonctionnement (hub) tient compte des exigences de durabilité de la batterie (résistance aux répétitions de cycles) et évite l'apparition des états critiques de la batterie (forte décharge ou charge excessive).

Gestion de la batterie (BMS)

Pour surveiller toutes les données importantes sur la batterie et traiter les données et les communications avec du module de gestion hybride, un calculateur à capacité OBD spécifique est placé à côté du connecteur de service. Le module de gestion de la batterie (Battery Management System) est lié au module de gestion hybride central du calculateur DME par le biais du bus CAN Hybride et du bus CAN Transmission. Les données d'entrée sont les données de capteur de surveillance de tension de module ainsi que de température module et batterie et un capteur de courant, qui contrôle l'état de charge SOC (State of Charge) et la sollicitation de la batterie. Le module de gestion de la batterie assure la commande des 2 moteur des ventilateurs de refroidissement de la batterie. Une tâche importante est ici la surveillance de l'isolation électrique entre les composants hybrides haute tension et le reste du véhicule ainsi que le calcul de l'état de charge de la batterie.

Boîtier électronique

Le terme boîtier électronique désigne l'unité de connexion à la batterie haute tension. Il est le lien entre les cellules de la batterie et les connexions HT pour les câbles menant à l'électronique de puissance. Le boîtier électronique reçoit ses instructions du système de gestion de la batterie, contrôleur spécifique au sein du boîtier électronique. Le boîtier électronique est équipé des connecteurs suivants :

- 2 connecteurs de tension continue (2 x 144 V plus & moins) à la transition batterie HT-connecteur de service
- 1 connecteur de tension continue (1 x 288 plus & moins) à l'électronique de puissance
- Basse tension pour connecteur de commande (CAN Hybride/CAN Transmission, ventilateurs, notamment)

se trouvent d'autres composants dans le boîtier électroniques, ils seront énumérés ci-après.



- 1 Connecteur de service
- 2 Connecteur du fil pilote
- 3 Connecteurs haute tension
- 4 Module de gestion de la batterie
- 5 Connecteurs basse tension

Protection

Quand le connecteur de service est branché, 2 de 3 dispositifs de protection assurent la liaison entre l'électronique de puissance et la batterie haute tension. La commande, et donc la mise en circuit de la tension continue de 288 volts vers l'électronique de puissance, a lieu par le module de gestion de batterie, où la ligne pilote ininterrompue assurant la liaison de tous les composants hybrides est une condition absolue à la commande. Pour la précharge, une résistance chutrice est mise en circuit dans le chemin de puissance lors de la mise en marche du système hybride avant que la commutation du dispositif de protection n'autorise la pleine puissance.

Connecteur de service

À l'intérieur du connecteur de service se trouvent un fusible haute tension monté en série avec les cellules de la batterie, ainsi qu'un contact de la ligne pilote. Le débranchement du connecteur de service déconnecte la batterie haute tension des autres composants haute tension, il est obligatoire pour intervenir sur ces composants.

Gestion thermique

Refroidissement du module hybride

Afin d'évacuer la chaleur, le module hybride est englobé dans le circuit haute température du moteur. Lorsque le moteur thermique est arrêté, la circulation du liquide de refroidissement est assurée par une pompe à eau supplémentaire.

Pour chauffer plus rapidement le moteur thermique, le module hybride est découplé du circuit de refroidissement par le biais d'un tiroir rotatif piloté par dépression. La température régnant dans le module hybride est déterminée par des sondes et transmise au calculateur de l'électronique de puissance.

Refroidissement de l'électronique de puissance

L'électronique de puissance est intégrée au circuit basse température du moteur thermique. La circulation du liquide de refroidissement est assurée par une pompe à eau supplémentaire. L'électronique de puissance peut ainsi fonctionner dans une plage de température optimale. Le même circuit refroidit également l'échangeur air-air intégré au boîtier du compresseur.



Reportez-vous au chapitre Sécurité haute tension.

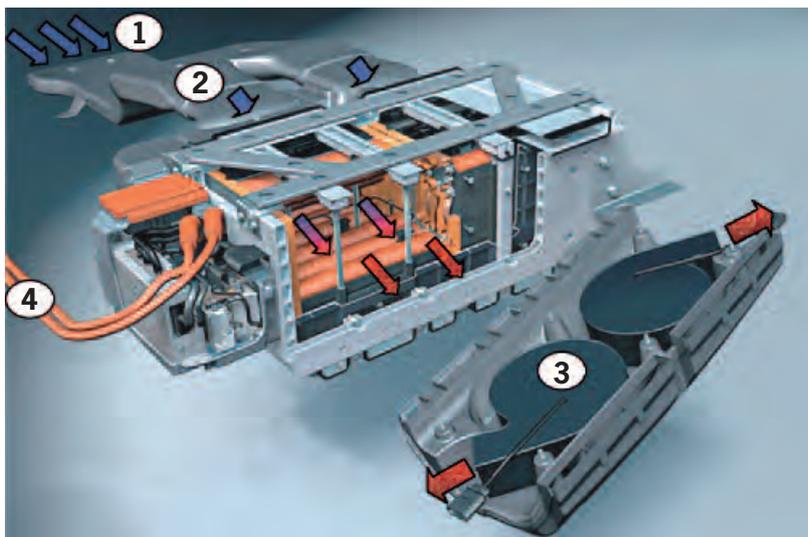
Refroidissement de la batterie haute tension

La batterie haute tension atteint sa puissance maximale de 38 kW dans une plage comprise entre +10 °C et +37 °C.

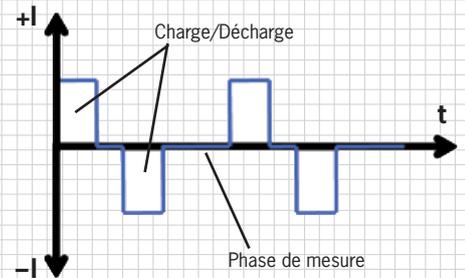
En pratique, la batterie est protégée des basses températures de par son emplacement protégé. Si la température descend au dessous de ce seuil, elle est pulsée activement jusqu'à atteindre le seuil de +10°C par l'application cyclique de courants de charge et de décharge. Cette fonction permet de disposer du mode Stop-Start du moteur thermique au bout de 15 minutes, même quand le véhicule est très froid.

Lors des processus de charge et de décharge, la batterie génère de la chaleur par sa résistance interne. Celle-ci doit être dissipée pour ne pas nuire aux propriétés chimiques des cellules sur toute la durée de vie du véhicule.

La batterie est refroidie en aspirant l'air de l'habitacle. Les deux ventilateurs situés à l'arrière du boîtier de batterie aspirent l'air climatisé de la partie arrière de l'habitacle, qui passe directement sur la batterie et régule ainsi sa température. La commande des ventilateurs est synchronisée avec la vitesse du véhicule, elle est quasiment imperceptible pour le conducteur.



L'air aspiré se disperse par les ouvertures (ventilation forcée par des ailettes en plastique) dans le soubassement du coffre à bagages. La commande du refroidissement est surveillée par la gestion de la batterie (BMS).



Impulsions Chaud de la batterie haute tension



L'ouverture du conduit d'air sous la banquette arrière doit toujours être parfaitement dégagée pour l'aspiration d'air, afin que le fonctionnement soit optimal.

- 1 Ouverture vers l'habitacle sous la banquette arrière
- 2 Conduits d'arrivée d'air
- 3 Ventilateurs électriques
- 4 Câbles haute tension vers l'électronique de puissance

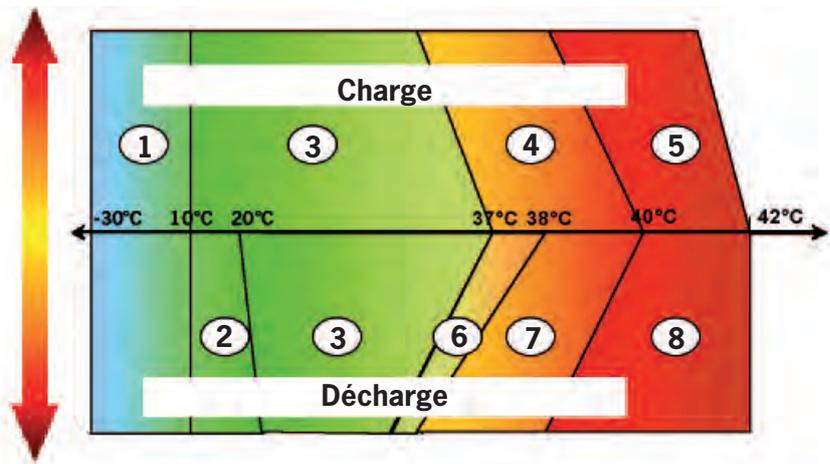
Charge

- 1 Stratégie de réchauffement (impulsions Chaud)
- 3 Pas de restrictions
- 4 Restrictions à un courant de charge de 6 A
- 5 - Réduction de la récupération

Décharge

- 1 Stratégie de réchauffement (impulsions Chaud)
- 2 Stop-Start uniquement
- 3 Pas de restrictions
- 6 Réduction du Boost
- 7 Réduction de la conduite électrique
- 8 Redémarrage moteur uniquement en mode Stop-Start

Comme auparavant, le conducteur commande lui-même la climatisation. Si la température de l'habitacle est trop élevée, les courants de charge et de décharge sont limités régulièrement par la modification des stratégies de fonctionnement, afin d'éviter que la température n'augmente davantage. Selon le graphique, à partir de 37 °C les courants de charge sont d'abord limités à 6 A et la récupération est en outre restreinte si la température monte fortement. De la même manière, les processus de décharge sont limités par la réduction de l'utilisation du mode Boost et de la conduite électrique.



Module de gestion hybride

L'interaction entre les principaux composants du moteur thermique, du module hybride (moteur électrique et embrayage), de la boîte de vitesses et de la batterie est contrôlée par le module de gestion hybride pendant les différentes conditions de conduite spécifiques à l'hybride. Il est placé avec la commande du moteur thermique, dans le calculateur DME Bosch MED 17.1.6.

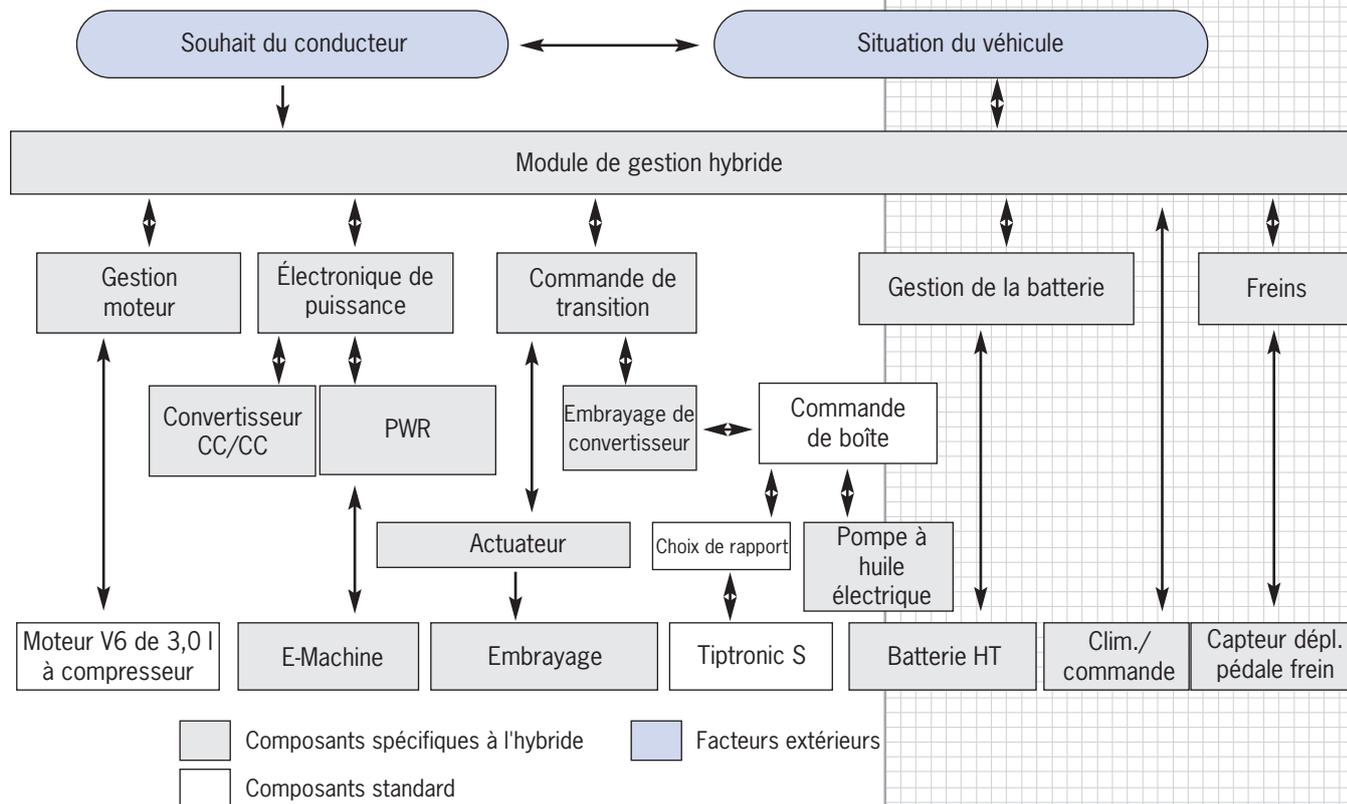
Le module de gestion hybride complète la gestion moteur existante et collecte toutes les informations de conduite et de consommation du véhicule, de manière à ce que ses commandes du moteur électrique, du moteur thermique et de tous les composants hybrides soient optimales dans toutes les situations. Il utilise à cette fin environ 20 000 paramètres là où à peu près 6 000 suffisent pour une gestion moteur conventionnelle.



Calculateur EMS DME Bosch MED 17.1.6 avec module de gestion hybride



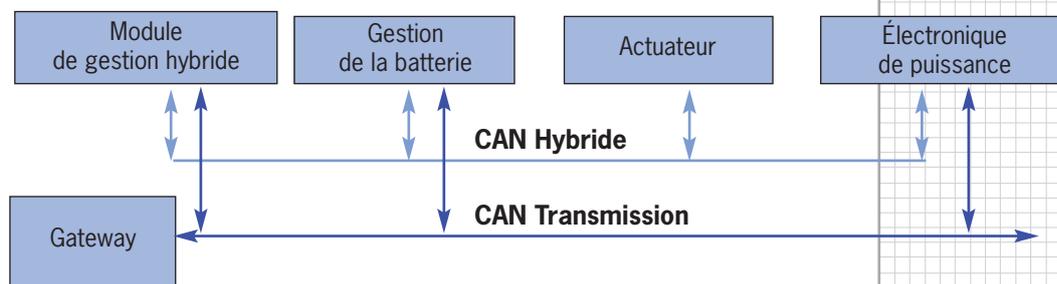
Le récapitulatif suivant présente les composants régulés par le module de gestion hybride.



La communication entre les composants hybrides s'effectue via le bus CAN Hybrid, qui assure la mise en réseau des sous-ensembles suivants :

- Module de gestion hybride
- Actuateur
- Gestion de la batterie (BMS)
- Électronique de puissance

À l'exception de l'actuateur, ces sous-ensembles sont également reliés au bus CAN Transmission.



- 1 E-Power-mètre
- 2 Température d'huile (inchangé)
- 3 Indication Ready dans le compte-tours
- 4 Affichage multifonction Hybride



- 1 Véhicule démarré et moteur thermique à l'arrêt
- 2 Contact coupé

Commande

Le Cayenne S Hybrid, comme tous les modèles Cayenne, est doté de fonctions étendues de confort d'utilisation et de confort de conduite spécialement ajustées au système de motorisation hybride. Ainsi, les modes de fonctionnement spécifiques à l'hybride, tels que la conduite tout électrique ou le Cruising, sont en principe disponibles même en cas de conduite avec remorque, en marche arrière ou en mode manuel de la boîte.

Affichages

L'état du système hybride est indiqué une série d'affichages dans le combiné d'instruments et le PCM, qu'il convient d'expliquer brièvement ici.



E-Power-mètre

L'E-Power-mètre indique la puissance gain d'énergie et de force motrice de l'E-Machine.

Dans la partie E-Power du cadran, l'E-Machine tient la fonction de moteur et entraîne le véhicule, soit seule, soit en association avec le moteur thermique. La consommation de courant s'affiche.

Dans la partie CHARGE du cadran : gain/récupération d'énergie, l'E-Machine agit comme un alternateur et charge la batterie haute tension, par ex. lors d'un freinage avec récupération de l'énergie.

Quand l'aiguille est sur 0, l'E-Machine est inactive, par ex. véhicule immobile en mode Stop du moteur thermique.

Affichage READY dans le compte-tours

Le compte-tours possède maintenant une zone « Ready ». Elle apparaît lorsque les deux moteurs (moteur électrique et moteur thermique) sont prêts à démarrer après commutation de la borne 50 via la clé de contact ou après un arrêt automatique.

Affichage multifonction

L'affichage multifonction du combiné d'instruments indique les flux d'énergie entre l'entraînement des roues, la batterie haute tension et le moteur thermique. L'écran affiche également les états de conduite spécifiques à l'hybride, tels que Cruising et Récupération.

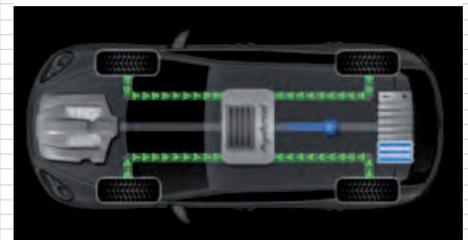
PCM

Le PCM permet au conducteur de consulter l'analyse statistique de la conduite. Un histogramme indique la durée de conduite sans émissions en pour cent de la durée totale (Hybrid Zero Emission).

Les pourcentages affichés englobent toutes les périodes où le moteur est arrêté, la consommation de carburant nulle et les émissions absentes.

Les données comprennent aussi les phases de fonctionnement à réduction de consommation : lorsque l'E-Machine en mode alternateur, moteur thermique à l'arrêt, génère de l'énergie électrique (récupération), lorsque le véhicule est en mode Cruising ou lorsque la fonction d'arrêt est activée.

Comme pour l'affichage multifonction, le PCM du combiné d'instruments peut également afficher les flux d'énergie.



Pour de plus amples informations, voir le Manuel technique Hybrid !



Démarrage du véhicule

Lors de la mise du contact (borne 15 active), la batterie 12 volts de démarrage alimente dans un premier temps le réseau de bord et les calculateurs. Au démarrage du moteur seulement (borne 50), les protections commutent dans le boîtier électronique et une tension continue de 288 V est appliquée à l'électronique de puissance par le biais des connexions de câbles haute tension.

Le moteur thermique ne démarre que quand les conditions d'une conduite tout électrique ne sont pas réunies :

- Température du moteur inférieure ou égale à 32 °C
- État de charge de la batterie de traction trop faible pour une conduite tout électrique

Si le niveau de charge de la batterie haute tension ne suffit pas au démarrage du moteur thermique, le Service après-vente Porsche a la possibilité de charger la batterie HT au moyen d'un chargeur spécial. La batterie haute tension ne peut être chargée par le chargeur que si sa charge est inférieure à 30 %.

La batterie 12 volts peut toujours être chargée au niveau du pôle 12 volts en utilisant un système de recharge externe conventionnelle.

Véhicule à l'arrêt

En stationnement, le module de gestion de la batterie contrôle régulièrement l'état de charge et les tensions de module. Lors d'un stationnement, l'ensemble du circuit haute tension est interrompu par les contacteurs du boîtier électronique. Ceci permet d'éviter la perte de courant dans les phases d'immobilité du véhicule et la décharge spontanée de la batterie haute tension est alors très lente.

Modes de fonctionnement hybrides

Le Cayenne S Hybrid offre six modes de conduites spécifiques, possibles uniquement avec un système hybride intégral parallèle, et contribuant notablement à la réduction de la consommation.

- Conduite tout électrique
- Boost (addition des couples du moteur thermique et du moteur électrique)
- Conduite thermique avec déplacement du point de charge
- Cruising (roulage sans force motrice)
- Freinage régénératif (récupération de l'énergie au freinage)
- Fonction Stop-Start



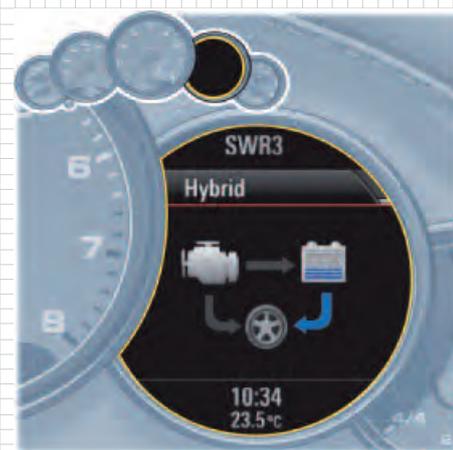
De par la nature du système, plusieurs conditions peuvent interdire un mode de conduite spécifique à l'hybride. Ces critères sont définis par des valeurs de limites et de seuils. Le récapitulatif suivant présente certaines des principales raisons empêchant une coupure du moteur thermique (vetos sur l'arrêt du moteur) :

- Couple souhaité par le conducteur, vitesse ou régime trop élevés
- État de charge de la batterie trop faible ou trop élevé
- Température du moteur/catalyseur trop faible
- Batterie trop chaude ou trop froide
- Montée trop abrupte
- Capot moteur ouvert (protection pour le personnel d'atelier)
- Conducteur n'ayant pas bouclé sa ceinture de sécurité ou portière conducteur ouverte avec levier sélecteur en position P ou N
- Diagnostics du moteur actifs (diagnostic du catalyseur, adaptation du mélange)
- Puissance du réseau de bord ou de la climatisation trop élevée

Conduite électrique

Le démarrage et la conduite tout électrique sont possibles jusqu'à une vitesse de 50 km/h en adoptant une conduite modérée. Lorsque la touche E-Power est actionnée (voir chapitre « Fonctions spéciales »), il est possible de rouler jusqu'à 60 km/h env. en conduite tout électrique. Il est ainsi possible de parcourir environ 2,5 km. L'E-Machine fournit alors une puissance de 34 kW pour la motricité et est alimentée en courant par le biais de la batterie de traction. Le moteur thermique est alors arrêté et les accessoires moteur ainsi que le réseau de bord et les consommateurs électriques sont alimentés par la batterie de démarrage de 12 volts ou par la batterie haute tension (compresseur de climatisation + convertisseur CC/CC).

Une fois en marche, la gestion de la batterie calcule en permanence l'état de charge et contrôle les données clés de la batterie, afin d'éviter des états critiques tels que la surchauffe ou une forte décharge. Les limites de courant des processus de charge et de décharge sont adaptées de manière dynamique et entièrement automatique. Ainsi, la gestion de la batterie en communication avec le module de gestion hybride signale s'il est nécessaire de charger la batterie par un déplacement du point de charge, ou s'il est judicieux de la décharger pour créer de la capacité en vue d'une récupération d'énergie.





Cruising

Le Cruising est possible dès que le véhicule roule à faible vitesse, et aussitôt que le conducteur relâche la pédale d'accélérateur. L'embrayage s'ouvre et le moteur thermique est automatiquement coupé, afin d'éviter le couple de friction du moteur habituel dans la phase de décélération. En Cruising, il n'y a aucune assistance de motricité des moteurs électrique et thermique. Le véhicule n'est alors freiné que par la résistance de l'air et la résistance au roulement. Lors des phases de Cruising, le rotor de l'E-Machine tourne sur l'arbre d'entraînement et génère de l'énergie électrique grâce à un couple de freinage imperceptible. Celle-ci alimente le réseau de bord et les accessoires raccordés. La batterie de traction n'est volontairement pas chargée. La tension triphasée de l'E-Machine génère 12 V DC dans l'électronique de puissance, ou 288 V DC pour le compresseur de climatisation. L'écran multifonction affiche la récupération.

La vitesse maximale en Cruising est limitée à 156 km/h, ou un régime équivalent à 2 600 1/min au niveau du vilebrequin. Ce régime est le plus régime maximal pour le recouplage du moteur thermique, au-delà l'usure de l'embrayage s'en trouverait aggravée.

Stratégie de Cruising

Au-dessous de 50 km/h un faible couple de décélération électrique est généré, car en circulation urbaine il est difficile de bénéficier d'un mode Cruising avec anticipation. L'énergie de récupération ainsi obtenue est également utilisée pour charger la batterie haute tension.



Récupération d'énergie

Ce terme technique désigne en général un processus de récupération de l'énergie. Dans cet état, l'E-Machine passe en mode alternateur. L'énergie électrique produite est réservée à la charge de la batterie haute tension et alimente dans le même temps tous les appareils électriques.

La récupération est effectuée par le module de gestion hybride dans les situations suivantes:

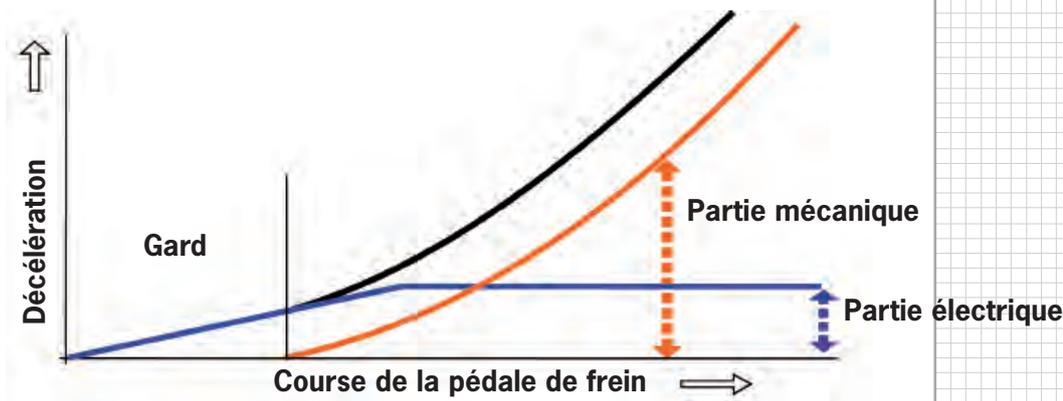
- Le conducteur laisse le véhicule rouler (en cas de pression sur la touche Sport, ou d'une vitesse < 50 km/h) → voir le chapitre « Cruising » !
- Le véhicule roule/descend une côte (inclinaison > 4 %)
- Pendant le démarrage

Descente d'une pente

À partir d'une pente de 4 %, le module de gestion hybride passe du mode Cruising en mode Récupération et met en œuvre un couple de freinage de plus en plus important afin que le véhicule ne prenne pas trop de vitesse.

Freinage

Dès la plage de garde de la pédale de frein, l'E-Machine définit un couple de freinage avant même qu'une pression hydraulique de freinage ne soit générée. La course de garde a été augmentée de 4 mm afin d'améliorer la dosabilité. La partie force de freinage de l'E-Machine est régulée par le module de gestion hybride en fonction de la course de la pédale et de la vitesse du véhicule.



L'E-Power-mètre du combiné d'instruments informe le conducteur visuellement du fonctionnement de l'E-Machine en mode alternateur pendant la récupération (Charge).

Si l'état de charge de la batterie n'autorise pas de récupération supplémentaire, le moteur thermique est démarré afin de bénéficier d'un couple de freinage suffisant.



Pour plus d'informations, reportez-vous au chapitre « Châssis ».



Tandis qu'en Cruising, le couple de freinage de l'E-Machine est abaissé de manière ciblée, pour la récupération le module de gestion hybride augmente la puissance de l'alternateur avec précision. Pour cela, le niveau de tension dans le bobinage du stator de l'E-Machine est augmenté, ce qui produit un flux de courant plus élevé quand le rotor tourne. La hausse de la puissance de l'alternateur agit comme un couple de freinage croissant sur l'arbre d'entraînement et ralentit le véhicule.

La puissance de freinage globale provient donc d'une superposition du système de freinage mécanique et de la puissance de l'alternateur de l'E-Machine, où la puissance de freinage de l'E-Machine présente comme pour la puissance motrice un maximum dans la plage inférieure de vitesse et où la part mécanique prédomine à vitesse élevée.

E-Boost

La motorisation hybride propose une fonction Boost, similaire à la fonction Kick-Down des moteurs thermiques, qui met à disposition la puissance maximale du moteur. Lorsqu'elle est active, le moteur électrique et le moteur thermique fournissent leurs puissances maximales, qui s'additionnent pour produire une valeur globale plus élevée. La somme des puissances des deux types de motorisation correspond à la puissance totale de la transmission. L'E-Boost autorise un couple total de 580 Nm et une puissance totale de 279 kW. La durée d'activation de cette fonction est limitée à 10 s maximum.



Déplacement du point de charge

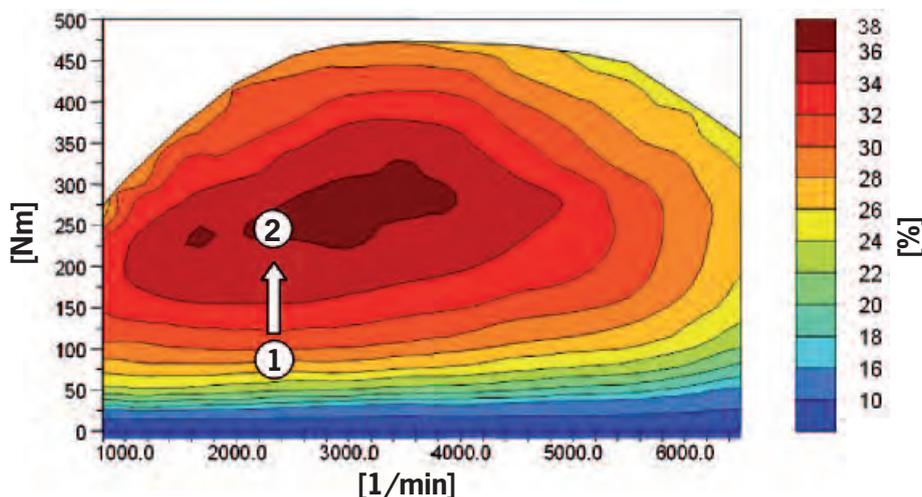
Chaque groupe motopropulseur possède une plage de charge déterminée, où le fonctionnement est le plus économique. Si le moteur thermique fonctionne en charge partielle, ou à pleine charge au-dessus, de cette plage, l'énergie renfermée dans le carburant n'est pas exploitée de manière optimale. Le module de gestion hybride tente de faire fonctionner le moteur thermique dans la plage la plus économique. Chez Porsche, les points de fonctionnement des autres sous-ensembles, de l'E-Machine et de la batterie haute tension sont dans le même temps eux aussi accordés avec le moteur thermique afin d'optimiser le fonctionnement de l'ensemble du système. L'objectif est de charger la batterie en utilisant le moins d'énergie possible et non de parcourir la plus grande distance possible en tout électrique.

Élévation du point de charge

Si le point de charge actuel est inférieur au point de charge optimal, le module de gestion hybride bascule l'E-Machine en mode alternateur et accélère dans le même temps. L'énergie mécanique en surplus est utilisée pour charger la batterie de traction. Avec l'élévation du point de charge augmente la consommation du véhicule. Le carburant est toutefois utilisé relativement efficacement et la conduite tout électrique sans émissions peut ainsi être prolongée. Le conducteur ne remarque rien, car le régime et la vitesse ne changent en rien. Le véhicule ne comporte comme si, depuis une chaussée plane, il abordait une côte sans changer de vitesse. L'écran multifonction signale graphiquement l'élévation de la charge avec les flux d'énergie correspondants.



Le graphique suivant représente une élévation du point de charge à env. 2 400 1/min. Le rendement du moteur thermique peut alors augmenter d'environ 10% (plage 1 28% → plage 2 38%).



- 1 Point de charge pas optimal
- 2 Point de charge dans la plage optimale
- [Nm] Couple
- [1/min] Régime
- [%] Rendement



Abaissement du point de charge

Si le couple voulu par le conducteur entraîne un dépassement de la plage la plus économique et que l'état de charge de la batterie l'autorise, l'E-Machine assiste le moteur thermique (cf. Boost) jusqu'à ce que l'état de charge passe au-dessous du seuil minimal (SOC) pour ce mode de fonctionnement. La consommation de carburant et les émissions polluantes sont ainsi fortement réduites, tout en autorisant une conduite sportive.

L'écran multifonction signale également l'abaissement du point de charge.

Fonction Stop-Start

Sur un véhicule conventionnel équipé de système Stop-Start (cf. Micro-hybride), le véhicule doit être immobile pour que le moteur thermique soit coupé. Sur le Porsche Cayenne S Hybrid, véhicule hybride intégral, le véhicule peut rouler en tout électrique. Cette caractéristique permet à la fonction Stop-Start de couper le moteur thermique même quand le véhicule est entraîné ou roule. La décision est ici prise par le module de gestion hybride.

Démarrage du moteur

Dans les cas suivants, le moteur thermique est démarré automatiquement :

- En cas de démarrage avec la clé quand la température de la batterie est inférieure à 10 °C
- En cas de demande de chaleur de la part de la climatisation de l'habitacle
- Quand le conducteur demande un couple élevé (pédale d'accélérateur), ou quand la charge augmente (par ex. en côte), ce que l'E-Machine ne peut pas gérer seule
- En cas d'état de charge faible de la batterie haute tension
- Quand la vitesse augmente
- - > 50 km/h
- - > 60 km/h avec touche E-Power activée
- En cas de détachement de la ceinture de sécurité du conducteur
- En cas d'ouverture de la portière conducteur
- En cas d'ouverture du capot moteur
- En cas de forte déclivité et d'anticipation d'un rétrogradage de la boîte Tiptronic S, entraînant le dépassement de la limite de régime de 2 600 1/min
- En cas de retour dans une phase de charge depuis une phase Cruising ou de récupération correspondant aux conditions susmentionnées



Arrêt du moteur

L'arrêt automatique du moteur a toujours lieu quand, quand aucune puissance n'est nécessaire pour la motricité ou la recharge. Le compte-tours passe en position Ready. Le module de gestion hybride empêche l'arrêt du moteur quand :

- La vitesse ou le régime est trop élevé (> 156 km/h ou > 2 600 1/min)
- L'état de charge de la batterie (SOC) est trop faible
- L'état de charge de la batterie est trop élevé et qu'un couple de freinage moteur est nécessaire
- Le capot moteur est ouvert
- Le conducteur n'a pas bouclé sa ceinture de sécurité, levier en P ou N
- La portière du conducteur est ouverte, levier en P ou N
- Un défaut est détecté/fonctionnement de secours de l'embrayage
- Des diagnostics moteurs sont en cours (catalyseur, adaptation du mélange, etc.)
- Un délai minimal ne s'est pas écoulé après le premier démarrage
- La côte dépasse 7 %
- L'habitacle doit être chauffé
- La puissance du réseau de bord ou de la climatisation est trop élevée
- La température du moteur/catalyseur est trop faible
- La batterie haute tension est trop chaude ou trop froide (< 10 °C ou > 42 °C)



Fonctions spéciales

Touche sport

La touche Sport de la console centrale sert à activer le mode Sport Plus.

Conséquences :

- En cas d'activation de la touche Sport ou du Kick-Down, la boîte rétrograde immédiatement en fonction du régime. Les régimes de changement des vitesses Tiptronic S sont décalés vers des régimes plus importants.
- Le mode Cruising est limité à env. 70 km/h (sinon 156 km/h).
- Le couple de récupération de l'E-Machine est relevé en Cruising. Le comportement routier se rapproche de celui du moteur thermique.
- Le moteur thermique fonctionne avec une courbe de pleine charge illimitée (normalement, pleine charge limitée).
- Une cartographie de pédale plus abrupte est utilisée.
- L'E-Boost s'active dès 80 % de la course de pédale d'accélérateur (10 s maxi).
- Le voyant d'avertissement « Sport » du combiné d'instruments est allumé.

Touche E-Power

En actionnant la touche E-Power dans la console centrale, la disponibilité du mode de conduite tout électrique est prolongée. Ce mode est principalement conçu pour rouler sans émissions polluantes dans les zones habitées et les parkings. Une courbe caractéristique d'accélérateur plus plate est utilisée de manière à améliorer la dosabilité. Le moteur thermique entre en action plus tard et la récupération est plus soutenue quand le moteur tourne.

En raison du changement de comportement routier, le moteur thermique n'opère plus dans la plage optimale. Par conséquent, une utilisation fréquente du mode E-Power augmente la consommation de carburant.

Quand cette touche est actionnée, une diode s'y allume et l'indication « E-Power » s'affiche en bleu dans le combiné d'instruments.

Conditions pour l'activation du mode E-Power :

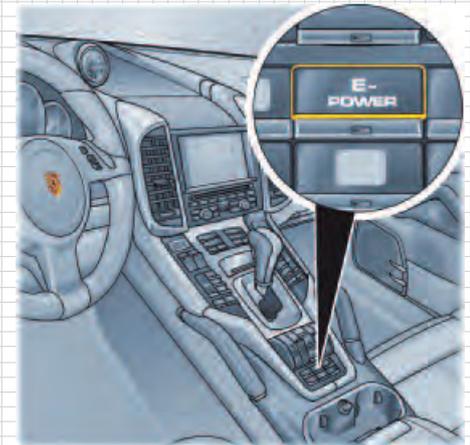
- État de charge de la batterie suffisant
- Vitesse du véhicule < 55 km/h
- Température de batterie entre 15 °C et 40 °C
- Pas de processus de chauffage par la climatisation

Le mode E-Power est coupé puis réactivé quand :

- L'état de charge de la batterie passe sous le seuil minimum
- La puissance demandée est trop élevée

Le mode E-Power est désactivé quand :

- La vitesse maximale est dépassée (conduite tout électrique)
- Le mode Sport est activé ou
- La touche E-Power est actionnée une nouvelle fois.



Consommation de carburant

Le Porsche Cayenne S Hybrid offre, par rapport au modèle Cayenne S conventionnel de puissance comparable, une consommation beaucoup moins élevée à des performances très sportives. Avec les véhicules hybrides, le style de conduite individuel est encore plus déterminant qu'avec les motorisations conventionnelles.

Conduire « façon hybride » signifie :

- Conduire en anticipant, lâcher tôt l'accélérateur
- Effectuer de longues phases de Cruising, pour retirer complètement le pied de l'accélérateur volontairement
- D'un point de vue énergétique, le Cruising est beaucoup plus intéressant que la récupération !
- Lors de freinages, il est judicieux de freiner lentement et régulièrement, avec une courte course de la pédale, afin d'obtenir des parts de récupération importantes
- Éviter le fonctionnement à pleine charge
- À charge élevée de la batterie, utiliser volontairement le moteur électrique jusqu'à ce que l'état de charge revienne dans la plage médiane
- L'utilisation prolongée de l'E-Power ou du mode Sport augmente la consommation de carburant
- Utiliser avec parcimonie les accessoires électriques tels que sièges chauffants, dégivrage de la lunette arrière, ...

L'économie de carburant est particulièrement sensible en cycle urbain avec un style de conduite adapté.