

Les journées de l'innovation BMW Group en 2010.

La mobilité du futur.

Table des matières.

1.	Pourquoi l'électromobilité ?	2
2.	Le projet i.	12
3.	Le système de transmission électrique.	20
4.	Construction légère et concept LifeDrive.	30
5.	Le PRFC – un matériau d'avenir.	38



1. Pourquoi l'électromobilité?

A notre époque, la société et avec elle tout ce qui a trait à la mobilité individuelle se voient confrontés à des défis de plus en plus nombreux. Un nombre croissant de facteurs influent sur la portée de l'action individuelle et de celle de l'entreprise. Le monde connaît un bouleversement écologique, économique et social. Il existe pourtant des évolutions dont on doit tenir compte. Quelles sont-elles et comment y faire face ?

Le changement climatique et le réchauffement planétaire.

Le changement climatique et le réchauffement planétaire qui l'accompagne ne sont plus à démontrer. La décennie qui vient de s'écouler (de 2000 à 2009) a été la plus chaude jamais enregistrée, et pourtant les efforts accomplis dans le monde pour contrarier le phénomène n'ont jamais été aussi importants. Une autre hausse de la température moyenne induirait un nombre considérable de conséquences graves parmi lesquelles la fonte accrue des glaciers, la hausse du niveau des mers, la modification des précipitations et l'augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes. Cette hausse continue de la température moyenne est due à l'accentuation de l'effet de serre naturel par l'homme. La combustion des carburants fossiles en particulier produit du CO₂ – un gaz néfaste pour le climat puisqu'il accélère l'effet de serre et donc indirectement aussi le réchauffement de la Terre. Pour ralentir voire même stopper ce réchauffement climatique, il est donc nécessaire de réduire rapidement et de manière significative les émissions de CO₂. Pour y parvenir, on pourrait passer des carburants d'origine fossile à des sources d'énergie renouvelables et améliorer l'efficacité de tous les consommateurs d'énergie.

La raréfaction des ressources.

En plus du réchauffement climatique, la raréfaction inquiétante des ressources menace l'ensemble de la planète. Certaines matières premières importantes comme le pétrole et les métaux précieux tendent à s'épuiser alors que le besoin quotidien progresse. Pour les uns, il faut trouver la cause de l'amenuisement des ressources dans l'industrialisation galopante des pays émergents. Mais la croissance démographique, la hausse du niveau



de vie ainsi que la gestion insouciante des matières premières contribuent aussi à cet état de fait. Conséquence de tout cela : les prix s'envolent pour presque toutes les familles de matières premières. A terme – l'échéance exacte est controversée – le pic pétrolier (Peak Oil) sera atteint. A partir de ce moment-là, la différence entre l'offre et la demande ne cessera de grandir et tous les besoins ne pourront être satisfaits. Par conséquent, la recherche d'alternatives au pétrole bat déjà son plein.

Le développement durable : une tendance de la société.

Le caractère brûlant du réchauffement climatique et de l'épuisement des ressources fait prendre conscience à l'homme de son rôle dans le système écologique. Beaucoup y sont déjà sensibilisés : ils se voient comme un élément d'un système global et souhaitent agir de façon consciente et pleinement responsable en adoptant un style de vie durable – pour eux et aussi pour les générations à venir. Durable ne signifie pas simplement « la préservation de l'environnement ». Globalement, la notion de « développement durable » a trois facettes : écologique, économique et sociale. Le développement durable au plan écologique a pour but de maintenir la nature et l'environnement pour les générations futures, donc d'avoir une gestion responsable des ressources. Le développement durable au plan économique implique une action économique offrant une base solide et durable en matière d'acquisition et de prospérité. Le développement durable au plan social exige que la société se développe de manière à permettre la participation de tous les membres d'une communauté . BMW Group s'est intéressé et voué très tôt au développement durable sous tous ses aspects pour créer une valeur ajoutée pour l'entreprise, l'environnement et la société.

Certains instruments tels que l'indice Dow Jones Sustainability traduisent la prise au sérieux grandissante dans l'économie de la notion de durabilité. Ces indices boursiers évaluent les entreprises d'après des critères économiques tout en tenant compte d'aspects écologiques et sociaux. BMW Group apparaît dans leurs classements en tête de file de sa branche.

De nouvelles solutions de déplacement pour des villes en pleine expansion.

L'autre tendance que l'on observe, c'est une urbanisation croissante. Ils sont toujours plus nombreux à quitter la campagne pour la ville. Les



villages deviennent des cités, les limites de la ville et de la campagne se confondent et de grandes conurbations voient le jour. Depuis 2007, plus de la moitié de la population mondiale vit en ville. Selon les prévisions de l'ONU, les citadins devraient représenter plus de 60 % de la population mondiale en 2030 et environ 70 % en 2050. A l'heure actuelle, il existe déjà dans le monde plus de 130 villes de plus de trois millions d'habitants.

Les mégapoles sont un phénomène particulier de l'urbanisation. On parle de mégapoles ou d'espace méga-urbain, selon la définition, pour des villes d'au moins huit millions d'habitants. Dans le monde, on dénombre plus d'une trentaine de ces cités gigantesques où se côtoient quelques 280 millions de personnes. La croissance rapide de ces villes s'accompagne d'une multiplication des défis : manque de place et pollution de l'environnement entre autres. Pour autant toutes les mégapoles ne se valent pas. Shanghai, Londres, Los Angeles ou Tokyo sont certes toutes d'après la définition des mégapoles, mais elles sont très différentes les unes des autres en termes d'infrastructures routières et de besoin de mobilité individuelle de leurs habitants. L'influence de la croissance sur l'infrastructure urbaine varie selon les villes.

Les législations reflètent l'environnement changeant.

Les gouvernements de différents pays aussi agissent en fonction du changement climatique et de la raréfaction des ressources. En introduisant des certifications pour les véhicules zéro émission, en limitant l'accès aux voitures et en promulguant des lois ambitieuses sur le parc automobile, ils essaient de contrer la hausse des émissions de CO₂. Ainsi les États-Unis, l'Europe, la Chine et le Japon exigent d'ici à 2020 une réduction des émissions des véhicules pouvant atteindre 30 % par rapport à la production de 2008.

La réponse de BMW Group.

La mobilité du futur réclame un nouveau rapport entre exigences mondiales et besoins individuels. On veut des solutions nouvelles pour une mobilité individuelle en milieu urbain. Ces solutions doivent être durables et, dans la mesure du possible, ne pas s'accompagner de restrictions, mais offrir des possibilités de différenciation. La réduction des émissions et de la consommation de carburant doit s'accélérer. BMW Group a reconnu ces besoins et s'est fixé pour objectif de permettre une mobilité non



polluante. C'est donc dans ce contexte que le groupe élabore un véhicule qui ouvre de nouvelles possibilités dans cet environnement-là et qui répond aux souhaits changeants de sa clientèle.

« A l'avenir aussi il y a aura des besoins en matière de mobilité individuelle. Les clients voudront toujours décider eux-mêmes de quand ils iront où et comment. Et ils voudront le faire en étant le plus possible respectueux de l'environnement. Et puis il y aura toujours la volonté de se différencier – la volonté par exemple de se démarquer au moyen de produits haut de gamme ». (Peter Ratz)

L'E-mobilité : une solution durable et une évolution pérenne.

BMW Group voit dans l'électromobilité un moyen de réunir mobilité individuelle et exigences du futur. Le gros avantage réside surtout ici dans l'absence d'émissions locales. L'électromobilité utilisant le courant électrique à la place du carburant comme énergie motrice, aucun gaz polluant n'est rejeté durant le trajet. Quand, en plus, l'énergie nécessaire à la propulsion est obtenue à partir par exemple du vent ou de l'eau – deux ressources renouvelables – l'E-mobilité est alors absolument neutre en termes de conséquences climatiques et elle épargne les ressources naturelles puisque aucun CO₂ n'a été rejeté dans l'environnement pour produire cette énergie. Les E-véhicules contribuent donc d'un côté à réduire les émissions de CO₂ et accroissent de ce fait la qualité de vie dans les grandes villes. Et d'un autre côté l'E-mobilité apprend ainsi à gérer les besoins croissants de la clientèle de manière globale, écologiquement durable et respectueuse de l'environnement.

« L'électromobilité permet de se déplacer sans détruire l'environnement par des émissions de gaz nocifs ». (Martin Artl)

Dynamique, couple et confort – les joies de l'e-mobilité.

Non seulement l'électromobilité est écologique, mais en plus elle procure une expérience de conduite unique basée sur l'émotion. Les E-véhicules peuvent se déplacer quasiment sans aucun bruit de moteur. De plus, sur les moteurs électriques la totalité du couple de l'E-transformateur d'énergie est disponible dès l'arrêt, d'où une grande agilité et donc un plaisir de conduite accru. Un E-véhicule accélère en outre sans interruption jusqu'à atteindre la vitesse maximale.



« Tous les clients ayant testé l'E-mobilité nous confirment avoir eu tout simplement du plaisir ». (Ulrich Kranz)

Conduire un moteur électrique s'accompagne d'une autre particularité : lorsque l'on retire le pied de la pédale d'accélérateur, le véhicule ne continue pas de rouler mais décélère de façon active. La pédale d'accélération devient ainsi une pédale de conduite et permet un déplacement on ne peut plus confortable, surtout à vitesse moyenne ou sans grande variation. Cela permet de résoudre près de 75 % des ralentissements en cycle urbain sans toucher à la pédale de frein. Le couple de décélération est également utilisé pour récupérer de l'énergie. En effet dès que le conducteur retire son pied de la pédale d'accélérateur, l'électromoteur devient alors un générateur qui transforme l'énergie cinétique en électricité pour réalimenter la batterie. Jusqu'à 20 % de l'énergie consommée est ainsi récupérée.

Quelles sont les limites de l'E-mobilité?

L'électromobilité n'en est qu'à ses balbutiements et des innovations sont par conséquent encore nécessaires à certains endroits. Le défi le plus important est évidemment l'amélioration de l'accumulateur d'énergie. Ses particularités spécifiques en termes de densité énergétique et de poids sont pour l'instant le facteur restrictif de l'E-mobilité.

Densité énergétique et poids de l'accumulateur d'énergie.

Pour l'heure seule une quantité limitée d'énergie peut être emmagasinée dans une batterie et la densité énergétique du composite de cellules est tout aussi faible. En effet un accumulateur d'énergie d'un véhicule électrique possède aujourd'hui l'équivalent énergétique d'environ deux à trois litres de carburant. Le rendement important du moteur compense toutefois en partie cette faiblesse. Car quand un moteur à combustion exploite 40 % de l'énergie du carburant tout au plus, le moteur électrique, lui, utilise jusqu'à 96 % de l'énergie mise à disposition. Un moteur électrique vous emmène donc nettement plus loin avec moins d'énergie. Certes l'autonomie d'un véhicule électrique n'a encore rien de comparable avec celle d'un moteur à combustion, mais l'accumulateur d'énergie automobile n'en est qu'à ses débuts. On peut donc s'attendre à des avancées technologiques dans les prochaines années grâce à une recherche poussée dans ce domaine. Les futurs accumulateurs d'énergie seront donc non seulement beaucoup moins onéreux, mais aussi plus légers, plus compacts tout en ayant une



bien meilleure densité énergétique.

Outre la densité énergétique, le poids de l'accumulateur d'énergie est le second facteur restrictif en termes d'autonomie. A capacité de batterie égale, plus un véhicule est léger et plus son autonomie est grande. Compte tenu de sa faible densité énergétique, la batterie a actuellement la taille d'une grosse valise de voyage et elle est par ailleurs très lourde. On pourrait certes augmenter l'autonomie du véhicule en développant la capacité de sa batterie, mais cela aurait pour effet de l'alourdir encore et donc de supprimer une partie de l'autonomie gagnée. Il faut donc trouver le bon rapport entre le poids et la capacité de l'accumulateur d'énergie et améliorer encore l'autonomie au moyen de mesures comme une construction résolument légère et des stratégies de charge et d'exploitation intelligentes. Les ingénieurs BMW Group travaillent du reste à réduire le temps de charge de manière significative. Car pour l'instant plusieurs heures de charge, et par conséquent d'immobilisation de la voiture, sont nécessaires pour recharger complètement un E-véhicule.

« Nous sommes parfaitement conscients des limites de l'électromobilité. Mais cela ne nous empêche pas de les faire reculer un peu plus tous les jours ».

(Martin Arlt)

Les ingénieurs de BMW Group ont identifié les domaines de l'électromobilité réclamant des améliorations et travaillent intensément à la mise au point de solutions optimales, satisfaisant la clientèle. C'est ainsi que BMW Group conduit de vastes projets pilotes en Allemagne, en Grande-Bretagne et aux États-Unis censés lui fournir des informations précieuses sur l'exploitation et le fonctionnement des E-véhicules et lui permettre d'ajuster à l'avenir ses véhicules encore plus précisément par rapport aux besoins de la clientèle. Ainsi qu'en témoignent les premiers résultats des essais sur la MINI E, BMW Group est sur la bonne voie.

BMW Group adopte une approche globale durable.

L'électromobilité fait partie intégrante d'EfficientDynamics. Grâce à ce dernier, BMW Group réduit depuis pas mal de temps déjà la consommation et les émissions au moyen de nouvelles générations de moteurs très performants, de mesures d'aérodynamisme, d'une construction innovante et plus légère ainsi que de mesures intelligentes de gestion de l'énergie au sein



du véhicule – et tout ceci pour des performances encore accrues. Entre 1995 et 2009, BMW Group a ainsi réduit les émissions de CO₂ de près d'un tiers sur l'ensemble de sa gamme de véhicules. Aujourd'hui encore l'entreprise réalise des économies de consommation grâce à EfficientDynamics en développant notamment l'électrification du système de transmission jusqu'à l'hybridation. A terme, EfficientDynamics sera synonyme de transition vers une mobilité sans d'émission grâce à la batterie électrique et à une énergie produite à partir d'hydrogène obtenu par régénération.

« On se déplacera à l'avenir exclusivement au moyen d'énergies renouvelables et renouvelées. Les ressources sont trop précieuses pour être gaspillées ». (Peter Ratz)

La notion de durabilité chez BMW Group.

Cependant n'appréhender la question de la durabilité que du point de vue du produit n'est pas suffisant pour BMW Group. La volonté de leadership affirmée grâce à EfficientDynamics, l'entreprise entend la transposer également à l'avenir dans le développement durable tout au long de la chaîne de création de valeur. C'est pourquoi la stratégie de BMW Group en matière de durabilité impose non seulement de développer des technologies de transmission efficaces et de mettre en place des concepts de mobilité durable dans les grandes agglomérations, mais aussi, dans le cadre de la philosophie Clean Production, de réduire davantage encore la pollution de l'environnement et la consommation des ressources notamment dans le processus de production. En véritable citoyen du monde, l'entreprise s'engage à trouver des solutions aux défis de la société – le but étant de participer activement à l'élaboration des conditions générales régissant son action à l'intérieur et à l'extérieur de l'entreprise.

« Au sein de l'entreprise, tout le monde est convaincu que la mobilité haut de gamme en particulier intégrera de plus en plus le concept de développement durable. Pour viser le haut de gamme, il faudra évidemment aussi penser désormais en termes de développement durable ». (Martin Artl)

BMW axe résolument ses process et ses structures sur l'électromobilité.

Pour transmettre aux véhicules électriques les gènes de l'entreprise, BMW Group accorde beaucoup d'importance au développement et à la



conception d'éléments d'identification du véhicule électrique. Concernant l'accumulateur d'énergie par exemple, les ingénieurs essaient de récupérer des cellules le maximum de rendement et d'autonomie par le biais d'une gestion efficace de l'accumulateur, de stratégies de fonctionnement intelligentes et d'un équilibre thermique optimal. Le système propulseur très performant a également été développé en interne. Car BMW Group ambitionne de construire également à l'avenir les meilleurs systèmes propulseurs automobiles. Des systèmes propulseurs qui se démarquent de la concurrence par leur efficacité, le déploiement de leur puissance – même quand l'électricité se substitue au carburant.

« BMW Group incarne la compétence en matière de moteurs et il en sera encore ainsi à l'avenir ». (Patrick Müller)

Dans d'autres domaines, BMW Group acquiert un savoir-faire au contact de partenaires compétents. Qu'il s'agisse de SB LiMotive dans le domaine du développement des cellules ou de SGL Automotive Carbon Fibers (SGL Group) pour la mise au point et la production de fibres de carbone et de toiles en fibres de carbone – les ingénieurs allient leurs précieuses compétences pour faire progresser davantage encore la mobilité individuelle. C'est donc dans le cadre du joint venture avec SGL Automotive Carbon Fibers (SGL Group) qu'est née à Moses Lake (Etas-Unis) une usine de fibres de carbone ultra moderne fonctionnant à partir d'énergies renouvelables afin de pouvoir fabriquer ce matériau dans les meilleures conditions et le mettre en œuvre à moindre coût.

Le Megacity Vehicle – une mobilité durable dans l'espace urbain.

Le Megacity Vehicle (MCV) montre la façon dont BMW Group conçoit la mobilité du futur dans l'espace urbain. Véritable véhicule du « purpose design », le MCV a été conçu en tenant largement compte des besoins et des exigences de l'électromobilité. Car comme le montrent les travaux de développement effectués jusque-là sur la MINI E et sur la BMW Concept ActiveE, la conversion d'un véhicule conçu à l'origine pour fonctionner avec un moteur à combustion (Conversion Vehicle) ne permet pas d'exploiter tout le potentiel de l'électromobilité. Le MCV intègre par conséquent les composants



électriques du moteur récemment mis au point dans une architecture de véhicule entièrement nouvelle. Une construction résolument plus légère et l'utilisation innovante de PRFC complètent ce concept de véhicule très étudié.

BMW s'essaya pour la première fois à la propulsion électrique en 1969 avec une BMW 1602 électrifiée 1602. Grâce à divers prototypes et constructions d'essai, BMW Group a acquis au cours des quarante dernières années un savoir-faire précieux sur cette autre technologie de transmission et en vérifia continuellement les possibilités d'exploitation. Il y eut entre autres la BMW E1, un véhicule expérimental qui présentait dès 1991 de nombreuses caractéristiques du véhicule électrique moderne et avec lequel on devait sonder les avantages et inconvénients de ce mode de propulsion dans la pratique. Mais c'est la technologie lithium-ion qui ouvrit des perspectives concrètes de développement en série puisqu'elle satisfaisait aux exigences nécessaires de sollicitation et de solidité des cycles et avait fait ses preuves à plusieurs reprises dans des emplois divers. BMW Group agit rapidement et put transposer assez vite ce savoir-faire en un résultat intéressant pour le client – la MINI E. Cette référence importante de BMW Group dans l'histoire de l'électromobilité est en circulation depuis déjà la mi-2009. Et avec plus de 600 MINI E actuellement en service, BMW Group est aujourd'hui le constructeur automobile ayant en circulation la plus grande flotte de véhicules électriques destinés aux particuliers. Les premiers résultats des essais montrent que l'E-mobilité convient déjà à un usage quotidien.

« L'heure est aux véhicules électriques ». (Patrick Müller)

BMW réfléchit au-delà du produit.

L'électromobilité ouvre des perspectives entièrement nouvelles autour du véhicule. On pense en effet à divers services relatifs à la recharge du E-véhicule. BMW Group collabore ainsi déjà avec des fournisseurs d'énergie pour permettre un accès rapide et souple à l'électricité « verte ». Des règles de recharge intelligentes et une recharge pilotable à distance sont d'autres possibilités pour rendre l'électromobilité séduisante aux yeux de la clientèle. BMW Group essaie donc avec ses partenaires la recharge assistée. Grâce à cette stratégie de charge « anticyclique », l'E-véhicule est chargé lorsque le besoin global en courant est encore faible ou que de l'énergie renouvelable est à disposition, la nuit par exemple. Il suffit alors d'indiquer l'heure de fin de charge, c'est-à-dire l'heure à laquelle le véhicule doit être disponible et



pleinement rechargé. Selon la préférence, le véhicule peut être rechargé de manière particulièrement écologique ou particulièrement rapide. Il y a aussi l'idée de faire du véhicule électrique un élément de l'alimentation énergétique et de l'utiliser à terme comme réserve d'énergie intermédiaire par exemple.

A l'avenir le concept de mobilité individuelle de BMW Group sera plus large encore. Puisque l'urbanisation croissante change de plus en plus les conditions de la mobilité, BMW Group réfléchit aussi à des services de déplacement dans lesquels l'intermodalité des moyens de transport jouera un rôle essentiel.



2. Le projet i.

Considérant l'évolution actuelle de la société et de l'environnement (chapitre 1), BMW Group a défini et présenté dans le courant de l'année 2007 la nouvelle orientation de l'entreprise – la stratégie « Number One ». Il y est surtout question de rendements conséquents, d'augmentation durable de la valeur et de garantie de l'indépendance de l'entreprise. Certes la croissance doit être au rendez-vous dans son cœur d'activité, mais il faut aussi trouver de nouveaux champs d'action rentables le long de la chaîne de création de valeur et du cycle de vie de l'automobile. BMW Group investit parallèlement de manière substantielle dans les technologies d'avenir, les nouveaux concepts de véhicule et les systèmes de transmission innovants. Le dessein du constructeur allemand est évident : rester à l'avenir le fournisseur numéro 1 de produits et services haut de gamme en matière de mobilité individuelle.

Dans le cadre de la nouvelle stratégie d'entreprise, on a recherché dans une étude qualitative approfondie de l'environnement ce qui motive la société et quels pourraient être les technologies, tendances ou défis de la mobilité à l'avenir – en particulier dans un contexte d'évolutions climatiques et démographiques. La réponse à ces questions est : le projet i.

« Avec le projet i, BMW Group aborde les défis futurs de la mobilité individuelle ». (Martin Artl)

La mission.

Le projet i et avec lui une initiative consistant à élaborer des concepts de mobilité durables et tournés vers l'avenir a vu le jour fin 2007. Le savoir-faire acquis grâce à ce projet doit bénéficier à l'entreprise et aux futurs projets automobiles. L'objectif à long terme du projet i est de proposer une façon nouvelle d'aborder les technologies, les processus et les concepts de véhicule dans les domaines de la production, du développement et de la commercialisation. Concrètement le projet i a pour mission de créer des produits nouveaux, tournés vers l'avenir et qui répondent aux défis et exigences des clients en milieu urbain.



La démarche.

Mais comment aborder au mieux ce « mandat » ? Pour réaliser ces objectifs, il ne suffit pas de maîtriser de nouveaux procédés et de nouvelles technologies. Il faut complètement repenser la construction automobile telle que nous la connaissons aujourd'hui. C'est pourquoi le projet i va au-delà des structures traditionnelles et réunit en un même lieu les détenteurs d'un savoir spécifique et les personnes à la pensée non-conformiste recrutés en internés. C'est donc dans cette unité organisationnelle, certes petite, mais néanmoins efficace et puissante, que sont définis les objectifs et les exigences fixés aux solutions de déplacement durables de demain et qu'ils sont ajustés aux besoins futurs des clients. Afin que l'équipe puisse aborder la problématique de la manière la plus libre et la plus détachée possible, le projet n'a été lié à aucune marque. Ce centre de réflexion (think tank) peut donc travailler de façon non-conventionnelle et en toute indépendance avec néanmoins le soutien plein et entier des experts de l'ensemble de l'entreprise. C'est donc dans un esprit d'échange ouvert et transparent que le projet i exploite tous les savoir-faire de l'entreprise.

« C'est pour moi une expérience formidable que de collaborer à un tel projet avec des collègues qui sont tous sur la même longueur d'ondes. Dès le début, nous avons eu toute la liberté nécessaire. Il régnait une ambiance et une atmosphère que l'on connaît d'ordinaire uniquement dans les start-up ».
(Peter Ratz)

Les débuts avec de nouvelles prémisses.

Lorsque les ingénieurs BMW Group affectés au projet i se sont mis au travail il y a deux ans et demi, ils ne sont pas partis de zéro. La base de leur travail de développement était une recherche intense sur les questions de mobilité et de besoins de la clientèle dans le futur afin de débusquer les éventuels potentiels de développement pour BMW Group. Dans le cadre du projet i, on réfléchit certes aux véhicules, mais on recherche toujours aussi des solutions globales de déplacement dans un contexte donné. Il est pourtant vite devenu évident que la première étape de développement serait un véhicule dont le déplacement serait sans impact négatif sur l'environnement, autrement dit sans émission de gaz, et qui répondrait parallèlement aux exigences de la mobilité urbaine moderne – le Megacity Vehicle (MCV).



L'objectif premier qui sous-tend tout le projet est un niveau de durabilité le plus élevé possible. Du premier fournisseur à la valorisation des pièces après la vie effective du véhicule en passant par la production, le processus doit comporter les trois facettes du développement durable : écologique, économique et socialement compatible. Dans un premier temps les ingénieurs passèrent donc au crible la totalité des processus et des éléments de la chaîne de création de valeur. Ils vérifièrent si la méthode employée jusque-là satisfaisait aux exigences élevées en termes de durabilité que BMW Group s'impose et si elle pouvait être ici ou là optimisée ou redéfinie. Les résultats furent en même temps les prémises de la naissance du Megacity Vehicle.

« Nous voulions voir à quoi ressemblerait la mobilité du futur pour que, forts de ces connaissances, nous puissions élaborer des concepts de mobilité durable dans l'espace urbain. La durabilité devait être présente tout au long du processus : de la naissance du produit à son utilisation et au réemploi possible de certains de ses composants et à leur recyclage ». (Peter Ratz)

Le résultat.

Le projet a largement exploité toutes les possibilités et libertés offertes. Il en résulte un concept de mobilité global et durable – le Mega City Vehicle (MCV). Le MCV montre la façon dont BMW Group conçoit le véhicule citadin durable du futur. Il s'agit d'un véhicule conçu pour un usage essentiellement en ville et qui allie dynamique, confort et durabilité. Grâce à son système de transmission électrique nouvellement mis au point (chapitre 3), à son concept de carrosserie révolutionnaire « LifeDrive » et à l'emploi innovant de PRFC dans l'habitacle (chapitre 4), le MCV permet de se déplacer en milieu urbain de manière maîtrisée, sûre et confortable – sans émissions nocives.

Le développement du produit ayant été appréhendé de manière globale, le MCV s'accompagne d'importantes modifications des processus. Compte tenu de ses caractéristiques nouvelles au niveau de la transmission, de l'architecture du véhicule et de l'emploi de nouveaux matériaux, la production est désormais en partie soumise à des processus entièrement nouveaux. En collaboration avec des partenaires performants tels que SB LiMotive (fabricant



de cellules de batterie) et SGL Automotive Carbon Fibers (producteur de fibres de carbone et de toile non tissée en fibre de carbone), BMW Group s'ouvre ainsi à de nouveaux domaines de compétences pleins de promesses.

« Les technologies mises au point par BMW Group dans le cadre du projet i recèlent un énorme potentiel d'actions écologiquement et économiquement durables ». (Martin Artl)

Le principe de développement durable concerne ainsi en toute logique chaque étape du processus. Et pourtant, avoir des produits écologiquement durables et donc préservant les ressources n'est pas une fin en soi pour BMW Group. Ces produits doivent en effet être à la fois rentables et bien étudiés.

La MINI E – pionnière de l'E-mobilité.

La première réussite du projet i remonte au printemps 2008, avec la MINI E. Parallèlement, le projet attira pour la première fois l'attention de l'opinion publique. La MINI E, avec son autonomie de 150 kilomètres en moyenne en usage quotidien et ses 204 chevaux, ne s'est pas contentée de poser des jalons techniques lors du premier projet de qualification de BMW Group. Elle continue depuis de réaliser un important travail de pionnière pour BMW Group dans le cadre de la mise au point de concepts de transmission alternatifs pour une mobilité sans émissions de CO₂.

L'objectif, lors du développement de la MINI E, était de la confier le plus rapidement possible à des clients pour recueillir des informations précieuses sur leur expérience de conduite d'un E-véhicule au quotidien. C'est donc dans le cadre d'essais in situ de grande envergure que certains clients privilégiés testent depuis la mi-2009 ces véhicules en Allemagne, aux Etats-Unis et en Grande-Bretagne. Au cours de deux phases d'essai intenses, cette mini-flotte livrera des informations importantes sur l'utilisation et le fonctionnement des E-véhicules et contribuera donc indirectement à l'évolution du MCV. Avec plus de 600 MINI E, BMW Group est aujourd'hui le constructeur automobile ayant en circulation la plus grande flotte de véhicules électriques destinés aux particuliers.

La MINI E en route.

Dans les trois pays tests, BMW Group collabore parfois étroitement avec les fournisseurs locaux d'énergie, les universités et les différents gouvernements. Car dans le cadre du projet MINI E, BMW Group ne se



contente pas seulement de faire découvrir aux utilisateurs une mobilité individuelle entièrement nouvelle, il conçoit aussi avec ses partenaires une partie des infrastructures. Les fournisseurs d'énergie permettent aux utilisateurs d'accéder, s'ils le souhaitent, à une électricité « verte » produite à partir de ressources renouvelables.

Etude d'utilisation de la MINI E à Berlin : l'électromobilité est adaptée à un usage quotidien.

Bien que les tests soient encore en cours, les premiers résultats venus de Berlin sont déjà extrêmement positifs. Comme l'indiquait une enquête préalable, les utilisateurs s'attendaient à des restrictions en termes d'autonomie et de temps de charge. Mais dans les faits, très peu ont fait l'expérience de ces limites. L'étude berlinoise montre en effet que pour plus de 90 pourcent des participants, l'autonomie moyenne de 150 kilomètres ne gêne pas leurs habitudes de déplacement. De même, le temps de charge n'est pas vécu comme une restriction.

Il apparaît donc que la différence d'utilisation des véhicules entre un conducteur de MINI E et les conducteurs de MINI Cooper ou de BMW 116i est marginale. La longueur moyenne d'un trajet simple diffère entre une BMW 116i, une MINI Cooper et une MINI E de seulement deux kilomètres. La distance totale parcourue tous les jours est également comparable pour les trois véhicules. Elle est de 37,8 kilomètres pour la MINI E – ce qui est supérieur à la moyenne nationale en ville – contre 42 kilomètres en moyenne par jour pour la BMW 116i et 43,5 kilomètres pour la MINI Cooper. Le trajet le plus long jamais accompli d'une seule traite au volant d'une MINI E est pour l'instant de 158 kilomètres. La comparaison avec l'utilisation moyenne d'une BMW Série 5 montre cependant que l'électromobilité ne convient pas de la même façon à tous les types de déplacement. Ce n'est pas non plus le but recherché. Pourtant 66 % des utilisateurs berlinois estiment que la souplesse de la MINI E est tout aussi grande que celle d'un véhicule conventionnel.

Quant aux infrastructures publiques de recharge du véhicule, il semble que les utilisateurs recherchent des bornes en premier lieu à proximité de leur lieu de travail, dans les parcs de stationnement publics, aux points de trafic intense comme les gares ou les aéroports ou encore les centres commerciaux. Une grande partie de la recharge en électricité se fait néanmoins à la maison et offre pour l'heure aux utilisateurs tests une mobilité adaptée à un



usage quotidien. La possibilité offerte par le partenaire Vattenfall Europe de recharger son véhicule avec de l'énergie verte a remporté un franc succès. Il semblerait donc que, pour les utilisateurs, rouler à l'électricité soit un ensemble intégrant le véhicule, l'infrastructure et la production d'énergie, et qu'ils entendent y jouer pleinement leur rôle .

La MINI E aux Etats-Unis : davantage de plaisir pour zéro émission.

Aux Etats-Unis également, des clients testent la MINI E. Pour la flotte américaine qui se compose de 450 MINI E, BMW Group a mis en place à Davis (UC Davis) une coopération spéciale en matière de recherche avec l'Université de Californie. La capacité de la MINI E à répondre aux exigences d'un usage quotidien est y testée de manière systématique afin de fournir à BMW Group des informations encore plus précises ainsi qu'une compréhension des habitudes d'utilisation.

Les résultats confirment l'écho positif de Berlin : la MINI E permet de satisfaire parfaitement les besoins de mobilité des clients tests américains. Son autonomie de 100 miles (environ 160 km) est entièrement suffisante pour le quotidien. Les conducteurs américains de la MINI E indiquent avoir parcouru en moyenne une distance journalière de 30 miles (environ 48 km), tandis que la moyenne est de 40 miles (environ 64 km) par jour pour un citoyen américain.

La recharge à domicile ne fut par ailleurs aucunement ressentie comme une gêne par l'utilisateur américain. La moitié d'entre eux ont même rechargé leur véhicule tous les jours, un peu par routine, même si cela n'était pas nécessaire. Par conséquent, ils ont très peu utilisé les infrastructures de recharge extérieures.

Le plaisir de conduire était également au rendez-vous. Les utilisateurs étaient unanimes sur ce point : conduire la MINI E procure du plaisir et n'exige pas de renoncer à quoi que ce soit. Les clients tests se sont du reste vite habitués à ces nouvelles sensations de conduite et beaucoup ont affirmé avoir eu moins de plaisir à conduire leur propre voiture après l'expérience MINI E. Cela transparaît d'ailleurs dans la fréquence d'utilisation : un tiers des utilisateurs ont indiqué rouler davantage en MINI E qu'avec leur véhicule personnel.

Les conséquences à tirer de ces études.

Les résultats fournis par Berlin et la Californie montrent que BMW Group



est sur la bonne voie. Seul un petit nombre de trajets n'a pas pu être effectué avec la MINI E. Les raisons les plus fréquemment invoquées pour cela, aux Etats-Unis comme d'ailleurs en Allemagne, étaient le manque d'espace de rangement et le nombre limité de passagers. Les données recueillies suggèrent qu'un Megacity Vehicle plus spacieux et doté d'une autonomie un peu plus importante satisferait presque en totalité les besoins de mobilité des habitants des grandes villes. BMW Group travaille donc d'ores et déjà intensément à cela.

La prochaine étape : la BMW Concept ActiveE.

BMW Group poursuit résolument ses activités de recherche et développement de l'électromobilité dans le cadre du projet i grâce à la BMW Concept ActiveE. Sur la base de cette étude présentée en décembre 2009, BMW Group confiera en 2011 une autre flotte de véhicules électriques d'essais à des clients. Cette expérimentation vise à approfondir les connaissances déjà acquises sur l'emploi quotidien des véhicules à propulsion électrique d'une part et à mieux cerner les souhaits de la clientèle d'autre part.

Si l'espace à l'intérieur de l'habitacle était plutôt réduit dans la MINI E, la BMW Concept ActiveE en revanche offre quatre vraies places assises et un coffre d'une capacité d'environ 200 litres grâce notamment à une meilleure intégration des composants de la transmission électrique. Le moteur spécialement mis au point pour cette BMW à propulsion entièrement électrique développe une puissance de 125 kW / 170 chevaux et dispose d'un couple maximal de 250 newton-mètres. L'énergie de la propulsion électrique provient de batteries au lithium-ion également de conception totalement nouvelle. Elles permettent une autonomie de près de 160 kilomètres (100 miles) en fonctionnement quotidien. Les composants du système de transmission électrique ont été conçus en tenant compte des exigences du MCV (Megacity Vehicle) et sont testés ici à un stade de présérie.

La BMW Concept ActiveE présente en outre des services nouveaux de BMW Connected Drive spécialement mis au point pour une utilisation dans un véhicule électrique. Parmi ces services, il y a les fonctions permettant de vérifier le niveau de charge de l'accumulateur, de rechercher des bornes de recharge publiques ou d'activer le chauffage/la climatisation auxiliaire du véhicule par le biais d'un téléphone portable.



Le Megacity Vehicle : le premier véhicule à propulsion électrique de série de BMW Group .

Avec le Megacity Vehicle (MCV), BMW Group va proposer une solution d'un genre nouveau pour une mobilité durable en environnement urbain. Le MCV devrait arriver sur le marché en 2013 sous le nom d'une sous-marque de BMW. Comme le montrent les travaux de développement de la MINI E et de la BMW Concept ActiveE, la conversion d'un véhicule conçu à l'origine pour fonctionner avec un moteur à combustion (Conversion Car) ne permet pas d'exploiter tout le potentiel de l'électromobilité. Le MCV a donc été conçu pour répondre aux besoins et aux exigences de l'électromobilité sans faire la moindre concession. Il bénéficie d'un système de transmission entièrement nouveau (voir chap. 3) et d'une architecture révolutionnaire (LifeDrive, chap. 4) combinant construction légère adaptée, espace fonctionnel optimal et sécurité maximale en cas de collision. Cela séduira un nouveau type de clientèle, car la structure compacte du système de transmission électrique permet de nouveaux concepts au sein de l'habitacle avec des fonctionnalités nouvelles et des libertés elles aussi nouvelles en matière de design .



3. Le système de transmission électrique.

Conduire impliquait jusque-là de rouler dans une voiture propulsée par un moteur à combustion. Or les changements que connaissent actuellement l'environnement et la société montrent que l'emploi des carburants fossiles dans tous les domaines de la vie courante est écologiquement néfaste et que les réserves ne seront pas éternellement disponibles. BMW Group voit dans le développement technique intensif de l'électromobilité la possibilité d'y remédier. Mais que recouvre exactement le concept d'E-mobilité ? Quelles sont les différences avec un moteur à combustion ? Quels sont les potentiels de l'E-mobilité et à quels défis les ingénieurs seront-ils confrontés ?

Non polluants et dynamiques – telle seront les véhicules de la nouvelle génération.

Pouvoir propulser des véhicules uniquement grâce à l'énergie électrique ouvre des perspectives de mobilité totalement nouvelles. Le fonctionnement d'un E-moteur ne produisant aucun gaz nocif pour le climat, l'énergie électrique permet donc une mobilité locale sans émissions et par conséquent non polluante. Lorsque cette énergie provient de ressources renouvelables, la production d'électricité provoque même zéro émission. L'E-mobilité procure une sensation de conduite complètement nouvelle, toute en agilité. La puissance d'un E-moteur BMW Group moderne est impressionnante et fait rapidement oublier que les E-véhicules étaient assimilés à un segment niche. Seul le faible bruit du moteur, tout au plus, rappelle que l'on est à bord d'un véhicule électrique.

« Le développement de la puissance sur un E-véhicule fonctionne quasiment comme pour un interrupteur d'éclairage : on allume/démarre et la pleine puissance est là ». (Hans-Jürgen Branz)

Un moteur électrique moderne de BMW Group, comme celle du Megacity Vehicle par exemple, atteint une puissance nettement supérieure à 100 kW. La particularité en cela c'est que toute la puissance du moteur est disponible dès le démarrage et n'a pas besoin d'être obtenue, comme pour les moteurs à combustion, via le régime moteur. Les différentiels, les



régulations antipatinage et le rapport veillent à ce que la totalité du couple soit restitué sur la route. Le couple maximal disponible dès l'arrêt confère aux E-véhicules une agilité particulièrement grande et garantit des valeurs d'accélération impressionnantes. La propulsion arrière du Megacity Vehicle complète parfaitement les performances des E-moteurs : grâce au transfert dynamique de charge sur les roues, les roues motrices supportent plus de poids au démarrage ce qui permet une meilleure traction et une meilleure transmission de la puissance. Le couple élevé des E-moteurs et la propulsion arrière assurent ainsi une dynamique de conduite caractéristique de BMW Group.

BMW Group ambitionne de continuer à construire à l'avenir les meilleurs moteurs. Des moteurs qui se démarquent de la concurrence par leur efficacité, le déploiement de leur puissance et leur silence en fonctionnement – même quand l'électricité remplace le carburant. BMW Group s'attache de manière intensive au développement technique de l'électromobilité : au sein de « l'e-Werk », le centre de compétence de BMW Group pour les moteurs électriques, les experts en charge du développement, de la fabrication et des achats sont regroupés sous un même toit. Tous travaillent à l'élaboration et à la mise en œuvre de la nouvelle génération de moteurs.

Accélérer sans changer de rapport.

Les moteurs électriques utilisent une plage de régimes nettement plus importante que les moteurs à combustion. Il est possible d'obtenir sans problème des régimes supérieurs à 12 000 tours/mn. Pour atteindre la vitesse maximale, le processus est également différent. Grâce à son couple élevé, un E-véhicule accélère non seulement plus vite qu'une voiture de puissance équivalente dotée d'un moteur à combustion, mais en plus son régime utile élevé permet d'obtenir la restitution du couple sans interruption sur toute la plage de vitesses. La puissance du moteur entraîne les roues par le biais d'une démultiplication. Il n'y a plus besoin d'une boîte à plusieurs vitesses. Cela signifie qu'un E-véhicule ne disposant que d'une seule vitesse peut accélérer de 0 km/h jusqu'à la vitesse maximale. La propulsion continue avec un régime sans cesse croissant est une expérience particulière qui n'était possible jusque-là sur un moteur à combustion qu'au prix d'une modification importante de la conception (boîtes à double embrayage par exemple).



« L'électromobilité n'est aucunement une déclaration de renoncement aux plaisirs de la route. Conduire un E-véhicule est au contraire un réel plaisir ».
(Patrick Müller)

Dans le cas du Megacity Vehicle (MCV), seule la vitesse maximale théorique n'est volontairement pas complètement exploitée. Le MCV circulant en effet essentiellement en ville et en périphérie, les 150 km/h de sa vitesse de pointe sont pour l'instant parfaitement suffisants. Des vitesses plus importantes seraient certes possibles, mais pas forcément judicieuses. Tout d'abord en raison des besoins énergétiques très élevés lors des déplacements à grande vitesse : plus la vitesse augmente et plus la résistance de l'air croît – de façon exponentielle. Cela se traduirait donc par une consommation d'énergie plus grande. Or comme la quantité d'énergie mise à disposition est limitée du fait de la capacité de la batterie, circuler à grande vitesse réduirait alors fortement l'autonomie du véhicule. Ensuite parce que pour atteindre la vitesse de pointe, une autre démultiplication serait nécessaire ce qui aurait un impact non négligeable sur l'agilité du véhicule dans le trafic urbain. Pour augmenter la vitesse maximale des E-véhicules, on pourrait utiliser une transmission à plusieurs rapports mais cela impliquerait une conception nettement plus complexe, un encombrement plus grand et un poids plus important.

Freiner avec la pédale d'accélérateur.

L'autre différence qui contribue à faire de l'E-véhicule une expérience unique pour le conducteur, c'est la possibilité de freiner avec la pédale d'accélérateur. La pédale d'accélérateur devient ainsi une « pédale de conduite ». Lorsque l'on retire le pied de la pédale d'accélérateur, le véhicule ne continue pas de rouler au ralenti mais décélère de façon active. Ce couple de décélération est alors utilisé pour récupérer de l'énergie. Au freinage, l'électromoteur se transforme en générateur produisant de l'énergie et rechargeant la batterie. Semblable dans le principe à la récupération de l'énergie de freinage du pack de mesures EfficientDynamics, l'énergie récupérée peut alors directement alimenter la propulsion. L'utilisation intensive de l'énergie récupérée par le moteur permet d'augmenter l'autonomie du véhicule jusqu'à 20 %. Conduire avec une seule pédale permet par ailleurs une conduite plus détendue, avec moins de changements de pied et avec une meilleure rapidité de réaction, ce



qui est particulièrement opportun pour évoluer dans le trafic urbain. Jusqu'à 75 % des décélérations s'effectuent ici sans recours à la pédale de frein.

Des composants moteur puissants et compacts.

Un véhicule équipé d'une propulsion électrique n'offre pas seulement une tenue de route remarquable. Le moteur électrique bénéficie en outre, par rapport au moteur à combustion, d'une densité de puissance plus importante. Cela signifie qu'avec un E-moteur, la même puissance du moteur peut être obtenue pour un encombrement plus faible. L'ensemble du moteur de la BMW Concept ActiveE par exemple (et à terme du MCV) est, sans l'accumulateur d'énergie, aussi gros que deux caisses de boissons. La forme compacte du groupe moteur permet par conséquent une bonne insertion dans l'architecture du véhicule. Par ailleurs, aucune intégration complémentaire de système complexe d'évacuation des gaz ou d'amenée d'air n'est nécessaire. Les dimensions plus petites et le volume nettement plus faible de la propulsion électrique permettent un gain de place pouvant atteindre 50 % par rapport à un moteur classique avec boîte de vitesses. Cela profitera avant tout aux passagers de ces concepts de véhicule du futur.

La propulsion électrique intègre plusieurs composants qui interagissent les uns avec les autres pour déplacer le véhicule : l'électromoteur, l'électronique de puissance, un rapport de démultiplication et l'accumulateur d'énergie électrique.

Au cœur : le moteur électrique.

Le cœur de la propulsion électrique, c'est l'électromoteur. Pour faire simple, la toute dernière génération de moteurs électriques BMW Group comprend un stator fixe en forme de tube et un cylindre rotatif à l'intérieur du stator, le rotor. Ce dernier est lié au rapport de démultiplication et donc indirectement aux roues motrices. Le stator est pourvu de bobines dans lesquelles le flux électrique peut générer un champ magnétique. Sur le rotor en revanche, on trouve un ou plusieurs aimants à polarité fixe. Pour mettre le moteur électrique en mouvement, une attraction et une répulsion ciblées entre le rotor et le stator sont créées par le biais d'un champ magnétique changeant (champ magnétique rotatif). On exploite ici l'attraction de deux pôles différents d'un aimant et/ou la répulsion de deux pôles identiques – le pôle nord et le pôle sud s'attirent tandis que deux pôles nord ou deux pôles sud ensemble se repoussent.



Quand le courant passe, le pôle sud du champ magnétique généré dans le stator attire le pôle nord de l'aimant du rotor. On fait cependant passer le pôle sud à la phase suivante avant même que le pôle nord du rotor n'ait atteint le pôle sud du stator. Le rotor se tourne par conséquent et « court » littéralement après les champs magnétiques perpétuellement changeants du stator. Par ce mouvement de rotation, le rotor transmet l'énergie mécanique nécessaire à la propulsion. La vitesse du véhicule dépend de la vitesse à laquelle on fait tourner le champ magnétique à l'intérieur du stator. Le couple en revanche est influencé par le nombre d'aimants et l'intensité du courant : plus il y a d'aimants sur le rotor et plus le courant circulant est élevé et plus la propulsion électrique produira un couple élevé.

Ce principe de fonctionnement correspond à une machine synchrone triphasée et perpétuellement stimulée, comme celle que l'on trouve actuellement sur la BMW Concept ActiveE et le MCV. « Moteur synchrone » signifie que le rotor suit de façon synchrone le champ rotatif du stator. Le champ magnétique du rotor est par ailleurs excité en permanence par des aimants et n'a pas besoin d'être initialement induit (stimulation extérieure). Une excitation extérieure serait beaucoup plus coûteuse car elle nécessiterait un second organe de régulation pour générer le champ magnétique dans le rotor. Les machines stimulées en permanence représentent actuellement l'optimum de l'exigence, de la complexité et du fonctionnement.

Plus de puissance grâce à l'électronique : l'électronique de puissance.

Pour que le moteur électrique fonctionne et fournisse une puissance optimale, il est indispensable de trouver la bonne rotation du champ magnétique dans le stator. L'obtention de couples élevés supérieurs à 12 000 tr/mn passe par le changement très rapide et précis des champs magnétiques des phases. Cette tâche importante est assurée par une unité de commande spéciale : l'électronique de puissance. Elle veille au changement de champ magnétique à la vitesse souhaitée et avec l'intensité de champ adéquate. Par ce biais, elle s'assure que le rotor tourne au régime nécessaire et transmet le couple souhaité.

La batterie : le réservoir du véhicule électrique.

Des courants très forts sont nécessaires pour pouvoir entraîner le moteur d'un E-véhicule. Des intensités pouvant aller jusqu'à 400 ampères sont



libérées pour chaque phase, ce qui correspond à peu près à 25 fois l'intensité d'une prise de courant domestique. De même, des tensions pouvant atteindre 400 volts sont deux fois plus importantes que l'alimentation électrique classique des terminaux normaux. Pour emmagasiner et restituer à la demande toute cette énergie, on a recours à un assemblage de cellules de stockage lithium-ion de dernière génération. La technologie lithium-ion a déjà fait la preuve de sa capacité de stockage particulièrement élevée et de la solidité de ses cycles dans de nombreux autres domaines, notamment en téléphonie mobile et dans les ordinateurs portables. Une cellule lithium-ion (adaptée au secteur automobile) a les dimensions d'un livre de poche et possède une tension nominale d'environ 3,7 V. La plage de tension utile d'une cellule est néanmoins comprise entre 2,7 et 4,1 V. Pour obtenir un accumulateur doté de la tension nécessaire de 400 V, on branche une centaine de ces cellules en série.

L'emploi de ces cellules de batterie s'accompagne toutefois de quelques particularités. Le fonctionnement des cellules lithium-ion, par exemple, varie suivant la température. Pour avoir une autonomie maximale, il faut ainsi une température de fonctionnement optimale d'environ 20 °C. L'accumulateur d'énergie est donc tempéré au besoin par des éléments de chauffage auxiliaires ou par un refroidissement actif. La plage de températures utiles des cellules employées en automobile est néanmoins beaucoup plus large que celle des autres cellules de batterie. Certaines cellules d'ordinateur portable par exemple ne peuvent être chargées lorsque la température est négative. Leurs performances sont alors très limitées. S'agissant des cellules utilisées par BMW Group, il y a certes aussi une perte de performances à basse température mais la composition chimique à l'intérieur de la batterie réduit nettement ce déficit. Le préconditionnement de la batterie dès le processus de charge ainsi que la modulation thermique suivant les besoins pendant les trajets éliminent ce manque potentiel.

La sécurité est la première des priorités.

La première des priorités lors de l'élaboration et de la disposition de l'accumulateur d'énergie, a été d'assurer la sécurité des passagers du véhicule. L'accumulateur présente en effet un potentiel de risques certain puisqu'il renferme des courants élevés ainsi que des produits chimiques qui, lorsqu'ils sont mis en contact, peuvent réagir et s'enflammer. La



probabilité d'un choc électrique ou d'une inflammation est éliminée par une série de mesures. D'abord, les cocktails de produits chimiques utilisés dans les cellules de batterie de véhicule sont nettement moins « méchants » que ceux des batteries d'ordinateur portable par exemple. Ensuite, les modules de batterie sont bien protégés par la carrosserie pour éviter toute détérioration en cas de collision. Un réfrigérant, des algorithmes complexes et de nombreux capteurs de surveillance embarqués veillent par ailleurs à ce que la batterie ne subisse aucune surchauffe – en fonctionnement comme en charge. Enfin, des disjoncteurs empêchent l'accumulateur d'énergie de trop se décharger ou trop se charger. Même l'introduction d'objets métalliques dans l'accumulateur a été prévue et sécurisée pour que ce type d'incident ne soit pas critique.

Toute la vie du véhicule.

Les ingénieurs de BMW Group travaillent actuellement à améliorer la longévité de l'accumulateur d'énergie. Pour cela, ils doivent tenir compte de certains facteurs ayant une influence sur la durée de vie de l'accumulateur. Une batterie vieillit à un double niveau : tout d'abord sur le plan calendaire – autrement dit, avec le temps elle perd de sa puissance et du contenu énergétique maximum pouvant être utilisé. Ensuite, certains facteurs comme une décharge trop profonde (depth of discharge) ou la température à laquelle la batterie fonctionne sont des critères importants accélérant le vieillissement de la cellule. Les tests conduits par BMW Group veillent à ce que les cellules satisfassent aux exigences de la clientèle pendant toute la durée de vie du véhicule, et ce tant en termes de longévité que de fréquence des cycles de charge. Dans un souci de durabilité, les batteries usées sont réutilisées, car même lorsque leur capacité n'est plus suffisante pour faire fonctionner un véhicule, elle est toujours assez puissante pour être utilisée comme accumulateur d'énergie fixe pour des applications diverses.

Des défis pour l'avenir.

L'avenir de l'électromobilité réside dans les développements futurs des accumulateurs d'énergie. Les ingénieurs BMW essaient par conséquent de mettre au point un accumulateur d'énergie plus compact, moins coûteux et plus léger. Mais il faut avant tout que celui-ci dispose de plus d'énergie pour accroître l'autonomie du véhicule. La densité énergétique à l'intérieur de l'accumulateur d'énergie d'un E-véhicule n'est pas encore comparable à celle d'un réservoir de carburant plein. Dans un accumulateur à haute



tension de 22 kWh, il y a l'équivalent énergétique d'environ 2,5 litres de supercarburant. Et les autonomies actuellement possibles sont proportionnellement plus faibles. Pourtant un moteur électrique fonctionne plus efficacement : compte tenu de son rendement nettement plus élevé (jusqu'à 96 %) – un moteur à combustion atteint dans le meilleur des cas 40 % – il ira nettement plus loin avec une énergie moindre qu'un véhicule doté d'un moteur à combustion comparable. Cette efficacité exceptionnellement élevée permet néanmoins une autonomie qui est, pour beaucoup, déjà parfaitement adaptée aux déplacements quotidiens. Comme le montrent les premiers résultats des études d'utilisation de la MINI E, 90 % des utilisateurs test ont pu conserver une mobilité pleine et entière avec l'autonomie dont dispose actuellement le véhicule.

Mesures prises pour augmenter l'autonomie.

Une question cruciale demeure : comment accroître encore l'autonomie ? Augmenter la capacité de la batterie pourrait être une possibilité. Mais doter le véhicule d'une batterie plus grosse l'alourdirait ce qui aurait pour effet de limiter l'autonomie. En effet, la taille de la batterie ne peut être augmentée à souhait parce qu'à partir d'un certain seuil le poids supplémentaire de la batterie anéantit le gain d'autonomie. En conséquence, les ingénieurs BMW Group essayent d'exploiter le mieux possible l'actuelle capacité de la batterie. La principale mesure à cet effet est de réduire le plus possible le poids du véhicule par une construction résolument légère et par l'emploi de matériaux intelligents (voir aussi le chap. 4). Par ailleurs, ils veillent à décharger les batteries le plus complètement possible. La plage d'utilisation des cellules de batterie de BMW Group est comprise entre 400 V et 250 V, ce qui correspond à environ 85 % de l'énergie disponible de la batterie. Il n'est pas possible de décharger davantage la batterie sous peine de déclencher des processus physico-chimiques endommageant irrémédiablement les cellules de la batterie.

« Nous veillons à utiliser au mieux chaque kilowattheure issu de la batterie. Nous voulons que le fonctionnement soit le plus efficace possible ». (Patrick Müller)

Certes la propulsion nécessite de l'énergie, mais aussi certaines fonctions annexes comme l'éclairage, la climatisation ou encore l'infodivertissement. Si leur consommation passait relativement inaperçue dans un véhicule



classique, il en est autrement dans un E-véhicule. Leurs besoins en énergie pèse en effet sur l'autonomie du véhicule. Ainsi un véhicule circulant en ville ne consomme en moyenne qu'environ 2,5 kW pour se déplacer tandis que la climatisation peut réclamer jusqu'à 5 kW en fonctionnement maximal. On tente donc de réduire autant que possible la consommation d'énergie au moyen de règles de recharge intelligentes et de stratégies de fonctionnement efficaces. Le véhicule peut ainsi être climatisé pendant l'opération de charge de sorte que la capacité de la batterie pendant les déplacements soit consacrée presque uniquement au transport. Un autre effet connexe positif de cette stratégie intelligente de recharge, c'est le confort – le confort de rentrer en été comme en hiver dans un véhicule agréablement tempéré. Pour augmenter l'autonomie du véhicule, on pourrait également couper l'alimentation de fonctions inutilisées et consommatrices d'énergie ou bien « laisser naviguer » le véhicule. Pour cela, on utilise la dynamique propre au véhicule et on le fait rouler sans utiliser le moteur. Les ingénieurs voient néanmoins à long terme l'avenir dans le développement des accumulateurs d'énergie pour obtenir une plus grande densité énergétique.

Range Extender – petit moteur, grande autonomie.

Le « Range Extender » est une mesure particulière permettant d'accroître l'autonomie. Il s'agit en l'espèce de faire produire du courant à un moteur à combustion par l'intermédiaire d'un générateur pour recharger la batterie durant les déplacements et la maintenir ainsi à un niveau de charge constant. Cela permet d'obtenir une autonomie supplémentaire considérable. Un moteur électrique à part entière étant déjà à bord, ce moteur à combustion peut être relativement petit. Les examens montrent qu'une puissance de 20 à 30 kW est largement suffisante pour un fonctionnement normal. Le Range Extender délivre dans cet ordre de grandeur suffisamment d'énergie pour maintenir le profil de conduite souhaité sans devoir consommer beaucoup de carburant inutilement. Grâce à la forme compacte des composants électriques de la transmission et à l'architecture nouvelle du véhicule, le Range Extender s'intègre aisément.

Parfaitement envisageable comme solution à court terme pour accroître l'autonomie du véhicule, le Range Extender n'est cependant qu'une solution de compromis pour BMW Group. Les ingénieurs BMW Group misent plutôt à long terme sur l'amélioration de la technologie de la batterie. Car



pour l'heure, l'accumulateur d'énergie est encore, compte tenu de ses particularités (faible densité énergétique et donc autonomie moindre, poids relativement important), le facteur restrictif de l'E-mobilité. La technologie d'accumulation énergétique en automobile ayant néanmoins le vent en poupe, on peut s'attendre à d'autres avancées dans ce domaine.

« On peut également s'attendre à des avancées technologiques dans ce domaine dans les années à venir. Bientôt, on jouira d'une autonomie plus importante avec des batteries plus petites et plus légères. Nous sommes au beau milieu d'un développement recelant encore beaucoup de potentiel ».
(Patrick Müller)



4. Construction légère et concept LifeDrive.

De nouveaux concepts de carrosserie pour répondre aux défis de la nouvelle mobilité.

Faire fonctionner un véhicule à l'électricité ne signifie pas simplement remplacer le moteur à combustion par une propulsion électrique. L'électrification d'un véhicule s'accompagne de travaux d'envergure sur l'ensemble de la carrosserie car les composants électriques du moteur posent des problèmes d'encombrement entièrement nouveaux dans un véhicule. Le travail de développement de la MINI E et de la BMW Concept ActiveE ont rapidement montré que les Conversion Cars – c'est-à-dire les véhicules conçus avec un moteur à combustion et transformés pour fonctionner à l'électricité – ne constituaient pas une solution optimale à long terme pour répondre aux exigences de l'E-mobilité. Bien que ces véhicules aient été et soient toujours très importants pour le recueil d'informations concernant l'utilisation et le fonctionnement des véhicules électriques, l'intégration d'une propulsion électrique en leur sein (autrement dit dans un environnement de conception peu adaptée) ne permet pas d'exploiter au mieux le potentiel de l'E-mobilité. Les Conversion Cars sont lourdes comparativement et l'intégration de modules de batterie lourds et volumineux ainsi que de l'électronique spécifique du moteur augure d'importants travaux de transformation puisque la conception du véhicule repose sur des paramètres totalement différents à l'origine.

Il faut par conséquent élaborer un nouveau concept de carrosserie qui tienne compte de toutes les particularités techniques de la propulsion électrique et qui satisfasse en outre pleinement aux exigences en matière de sécurité. Mais à quoi ressemble une architecture de carrosserie de véhicule électrique satisfaisante et fonctionnelle ?

La construction légère sur les véhicules électriques.

Aujourd'hui une carrosserie doit être non seulement solide, mais aussi et surtout légère, précisément sur un véhicule à propulsion électrique, car le poids du véhicule est, avec la capacité de la batterie, le facteur limitant l'autonomie. Plus un véhicule est léger et plus son autonomie sera



grande – simplement parce que la propulsion électrique devra déplacer une masse moins importante. Lors des accélérations, chaque kilo en trop se traduit clairement en une diminution de l'autonomie. Et comme en ville, – lieu principal d'utilisation d'un E-véhicule – la conduite est souvent faite d'accélérations en raison de l'important trafic...

Un poids plus faible du véhicule induit certes une plus grande autonomie, mais aussi des performances routières sensiblement meilleures. Car un véhicule plus léger accélère plus vite, est plus agile dans les virages et s'arrête plus rapidement lors du freinage. Une construction légère est donc synonyme de davantage d'agilité, de sécurité et de plaisir de conduite. En raison de la masse accélérée plus faible, il a été possible de réduire les structures absorbant l'énergie lors des collisions, ce qui représente une nouvelle économie de poids.

Il convient par conséquent d'emblée de minimiser le plus possible le poids total d'un E-véhicule. On peut penser que les conditions de construction seront difficiles : le système de transmission d'un E-véhicule est nettement plus lourd que celui d'un véhicule à moteur à combustion (réservoir plein compris). La propulsion électrique avec la batterie pèsent environ 100 kg de plus. La différence est essentiellement due au poids de la batterie. Pour compenser cela, BMW Group mise sur une construction légère conséquente et sur l'emploi de matériaux innovants. Selon la demande et la zone d'utilisation du véhicule, les ingénieurs BMW Group utilisent le matériau optimal pour chaque composant. Et ils parviennent effectivement à ce que cette batterie massive finalement « ne pèse pas lourd ».

« Un matériau de construction léger est un élément important de l'électromobilité car il permet de compenser l'inconvénient du poids de l'accumulateur d'énergie ». (Bernhard Dressler)

Purpose Design : le concept « LifeDrive » (véritablement basé sur les objectifs à atteindre).

La construction légère n'est qu'une facette – même si elle est très importante – du travail de développement d'une carrosserie moderne. En électrifiant complètement un véhicule, les ingénieurs BMW Group en profitent pour repenser complètement l'architecture d'une automobile et l'adapter aux exigences et aux réalités de la mobilité de demain. Grâce au concept LifeDrive, ils ont ainsi créé un concept de carrosserie révolutionnaire



résolument axé sur la zone et les objectifs futurs d'utilisation du véhicule et qui offre en même temps un emploi novateur des matériaux.

Comme pour les véhicules avec structure cadre, le concept LifeDrive comprend deux modules indépendants séparés horizontalement. Le module « Drive », le châssis en aluminium, constitue une base solide et intègre la batterie, le moteur ainsi que les fonctions structurelles et anti-collision de base dans une structure. Le module « Life », quant à lui, se compose essentiellement d'un habitacle ultra résistant et très léger en plastique à renfort fibre de carbone (PRFC). Grâce à ce concept innovant, BMW Group donne une dimension totalement nouvelle à la construction légère, à l'architecture automobile et à la sécurité en cas d'accident.

« Le concept LifeDrive réunit l'ensemble des systèmes nécessaires au déplacement ainsi que les données et les exigences de l'électromobilité et les met en œuvre dans une nouvelle approche de BMW Group ». (Uwe Gaedicke)

Le module Drive : la base, le fondement solide.

Le module Drive cumule plusieurs fonctions sur la base d'un support léger et stable en aluminium : il est à la fois la carrosserie de base avec le châssis, l'élément déformable en cas de collision, l'accumulateur d'énergie et l'unité moteur. Avec un poids d'environ 250 kg et des dimensions comparables à celles d'un matelas pour enfants, l'accumulateur d'énergie est l'élément moteur du design fonctionnel et intégratif du module Drive. Par conséquent, la priorité lors de la conception a été d'intégrer la batterie, en tant que principal et plus gros élément constitutif d'un véhicule électrique, dans la structure du véhicule de manière à assurer un fonctionnement sécurisé et une sécurité en cas de collision.

Le module Drive comprend donc trois zones. La partie centrale héberge la batterie et l'entoure d'un profilé d'aluminium solide en guise de protection. Les deux structures actives en cas de collision à l'avant et à l'arrière du véhicule font office de zones déformables lors des chocs frontaux ou arrière. Sur le module Drive, on trouve également les composants de l'unité moteur électrique ainsi que de nombreux composants du châssis. La propulsion électrique étant globalement beaucoup plus compacte que celle d'un véhicule comparable avec moteur à combustion, l'électromoteur, le rapport de démultiplication, l'électronique de puissance et les essieux ont pu être logés dans un espace très réduit grâce à des solutions complexes.



Le module Life : le PRFC connaît une nouvelle dimension.

Le concept LifeDrive est complété du module Life – autrement dit l’habitacle du véhicule – qui repose sur la structure porteuse du module Drive. La grande particularité du module Life, c’est qu’il est essentiellement constitué de plastique à renfort fibre de carbone – ou PRFC. L’emploi de ce matériau high-tech à une telle échelle pour la production en grande série d’un véhicule est inédit – son utilisation en grande dimension étant jusque-là trop coûteuse et le traitement et la fabrication pas encore assez souples. Pourtant après dix ans de recherche intensive et d’optimisation des processus, BMW Group est le seul constructeur automobile à disposer de l’expérience nécessaire pour employer le PRFC dans la production en grande série. Le PRFC possède, contrairement à l’acier, de nombreux avantages parmi lesquels une grande solidité et une extrême légèreté. A résistance au moins égale, il est ainsi environ 50 % plus léger que l’acier. L’aluminium, lui, n’aurait permis une économie de poids « que » de 30 % par rapport à l’acier. Le PRFC est ainsi le matériau le plus léger que l’on puisse utiliser en carrosserie sans aucune perte de sécurité.

L’emploi de ce matériau high-tech pour les grandes dimensions allège considérablement le module Life et accroît l’autonomie du véhicule tout en améliorant les performances routières. La tenue de route en bénéficie aussi largement puisque la grande rigidité du PRFC procure des sensations plus directes au volant. De même les mouvements rapides de la direction sont convertis sans aucune perte. Parallèlement, le PRFC garantit un confort de conduite accru, car la carrosserie rigide amortit très bien l’énergie fournie par la route. Il n’y a donc aucune vibration parasite durant la conduite, pas plus que de cahots ou d’oscillations.

Pourtant, le module Life n’est pas seulement très léger. Il permet en outre de remodeler et de repenser l’habitacle d’un véhicule. L’intégration de tous les composants moteur dans le module Drive rend par exemple superflu le tunnel de transmission. Cet élément qui transmet la force du moteur aux roues arrière était jusque-là indispensable et prenait de la place dans l’habitacle. Le Megacity Vehicle (MCV) offre ainsi, pour un même empattement, nettement plus de place pour ses occupants. Cette nouvelle structure permet par ailleurs



d'intégrer de nouvelles fonctionnalités, de nouveaux degrés de liberté dans l'architecture et donc de pouvoir mieux adapter l'habitacle aux besoins de mobilité en ville.

Le PRFC comme matériau de carrosserie.

Le PRFC présente de nombreux avantages en tant que matériau de construction pour la carrosserie d'un véhicule. C'est d'abord un matériau extrêmement résistant à la corrosion. Il ne rouille pas et a donc une longévité nettement plus importante que le métal. Les mesures de protection contre la corrosion n'ont pas conséquent plus lieu d'être. Par ailleurs il est très stable quelles que soient les conditions climatiques.

Le secret de ce matériau très robuste, c'est la fibre de carbone. Elle est pour ainsi dire indéchirable dans le sens longitudinal. Le PRFC est un matériau composite à base de fibres et de plastique. Il est créé en suturant les fibres pour former une toile non tissée qui est ensuite scellée dans une enveloppe de plastique (matrice de plastique). A l'état sec et exempt de résine, le PRFC peut être travaillé comme un textile, ce qui permet une grande souplesse de modelage. Ce n'est qu'après injection de la résine dans l'intissé et séchage que le matériau acquiert son aspect dur et final et que sa résistance devient au moins aussi importante que celle de l'acier – pour un poids toutefois nettement plus faible.

La grande résistance dans le sens des fibres permet du reste une conception ciblée des pièces de PRFC : plus résistantes aux endroits de forte sollicitation. On oriente donc les fibres à l'intérieur de la pièce en fonction des sollicitations. En superposant les fibres dans des sens différents, on crée alors une pièce résistante en tous points. Les composants peuvent ainsi être conçus de façon beaucoup plus efficiente et efficace qu'avec n'importe quel autre matériau dont le niveau de solidité est uniforme dans tous les sens, le métal par exemple. On réalise ainsi de nouvelles économies de matériau et de poids. Cela génère de nouveaux potentiels d'économie de poids : la masse accélérée étant plus faible en cas de collision, il est en effet possible de réduire les structures absorbant l'énergie ce qui représente une nouvelle économie de poids.

« Le PRFC permet de construire une carrosserie très légère sans concession en matière de confort et de sécurité ». (Bernhard Dressler)



Construction légère et sécurité : avec le PRFC, l'un ne va pas sans l'autre.

La construction légère joue certes un rôle important dans l'élaboration du concept LifeDrive, mais aussi la sécurité des passagers. Les exigences actuelles en matière de carrosserie sont très élevées et de nombreux scénarios de collision doivent être pris en compte. D'ordinaire cela crée pas mal de difficultés aux ingénieurs qui utilisent de nouveaux matériaux. Pourtant dans ce cas précis, la combinaison de l'aluminium dans le module Drive et du PRFC de l'habitacle dans le module Life a dépassé toutes les attentes dès les premiers essais et montre clairement que construction légère et sécurité ne sont pas antinomiques.

« Construction légère ne signifie pas pour autant « moins de sécurité », bien au contraire. Le concept LifeDRive s'est même parfois montré supérieur aux conceptions conventionnelles dans les crashtests ». (Nils Borchers)

Sa capacité à absorber une quantité énorme d'énergie rend le PRFC très peu sensible aux dommages. Même à des vitesses de collision importantes, il se déforme à peine. Ce matériau extrêmement rigide garantit donc, tout comme pour le cockpit d'une Formule 1, constitue un espace extrêmement solide. En cas de choc frontal ou arrière, la carrosserie reste intacte et les portes s'ouvrent sans problème après l'accident.

Parfaitement protégé en cas de collision latérale.

La capacité d'absorption de l'énergie du PRFC est exceptionnelle. La sécurité impressionnante de ce matériau s'est vérifiée dans des scénarios de chocs frontaux ou latéraux. Le matériau est à peine cabossé malgré des forces engagées importantes et agissant en partie de façon ponctuelle. Les passagers sont donc protégés au mieux. Le PRFC est donc destiné à être utilisé dans les parois latérales du véhicule, là où chaque centimètre d'habitacle intact est capital.

« Pour casser le PRFC, il faut des forces très élevées ou des accélérations très importantes. Nettement plus que ce que l'on pourrait croire au premier coup d'œil ». (Bernhard Dressler)

Pour autant le PRFC ne peut être indéfiniment sollicité. Si les forces impliquées dépassent les limites de tolérance du matériau, la toile



composite de fibres se défait de façon contrôlée en ses différents composants.

Le meilleur des deux univers : la combinaison de l'aluminium et du PRFC.

Le nouveau module Drive a lui aussi été conçu pour satisfaire aux exigences élevées en matière de sécurité en cas d'accident. Des structures actives en cas de collision réalisées en aluminium pour l'avant et l'arrière du véhicule apportent une sécurité supplémentaire. Elles absorbent une bonne partie de l'énergie libérée dans un choc frontal ou arrière. Pour protéger au mieux la batterie, elle a été logée dans le dessous de caisse. D'un point de vue statistique, le dessous de caisse est l'endroit du véhicule qui se déforme le moins dans les collisions et où l'énergie déployée par le choc est la moins importante. En positionnant la batterie dans le dessous de caisse, les ingénieurs BMW Group obtiennent un centre de gravité bas optimal qui rend le véhicule très agile et à l'abri des tonneaux.

En cas de choc latéral, la batterie bénéficie par ailleurs des caractéristiques antichocs du module Life puisque toute l'énergie y est déjà absorbée et n'atteint pas l'accumulateur d'énergie. Grâce à l'emploi d'un mélange d'aluminium dans le module Drive et de PRFC dans le module Life, la batterie est protégée du mieux possible, même au niveau de la barre de seuil.

« Le module Drive est l'écrin le plus sûr que la batterie puisse avoir ». (Hans-Jürgen Branz)

L'extrême résistance de l'habitacle en PRFC et la répartition intelligente des forces dans le module LifeDrive créent les conditions d'une protection optimale pour les passagers du véhicule. Cette combinaison de matériaux dans le module Life est donc plus sûre qu'une carrosserie autoportante en acier. Les essais montrent tout le potentiel du PRFC et de son association avec d'autres matériaux. Dans cette phase encore relativement précoce, il est en effet déjà plus performant que d'autres matériaux à un stade de développement nettement plus avancé.

Les avantages LifeDrive.

Grâce au Purpose Design, le concept LifeDrive intègre toutes les particularités de l'E-mobilité comme la batterie volumineuse et les éléments compacts de la transmission dans une structure anti-collision.



Les avantages du concept LifeDrive ne se résument toutefois pas uniquement à une économie de poids, à une plus grande autonomie, à de meilleures performances routières et à une sécurité accrue. Lorsque, au-delà du produit, on s'intéresse aux processus de production, on s'aperçoit alors de tout ce que recouvre le concept LifeDrive. Son principe permet en effet de satisfaire aux exigences d'un produit durable au sein d'une chaîne de production elle aussi durable.

La construction séparée châssis-carrosserie peut être réalisée jusque dans la production d'un nombre moyen de pièces et offre, grâce à des processus parallèles, une grande souplesse. Grâce à la nouvelle architecture du véhicule, des processus de production totalement nouveaux, à la fois plus simples et moins gourmands en énergie, sont possibles. La séparation horizontale des modules autorise ainsi une fabrication distincte des deux éléments. Ces derniers peuvent être réunis ensuite dans un processus de montage simple pratiquement n'importe où dans le monde.

« Les travaux de développement de ces dernières années m'ont clairement montré que le concept LifeDrive est pour l'instant LA solution pour répondre à toutes les exigences de l'électromobilité tout en exploitant du mieux possible ses potentiels ». (Uwe Gaedicke)



5. Le PRFC – un matériau d’avenir.

Le plastique à renfort fibre de carbone (PRFC) est depuis longtemps un matériau incontournable dans l’industrie aérospatiale ou le sport automobile. Les constructeurs recourent de plus en plus au PRFC et à ses avantages, notamment quand ils ont des impératifs de rigidité et de résistance importante du matériau pour un poids somme toute limité. Les experts du centre de technologie et d’innovation de Landsut (LITZ) travaillent donc intensément depuis dix ans sur ce matériau high-tech. Grâce à ce long travail de développement et à son transfert en production de série, BMW Group a acquis un savoir-faire unique dans le monde de l’automobile sur les procédés, les outils et la mise en œuvre du PRFC ainsi qu’un haut niveau d’industrialisation pour sa production. Pourtant qu’est-ce qui rend ce matériau si particulier ?

Incroyablement léger et aussi solide que l’acier.

Le plastique à renfort fibre de carbone (PRFC) est un matériau composite qui se compose d’une fibre de carbone scellée dans une matrice de plastique (résine). Il est difficile de comparer le PRFC à d’autres matériaux. Il présente de nombreux avantages exceptionnels. Le PRFC est avant tout extrêmement rigide et solide – pour un poids extraordinairement faible. A fonction au moins égale, le PRFC est 50 % plus léger que l’acier et 30 % moins lourd que l’aluminium. Par ailleurs, il ne craint pas la corrosion, les acides ni les solvants organiques, ce qui en fait un matériau à la longévité nettement plus importante que le métal. Enfin, quelles que soient les conditions climatiques le PRFC ne se détériore pas et il se déforme peu lorsqu’il est soumis à de fortes variations de température.

Une construction légère sans concession en matière de sécurité.

La grande solidité du matériau s’accompagne de propriétés d’amortissement remarquables ainsi que d’une excellente résilience. Le PRFC possède une impressionnante faculté d’absorption de l’énergie, ce qui le rend très peu sensible aux dommages. Les éléments de carrosserie en PRFC sont donc non seulement très légers, mais ils possèdent en outre une tenue exemplaire en cas de collision. Le PRFC est ainsi le matériau le plus léger



que l'on puisse utiliser en carrosserie sans aucune perte en matière de sécurité. Pour autant le PRFC ne peut être indéfiniment sollicité. Si les forces impliquées dépassent les limites de tolérance du matériau, l'élément composite se dissocie en ses différents composants de façon contrôlée.

« Pour détruire le PRFC, il faut des forces considérables ou des accélérations très importantes. Nettement plus que ce que l'on pourrait croire au premier coup d'œil ». (Bernhard Dressler)

Des pièces d'une résistance sur mesure.

Le secret de ce matériau très robuste, c'est la fibre de carbone.

Contrairement aux métaux quasiment isotropes, comme l'aluminium ou l'acier, que l'on peut solliciter pareillement en tous points, la fibre de carbone est anisotrope. Telle une barre, elle est extrêmement résistante, à la traction et à la pression, surtout dans le sens longitudinal. C'est son gros avantage ! Car comme dans une pièce les forces ne s'exercent jamais simultanément en tous les points et dans tous les sens, cette propriété singulière permet un façonnage sur mesure des pièces en fonction de leurs sollicitations. A l'instar de la nature qui fixe le matériau dans les os ou les plantes uniquement là où cela est nécessaire, les experts BMW Group fabriquent des pièces en PRFC avec l'orientation et la résistance adéquates. Pour cela, ils placent les fibres en quantité suffisante le long de l'(des)axe(s) de sollicitation de la pièce. La pièce est ainsi conçue d'après des données connues et, en même temps, elle est très légère.

« Le PRFC permet un usage efficace du matériau avec une fonction et une stabilité optimales et un poids minime ». (auteur de la citation ?) (Bernhard Dressler)

L'emploi de PRFC est plus qu'une simple substitution de matériau, comme ce fut le cas par exemple pour l'acier et l'aluminium. Grâce à ses propriétés particulières, ce matériau high-tech permet une approche totalement nouvelle et donc aussi des concepts de construction novateurs. Pour l'électromobilité, le PRFC offre ainsi un potentiel énorme en tant que matériau de carrosserie puisque sa légèreté induit un rapport puissance-poids plus élevé et donc une autonomie plus grande. L'utilisation réfléchie du plastique à renfort fibre de



carbone améliore considérablement bon nombre de produits de construction légère – dans la mesure où l'on maîtrise réellement le matériau.

« C'est la bonne utilisation du PRFC qui assure une construction légère »,
(Jochen Töpker)

La compétence technologique de BMW Group.

Ce n'est pas sans raison si le PRFC était utilisé jusque-là uniquement à petite échelle ou sur des prototypes. Les pièces fabriquées dans ce matériau relativement jeune nécessitaient à l'époque un travail essentiellement manuel et donc extrêmement long. Le coût élevé ainsi engendré ainsi que la durée des cycles de production et de finition interdisaient alors toute production en grande série. Depuis 2003 pourtant, BMW Group produit des pièces en PRFC de façon industrielle avec un nombre d'unités en progression continue. Depuis lors, les toits des modèles BMW M3 et M6 ainsi que les supports des pare-chocs de la M6 sont aussi fabriqués industriellement dans l'usine de Landshut.

Grâce au développement important des procédés et du matériau, BMW Group a acquis au cours des dix dernières années une grande compétence dans les processus de fabrication spécifiques au PRFC, dans la bonne utilisation des outils et dans l'optimisation de la durée des cycles. Les spécialistes PRFC de BMW Group sont ainsi parvenus à développer et automatiser le processus de fabrication des pièces en PRFC dans l'usine de Landshut au point de permettre désormais une production en grande série à la fois économique et de très bonne qualité des composants de carrosserie à base de matériaux renforcés de fibre de carbone. Les spécialistes des procédés du centre de technologie et d'innovation de Landshut (LITZ) ont ainsi permis l'emploi plus fréquent de PRFC en carrosserie automobile. BMW Group effectue ici un important travail de précurseur pour pouvoir à l'avenir exploiter davantage encore le potentiel de ce matériau.

Une production ultra moderne chez BMW Group.

Le mode de production actuel encore très utilisé, dans lequel des produits semi-finis à base de fibres préalablement imprégnés de résine (appelés « prepregs ») sont ajoutés lors de la mise en œuvre puis terminés dans l'autoclave (un four énorme), est irréalisable pour la production de véhicules en grande série. C'est pourquoi BMW Group a entamé dès



2003 des recherches pour mettre au point une nouvelle génération de pièces en PRFC produites en série d'un excellent niveau de finition. Ultramoderne et avec des cycles très courts. La production de pièces en PRFC n'est aucunement la « chasse gardée » de l'usine de Landshut. Elle est, sous certaines conditions, transposable en théorie sur tous les sites BMW. Mais comment crée-t-on chez BMW Group une pièce en PRFC ?

De la fibre à la toile non tissée.

Le point de départ de la production de PRFC, c'est ce qu'on appelle le précurseur. Cette fibre textile thermoplastique en polyacrylonitrile constitue la base du processus de production. Au cours d'un processus complexe en plusieurs étapes, les éléments des fibres sont soumis à différentes températures et différentes pressions pour être dissociés sous forme de gaz jusqu'à obtention d'une fibre quasiment faite exclusivement de carbone pur et dont la structure du graphite est stable. La fibre de carbone ainsi créée a une épaisseur de seulement sept microns (soit 0,007 millimètres). Pour comparaison, un cheveu humain mesure environ 50 microns. Pas moins de 50 000 de ces filaments sont rassemblés en « rovings » (stratifili) ou « heavy tows » pour pouvoir être exploités ensuite dans l'industrie automobile. Outre leur emploi dans la construction automobile, ces assemblages de fibres sont utilisés aussi pour les pales d'éoliennes par exemple.

Dans la phase suivante du processus, les faisceaux de fibres sont mis en œuvre sous forme de toile non tissée. Contrairement à un tissu, les fibres lors de la fabrication de la toile ne sont ni croisées, ni tissées mais rangées à plat les unes contre les autres. Le tissage aurait l'inconvénient de tordre les fibres et ainsi de leur faire perdre une partie de leurs propriétés remarquables. Seule l'orientation des fibres en toile non tissée permet de conserver à la pièce les propriétés intéressantes du PRFC.

Préformage et assemblage – une mise en forme optimale.

La toile réalisée sur mesure et encore plane obtient sa forme future au cours d'un processus dit de « préformage ». C'est un champ de chauffe qui confère au paquet multicouches une forme tridimensionnelle stable. La forme future de la pièce est alors d'ores et déjà clairement reconnaissable. Plusieurs de ces paquets multicouches préformés (ébauches préformées) pourront être assemblés ensuite pour constituer une pièce plus grosse. Cela permet de réaliser en PRFC des pièces de carrosserie de grande dimension très



intégrées normalement réalisées en aluminium ou en tôle d'acier lors d'un processus complexe. Les avantages pour la conception et la fabrication de la carrosserie sont considérables : diverses fonctions, comme les éléments de fixation, peuvent être directement intégrées à la pièce. Même des pièces de structure complexe, par exemple un groupe de pièces de carrosserie aux parois d'épaisseurs différentes, peuvent être fabriquées dans un seul moule.

Dans chacune des deux étapes du processus – le préformage et l'assemblage – le défi majeur consiste à rendre un textile suffisamment souple pour lui donner la forme stable de l'ébauche préformée et pour que les ébauches puissent être ensuite liées avec précision lors de l'assemblage. En la matière également BMW Group a acquis au fil des années une expertise précieuse.

Des résines sous haute pression grâce au Resin Transfer Moulding (RTM).

Les ébauches préformées assemblées passent ensuite à l'étape suivante du processus : l'injection de résine. Pour que les éléments préformés gardent durablement leur forme, on a alors besoin du second matériau important pour le composite : la résine. Lors du processus RTM (Resin Transfer Moulding), la résine est injectée sous haute pression dans les ébauches préformées. C'est l'association des fibres avec la résine et le durcissement consécutif qui confèrent au matériau sa robustesse et donc ses propriétés exceptionnelles.

L'imprégnation des fibres par la résine est un processus très complexe soumis à des exigences contraaires. Ainsi, la résine doit d'une part pénétrer très rapidement dans l'ensemble du matériau et atteindre toutes les fibres jusqu'au niveau microscopique. Pour cela, la résine doit avoir une viscosité la plus faible possible. Autrement dit, elle doit être suffisamment fluide pour pouvoir se répartir rapidement sur l'ensemble de la toile. Et d'autre part, elle doit durcir le plus rapidement possible dès que le matériau en est entièrement imprégné. Un agent de démoulage doit en outre garantir un détachement sans dommage des pièces résinifiées de leur sans les abîmer et sans altérer la combinaison fibres-résine. A la fois résoudre et réaliser ces contradictions est très compliqué. BMW Group a mis au point ses propres concepts en matière de procédés, d'outils et d'installations. Ils sont conçus pour régler ce conflit d'objectifs et permettre une productivité importante tout en garantissant une qualité très élevée.



L'imprégnation de la toile par la résine est un processus combinant une dizaine de substances et matériaux ne devant en aucun cas réagir les uns avec les autres. Ce composite à base de toile de fibres, de résine, de durcisseur, de liant, de fil à coudre, d'agent de démoulage et d'autres matériaux doit par ailleurs pouvoir être réalisé aussi bien en grande dimension qu'au niveau microscopique. C'est là la plus grande difficulté du travail du composite de fibres, car la qualité du matériau tient à la liaison entre la résine et les fibres.

Le travail de finition : la découpe au jet d'eau.

Une fois l'injection de résine et le durcissement achevés, la pièce est presque terminée. Il ne reste plus que les travaux de finition : une découpe propre du contour de la pièce et la réalisation des ouvertures manquantes. Ce travail final, BMW Group le réalise sur une machine de découpe au jet d'eau. Comme la pièce en PRFC a déjà toute sa stabilité et sa robustesse après l'imprégnation de résine, les têtes de fraisage conventionnelles ont rapidement montré leurs limites pour les travaux de finition et ont dû être remplacées souvent en raison d'une usure importante. La découpe au jet d'eau en revanche permet une découpe et un perçage sans usure. Elle doit être cependant adaptée au travail du PRFC. BMW Group a donc encore optimisé son procédé en conséquence.

« Grâce à notre processus de production élaboré, nous sommes en mesure de créer une pièce qui corresponde exactement à ce que souhaite le constructeur et à ce dont il a besoin ». (Andreas Reinhardt)

Le recyclage : réutilisation des déchets de coupe.

BMW Group réfléchit au-delà du cycle du produit et a élaboré et évalué au fil de ses travaux de développement divers concepts en matière de recyclage et de valorisation. Jusque-là les résidus de ce matériau haut de gamme ne pouvaient être exploités de manière optimale. Mais BMW Group a mis au point un concept de recyclage unique au monde pour les déchets de production purs au point de les rendre exploitables pour la production de série. Une part considérable des fibres peut ainsi être réutilisée. Grâce à un procédé de préparation spécial, on obtient de nouveau un textile qui peut remplacer les fibres primaires. La réutilisation présente un double avantage, car la réduction des déchets entraîne une moindre pollution de l'environnement et moins de besoins de produire du matériau.



« Nous nous sommes fixés pour objectif de réutiliser au mieux dans nos propres produits les déchets de coupe des processus de production ».

(Andreas Reinhardt)

Le souci écologique dans le domaine du PRFC ne s'exprime pas chez BMW Group uniquement dans le recyclage. Dès la production des fibres de carbone, BMW Group veille, dans le cadre de son joint venture avec SGL ACF (Automotive Carbon Fibers), à ce que l'énergie nécessaire à sa nouvelle usine de Moses Lake (USA) provienne exclusivement de ressources renouvelables. Cette usine servira également de référence en matière d'efficacité énergétique.

Une approche globale pour un résultat optimal.

Les processus, matériaux, installations et outils ont été tellement peaufinés par les ingénieurs et les experts en PRFC au cours de ces dix dernières années qu'il est désormais possible de produire en grande série des pièces en PRFC. Les spécialistes du PRFC ont toujours eu en ligne de mire l'ensemble de la chaîne de production et de création de valeur. De la production des fibres au recyclage, BMW Group a toujours eu une influence particulière sur la totalité des processus. Car c'est la seule manière d'être certain que les avancées ponctuelles se répercutent positivement sur l'ensemble du processus.

Une orientation d'emblée vers la production de série.

L'augmentation continue du nombre de pièces produites et le développement de procédés innovants a permis à BMW Group de se constituer une expérience considérable sous la forme de collaborateurs, d'outils et de maîtrise des processus. Ce haut degré d'expertise n'a cependant été possible que parce que la volonté d'exploiter le PRFC en production industrielle de grande série a été affichée dès le début. Car pour BMW Group n'entend pas confiner dans des utilisations marginales le PRFC qui est aussi la technologie de l'avenir dans la construction automobile. C'est pourquoi on a beaucoup investi d'emblée dans les prestations internes, qualifié les collaborateurs et développé résolument les processus. Du fait de son autonomie et de la part importante des prestations effectuées en interne



tout au long du processus de production, BMW Group est de plus très peu dépendant de facteurs externes. Le caractère abouti du processus de production se reflète avant tout dans la qualité élevée des pièces produites.

« Le fondement de l'industrialisation du PRFC n'est pas d'en vérifier durablement la qualité, mais de la produire ». (Jochen Töpker)

Pour de plus amples informations, veuillez vous adresser à :

Tobias Hahn, Technologiekommunikation
Téléphone : +49-89-382-60816, Fax : +49-89-382-28567

Internet : www.press.bmwgroup.com
Courriel : presse@bmw.de

