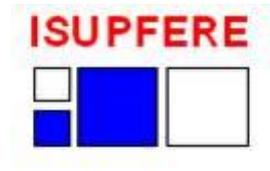


Nom:

Prénom:



SYNTHESE DE TEXTES

(45 min)

En vous basant uniquement sur la lecture des articles suivants, répondez aux questions:

1. Quels sont les deux principaux enjeux du développement de l'électro- mobilité ?

2. Quelle est la stratégie de Tesla pour répondre à ces enjeux?

3. En quoi Tesla déjoue les pronostics des grands constructeurs?

4. Quels sont les risques associés au nouveau projet d'usine ?

Tesla. Son nouveau pari : une usine géante de fabrication de batteries

Réfléchissant sur l'avenir des voitures tout électrique (V.E), il y a quelques années les grands producteurs, à l'écoute de leurs experts avaient conclu que :

- Il est pratiquement impossible pour une nouvelle compagnie de pénétrer seule dans le marché de l'automobile.
- Pour les véhicules électriques (V.E.) l'autonomie utile doit être limitée à 150-200 km.
- Les V.E. doivent être conçus comme des véhicules urbains.
- Les V.E. seront difficiles à vendre et les clients seront peu enclins à payer une prime.
- Il y aura une perte financière importante, au début, pour créer ce marché.

Comme ce fut souvent le cas ces dernières années, l'esprit d'innovation et d'entreprise de la «Silicon Valley» a bouleversé en quelques années ces croyances bien établies

L'idée Tesla conçue et animée par un ancien ingénieur de Stanford, J.B. Straubal et le tempérament audacieux de Elon Musk, connu pour ses réussites financières récentes, a en quelques années changé la donne. Tesla produit un V.E. haut de gamme (en concurrence avec les berlines Mercedes et BMW) avec une autonomie double des recommandations de l'industrie. La demande présente dépasse l'offre et le tout est réalisé avec une nouvelle société dont la valeur financière connaît le succès auprès de la bourse.

Il semble toutefois que récemment Nissan avec la « leaf », qui répond aux critères de l'industrie, bénéficie de l'effet Tesla et voit enfin ses ventes augmenter. Nissan avait d'ailleurs précédé Tesla en construisant à Smyrna (Tennessee) une nouvelle usine de batteries à côté de son usine de voitures. Carlos Ghosn avait justifié ce choix par l'absence de bonnes batteries sur le marché.

En 2008, le président Obama annonçait un programme de 2,4 G US \$ pour développer la production de batteries aux USA.

L'idée était bonne mais l'exécution fut médiocre et on attend encore un résultat.

Actuellement les batteries sont fournies par Panasonic à partir du Japon

L'usine japonaise, fournisseur actuel de Tesla a une capacité de 3 GWh par an.

Elle fabrique des batteries «lithium-Ion».

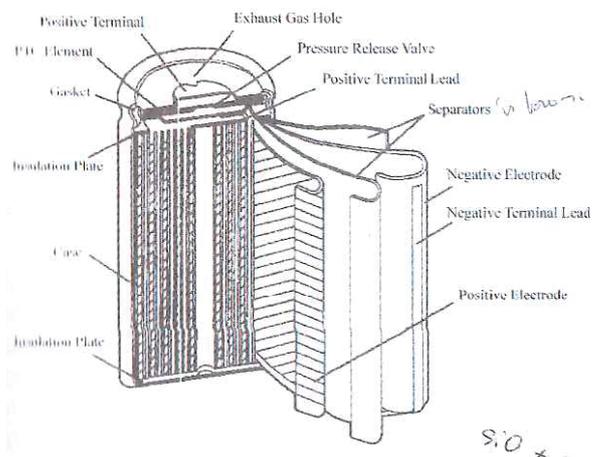
Le lithium, troisième élément du tableau de Mendeleev, est le plus léger des métaux. Il est connu entre autre des producteurs d'aluminium pour la production d'alliages. Le lithium est très réactif et il brûle dans l'air d'où l'obligation de ne l'utiliser que dans des composés chimiques. Le lithium peut perdre facilement un électron sur les trois de l'atome et créer un ion. Les piles Li-ion sont actuellement les plus performantes. Elles consistent en une électrode positive avec un lithium métal oxyde, une électrode négative en carbone (six atomes de C peuvent fixer un lithium), un électrolyte et un séparateur qui est un polymère microporeux ne laissant passer que les ions. Les ions passent d'une électrode à l'autre suivant le cycle de charge ou de décharge.

La pile Panasonic 18650 (ou 20700)

Le passage d'un concept de laboratoire à un produit industriel est long et difficile surtout pour la fabrication de batteries utilisable pour les V.E. Doit-on utiliser des grands formats ou des petites unités qui peuvent prendre la forme de cylindres, de poches ou de prismes ?

Panasonic a depuis longtemps opté pour la pile cylindrique, modèle 18650. Cette pile de 45 gr produit actuellement une énergie spécifique supérieure de 50% par unité de poids aux autres produits. Son coût, ses performances, sa durée dans le temps et sa sécurité d'emploi sont remarquables.

Ci-dessous, une vue éclatée de la pile 18650 dont la fabrica-



Dossier PILES ET BATTERIES

tion au Japon est très automatisée et adaptable au progrès dans la fabrication des électrodes et autres séparateurs

La batterie Tesla pèse environ 450Kg dans sa version normale, elle peut emmagasiner de 60 kWh à 85 kWh suivant les versions. Elle peut fournir jusqu'à 215 kW.

La batterie 85 kWh est composée de 7104 piles du modèle 18650. Il y a 16 modules câblés en série. Chaque module est constitué de six groupes de 74 piles 18 650 en parallèle. Les six groupes sont câblés en série. Le paquet est situé sous la planche de la cabine pour abaisser le centre de gravité du véhicule. Une plaque de 6mm en alliage d'aluminium protège la batterie pour éviter un incident provenant de débris de la route ou autre choc.

Le coût de la batterie (85 kWh) pour un modèle S est de l'ordre de 21.250 US \$ hors coût du BMS. Les chiffres de 30% qui circulent dans la presse pour un modèle S vendu 70,000 US\$ semblent proches de la présente estimation. Tesla propose plusieurs types de batteries, soit actuellement 60 kWh ou 85 kWh, mais les modèles futurs comme le modèle X ou le 3 auront d'autres types de batteries notamment pour le modèle 3 qui sera un plus petit véhicule avec un prix de vente de 30 000 à 40 000 \$.



Tesla 85 kWh battery	Rated*	Actual**
Cell Capacity, Ah	3.25	3.1
<i>Available with Ripon Purchase</i>		
Total # of cells in series in pack	96	96
# of modules per pack	16	16
# of cells in series per module	6	6
# of cells in parallel in module/pack	74	74
Total # of cells in module	444	444
Total # of cells	7104	7104
Battery Capacity, kWh	85	80
* Charged to 4.35 V per cell		
** Charged to 4.2V per cell		

Tesla 85 kWh Battery Breakdown

Contrôle des batteries pour un V.E. : Batteries Management System (BMS)

Un système de batteries est dynamique et change avec l'âge, les conditions de charge et décharges, l'environnement (température), etc. Un système sophistiqué de contrôle doit être mis en place pour assurer le bon fonctionnement du véhicule dans le temps.

Pour le conducteur, les garanties de conduite (accélération, vitesse), les informations sur l'état de charge des batteries, doivent être disponibles en temps réel.

Pour le constructeur qui a vendu le véhicule avec une garantie de huit ans ou 100 000 Miles, il est nécessaire de s'assurer que la charge des batteries et leur décharge se fassent suivant les critères retenus.

La plage de fonctionnement d'une batterie est déterminée par le SOC (State of Charge) définie comme le pourcentage maximum de charge. Une batterie avec une pleine charge a un SOC de 100%. Le DOD (Depth of Discharge) est aussi utili-

sé et égal à 1-SOC.

La puissance et l'énergie d'une batterie diminuent avec les cycles et le temps. La perte de puissance est due à une augmentation de la résistance interne. La perte de capacité provient d'une dégradation des électrodes et de l'électrolyte. Les performances dépendent aussi de la température mais les batteries li-ion ont une plage de fonctionnement entre -20°C et +40°C. Le chargement des batteries doit suivre un protocole car le chargeur peut contrôler soit l'intensité soit le voltage. En général une phase à courant constant sera suivie d'une phase à voltage constant.

Le système de contrôle (BMS) doit essentiellement contrôler la charge et la décharge de la batterie qui peuvent être limitées respectivement à 80% et 40% pour augmenter la durée de vie. Lorsque la batterie perd de la capacité avec l'âge, le BMS augmente la charge pour maintenir l'autonomie du véhicule. Le BMS fournit au conducteur les informations sur l'autonomie restante. Le BMS contrôle aussi l'opération de charge du véhicule. Le BMS est un outil indispensable au bon fonctionnement de tout véhicule électrique.

La concurrence japonaise et coréenne des batteries

En 2013, la capacité mondiale de batteries li-ion est voisine de 33 GWh/an. Cette capacité augmente régulièrement mais elle est concentrée en Asie. Samsung et LG Chem en Corée, Panasonic au Japon sont les principaux producteurs. Ces usines ne sont pas entièrement intégrées et il existe une «Supply Chain». Sumitomo Mining est un important sous-traitant. On distingue, par exemple, quatre types de batteries chez Panasonic pour le modèle 18650 suivant le type d'électrodes avec une masse d'énergie allant de 620 Wh/L à 800 Wh/L (Watt*heure par litre). Plusieurs chaînes de fabrication en parallèles sont utilisées.



Tesla le futur concurrent

L'entrepreneur Musk (Tesla) va-t-il réussir son nouveau pari en investissant 5 G US\$ dans une «megafactory» dont la capacité doit pouvoir alimenter en 2020 le marché mondial des batteries (pour le moment dominé par le Japon et la Corée) ?

Une usine de batteries totalement intégrée, qui n'existe pas encore ailleurs, est complexe. Le succès se mesurera sur l'obtention d'un produit fiable, avec une longue durée de vie, une haute énergie par unité de poids et de volume et le tout avec un coût compétitif.

Ce projet de 5 G US \$ abritera donc au Nevada, sous un

même toit la préparation des matières premières, la fabrication des électrodes et de l'électrolyte, l'assemblage des paquets de batteries, les contrôles qualité pour la livraison d'un produit fini à l'usine automobile située à proximité et prévue pour 500 000 unités par an.

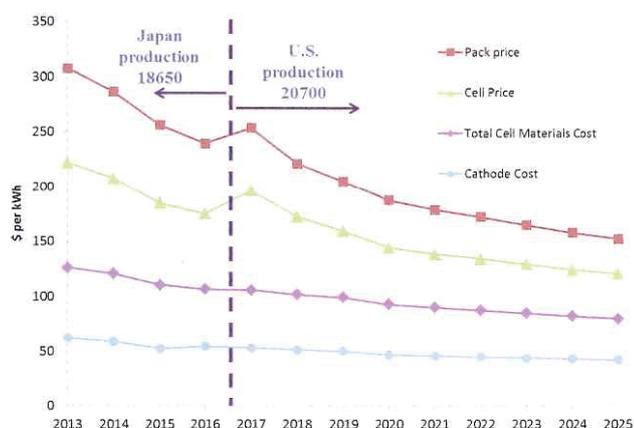
Sa capacité en 2020 sera de 35 GWh, soit dix fois plus que la plus grande des usines existantes en 2014. Aucune innovation technique n'a été annoncée et l'on peut assumer que le principe de fabrication de Panasonic sera adopté en ajoutant la préparation des sous-ensembles.

Le pari est audacieux

Le projet sera financé par les actionnaires, Tesla pour 2.5 G US\$ et Panasonic pour 1 G US \$. D'autres actionnaires doivent se joindre au projet, fascinés qu'ils sont par les résultats obtenus par Tesla dans la «Silicon Valley» avec Space X et surtout le succès du modèle S.

L'usine couvrira 46 ha et nécessitera 9,8 millions d'heures de travail en cinq phases et fournira plus de 5 000 emplois lorsqu'elle sera en exploitation. Le maître d'œuvre sera la compagnie Yates Construction. Les travaux ont commencé sur le site industriel de Tahoe-Reno avec un soin particulier pour rendre l'usine indépendante énergétiquement et respectant les normes du développement durable (recyclage des batteries notamment).

La réduction de coût en US \$ par kWh sera l'une des grandes préoccupations comme le montre le graphique suivant :



Mais les risques ne sont pas absents

La montée en production d'une telle usine va créer certainement des changements dans la « supply chain » qu'il est difficile de prévoir.

Embaucher et former du personnel au Nevada ne va pas être facile mais on peut répondre que l'usine actuelle de Tesla en Californie est aussi partie de zéro. Le problème du contrôle de qualité paraît immense ; comment se mettre à l'abri d'un défaut sur les matières premières ou un mauvais fonctionnement sur l'une des nombreuses lignes de fabrication. Cela sera certainement pensé mais peut-on penser à tout ?

Le futur proche

Les performances de ces piles peuvent être améliorées en augmentant le pourcentage de lithium dans le cristal de

Le déploiement de superchargeurs s'accélère en Europe

Tesla, le constructeur des véhicules électriques, chouchoute également ses clients européens. La marque vient ainsi d'annoncer l'ouverture de deux nouvelles stations Superchargeurs, ses bornes de recharge rapide (50% de charge en 20 minutes) utilisables gratuitement par ses clients, à Houdemont près de Nancy et à Castelnau-d'Estrétefonds près de Toulouse. «Ces deux Superchargeurs viennent s'ajouter au réseau déjà existant de 116 stations en Europe, dont 16 en France», indique Tesla dans un communiqué. Avec le doublement en moins de trois mois de son réseau de chargeurs rapides en Europe, la marque indique qu'il est désormais possible de rejoindre la Côte d'Azur depuis la Scandinavie.

«Usine Nouvelle», 5 janvier 2015

l'oxyde métallique et en améliorant la densité de carbone à la cathode. Des progrès sont enregistrés chaque année avec l'augmentation du pourcentage de lithium et les performances s'améliorent de 5% chaque année (une future loi de Moore ?!).

Les chercheurs de l'université de Stanford, dont les anciens élèves ont fortement contribué au développement de Tesla, m'ont confirmé que les piles actuelles appartiennent à la première génération. La seconde génération utilisera le silicium pour remplacer le graphite. Mais les grains de silicium ont le défaut d'éclater lors des différents cycles d'où l'emploi prévu des nanotechnologies pour l'instant très chères, (100 fois plus que pour le silicium normal). De nombreuses voies sont à l'étude avec des résultats encourageants. La troisième génération utilisera probablement une anode en lithium. Il est important de penser à l'avenir lors de la construction d'une très large usine pour pouvoir adapter les chaînes de fabrication aux nouvelles technologies.

Conclusion

L'avenir de la voiture tout électrique semble maintenant assuré.

Il sera d'autant plus grand que les recherches progresseront sur les piles électriques, leur principe et leurs composants. Restera toutefois l'inconnu des stations de recharge qui peut ralentir la croissance ou l'accélérer.

À l'horizon 2016, les experts prévoient que le marché sera dominé par Tesla (80 000 unités par an) et Nissan avec une production équivalente. Les autres producteurs seront individuellement limités à des ventes inférieures à 30 000 unités. L'impact de la nouvelle usine de Tesla ne se fera sentir qu'après 2020 lorsque le prix de l'essence sera certainement revenu à un niveau normal. ■

La mobilité électrique : le déploiement d'un système au XXI^e siècle¹

Après un siècle d'essais, le véhicule électrique va-t-il enfin décoller ? Le succès de la mobilité électrique est souvent associé à des progrès techniques comme celui des batteries. Dans ma thèse de doctorat, j'ai montré qu'au-delà du produit automobile, la réponse à cette question dépend de la capacité de l'entreprise à déployer un système d'électromobilité. Il s'agit d'une question qui concernera un nombre croissant de domaines, de la mobilité aux nouvelles technologies, car elle combine deux caractéristiques clés.

D'une part, ce système s'organise autour d'une plateforme véhicule électrique : plateforme, car le véhicule électrique crée une base sur laquelle peuvent s'appuyer des partenaires situés en dehors de la chaîne de valeur automobile traditionnelle, comme des opérateurs de parkings ou des installateurs des bornes. Pour percer et se faire une place à côté de la voiture traditionnelle, la plateforme véhicule électrique doit être accompagnée d'un système d'électromobilité, des infrastructures et des services nécessaires à une mobilité pratique et économique.

D'autre part, il s'agit d'une innovation disruptive, qui définit pour les clients potentiels de nouveaux usages et critères de valeur par rapport au véhicule thermique. Il y a dix ans, comment aurait-on pu imaginer à quel point un accès nomade à Internet changerait nos habitudes ? Comme pour les smartphones, la valeur de la mobilité électrique se découvre à l'usage, que ce soit l'absence de bruit ou le temps gagné à ne plus passer à une pompe à essence. Le déploiement de cette plateforme disruptive implique alors un apprentissage collectif qu'il s'agit de stimuler : l'entreprise, les partenaires et les clients doivent s'approprier et co-construire leur système d'électromobilité.

Le déploiement du véhicule électrique pose alors une question caractéristique des marchés multi-face : comment déployer le système d'électromobilité et favoriser simultanément l'adoption du côté des clients ? Pour concevoir et déployer un système performant, il faut comprendre les usages des clients dans ce nouveau système. Or, ces usages

ne se révèlent que dans un système suffisamment déployé et évoluent avec le déploiement. Réciproquement, les clients n'adoptent la plateforme disruptive que lorsqu'elle s'insère dans un système qui fournit dans l'ensemble un usage plus pratique que les solutions existantes. Les constructeurs et les autres acteurs du système doivent ainsi trouver un chemin adapté pour créer des masses critiques, soit locales, soit dans des niches, qui permettent d'enclencher le passage à l'échelle.

Une recherche intervention menée au Centre de recherche en gestion de l'École polytechnique avec le programme véhicule électrique de Renault a permis de caractériser les défis posés par le déploiement d'une telle plateforme disruptive pour une entreprise établie. En participant à la prise en charge de ces enjeux, nous avons pu caractériser des activités et outils de gestion qui constituent les éléments d'un nouveau modèle d'ingénierie du déploiement de plateformes disruptives.

Cette nouvelle ingénierie élargit dans l'espace et dans le temps l'action des métiers traditionnels du développement technique et de la distribution commerciale. En termes de périmètre, il s'agit pour les acteurs du projet de passer du rôle d'ensemblier à celui de leader de plateforme. Ce rôle implique la mobilisation de partenaires et de clients dans la conception et le déploiement de la plateforme. Auparavant, les constructeurs n'avaient jamais à se soucier de questions



Une Renault Zoe en cours de chargement sur une station Autolib' parisienne

d'infrastructure ou des types d'habitation de leurs clients : ces questions sont essentielles dans le cas du véhicule électrique, l'une principalement pour la recharge occasionnelle, l'autre pour la recharge quotidienne. Parmi les nouveaux partenaires pour les constructeurs se trouvent ainsi des acteurs privés mais aussi, ce qui est original, publics. En effet, tant les

entités supranationales comme l'Union Européenne que les gouvernements et les pouvoirs publics locaux peuvent soutenir le déploiement d'une mobilité électrique, soit en imposant des émissions moyennes soit en donnant des avantages comme l'accès aux voies de bus. Le rôle de leader de plateforme nécessite ainsi d'accompagner sur les territoires le passage à l'échelle, le déploiement massif de la plateforme disruptive.

L'élargissement est aussi temporel, pour les acteurs historiques de l'amont comme pour ceux de l'aval. Pour les métiers de la relation clients, l'enjeu est de préparer le passage à l'échelle en stimulant l'apprentissage collectif et la prescription par des expérimentations et le choix de marchés prescripteurs. Dans le cas de la mobilité électrique, ces marchés peuvent être des taxis, des véhicules d'autopartage ou des flottes d'entreprises qui permettent à un grand nombre de personnes d'accéder à la mobilité électrique. Ces marchés ne sont pas toujours intéressants à court terme pour les constructeurs, car les volumes sont parfois faibles et les exigences peuvent être élevées, mais ils ont un impact



Une «wallbox» Nissan, appelée «home charging station»



une Tesla Model S sur le plateau de Saclay

important dans l'appropriation de la plateforme disruptive par les clients. Pour les métiers de l'amont, la conception du système d'électromobilité se poursuit pendant le passage à l'échelle, en adaptant le produit-service en fonction des nouveaux apprentissages. Contrairement à ce qui se fait pour des produits établis, ces apprentissages ne peuvent être que difficilement anticipés, car ils se font au sein d'un système déjà déployé, et sans lequel on ne peut pas toujours anticiper les usages futurs.

Pour penser le déploiement, de nouveaux outils de gestion sont alors nécessaires pour formaliser les apprentissages acquis au cours de ce processus et les valoriser dans une optique de passage à l'échelle. L'un de ces outils est un modèle que nous avons baptisé USIDEV, comme User-centric

Simulation for the Deployment of EV. En analysant les usages de mobilité d'une base de plus de 45 000 personnes, nous avons créé un modèle de déploiement de la mobilité électrique qui permet notamment d'estimer le potentiel d'électromobilité d'un territoire et de simuler l'impact de leviers de déploiement. Le modèle permet ainsi de piloter le déploiement, notamment en choisissant les clients les mieux adaptés et en concentrant les actions sur les leviers les plus porteurs.

En activant de nombreux leviers simultanément, en concevant et en déployant dans son ensemble un système d'électromobilité performant, la mobilité électrique peut alors sortir de ses marchés de niche et se développer jusqu'à un marché de masse. Le cas norvégien montre qu'une telle évolution n'est pas utopique : avec plus de 10 % de parts de marché, le véhicule électrique fait partie intégrante du paysage automobile norvégien. Pour expliquer les différences avec le marché français du véhicule électrique, qui ne dépasse pas 1 % des immatriculations, le modèle permet d'identifier les éléments transposables et ceux propres au marché norvégien. Une différence majeure réside dans les revenus et le budget consacré à l'achat d'un véhicule, plus de deux fois plus élevé en Norvège par rapport à la France. Mis à part cette différence, de nombreuses mesures mises en place en Norvège seraient transposables à la France — de l'accès aux voies de bus à la gratuité des péages en passant par le déploiement d'une infrastructure publique — et permettraient au véhicule électrique de décoller en France.

Quels acteurs et quelles formes organisationnelles seront à l'origine de ce succès ? Il est aujourd'hui trop tôt pour le dire. À la fois des acteurs établis - comme Renault-Nissan, BMW ou Daimler - mais aussi des nouveaux entrants - comme Tesla - commercialisent aujourd'hui des véhicules électriques. Ils ont mis en œuvre des méthodes originales, adaptées à leur situation de départ, et dont on pourra estimer l'efficacité dans quelques années.

Le déploiement de la mobilité électrique remet en question les approches traditionnelles de la mobilité individuelle, bien au-delà des questions technologiques. Le véhicule électrique ne sera probablement pas seul dans le paysage des transports de demain : à un prix aujourd'hui supérieur, les véhicules hybrides rechargeables peuvent bénéficier de l'infrastructure existante de pompes à essence pour les longs trajets et offrir des avantages similaires aux véhicules électriques en ville. Or, comme les véhicules électriques, les véhicules hybrides rechargeables peuvent bénéficier d'incitatifs publics, d'une infrastructure publique et nécessitent des prises de recharge domestiques. Plus loin, le véhicule autonome pose des questions de déploiement similaires, car lui aussi pourrait dépendre d'un cadre juridique, d'infrastructures de communication ou d'orientation, de standards (communication «car to car»). Une approche d'ensemble, une ingénierie du déploiement, restera donc incontournable pour piloter notre mobilité du futur. ■

¹ Ce texte est basé sur une thèse de doctorat de l'École polytechnique, soutenue publiquement le 12 décembre 2014, et intitulée «L'ingénierie du déploiement d'une plateforme disruptive - le cas du véhicule électrique».