

جامعة تونس الافتراضية Université Virtuelle de Tunis

Mastère professionnel en Optimisation et Modernisation des Entreprises MOME

Présenté par

Yassine KCHAOU

Pour l'obtention du

Diplôme de mastère professionnel

Etude d'industrialisation de véhicules électriques en Tunisie

Réalisé au

Ministère de l'Industrie - Direction Générale des Industries Manufacturières

Soutenu le 05/07/2013

Devant le Jury:

Président : M^{me} Hanen BOUCHRIHA

Rapporteur : M. El Hassen TAKTAK

Encadreurs Organisme d'accueil : M. Jamel EL JARII

M. Fathi SAHLAOUI

Encadreur UVT : M. Hamed BEN REBAH

Année Universitaire: 2012/2013

Dédicace

A toute personne qui m'aime, à qui j'avoue que si l'on doit réussir quelque chose, il faut que le succès arrive doucement, à la suite de beaucoup d'effort, mais sans angoisses, ni obsessions.

A la mémoire de mon beau-père,

A mes chers parents,

A ma chère belle-mère,

A ma chère femme pour son amour & ses sacrifices

Remerciements

Que toutes les personnes qui m'ont aidé durant l'élaboration de ce travail trouvent dans ces lignes l'expression de ma reconnaissance et ma profonde gratitude.

Je tiens à remercier mes encadreurs M. Hamed BEN RABAH, M. Jamel EL JARII et M. Fathi SAHLAOUI qui m'ont toujours prodiqué encouragements et conseils et m'ont réservé un temps précieux pour les corrections et les discussions malgré leurs multiples occupations.

Je tiens encore à exprimer toute ma reconnaissance à mes chefs hiérarchiques et mes collègues de travail au sein de la Direction Générale des Industries Manufacturières qui m'ont beaucoup encouragé à aboutir mon projet en me facilitant de temps en temps un désengagement partiel de mes occupations professionnelles.

Je ne saurais d'oublier de remercier tous mes tuteurs au sein de l'Université Virtuelle de Tunis qui m'ont assisté à développer mes compétences dans diverses disciplines tout au long du cursus de mastère MOME.

Résumé

La mobilité verte est devenue une réalité pour plusieurs pays développés. L'histoire de l'évolution de l'automobile a montré que le moteur thermique n'aura peut-être plus de chance à conserver sa place suite aux facteurs environnementaux et économiques. La nouvelle tendance observée est celle du développement de la mobilité électrique, anciennement exploitée, avec de nouvelles technologies et un nouveau challenge. La nouvelle industrie du véhicule électrique ouvrira peut être les portes devant les pays en voie de développement comme la Tunisie et permettra à ceux-ci de prendre le train de la technologie en marche et de récupérer les longues années de retard.

Mots clés : pollution, véhicule électrique, autonomie batterie, maîtrise de l'énergie, industrie automobile.

Abstract

The green mobility became a reality for many developed countries. The automobile evolution history showed that the combustion engine might not have more chance to keep his place result of the environmental and economic factors. The new trend observed is the development of electric mobility, formerly operated, with new technologies and a new challenge. The new electric vehicle industry may open the door to the developing countries such as Tunisia and allow them to take on the technology train and retrieve the long years of delay.

Key words: pollution, Electric Vehicle, battery range, energy management, automotive industry.

ملخص

أصبح التنقل الأخضر حقيقة واقعة بالنسبة لكثير من البلدان المتقدمة. كما بيّن تاريخ تطوّر صناعة السيارات أن المحرّك الحراري قد لن يحافظ مستقبلا على مكانته نتيجة الضغوط البيئية والاقتصادية. فالإثّجاه الجديد الذي لوحظ هو تطوّر التنقل الكهربائي الذي تمّ استغلاله سابقا، بتكنولوجيّات جديدة وتحدّيات جديدة. ومن الممكن أن تفتح الصناعة الجديدة للسيارات الكهربائية الباب أمام البلدان النامية مثل تونس وتسمح لهم بأخذ قطار التكنولوجيا واسترداد سنوات طويلة من التأخر.

كلمات مفاتيح: التلوّث البيئي، السيارة الكهربائيّة، درجة التّحكم الدّاتي للبطارية، التحكم في الطاقة، صناعة السبّار ات

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Présentation de la DGIM	3
1.1 Introduction	4
1.2 Présentation de la DGIM	4
1.2.1 Mission	4
1.2.2 Organigramme	6
Chapitre 2 : Historique de l'évolution du véhicule électrique	7
2.1 Introduction	8
2.2 Historique de l'évolution du véhicule électrique	8
Chapitre 3 : Définitions et technologies	17
3.1 Introduction	18
3.2 Différents types de traction dans les véhicules électriques	19
3.2.1 Traction électrique classique	19
3.2.2 La traction bi-mode	19
3.2.3 La traction hybride	20
3.3 Les composants du véhicule électrique	20
3.3.1 La batterie de traction	20
3.3.1.1 Définition et principe de fonctionnement	20
3.3.1.2 Technologies des batteries de traction	21
3.3.1.2.1 Plomb/Acide – Pb	21
3.3.1.2.2 Cadium – Nickel – Ni-Cd	21
3.3.1.2.3 Nickel – Métal Hydrure – Ni-MH.	21
3.3.1.2.4 Lithium et dérivés	
3.3.1.2.5 Zebra batteries	22
3.3.1.2.6 Nickel – Zinc – Ni-Zn	22
3.3.1.3 Caratéristiques des batteries de traction	22
3.3.1.4 Perspectives de progrès et nouvelles technologies de batteries de traction	23
3.3.2 Le moteur électrique de traction.	26
3.3.2.1 Définition et principe de fonctionnement	26
3.3.2.2 Perspectives de progrès et nouvelles technologies des moteurs électriques de	
traction	28

3.3.3 L'électronique de puissance dans le véhicule électrique	29
3.3.3.1 Les chargeurs	29
3.3.3.1.1 L'infrastructure de recharge	30
3.3.3.1.2 la nécessité de l'emploi des énergies propres	31
3.3.3.2 Les convertisseurs électroniques de puissance	31
3.3.3.2.1 Le hacheur	31
3.3.3.2.2 L'onduleur	32
Chapitre 4 : contexte mondial de l'industrie automobile et marché mondial des véhi électriques	
4.1 Introduction	
4.2 Etat des lieux de l'industrie automobile mondiale	35
4.2.1 Les principales caractéristiques du marché automobile mondial	36
4.2.2 La configuration du marché mondial d'automobile en 2012	37
4.2.3 Les recompositions du marché mondial de l'automobile	38
4.2.4 La renégociation de la chaine de valeur automobile	40
4.3 Le développement du véhicule électrique ; c'est l'engagement des gouvernements	41
4.4 Le marché mondial des véhicules électriques	43
4.4.1 Evolution des ventes des véhicules électriques à l'échelle mondiale	43
4.4.2 Progression future du marché des véhicules électriques	44
4.4.3 Les problèmes qui freinent l'évolution du marché mondial des véhicules électrique	es.46
4.4.3.1 Les consommateurs sont-ils prêts ?	46
4.4.3.2 Quels freins à l'achat d'un véhicule électrique ?	47
4.4.3.3 L'autonomie est-elle un point bloquant ?	47
4.4.3.4 Et la recharge?	49
4.4.3.5 Est-il économique de posséder un véhicule électrique ?	49
4.5 Conclusion.	51
Chapitre 5 : Contexte tunisien de l'automobile	
5.1 Introduction	54
5.2 Cadre réglementaire	54
5.3 Le marché tunisien de l'automobile	54
5.3.1 Le consommateur tunisien et l'automobile	55
5.3.2 Evolution du marché automobile tunisien	55
5 3 3 Acteurs commerciaux et concurrence	56

5.4 L'industrie automobile en Tunisie	59
5.4.1 Le secteur « carrosserie et montage automobile »	60
5.4.1.1 Principaux producteurs locaux	61
5.4.1.2 Incitations et privilèges accordés au secteur	62
5.4.1.3 Fabricants tunisiens de véhicules particuliers	62
5.4.1.3.1 WALLYSCAR	62
5.4.1.3.2 Compagnie industrie auto BARKIA	64
5.4.2 Le secteur « composants mécaniques automobile »	65
5.4.3 Le secteur « câbles et composants électriques et électroniques automobile »	66
6 : Plan d'action pour stimuler l'industrialisation des véhicules électriques en Tu	nisie .69
6.1 Raison et finalité de l'implantation d'une industrie de véhicules électriques en Tur	isie70
6.2 Présentation du projet industriel « AL BURAQ »	71
6.2.1 Ce que signifie « AL BURAQ » ?	71
6.2.2 Mission et objectif	72
6.2.3 Synoptique	73
6.2.4 La filiale industrielle des batteries de traction	73
6.2.4.1 Objectif	73
6.2.4.2 Problèmes et obstacles	74
6.2.4.3 Potentialités et opportunités à exploiter	74
6.2.5 La filiale industrielle des véhicules électriques	74
6.2.5.1 Objectif	74
6.2.5.2 Problèmes et obstacles	74
6.2.5.3 Potentialités et opportunités à exploiter	75
6.2.6 Solutions de recharge pour les véhicules électriques	75
6.2.6.1 Problèmes et obstacles	75
6.2.6.2 Potentialités et opportunités à exploiter.	75
6.2.7 Solutions de conversion et de stockage de l'énergie	76
6.2.7.1 Problèmes et obstacles	76
6.2.7.2 Potentialités et opportunités à exploiter	76
6.2.8 L'industrie de recyclage et de valorisation des composnts automobile	77
6.2.8.1 Objectif	77
6.2.8.2 Problèmes et obstacles	77
6.2.8.3 Potentialités et opportunités à exploiter	78

Conclusion générale	83
6.5 Calendrier prévisionnel d'implémentation.	81
6.4 Etagère de réalisation future (Future Shelf)	80
électriques en Tunisie	78
6.3 Analyse des problèmes et des obstacles qui freinent l'industrialisation des	véhicules

Liste des figures

Figure 1.1 : organigramme fonctionnel de la DGIM	6
Figure 2.1 : Thomas Parker assis dans une voiture électrique, qui pourrait être la première monde (1884)	
Figure 2.2 : En 1891, l'américain William Morrison construit la première vraie voiture électrique	9
Figure 2.3 : Des Taxis électriques à New-York (1897)	9
Figure 2.4 : « La Jamais Contente » pilotée par Camille Jenatzy(Belgique 1899)	9
Figure 2.5 : la Phaeton de WOOD (1902)	10
Figure 2.6 : la FORD modèle T à essence (1908)	10
Figure 2.7: la Buick Skylark hydride de Victor Wouk, General Motors (1972)	11
Figure 2.8: la CitiCar de Vanguard-Sebring (1974)	11
Figure 2.9 : l'EV1 de GM (1988 – 1998)	12
Figure 2.10 : la voiture Hybride Toyota Prius (1997)	12
Figure 2.11 : les véhicules électriques et Hybrides lancés ente 1997 et 2000	13
Figure 2.12 : la Mitsubishi i-MiEV et ses versions démarquées la Peugeot iON et la Citro C-Zero	
Figure 2.13: la Nissan LEAF (2010)	15
Figure 2.14 : la voiture électrique chinoise BYD e6 (2011)	15
Figure 2.15 : le bus électrique chinois BYD K9 (2011)	16
Figure 2.16 : la Honda FCX Clarity au musée de l'environnement de la cité de Kitakyush préfecture de Fukuoka, lors de ma dernière visite au Japon (05/06/2013)	
Figure 3.1 : La famille des véhicules hybrides et électriques	18
Figure 3.2 : Architecture de la chaîne de traction électrique classique	19
Figure 3.3: Architecture de la chaîne de traction bi-mode (électrique-thermique)	19
Figure 3.4: Architecture de la chaîne de traction hybride	20
Figure 3.5: Le moteur de Phœnix à flux axial qui offre 30% d'autonomie supplémentaire véhicules électriques	
Figure 3.6: L'Active Wheel de Michelin intègre les moteurs de la voiture électrique dans roues.	
Figure 3.7: l'utilisation de l'énergie propre pour la recharge des véhicules électriques	31
Figure 3.8: principe de fonctionnement du hacheur	32
Figure 3.9: principe de fonctionnement de l'onduleur	33

rigure 4.1: repartition du marche mondial de l'automobile en 2011 (en pourcentage des ventes de voitures particulières)	37
Figure 4.2: producteurs de batterie au lithium	
Figure 4.3: objectifs de vente des différents plans nationaux à l'horizon 2020	43
Figure 4.4: statistiques des véhicules électriques vendus dans le monde	43
Figure 4.5: prévision de la production de la motorisation électrique et hybride mondiale à l'horizon 2016	45
Figure 4.6: Intérêt des européens pour l'achat d'un véhicule électrique	46
Figure 4.7: Répartition des kilométrages journaliers	47
Figure 4.8: Autonomie électrique demandée par les consommateurs européens	48
Figure 4.9: Bilans économiques comparés véhicule électrique/véhicules thermiques	51
Figure 5.1: évolution des immatriculations de véhicules particuliers et utilitaires neufs en	
Tunisie	55
Figure 5.2: Implantation des industriels de Carrosserie et Montage automobile	60
Figure 5.3: le modèle IZIS du fabricant tunisien WallysCar	62
Figure 5.4: L'usine du fabricant tunisien WallysCar	63
Figure 5.5: présentation officielle de la compagnie industrie auto BARKIA	64
Figure 5.6: présentation officielle du véhicule BARKIA type Africa	64
Figure 5.7: Implantation des équipementiers en composants mécaniques automobile en Tunisie	65
Figure 5.8: Implantation des équipementiers en câbles et composants électriques et électroniques automobile en Tunisie	66
Figure 6.1: Synoptique du projet industriel « AL BURAQ »	73
Figure 6.2: Exemple d'un système de stockage d'énergie distribuée	76

Liste des tableaux

Tableau 3.1: Comparaison poids/puissance/prix par type de batterie	.23
Tableau 3.2: Comparaison des moteurs utilisés en traction électrique	.27
Tableau 4.1: répartitions et orientations des jointes-ventures chinoises	.39
Tableau 4.2: prévision de la production de la motorisation électrique et hybride mondiale à l'horizon 2016	
Tableau 4.3: Objectifs nationaux et primes à l'achat en Europe	.50
Tableau 5.1: Liste des concessionnaires automobiles tunisiens	.56
Tableau 5.2: Marché des véhicules toutes marques (VP & VU) pour l'année 2012	.57
Tableau 5.3: Principaux Fabricants d'automobile en Tunisie	.61
Tableau 6.1: fiche d'analyse des problèmes liés à l'industrialisation des véhicules électrique en Tunisie	
Tableau 6.2: calendrier prévisionnel d'implémentation des différentes actions programmées	

Introduction générale

Le secteur des transports se développe rapidement. Nous en apprécions les avantages: rapidité et accessibilité géographique à tous les points du globe, mais cette médaille a son revers : bruit, congestion, émissions polluantes et dioxyde de carbone (CO₂), principal gaz à effet de serre responsable du réchauffement climatique. Le secteur des transports représente un enjeu stratégique de premier plan sur le long terme en matière de maîtrise de ses émissions de gaz à effet de serre.

Les véhicules électriques et hybrides sont considérés comme une des réponses à la réduction de la facture énergétique et aux impacts environnementaux des transports que sont les émissions, qu'elles soient locales (particules) ou globales (gaz CO2). Si l'hybridation des voitures est un concept qui se généralise progressivement, le marché des véhicules électriques reste encore balbutiant.

Le véhicule électrique n'est pas une idée nouvelle. Du XIXème à la fin du XXème siècle, divers modèles ont été expérimentés et ont tenté de rivaliser avec les véhicules thermiques. L'échec a été à chaque fois au rendez-vous, en raison du manque de capacité des batteries et donc de la faible autonomie de ces véhicules, comparé à celle des véhicules thermiques. Cela a prouvé que la polyvalence et l'autonomie étaient au centre des enjeux du développement des véhicules électriques.

La mobilité électrique fait aujourd'hui l'objet d'un engouement formidable, comme en a témoigné le Mondial de l'automobile 2010. Les véhicules « propres » sont en effet devenus un enjeu de société en raison de la montée en puissance des préoccupations environnementales, de la volatilité du prix des carburants fossiles et de la forte médiatisation des véhicules électriques.

Le développement des projets en matière de véhicule électrique peut s'expliquer tout d'abord par les objectifs environnementaux fixés dans plusieurs pays pour lutter contre le changement climatique, visant notamment à diminuer les émissions de CO2. La voiture électrique apparaît alors comme un levier de relance et de modernisation du secteur de l'industrie automobile. Enfin, la maturité technologique des batteries ouvre des perspectives pour le développement à grande échelle du véhicule électrique. Jusqu'à présent, le frein essentiel au développement du véhicule électrique était la batterie dont la capacité était insuffisante.

Pour la Tunisie, le développement et la promotion de la mobilité propre est fortement recommandé puisque cette dernière permettra de contribuer à la maîtrise des coûts relatifs à l'utilisation des carburants fossiles et à l'entretien et assurer surtout un développement durable fondé sur la préservation de l'environnement pour les générations tunisiennes futures.

Dans le présent travail, nous allons présenter l'établissement d'accueil : la Direction Générale des Industries Manufacturières au sein du Ministère de l'Industrie. Après un clin d'œil historique sur le développement du véhicule électrique au fil du temps, nous allons étudier le contexte mondial actuel relatif à l'industrie des véhicules électriques, d'évaluer l'évolution du marché mondial des véhicules électriques et de recenser les problèmes qui freinent cette évolution. Ensuite, nous allons tenter d'analyser le contexte tunisien de point de vue marché de véhicules et industrie automobile tunisienne et d'essayer finalement d'initier, sur la lumière des analyses du contexte mondial et national, l'implantation d'une unité industrielle dédiée à la fabrication des véhicules électriques en Tunisie tout en veillant à identifier les problèmes et les obstacles qui freinent le développement d'un tel projet.

Le résultat final de cette étude sera présenté sous forme d'un plan d'action à mener pour surmonter les problèmes et les obstacles identifiés et aboutir à succéder l'implantation effective du projet d'industrialisation de véhicules électriques en Tunisie.

Chapitre 1 : Présentation de la DGIM

1.1. Introduction:

Le Ministère de l'Industrie a pour mission d'élaborer et de mettre en œuvre la politique du gouvernement dans les domaines se rapportant à l'industrie, aux industries agro-alimentaires, aux services connexes à l'industrie, à l'énergie, aux mines, à la coopération industrielle et à la sécurité industrielle, énergétique et minière.

Le décret n° 2010-617 du 5 avril 2010, modifiant et complétant le décret n° 2000-134 du 18 janvier 2000, défini l'organisation du ministère de l'industrie comme suit :

- ➤ Le Cabinet
- ➤ L'Inspection Générale
- La Direction Générale des Services Communs (DGSC)
- Direction Générale de la Tutelle des Entreprises (DGTE)
- Direction Générale de l'Infrastructure Industrielle et Technologique (DGIIT)
- ➤ Direction Générale de la Promotion des Petites et Moyennes Entreprises (DGPPME)
- Direction Générale des Industries Manufacturières (DGIM)
- Direction Générale de l'Innovation et du Développement Technologique (DGIDT)
- ➤ Direction Générale du Textile et de l'Habillement (DGTH)
- ➤ Direction Générale des Industries Alimentaires (DGIA)
- ➤ Générale de l'Energie (DGE)
- Direction Générale des Mines (DGM)
- Direction de la Sécurité (DS)

1.2. Présentation de la DGIM:

La Direction Générale des Industries Manufacturières (DGIM) est une direction technique au sein du Ministère de l'Industrie.

1.2.1. **Mission**:

La DGIM est chargée notamment de :

- Participer à la mise en œuvre de la politique de l'Etat dans le domaine du développement des industries manufacturières,
- Préparer les textes législatifs et réglementaires régissant les entreprises du secteur des industries manufacturières,
- Suivre les investissements et la production dans les secteurs des industries manufacturières,
- Participer à l'élaboration des plans de développement économique et social et de suivre leur exécution,
- Participer à l'élaboration des études et des stratégies des secteurs des industries manufacturières visant le développement du secteur, de son intégration et la promotion de son environnement ainsi que de ses exportations,
- Aider les entreprises des industries manufacturières à définir leur politique d'investissement et leur programme de fabrication en collaboration avec les centres techniques spécialisés,
- Accompagner les entreprises des industries manufacturières dans le processus de leur mise à niveau,
- Participer à l'élaboration de la politique du commerce extérieur,
- Assurer le suivi de l'impact du démantèlement tarifaire sur le secteur des industries manufacturières et d'en proposer des mesures d'accompagnement.

Outre les activités citées ci-dessus, la DGIM assure des prestations d'émission d'avis techniques concernant principalement :

- Les importations soumises aux cahiers des charges (meuble, pneus et roues, carreaux céramiques, appareils récepteurs de télévision, cartes électroniques principales des appareils de télévision et seringues à usage unique),
- Les fiches techniques,
- Les demandes d'admissions temporaires,
- Les privilèges fiscaux Article 14 et Article 27,
- Les autorisations d'importation et d'exportation par TTN,
- Les attestations d'approvisionnement en produits chimiques dangereux et acides.

1.2.2. Organigramme:

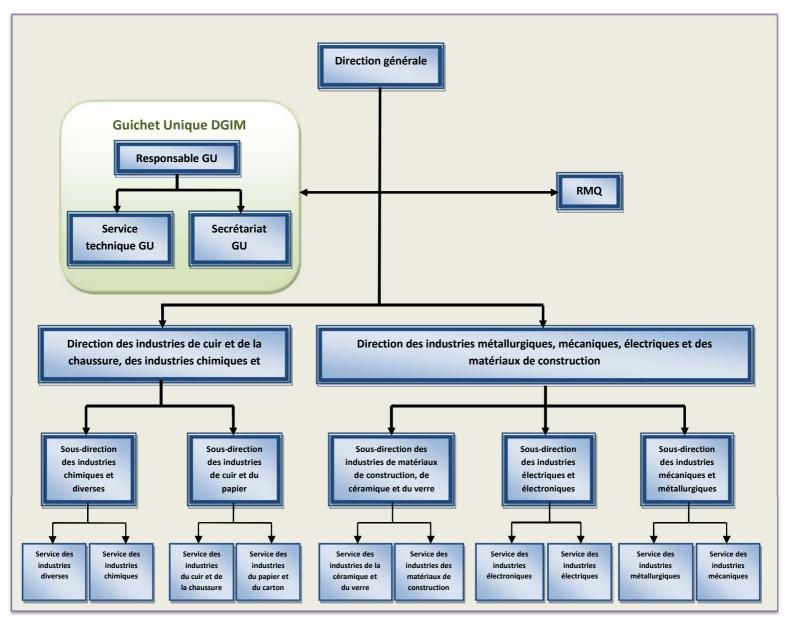


Figure 1.1: organigramme fonctionnel de la DGIM.

Chapitre 2 : Historique de l'évolution du véhicule électrique

2.1. Introduction:

Contrairement à certaines fausses idées, la voiture électrique n'est pas le fruit de la pensée écologique de ce XXIè siècle mais a déjà été expérimentée et exploitée depuis la genèse de la construction automobile. La concurrence entre le moteur électrique et le moteur à combustion ne date pas d'hier et le mutisme adopté par le premier type de moteur durant pratiquement un siècle vient du fait que son fournisseur d'énergie électrique, à savoir l'accumulateur, était trop encombrant donc très lourd. Quant à ses centrales de recharge, elles étaient quasi-inexistantes et les moteurs électriques étaient jugés trop silencieux, donc dangereux pour les piétons. Mais la vraie raison pour laquelle le moteur électrique fut oublié par le secteur automobile est l'invention du « crank) ou démarreur automatique conçu pour le moteur à combustion.

2.2. Historique de l'évolution de la voiture électrique :

Le premier véhicule électrique a fait son apparition aux alentours de **1830** (1832-1839). Il s'agissait plutôt d'une carriole (charrette) électrique inventée par *Robert Anderson*, un homme d'affaires écossais.

Vers **1835**, l'américain *Thomas Davenport* construit une petite locomotive électrique. Vers 1838 l'écossais *Robert Davidson* arrive avec un modèle similaire qui peut rouler jusqu'à 6 km/h. Ces deux inventeurs n'utilisaient pas de batterie rechargeable.

En **1859**, le français *Gaston Planté* invente la batterie rechargeable au plomb acide. Elle sera améliorée par *Camille Faure* en **1881**.



Figure 2.1 : Thomas Parker assis dans une voiture électrique, qui pourrait être la première au monde (1884).

-

¹ Le « Crank » ou manivelle, est un composant mécanique présentant une partie excentrée appelée maneton par lequel une force peut lui imprimer un mouvement de rotation autour de son axe. (Source : Wikipédia)



Figure 2.2 : En 1891, l'américain William Morrison construit la première vraie voiture électrique.

En 1897, on peut apercevoir les premiers taxis électriques dans les rues de New York.



Figure 2.3: Des Taxis électriques à New-York (1897)

En **1899** en Belgique, une société construit « La Jamais Contente », la première auto électrique dont la vitesse dépassa les 100 km/h (elle atteindra les 105 km/h). L'auto était pilotée par le belge *Camille Jenatzy*, et munie de pneus Michelin. Elle était en forme de torpille².



Figure 2.4: « La Jamais Contente » pilotée par Camille Jenatzy(Belgique 1899).

-

² Une torpille est un engin automoteur, se déplaçant sous l'eau et destiné à la destruction de navires de surface ou de sous-marins. (Source : Wikipédia)

Dès 1900, la voiture électrique connait ses beaux jours. Plus du tiers des voitures en circulation sont électriques, le reste étant des automobiles à essence et à vapeur.

En **1902**, la Phaeton de Wood pouvait rouler 29 kilomètres à une vitesse de 22.5 km/h et coutait 2000 dollars.



Figure 2.5: la Phaeton de WOOD (1902).

En 1912, la production des véhicules électriques est à son apogée. Mais l'introduction de la Ford Model T à essence en 1908 va commencer à se faire sentir.



Figure 2.6: la FORD modèle T à essence (1908).

Dans les années 1920, certains facteurs mèneront au déclin de la voiture électrique. On peut citer leur faible autonomie, leur vitesse trop basse, leur manque de puissance, la disponibilité du pétrole, et leur prix deux fois plus élevé que les Ford à essence.

En 1966, le congrès américain recommande la construction de véhicules électriques pour réduire la pollution de l'air. L'opinion publique américaine y est largement favorable et avec

l'augmentation du prix de l'essence en 1973³, date du premier choc pétrolier: embargo de l'OPEP envers les Etats-Unis, pourtant rien ne décollera vraiment.

En **1972**, *Victor Wouk*, le parrain du véhicule hybride construit la première voiture hybride, la Buick Skylark de General Motors (GM).



Figure 2.7: la Buick Skylark hydride de Victor Wouk, General Motors (1972).

En 1974, la CitiCar, qui ressemble beaucoup à une voiturette électrique de Golf, fait son apparition à l'Electric Vehicle Symposium de Washington D.C. Elle peut rouler sur 64 kilomètres à une vitesse de 48 km/h. En 1975, la société Vanguard-Sebring est le sixième constructeur américain mais elle sera dissoute quelques années plus tard.



Figure 2.8: la CitiCar de Vanguard-Sebring (1974).

En 1976, le Congrès américain adopte « the Electric and Hybrid Vehicle Research, Development, and Demonstration Act. », qui a pour but de favoriser le développement des nouvelles technologies de batteries, moteurs et composants hybrides.

Dès **1988**, le président de General Motors (GM) *Roger Smith* lance un fond de recherche pour développer une nouvelle voiture électrique qui deviendra l'EV 1.

11

³ Pendant la guerre du « Kippour » « حرب أكثوبر » contre Israël, les pays arabes membres de l'OPEP (Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole), réunis au Koweït, annoncent un embargo sur les livraisons du pétrole contre les états qui soutiennent Israël dans cette guerre.

En **1990**, l'Etat de la Californie vote le « Zero Emission Vehicle (ZEV) », un plan qui prévoit que 2% des véhicules devront avoir zéro émission polluante en 1998 (puis 10% d'entre eux pour 2003).

Entre **1996** et **1998** GM va produire 1117 EV1, dont 800 d'entre elles en location avec un contrat de 3 ans.



Figure 2.9: l'EV1 de GM (1988 – 1998)

En **1997**, Toyota a lancé la Prius, la première voiture hybride à être commercialisée en série. 18000 exemplaires sont vendus au Japon la première année.



Figure 2.10: la voiture Hybride Toyota Prius (1997).

De **1997** à **2000**, de nombreux constructeurs lancent des modèles électriques hybrides: la Honda EV Plus, la G.M. EV1, le Ford Ranger pickup EV, Nissan Altra EV, Chevrolet Chevy S-10 EV et le Toyota RAV4 EV.



Figure 2.11 : les véhicules électriques et Hybrides lancés ente 1997 et 2000.

Cependant à partir de **2000**, la voiture électrique va re-mourir à nouveau.

En **2002**, G.M. et Daimler Chrysler poursuivent le « California Air Resources Board (CARB) » pour faire annuler la loi « Zero Emission Vehicle (ZEV) » de 1990. Le président américain George Bush se joint à eux.

En **2003** en France, Renault fait une tentative avec la sortie de sa voiture hybride Kangoo Elect'road mais abandonnera la production après environ 500 véhicules.

En 2004, c'est la fin de l'EV1; GM va récupérer tous les véhicules EV1 pour les détruire, et ce malgré plusieurs mouvements de protestation, seuls quelques-uns ayant été désactivés pour être exposés dans des musées et des universités. Le constructeur fut accusé de céder au lobbying des sociétés pétrolières; En 2006, *Chris Paine* sort un documentaire intitulé « Who Killed the Electric Car? » qui analyse la montée en puissance et la mort de la voiture électrique à la fin des années 90. Il s'attarde principalement à EV1 de GM.

En 2007, il y avait encore 100 000 véhicules électriques en circulation aux Etats-Unis.

En Juillet 2009, La Mitsubishi i-MiEV a été lancée au Japon pour les professionnels, et pour les clients individuels en Avril 2010 suivie par la vente au public à Hong Kong en mai 2010, et en Australie en Juillet 2010 via leasing. L'i-MiEV a été lancée en Europe en Décembre 2010. La mise sur le marché dans les Amériques a commencé au Costa Rica en Février 2011,

suivi par le Chili en **mai 2011**. Pour tous les véhicules de la marque iMiEV, Mitsubishi rapporte autour de 27.200 unités vendues ou exportées depuis 2009 à Décembre 2012, y compris le minicab MiEV vendu au Japon, et les versions démarquées et vendues comme Peugeot iOn et Citroën C-Zero sur le marché européen.



Figure 2.12 : la Mitsubishi i-MiEV et ses versions démarquées la Peugeot iON et la Citroën C-Zero.

En **décembre 2010**, La Nissan LEAF « Leading, Environmentally Friendly, Affordable, Family car », une voiture électrique 5 places annoncée par Nissan en 2009, a été commercialisée au Japon et aux États-Unis et a devenu disponible dans l'ensemble de l'Europe depuis fin 2011.



Figure 2.13: la Nissan LEAF (2010).

Le **26 Octobre 2011**, les ventes au grand public de l'e6, la voiture électrique du fabricant chinois BYD Auto, ont commencé à Shenzhen. Il s'agit d'une voiture toute-électrique avec une portée de 300 km (186 miles) selon le constructeur. Les essais sur le terrain ont commencé en Chine en mai 2010 avec 40 unités d'exploitation de taxis dans la ville de Shenzhen.

BYD prévoit de vendre le modèle e6 aux États-Unis pour 35.000 \$ US. En Octobre 2011 BYD a annoncé que les ventes aux clients particuliers seront retardées d'au moins 18 mois en raison de l'**absence d'infrastructures de recharge** et en mai 2013, BYD a annoncé que l'e6 sera vendu aux États-Unis seulement pour les professionnels, la société se concentrera sur les ventes d'autobus électriques en Amérique du Nord.



Figure 2.14: la voiture électrique chinoise BYD e6 (2011).



Figure 2.15: le bus électrique chinois BYD K9 (2011).

Les recherches et les expérimentations des nouveaux modèles de véhicules électriques et hybrides se poursuivent actuellement pour développer des automobiles propres de plus en plus performantes, plus abordables du côté prix et qui répondent largement aux exigences du consommateur.

Lors d'une visite au Japon dans le cadre d'un stage, j'ai visité le musée de l'environnement de Kitakyūshū⁴ où j'ai repéré une présentation sur la Honda FCX Clarity, une voiture électrique alimentée par une pile à combustible et ayant une autonomie allant jusqu'à 650 km. A ce qu'on m'a expliqué, ce modèle est actuellement en cours de test au Japon.



Figure 2.16 : la Honda FCX Clarity au musée de l'environnement de la cité de Kitakyushu, préfecture de Fukuoka, lors de ma dernière visite au Japon (05/06/2013).

-

⁴ Ville japonaise de près d'un million d'habitants, située au nord de Kyūshū, dans la préfecture de Fukuoka (située au sud du Japon à 1080 Km de Tokyo).

Chapitre 3 : Définitions et technologies

3.1. Introduction:

Les véhicules électriques font partie de la famille des véhicules électrifiés qui désigne l'ensemble des véhicules hybrides, hybrides rechargeables et électriques.

À l'intérieur de ces familles, plusieurs sous-catégories peuvent exister. Pour les véhicules hybrides notamment, plusieurs types d'hybridation existent et plusieurs degrés d'hybridation sont possibles, qui dépendent du ratio entre la puissance thermique et la puissance électrique embarquées dans le véhicule afin de le propulser. Les véhicules électriques représentent le dernier maillon de la chaîne de l'électrification du véhicule.

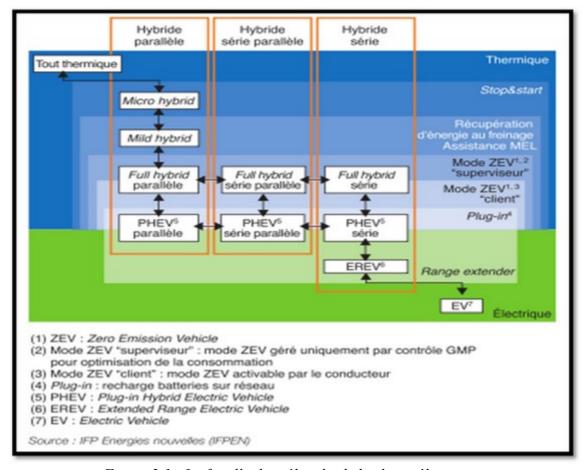


Figure 3.1 : La famille des véhicules hybrides et électriques.

Nous n'allons pas se contenter d'expliquer toutes les techniques d'hybridation présentées cidessus, mais nous allons faire le focus sur les véhicules tout-électrique (EV : Electric Vehicle) appelés encore ZEV (Zero Emission Vehicle).

Le véhicule thermique, c'est très simple : un moteur à combustion ultra complexe devant répondre à des contraintes fortes, combiné à un simple réservoir d'essence. Le véhicule électrique, c'est tout à fait l'inverse : les **moteurs électriques performants** existent depuis un siècle, mais la batterie bon marché, légère et ayant une bonne autonomie reste à inventer. Il n'existe pas de technologie idéale et tout est affaire de compromis. Cependant, les progrès faits au niveau de la technologie Lithium⁵-ion laissent entrevoir de belles perspectives.

Les technologies du véhicule électriques sont simples et maitrisées. L'essentiel des performances de la voiture reposent sur la **batterie**, organe clé du véhicule vert. La batterie délivre ensuite l'énergie à la chaine de traction de la voiture électrique.

3.2. Différents types de traction dans les voitures électriques :

3.2.1. Traction électrique classique :

C'est la solution la plus répandue. Elle est composée d'un groupe de batterie, d'une gestion électronique du courant et d'un moteur électrique. Le montage se fait sur véhicules légers de série, poids lourds, chariots élévateurs, deux roues...

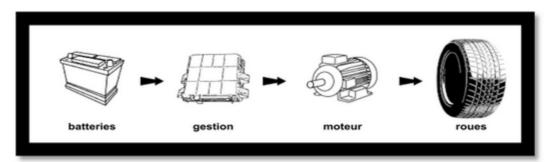


Figure 3.2 : Architecture de la chaîne de traction électrique classique.

3.2.2. La traction bi-mode:

La traction thermique classique est utilisée hors des villes ; la traction électrique classique s'utilise en ville.

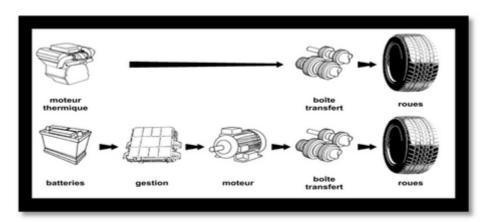


Figure 3.3: Architecture de la chaîne de traction bi-mode (électrique-thermique).

⁵ Le Lithium est un élément chimique, de symbole Li et de numéro atomique 3, situé dans le groupe 1 parmi les métaux alcalins dans le tableau périodique des éléments. Il est souvent utilisé comme anode de batterie du fait de son grand potentiel électrochimique.

3.2.3. La traction hybride:

Il s'agit d'un groupe électrogène, entraîné par un moteur thermique ou par une turbine à gaz. Celui-ci produit du courant, qui recharge en permanence un groupe de batteries. Celles-ci débitent dans un moteur électrique de traction. En site urbain, le groupe est à l'arrêt et on recourt au moteur électrique.

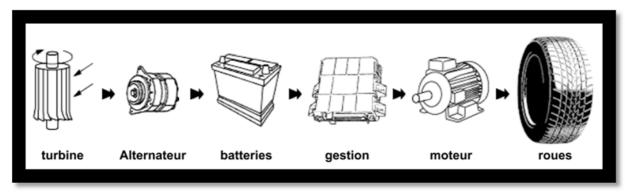


Figure 3.4: Architecture de la chaîne de traction hybride.

3.3. Les composants du véhicule électrique :

3.3.1. La batterie de traction :

3.3.1.1. Définition et principe de fonctionnement :

La batterie de traction est un générateur électrochimique qui stocke de l'énergie sous forme chimique et la restitue sous forme électrique. Son principe de fonctionnement est identique à celui des batteries de démarrage, de servitude et d'éclairage que nous connaissons (Voir **annexe1** pour tout savoir sur le principe de fonctionnement de la batterie rechargeable).

Toutefois, en raison de son aptitude à générer de très forts courants, pendant des durées importantes, le principe de fonctionnement des batteries de traction est très différent des autres batteries, par sa technologie de fabrication, sa gestion de charge et de décharge.

La batterie électrique de traction est l'organe clé des voitures électriques. Elle influe directement sur la performance et surtout l'autonomie de l'automobile écologique. C'est pour cette raison qu'on parle souvent d'un système ou d'unité de stockage d'énergie.

L'unité de stockage d'énergie remplit deux fonctions essentielles : réservoir et récupérateur d'énergie :

La fonction réservoir est réalisée par des batteries de technologies diverses. Le principe est toujours le même depuis de nombreuses années, il reste très simple: des cellules d'accumulateur sont connectées et assemblées entre elles dans un

- conteneur étanche : la batterie. Pour obtenir la puissance nécessaire, les batteries sont regroupées dans un ou des packs et réparties dans le véhicule.
- Extender » est plus nouvelle. Elle consiste à stocker l'électricité produite par le moteur en mode « générateur » lors **des décélérations**. Pour être efficace, elle doit utiliser des accumulateurs acceptant les courants élevés en provenance du moteur. Peu de technologies de batteries le permettent. Les composants les plus efficaces pour cela sont les **super-condensateurs**⁶. Leur temps de charge et de décharge, de l'ordre de quelques secondes, leur permet de jouer le rôle de tampon d'énergie entre le moteur et les batteries. Ils ont franchi les portes des laboratoires de recherche pour être produits en volumes importants par des firmes comme Maxwell et Batscap, filiale du groupe Bolloré.

3.3.1.2. Technologies des batteries de traction :

Six (06) technologies différentes de batteries de traction sont en compétition pour équiper les véhicules électriques. Cette diversité permet une large palette de choix aux concepteurs :

3.3.1.2.1. Plomb/Acide - Pb:

Ce sont les plus simples de conception et de fabrication. Les processus de production sont bien maîtrisés, les industriels les produisant innovent pour les rendre plus performantes face à la concurrence des autres technologies. Elles sont lourdes et peu puissantes mais ont pour avantage leur prix.

3.3.1.2.2. Cadmium-Nickel - Ni-Cd:

Ces batteries ont été couramment utilisées depuis une quinzaine d'années dans les appareils portatifs. Deux inconvénients pour ce type d'accumulateur : un « effet mémoire » qui nécessite des décharges profondes régulières, et une réglementation européenne contraignante pour les usages du cadmium. Elles sont très endurantes, mais actuellement peu utilisées.

3.3.1.2.3. Nickel-Métal Hydrure - Ni-MH:

Ces batteries sont apparues, dans un premier temps, dans l'outillage sans fil et la téléphonie. Elles propulsaient l'EV1 de General Motors avant d'être choisies par Toyota pour ses voitures hybrides. Les Ni-MH sont actuellement le standard pour équiper les voitures hybrides.

⁶ Un super-condensateur est un condensateur de technique particulière permettant d'obtenir une densité de puissance et une densité d'énergie intermédiaire entre les batteries et les condensateurs électrolytiques classiques.

Commercialisées depuis 1990, elles présentent une énergie volumique importante et une faible sensibilité à l'effet mémoire.

3.3.1.2.4. Lithium et dérivés :

Plusieurs technologies composent la famille des batteries au Lithium. Elles occupent aujourd'hui une place prédominante sur le marché de l'électronique portable, et sont de plus en plus utilisées dans les véhicules électriques.

Leurs principaux avantages sont une densité d'énergie élevée (densité massique deux à cinq fois plus élevée que le Ni-MH par exemple), ainsi que l'absence d'effet mémoire.

Les différentes catégories qui composent la famille des batteries au Lithium sont :

- Lithium-ion Li-ion les plus courantes pour les applications nomades de faible puissance.
- Lithium Polymère Li-Po: plus légères que les Li-ion, elles sont aussi plus faciles à mettre en œuvre
- Lithium-phosphate LiFePO4 : Une des avancées majeures des cinq dernières années. Elles combinent les avantages des Li-ion et Li-Po et une durée de vie élevée.
- Lithium Métal Polymère LMP : fonctionne à température interne d'environ 85°C.
 Une technologie en cours de développement dont le promoteur est le groupe Bolloré.

3.3.1.2.5. Zebra batteries :

Une technologie à part, car elle est mise en œuvre par un seul fabricant. Elle utilise du chloro-aluminate de sodium liquide et sa température interne est de 250°C.

3.3.1.2.6. *Nickel-Zinc – Ni-Zn*:

Considérée comme des batteries de nouvelle génération, leur développement industriel est en cours. Elles sont proches des Li-ion pour les performances, et devraient coûter sensiblement moins cher.

3.3.1.3. Caractéristiques des batteries de traction :

La sélection d'une batterie de traction se fait en fonction des critères suivants, par ordre d'importance :

- Energie, poids (Energie/Massique);
- Recharge (Nombre de cycles);
- Durée de vie, prix ;

- Entretien;
- Tension, encombrement (fonction de l'utilisation);
- Son aptitude au recyclage.

Le tableau suivant résume une petite étude de benchmark sur les différentes technologies de batteries de traction et leurs principales caractéristiques:

Tableau 3.1: Comparaison poids/puissance/prix par type de batterie.

Compaténiations	Type de batterie																
Caractéristiques	P	b	Ni-Cd		Ni-MH		Li-	ion	Li-Po		LiFePO4		Zebra		Ni-Zn		
Wh/kg (poids)	4	0	60		80		160		200		200		120		80		
Nombre de Cycles	40	00	1400		1200		1250 1		18	300 15		1500		1100		1000	
Puissance Pack 10 kWh																	
kWh/kg	0.0	04	0.06		0.08		0.	0.16 0.2		0.2		0.12		0.08			
Poids en kg	25	50	167		125		62	2.5	50		50		83		125		
Durée de vie en k	ilomètr	es															
Sur la base de 140 km par charge	56000		196000		1960		168	168000		175000 252000 210000		154000		1400	000		
Prix en euro	Actuel	2015	Actuel	2015	Actuel	2015	Actuel	2015	Actuel	2015	Actuel	2015	Actuel	2015	Actuel	2015	
Prix au kWh	450	450	1200	1200	1300	1200	1400	1200	1550	1200	1500	1000	1100	1000	NC	NC	
Prix Pack 10 kWh	4500	4500	12000	12000	13000	12000	14000	12000	15500	12000	15000	10000	11000	10000	NC	NC	
Prix au km	0.080	0.080	0.061	0.061	0.077	0.071	0.080	0.068	0.062	0.047	0.071	0.047	0.071	0.064	NC	NC	

(Source : Arval)

3.3.1.4. Perspectives de progrès et nouvelles technologies de batteries de traction :

Pour réaliser des batteries capables de rendre crédible une offre de véhicule électrique sur le marché, les chercheurs du monde entier travaillent à relever différents défis à savoir:

❖ Augmenter la capacité de stockage d'énergie des batteries de traction

Embarquer un maximum d'énergie pour un encombrement minimal, c'est le défi de tout type de transport et le véhicule électrique n'échappe pas à cette contrainte. Les énergies fossiles sont à la fois une source et un contenant d'énergie. En brulant 1 kg d'essence, il est possible de générer 10000 Wh (Wattheure) d'énergie. La densité énergétique est définie par ce rapport poids/puissance et détermine les performances d'autonomie du véhicule électrique.

Les batteries lithium-ion ont une densité énergétique de 150 Wh/kg à 200 Wh/kg, soit quatre fois plus que la technologie nickel-cadmium et six fois plus que le plomb. Mais cela reste 50 fois moins que les carburants liquides. Les chercheurs travaillent ainsi sur de nouveaux types d'électrodes capables de stocker plus d'ions, comme l'oxyde de manganèse (LiMnO2) ou l'oxyde de nickel (LiNiO2). Ces technologie sont en cours de développement et pourraient voir la densité énergétique des batteries des voitures électriques portée à 350, voire 500 Wh/kg. La problématique est de trouver la solution qui combine performance et longévité dans le temps, en évitant la dissolution de l'électrode positive dans l'électrolyte après quelques cycles de charges. De gros progrès sont donc encore à faire pour augmenter la densité d'énergie des batteries sans que leur durée de vie ne soit trop inférieure à celle des voitures électriques.

Diminuer les temps de charge des batteries de traction

Le temps de charge d'une batterie d'une voiture électrique est d'environ 8 h avec une prise de 16A (ampères) et passe à 5 h avec la prise 32A. Plus l'intensité de charge est élevée (plus le nombre d'électron qui transite est important), moins la charge est longue. Avec une prise 200A, il serait ainsi possible de charger la batterie en moins d'une heure, et de la charger à 50% de sa puissance nominale en vingt minutes.

Cependant, cette charge rapide pourra endommager la batterie électrique de traction. Lorsque la puissance est trop importante, les ions lithium n'ont pas le temps de reprendre la forme originale sur l'électrode de graphite, à la surface de laquelle se forme une couche de lithium métallique. Il existe donc une intensité à ne pas dépasser dans la batterie. L'alternative peut être de remplacer cette électrode de graphite par une feuille d'oxyde de titane, qui autorise une intégration des ions lithium plus rapide. La charge complète de la batterie devient possible en 5 minutes! Cependant la contrepartie est une densité énergétique moindre : 130 Wh/kg.

* Améliorer la sécurité des batteries de traction

Le vieillissement des batteries dans les voitures électriques est une problématique dominante qui peut également impacter la sécurité. Ainsi, le lithium peut à l'usage dégrader l'électrolyte. Le risque, c'est de voir les deux électrodes entrer en contact, provoquant ainsi un court-circuit et donc, une explosion. Pour y remédier, les électrodes de la batterie électrique sont protégées par des séparateurs sophistiqués. En plus de cela, un système électronique important accompagne la gestion de la batterie : vitesse de charge / décharge, température des modules,

fusibles, ... Une autre solution moins couteuse, c'est de se prémunir des courts-circuits à l'aide d'un électrolyte solide. Il s'agit de la batterie « lithium-polymère » dont la société BatScap, filière du groupe Bolloré, détient les brevets. La contrepartie de cette solution, c'est que la batterie doit être portée à 60°C pour fonctionner. En conséquence, la densité d'énergie de cette solution descend à 100 Wh/kg et les performances de la voiture électrique diminuent d'autant.

Diminuer les coûts des batteries de traction

Le budget alloué à la partie batterie par les constructeurs automobiles est de l'ordre de 200€ du kWh. Or, le coût des batteries lithium est aujourd'hui de l'ordre de 500 €/kWh. Il y a donc de gros efforts à faire. Il est par exemple possible de diminuer le coût de l'électrode en cobalt (un matériau donnant lieu à de nombreuses spéculations) par d'autres matières tout aussi stables. Les chercheurs travaillent notamment sur une électrode en phosphate de fer, plus stable et moins chère que le cobalt, mais avec une densité d'énergie moindre. Le cout important des batteries des voitures électriques s'explique surtout par leur faible volume de production, d'abord parce qu'il n'y a pas encore de demande, et aussi que les outils de production sont calibrés pour des petites séries de prototypes. Le lancement d'un véhicule électrique populaire et les volumes qui en découlent devrait grandement contribuer à limiter les coûts de la batterie.

❖ Renforcer l'approvisionnement et le recyclage du lithium des batteries de traction

Les batteries d'un véhicule électrique comptent environ 5 kg de lithium (25kg de carbonate de lithium). Ainsi, pour un marché mondial de 60 millions de véhicules électriques, il faudrait 300.000 tonnes de lithium pour les batteries. Ce chiffre est démesuré par rapport à la production mondiale : 40 000 tonnes en 2011. Pourtant, les ressources existent. Les réserves mondiales sont estimées à 11 millions de tonnes, principalement dans des gisements inexploités, au Canada, en Afrique, en Australie, en Bolivie et surtout au Tibet. Toute la filière d'approvisionnement est à créer, principalement dans des régions peu stables politiquement. Le développement de la voiture électrique risque donc d'avoir autant d'impacts géopolitiques que l'exploitation des gisements d'énergies fossiles. Le lithium est également présent dans les océans, en très faible concentration (0,2 g/m3) mais des chercheurs travaillent déjà à la mise en place de techniques d'extraction en Asie.

Une partie importante d'approvisionnement en lithium pourrait donc rapidement être le recyclage, une fois la première génération de batteries utilisées. Cela apparaît comme un point crucial pour que l'équation économique de la batterie lithium reste équilibrée. Deux solutions existent pour récupérer les matériaux de la batterie de la voiture électrique : chimique ou thermique. Les filières de recyclage restent à créer mais nul ne doute qu'elles se mettront rapidement en place si les voitures électriques se développent.

Vers des batteries sans lithium?

Si le lithium venait vraiment à manquer, la voiture électrique à batterie ne serait pas morte pour autant. D'autres perspectives restent envisageables. Des batteries fonctionnant par exemple au magnésium, un minerai très abondant, sont par exemple en cours de développement, bien qu'elles présentent aujourd'hui des performances trop limités pour la voiture électrique. Des équipes de chercheurs travaillent également à utiliser des enzymes de la biomasse afin de produire des molécules chargées électro chimiquement. Bref, les perspectives de développements autour de la batterie sont infinies!

3.3.2. Le moteur électrique de traction :

3.3.2.1. Définition et principe de fonctionnement :

Le moteur électrique de traction est un composant très simple au cœur du véhicule électrique. Il joue sur les forces d'interaction entre un électroaimant et un aimant permanent. L'électroaimant est alimenté par intermittence par l'énergie de la batterie de traction pour mettre en rotation l'aimant. La simplicité de fonctionnement rime également avec un rendement élevé. 90% de l'énergie électrique est restituée en énergie mécanique. Nous sommes à l'opposé du moteur thermique, qui est avant tout une machine à produire de la chaleur. Ses rendements sont de 35% pour l'essence et de 40% pour le diesel. Le reste de l'énergie que contient le carburant est perdu sous forme de chaleur ou par les frottements de la chaîne de traction complexe. Pour l'électrique, les seules pertes de chaleur se font par effet Joules ou par les très faibles frottements. L'architecture de la chaîne de traction de la voiture électrique est beaucoup plus simple : il n'y a pas besoin de boîte de vitesse ou de composants pour convertir le mouvement vertical des pistons en mouvement rotatif : l'axe du moteur tourne directement sur l'axe des roues de la voiture électrique. Il est amusant de noter que lorsqu'une voiture électrique tombe en panne, il est impossible de la remorquer car la rotation des roues est bloquée par le moteur.

Très utilisé, depuis plus d'un siècle, le moteur électrique est souple, silencieux, ne pollue pas et s'adapte à toutes les situations.

De manière spécifique, le moteur électrique de traction doit :

- ✓ Pouvoir tourner et freiner dans les deux sens de rotation ;
- ✓ Posséder un couple important à bas régime, ainsi qu'un bon rendement.

Pour ces raisons, et en fonction du type de véhicule fabriqué, les constructeurs orientent leurs choix sur :

- Le moteur série ;
- Le moteur à excitation séparée ;
- Le moteur Bruschless (ou moteur synchrone sans balais);
- Le moteur asynchrone.

L'annexe 2 fourni les informations nécessaires concernant la technologie et le principe de fonctionnement des moteurs électriques cités ci-dessus.

Ci-après un tableau récapitulatif exprimant le résultat de comparaison des caractéristiques des deux types de moteur électrique à savoir le moteur à courant continu et le moteur à courant alternatif issu de l'étude et de l'appréciation d'un groupe d'experts.

Tableau 3.2: Comparaison des moteurs utilisés en traction électrique.

Paramètres	Moteur à courant continu	Moteur à courant alternatif
Contrôle de vitesse	Tension, flux	Tension, fréquence
Contrôle de couple	Courant, flux	Courant, fréquence de glissement
Plage de vitesse	4	2
Vitesse maximum	2	5
Puissance massique	2	3
Encombrement	4	5
Rendement	4	5
Récupération freinage	4	2
Facilité de construction	2	5
Refroidissement	2	3
Robustesse	2	5
Bruits	5	5
Simplicité de commande	3	2
Prix	1	2
Pollution	5	5
Entretien	4	5
Total	44	54

(Source : Association Nationale pour la Formation Automobile)

5 = excellent 1 = médiocre

Ainsi, on remarque que Le moteur à courant alternatif est de plus en plus employé pour la traction électrique. A noter que le même groupe d'experts a attribué un total de 21 points au moteur thermique.

3.3.2.2. Perspectives de progrès et nouvelles technologies des moteurs électriques de traction :

Les perspectives de progrès des moteurs électriques sont également considérables : les moteurs utilisés aujourd'hui ont été conçus pour des usages standards de type industriel, comme les machines-outils. Les perspectives d'amélioration du poids, de l'encombrement et de la performance des moteurs des voitures électriques sont donc considérables. En travaillant sur des aimants permanents surpuissants faits d'un alliage néodyme-fer-bore et une nouvelle géométrie, la société française Phœnix International a conçu un moteur deux fois plus compact et léger : des notions cruciales pour une voiture électrique performante. Grâce à ces moteurs dit « à flux axial », les rendements dépassent 90%.

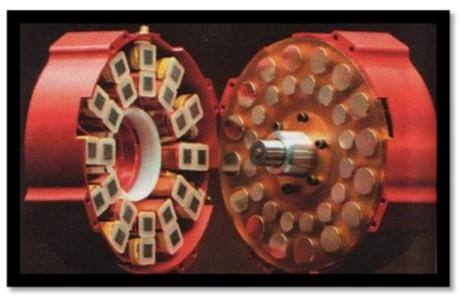


Figure 3.5: Le moteur de Phœnix à flux axial qui offre 30% d'autonomie supplémentaire aux véhicules électriques.

Par ailleurs, la miniaturisation des moteurs permet de repenser l'architecture des véhicules. Michelin a ainsi développé le concept « Active Wheel » où le moteur est directement logé dans la roue. L'espace sous le capot se trouve entièrement libéré, ce qui permet de repenser tous les volumes de la voiture électrique.

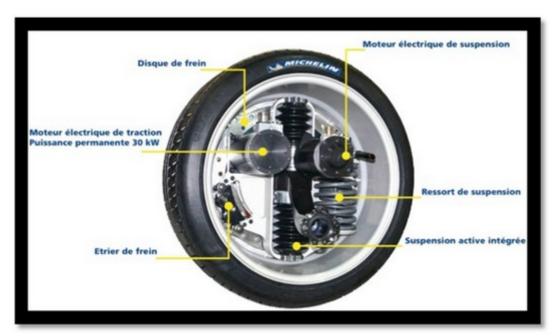


Figure 3.6: L'Active Wheel de Michelin intègre les moteurs de la voiture électrique dans les roues.

3.3.3. L'électronique de puissance dans le véhicule électrique :

Entre la prise de courant, la batterie et le moteur, différents organes permettent de calculer, convertir et délivrer l'énergie dont le véhicule électrique a besoin. Ils constituent l'électronique de puissance :

- Le chargeur adapte le courant apporté par la prise de branchement à ce que la batterie électrique peut recevoir,
- L'onduleur convertit le courant électrique continu fourni par la batterie en courant alternatif dont le moteur du véhicule électrique a besoin,
- Le boitier d'interconnexion distribue l'énergie à la bonne intensité, soit au moteur électrique, soit à la batterie, soit aux autres composants électroniques, en fonction de leurs besoins, et de la phase de roulage du véhicule électrique (charge, accélération, décélération).

3.3.3.1. Les chargeurs :

Pendant la charge, la batterie se comporte comme un récepteur de courant. Cette phase de fonctionnement obéît à des valeurs limites à ne jamais dépasser pour :

- ✓ La tension :
- ✓ L'intensité;
- ✓ Le temps ;
- ✓ La température ;
- ✓ Le dégagement gazeux.

Pour répondre à ces besoins, il existe pour chaque type de batterie un chargeur adapté.

- Le chargeur embarqué,
- Le chargeur stationnaire.

Ces chargeurs sont pilotés par un micro-processeur. Ils s'adaptent automatiquement aux besoins de la batterie en restant dans les valeurs permises. La coupure s'effectue automatiquement en fin de charge.

3.3.3.1.1. L'infrastructure de recharge :

La recharge du véhicule électrique nécessite l'installation de bornes de recharge sur l'ensemble du territoire national, tant en domaine privé que public. Ce parc de bornes est appelé « infrastructure de recharge ».

Pour la recharge des véhicules électriques, deux modes s'opposent – ou se complètent : le branchement du véhicule à une borne électrique permettant une recharge lente ou rapide et l'échange de la batterie en station-service. Ce second mode, communément appelé *QuickDrop*, est principalement défendu par l'industriel Better Place⁷. Dans le contexte actuel d'intense concurrence entre les fabricants de batteries, il n'est pas retenu comme option prioritaire par les fabricants d'automobiles. En outre, le système de *QuickDrop* présente un défaut majeur par son besoin important d'immobilisation de capital pour le stock de batteries dans les stations de recharge.

Pour autant, la recharge de véhicules électriques en borne fixe doit encore faire l'objet de nombreuses décisions avant de se présenter sous une forme commune. Pour des raisons de puissance de recharge et de sécurité de l'utilisateur, le système retenu ne pourra pas reposer sur une prise standard. Des options divergentes peuvent encore être retenues, comme le type d'alimentation (en courant continu ou alternatif), le niveau de sécurité vis-à-vis du risque électrique, divers aspects relatifs à la puissance de la recharge rapide ou encore ... la forme des prises !

L'enjeu est de taille pour les industriels et autres équipementiers : certaines technologies existantes pourraient être employées, évitant ainsi de nouveaux coûts de développement. Une quinzaine d'acteurs majeurs dont les Français Schneider Electric, Legrand, SagemCom, FCI, Nexans ou Maréchal, se sont fédérés au sein d'une association appelée « EV Plug Alliance »

30

⁷ Société internationale qui a développé et vendu des services de charge batterie pour les véhicules électriques. Elle a été officiellement fondée à Palo Alto, en Californie, mais la majorité de sa planification et ses opérations ont été pilotées en provenance d'Israël, où Shai Agassi son fondateur et ses principaux investisseurs résidaient.

pour peser sur les orientations des organismes normalisateurs autour de la définition de la prise située à l'extrémité amont du cordon de recharge.

3.3.3.1.2. La nécessité de l'emploi des énergies propres :

Le véhicule électrique est présenté comme un véhicule « propre » en ce qu'il n'émet ni CO2 ni particules « du réservoir à la roue » (« from tank to wheel » – TTW). Cette « propreté » n'est pas forcément la même pour l'énergie électrique qui remplira ses batteries... C'est pourquoi on calcule également les émissions de CO2 du véhicule électrique « du puits à la roue » (« from well to wheel » – WTW) par mesure des **émissions de CO2 des centrales de production d'énergie électrique**. Cette mesure peut être faite pour un type de centrales, selon leur énergie primaire et leur technologie ; elle est souvent donnée pour un mix énergétique d'une zone géographique, et indiquée en moyenne annuelle ou déclinée selon les saisons ou les heures de la journée. La mesure d'émissions de CO2 peut alors être comparée pour différents types de motorisation ou de carburants (électrique, hybride, diesel, essence, GNL, bioéthanol, etc.).

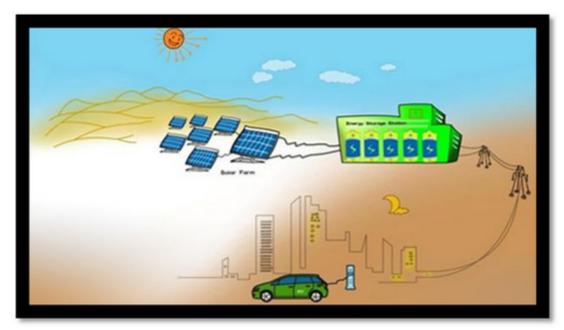


Figure 3.7: l'utilisation de l'énergie propre pour la recharge des véhicules électriques.

3.3.3.2. Les convertisseurs électroniques de puissance :

3.3.3.2.1. Le hacheur :

C'est un convertisseur électronique permettant de faire varier la tension aux bornes du moteur à Courant Continu et par conséquent sa vitesse. Il agit par découpage de la tension

d'où son nom de "hâcheur". Il fait varier le rapport cyclique T1/T2, qui provoque la variation de tension (U moyen).

Pour un moteur à excitation séparée, le convertisseur est composé de deux hacheurs qui permettent d'adapter le moteur à tous les besoins en couple et tension. Il en résulte un fonctionnement très souple et économique.

Une gestion à microprocesseur limite ou stoppe le fonctionnement en cas de température et d'intensités excessives.

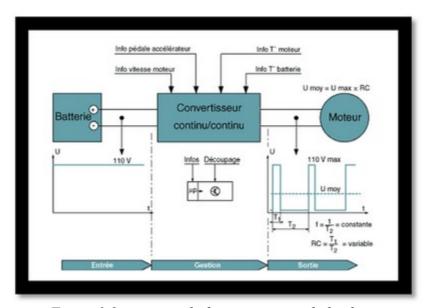


Figure 3.8: principe de fonctionnement du hacheur.

3.3.3.2.2. L'onduleur :

En traction électrique, l'onduleur est un convertisseur continu-alternatif, qui permet d'obtenir trois phases de courant alternatif, décalées de 2p/3 (120°), de fréquence variable de zéro à 50 Hz à partir d'un courant de batterie. Cette technologie permet d'adapter les moteurs alternatifs fabriqués en grande série, qui sont simples, robustes, et peu onéreux. Ce type de convertisseur fait varier uniquement la fréquence et permet d'obtenir ainsi une vitesse de rotation variable.

Ce procédé possède une puissance et un rendement correct à tous les régimes (La vitesse de rotation d'un moteur courant alternatif est fixée par la fréquence ; la tension fixe le couple).

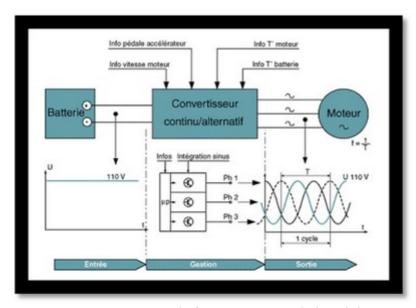


Figure 3.9: principe de fonctionnement de l'onduleur.

Si on résume le chapitre définitions et technologies, les caractéristiques et les enjeux des principaux composants d'une voiture électrique seront :

- 1. La batterie de traction: il s'agit de l'organe clé de la performance de la voiture électrique. Les technologies de batteries au lithium ont considérablement amélioré l'autonomie des voitures électriques et les perspectives de progrès sont considérables.
- 2. Le moteur de traction : organe simple techniquement, il peut permettre d'innover sur l'architecture des véhicules électriques pour améliorer encore leurs rendements.
- 3. **L'électronique de puissance** du véhicule électrique qui coordonne et gère l'utilisation de l'énergie électrique.
- 4. Le recours aux **énergies renouvelables** pour la recharge du véhicule électrique pour assurer le minimum de dégagement des gaz polluants pour la génération de l'énergie électrique.

Chapitre 4:

Contexte mondial de l'industrie automobile et marché mondial des véhicules électriques.

4.1. Introduction:

Alors que la crise du crédit de l'automne 2008 a durablement affecté l'industrie automobile mondiale, l'apparition des débats sur la potentialité d'une substitution partielle ou totale de la voiture traditionnelle thermique par des voitures partiellement ou totalement électrifiées, a posé la question du « devenir écologique » de l'automobile. Les aides accordées par les Etats européens et les investissements consentis dans la recherche de nouvelles motorisations plus respectueuses de l'environnement ont ouvert une réflexion de fond sur les fondements et le devenir à moyen terme de l'industrie automobile.

De nombreux facteurs plaident en faveur de l'émergence d'un marché de masse des véhicules électriques. D'une part, le renforcement des législations impose une amélioration de l'efficacité énergétique et une réduction des émissions de CO2 (gaz à effet de serre). Les objectifs sont multiples, mais les principaux demeurent la réduction de la dépendance à l'égard du pétrole et la diminution des coûts de santé liés à la pollution atmosphérique. D'autre part, les consommateurs sont de plus en plus sensibilisés à la protection de l'environnement et aux changements climatiques. Ils cherchent également à réduire leurs frais de carburant.

Malgré les dissensions et les doutes, force est de constater cependant que les voitures électriques font désormais partie du paysage automobile. Ainsi, l'électricité comme source d'énergie de remplacement devient donc une réalité pour de nombreux pays. Les véhicules électriques permettent d'éviter les émissions polluantes et, par le fait même, de lutter contre les changements climatiques.

4.2. Etat des lieux de l'industrie automobile mondiale :

Réellement, il n'existe pas encore d'un vrai consensus stratégique sur le développement de la voiture électrique au sein de l'industrie automobile. La plupart des positionnements sont encore en construction et depuis l'apparition des débats sur la question en 2008, les alliances et les objectifs des acteurs et des gouvernements ont été largement modifiés et amendés au gré des aléas du marché et des revirements politiques. Pour comprendre ces mutations et les positionnements des acteurs, il faut revenir sur les principaux enjeux qui structurent l'industrie automobile (globale) et favorisent ses reconfigurations.

4.2.1. Les principales caractéristiques du marché automobile mondial :

Les mutations de la géographie productive et commerciale de l'automobile se caractérisent par deux processus fondamentaux qui expliquent les changements majeurs intervenus au cours de la décennie 2000-2010 dans l'industrie automobile :

- Le premier est la montée en puissance des BRIC (Brésil, Russie, Inde, Chine) dans la répartition des parts de marché automobile dans le monde. L'évolution la plus notable est celle que l'on peut observer en Chine qui, en 2009, est devenue le premier marché automobile du monde avec plus de 10 millions d'immatriculations, dépassant celui des Etats-Unis. Alors que les marchés occidentaux affichent une tendance à la stagnation voire à la régression, la part de la demande dans les pays anciennement émergents ne cesse de croître, modifiant de manière significative les orientations stratégiques des constructeurs automobiles ainsi que l'implantation de leurs usines. Par ailleurs, ces mutations contribuent à modifier les rapports de force entre les constructeurs historiques, majoritairement occidentaux, et de nouveaux entrants chinois ou indiens.
- ➤ Le second processus observable réside dans la recomposition des marchés des pays industrialisés et l'évolution de leur segmentation. Dans un contexte de stagnation des ventes, les firmes automobiles ont privilégié une différenciation des modèles proposés qui a conduit à un élargissement conséquent de la gamme des véhicules présentés aux clients. Cet élargissement s'est traduit par une multiplication des motorisations commercialisées, des équipements intérieurs et des carrosseries, contribuant à faire croitre de manière significative la diversité de l'offre automobile qui décline un même produit en une multitude de versions (sport, break, coupé, etc.). Cette quête de différenciation entre les constructeurs a contribué à faire émerger de nouvelles niches et de nouveaux produits, créant parfois de nouveaux segments de marché (l'exemple du Renault Espace en est un bon exemple mais la voiture électrique pourrait en être un autre).

Ces deux évolutions traduisent une nouvelle tendance de fond du marché mondial de l'automobile poussant les constructeurs traditionnels européens, américains et japonais à se disputer des marchés de plus en plus saturés et à faire face à une concurrence de plus en plus sérieuse venue des BRIC sur les marchés émergents.

4.2.2. La configuration du marché mondial d'automobile en 2012 :

Historiquement, on considère que les constructeurs sont les acteurs dominants de l'industrie automobile car ils maîtrisent la totalité des relations entre les différents pourvoyeurs de ressources (fournisseurs, financeurs, travailleurs) ainsi que la relation avec le marché final et les consommateurs.

Cependant, la montée en puissance des pays émergents et l'affaiblissement des constructeurs traditionnels lors de la crise de 2008-2009 ont généré des restructurations profondes de l'activité des multinationales de l'automobile et un repositionnement des acteurs dans la hiérarchie du secteur.

Longtemps dominé par l'Amérique du Nord et l'Europe, le marché automobile mondial s'est clairement déplacé vers l'Asie qui représente à elle seule près de la moitié du marché mondial en 2011 (49,10%). Cette évolution est en grande partie due à la croissance spectaculaire du marché chinois qui a connu une progression de plus de 50% entre 2008 et 2009 et de 33,7% en 2011. La progression du Brésil est aussi remarquable puisqu'il est devenu le cinquième marché mondial en 2009 avec des ventes qui ont doublé entre 1993 et 2009. Les deux autres grands marchés des BRIC que sont l'Inde et la Russie sont également en progression mais ne représentent pas une part aussi importante que la Chine ou le Brésil.

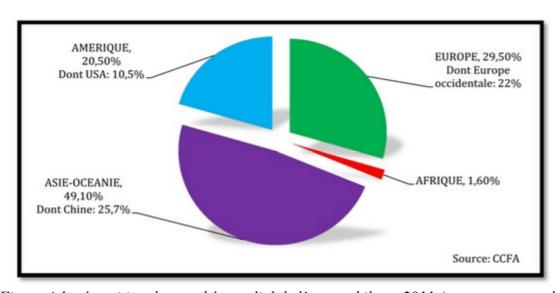


Figure 4.1: répartition du marché mondial de l'automobile en 2011 (en pourcentage des ventes de voitures particulières).

Cette progression des ventes automobiles dans les pays émergents est le résultat de l'apparition d'une classe moyenne associée à la croissance économique qui génère une

demande solvable nouvelle. C'est le cas notamment en Chine où la classe moyenne a littéralement explosé en quelques années.

Néanmoins, la demande automobile chinoise fait aujourd'hui une part inhabituellement importante aux véhicules de luxe ou de catégorie supérieure en raison des fortes inégalités de revenu et du statut particulier de l'automobile qui reste un objet de distinction sociale et un marqueur de réussite. Cette configuration fait du marché chinois un véritable « paradis » pour les constructeurs spécialisés dans le haut de gamme comme BMW ou Daimler et elle contribue à ancrer, dans et en dehors des frontières chinoises, des politiques produits largement orientées sur le « premium » alors même que ce positionnement est intenable à long terme. En effet, à mesure que le marché chinois augmentera et que les revenus se répartiront de manière plus horizontale, ce segment aura tendance à décroître de manière significative au profit de véhicules moyens qui sont aujourd'hui l'apanage des constructeurs locaux comme Cheery, Geely et BYD.

4.2.3. Les recompositions du marché mondial de l'automobile :

La situation qui se dessine actuellement dans le monde et, en particulier, en Chine affiche des signes de remise en cause plus ou moins grande de la hiérarchie actuelle de l'industrie automobile et du rapport de force entre les différents acteurs du « système automobile » (constructeurs, équipementiers, consommateurs et pouvoirs publics). Le glissement du centre de gravité du marché automobile mondial des Etats-Unis vers l'Asie redéfinit une partie des enjeux industriels contemporains et contribue à faire émerger de nouveaux constructeurs issus de ces nouveaux espaces de compétition commerciale.

L'internationalisation des constructeurs traditionnels et leur investissement dans des capacités de production a largement profité aux acteurs locaux qui tendent à devenir des concurrents sérieux sur les marchés émergents mais également au niveau international. En Chine par exemple, le constructeur SAIC (Shanghai Automotive Industry Corporation) a largement tiré parti de son expérience et de ses co-entreprises avec Volkswagen et GM, et avait commencé dès le milieu des années 2000 à développer ses propres gammes de véhicules commercialisées sous des marques locales. La Roewe 7500 qui reprend dans les grandes lignes ce qui avait fait le cœur de la Rover 75 en est un bon exemple. Depuis 2010, les autorités chinoises imposent aux grandes joint-ventures qui lient les firmes européennes, américaines, japonaises et coréennes aux principales entreprises d'Etat (les fameuses SOCs pour State Owned Companies) de développer des marques chinoises qui vont devoir porter les gammes de produits tenus pour prioritaires par le NDRC (National Development and Reform

Commission, qui est le ministère chinois chargé de la planification et de la régulation économique). Le tableau suivant indique comment elles se répartissent. Il exprime clairement la double priorité : le cœur du marché de demain doit être constitué de véhicules low-cost et électriques.

Tableau 4.1: répartitions et orientations des jointes-ventures chinoises.

Partenaire chinois	Partenaire étranger	Nom de marque	Spécificité du véhicule	Lancement
Brilliance	BMW	?	Electrique	?
BAIC	Hyundai	Shou Wang	Moyenne de gamme	Disponible
BYD	Daimler	Denza	Electrique	2014
Chana	Ford – Mazda	?	Bas prix	?
Chana	PSA Peugeot Citroën	Bas prix ? Similaire à la DACIA		?
Chery	Israel corporation	Qoros	Electrique Compacte Véhicule Utilitaire Sport SUV	2014
Dongfeng	Nissan	Venucia	Electrique	2015
Dongfeng	Honda	Honda civic	Bas prix Compacte Voiture de luxe	Disponible
FAW	Volkswagen	Kaili E88	Electrique	2014
SAIC	GM	Wuling	Bas prix Moyenne de gamme	Disponible
SAIC	Volkswagen	Tantos	Electrique	?

(sources : Automotive World, China Car Times et les sites des fabricants)

Cette situation d'émancipation se confirme également pour les constructeurs ne bénéficiant pas de co-entreprises mais profitant indirectement des investissements faits par leurs concurrents internationaux. Le développement et l'installation de chaînes d'assemblages, d'une ingénierie de haut niveau et de toute la gamme des activités équipementières que les grandes jointes-ventures ont développées, permet aux constructeurs locaux comme Cherry, Geely ou BYD, d'exiger le même niveau de technicité et de qualité des équipementiers et sous-traitants chinois travaillant pour la concurrence internationale. De la même manière, la formation d'une main d'œuvre qualifiée sur place contribue à l'amélioration de tout le tissu industriel. En adossant leur production aux exigences des constructeurs mondiaux, les chinois bénéficient d'un savoir-faire technologique et d'unités d'assemblages qu'ils n'auraient pas pu obtenir par leurs seuls investissements. La tendance est renforcée par la présence

d'équipementiers mondiaux comme Bosch ou Siemens ou par le développement d'une activité équipementière par certains constructeurs mondiaux en voie de marginalisation comme constructeurs. On sait par exemple que, faute de pouvoir devenir un constructeur chinois, Mitsubishi Motors s'est transformé en motoriste pour satisfaire la demande chinoise. Ainsi, même si les parts de marché des constructeurs de ce type restent cantonnées aux alentours de 30%, les années d'adossement du développement de l'industrie automobile chinoise aux grandes multinationales du secteur ont d'ores et déjà permis de fournir à la Chine un accès aux dernières technologies automobiles. Cela leur permettra à terme de concurrencer les occidentaux sur leur marché d'abord, et dans des marchés où les normes environnementales et de sécurité sont particulièrement contraignantes ensuite (les normes EURO permettent par exemple d'exclure une large part de l'offre automobile chinoise du marché européen).

Cette configuration est totalement nouvelle dans l'automobile et la redistribution des rôles qui est en train de s'opérer, entre des « anciens » d'un côté et des « nouveaux » constructeurs de l'autre, constitue le nœud des mutations contemporaines de l'industrie et le cadre interprétatif des stratégies à venir.

Comme nous allons le voir, c'est dans ce nouveau contexte mondial qui oppose un monde ancien et un monde nouveau que les débats sur la nécessité d'accélérer la transition vers la voiture électrique s'insèrent. Loin des seules considérations environnementales, nous verrons que l'électrification du parc automobile mondial est un enjeu industriel majeur des années à venir.

4.2.4. La renégociation de la chaine de valeur automobile :

Dans les véhicules thermiques, l'essentiel de la valeur du produit est située dans la chaîne de traction (le moteur à combustion et ses pièces). En outre, la valeur des véhicules électrique réside dans la batterie.

Dans la hiérarchie actuelle de l'automobile, les constructeurs sont les principaux détenteurs de la valeur car ils conçoivent, dessinent et assemblent le véhicule et son moteur.

Les équipementiers fournissent l'essentiel des pièces qui composent une voiture (85% en moyenne) mais n'ont pas la maîtrise de l'ouvrage et donc la valeur ajoutée. Leurs marges sont faibles et dépendent exclusivement des volumes que les constructeurs sont capables de générer et de vendre.

L'avènement des voitures électriques et hybrides bouleverse ce processus car l'essentiel du prix et de la valeur de la voiture réside dans les packs de batteries destinés au stockage de l'énergie du véhicule. Les performances de la voiture, son autonomie, sa fiabilité, sa sécurité, son prix dépendent presque exclusivement de la batterie. Située hors du champ de compétence des constructeurs et des équipementiers traditionnels, la valeur de la voiture électrique est transférée vers des équipementiers spécialisés dans les batteries et dont le marché automobile n'est qu'un débouché parmi d'autres.

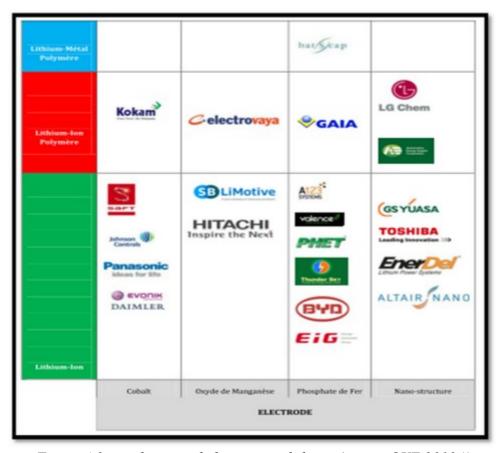


Figure 4.2: producteurs de batterie au lithium.(source OVE 2010A)

4.3. Le développement du véhicule électrique, c'est l'engagement des gouvernements :

Diverses initiatives gouvernementales visant à soutenir et à accélérer l'arrivée des véhicules électriques sont en cours dans de nombreux pays. Ces initiatives, dont voici des exemples, sont souvent le résultat d'une action concertée des gouvernements et de l'industrie :

- ✓ Allemagne : Le gouvernement investit 170 millions d'euros dans la recherche concernant les batteries pour véhicules électriques.
- ✓ France : Le gouvernement a lancé un plan national pour le développement des véhicules électriques et hybrides rechargeables. Ce plan prévoit notamment l'achat

de 100000 véhicules électriques pour le secteur public, l'obligation d'installer des prises de recharge dans les nouvelles constructions, la création d'une filière «batterie» et des investissements dans les infrastructures électriques estimés à 1,6 milliard d'euros.

- ✓ Royaume-Uni : La ville de Londres a mis en place le programme intitulé « An Electric Vehicle Delivery Plan for London ». Ce programme vise à la fois à créer des infrastructures de recharge et à stimuler le marché des véhicules électriques.
- ✓ Nations Unies : Même l'Organisation des Nations Unies participe à la promotion des véhicules électriques en soutenant le Zero Race Tour. C'est une course dont le but est de faire le tour du monde en voiture électrique (et en moins de 80 jours de conduite). L'idée est de faire taire les détracteurs de ce type de voiture non polluant quant à sa viabilité sur longue distance.
- ✓ États-Unis : On estime à 14,4 milliards de dollars américains les sommes mobilisées
 par le gouvernement fédéral en faveur des véhicules électriques. Sur ce total, le
 gouvernement a investi 2,4 milliards de dollars pour la conception des véhicules euxmêmes, dont 1,5 milliard de dollars dans la mise au point et la fabrication des
 batteries.
- ✓ Canada: Le gouvernement a publié la Feuille de route du Canada sur la technologie des véhicules électriques. Il s'agit d'une vision stratégique pour les véhicules électriques à batterie, les véhicules rechargeables et les autres véhicules électriques hybrides aptes à circuler sur les routes.

Ainsi, et à l'instar de la Chine entre 2009 et 2010, en plein creux de la crise économique, de nombreux pays ont annoncé la mise en place de plans de soutien aux véhicules électriques fixant divers objectifs de commercialisation à l'horizon 2020, comme le montre la figure suivante.

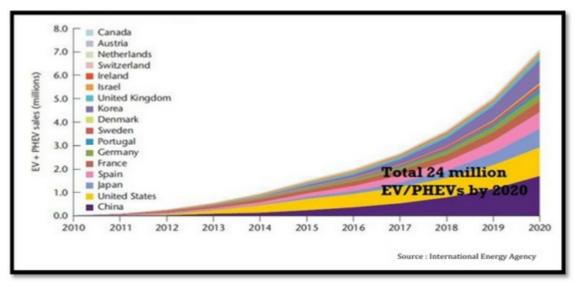


Figure 4.3: objectifs de vente des différents plans nationaux à l'horizon 2020.

4.4. Le marché mondial des véhicules électriques :

4.4.1. Evolution des ventes des véhicules électriques à l'échelle mondiale :

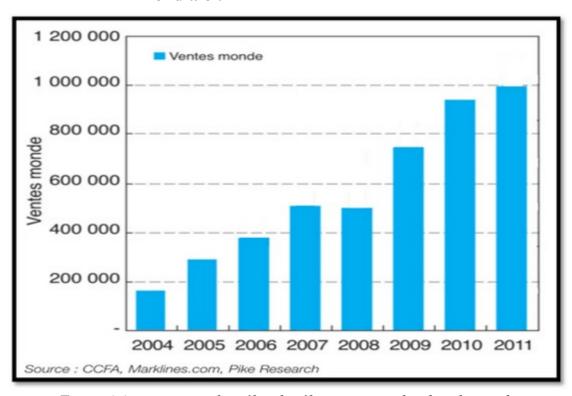


Figure 4.4: statistiques des véhicules électriques vendus dans le monde.

Le premier marché des véhicules électrifiés est le Japon avec 466000 modèles hybrides, hybrides rechargeables et électriques vendus en 2011, soit 13 % du marché national Japonais

des véhicules. Le Japon ainsi présente le taux de pénétration le plus significatif des véhicules hybrides dans le monde.

Aux États-Unis, le marché est moins avancé puisque un peu plus de 275000 véhicules hybrides sont arrivés sur les routes américaines. La Toyota Prius reste le modèle le plus populaire avec la moitié des parts de marché. De son côté, le marché des véhicules électriques repose pour l'instant uniquement sur les chiffres de vente de la Nissan Leaf qui a été vendue à 10000 exemplaires l'année dernière, et sur ceux de la Chevrolet Volt avec 7671 unités vendues en 2011.

En France, il s'est vendu, en 2011, environ 13000 véhicules hybrides (ce chiffre ne comprend pas les véhicules équipés d'un système "stop and start" qui n'entrent pas dans les statistiques des véhicules hybrides), chiffre en forte progression par rapport à 2010. Parmi ceux-ci, 8724 provenaient du groupe Toyota (y compris la marque Lexus et sa gamme hybride), avec notamment le modèle Auris qui s'est presque deux fois mieux vendu que sa devancière, profitant de la préférence de plus en plus marquée du marché européen pour les véhicules compacts.

Du côté des véhicules électriques, l'alliance Renault – Nissan a, quant à elle, vendu, en France, 1164 véhicules électriques dont les trois quarts sont des Kangoo car les ventes de la berline Fluence ont démarré plus tard. PSA Peugeot Citroën a vendu 645 C-zéro et Peugeot 639 i-On (les deux équivalents du même modèle électrique dans le groupe PSA).

4.4.2. Progression future du marché des véhicules électriques :

En termes de progression future, les dernières estimations font état d'un marché mondial de l'ordre de 2700000 véhicules électriques et hybrides vendus annuellement en 2016 (source : Automotive Compass). Le tableau suivant montre la prévision de la production de la motorisation électrique et hybride à moyen terme à l'horizon de 2016.

Tableau 4.2: prévision de la production de la motorisation électrique et hybride mondiale à l'horizon 2016.

_	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Asie- Pacifique	34 295	51 394	156 640	232 083	332 114	361 881	408 596	429 845	806 681	1 220 975	1 449 839	1 553 229	1 615 945	1 667 830	1 690 518
Amérique du Nord	0	69	10 136	33 239	60 318	89 976	99 983	113 111	193 429	290 048	380 602	487 104	512 923	539 015	548 606
Europe de l'Est	0	0	0	0	0	0	0	17 335	21 625	26 539	32 067	32 923	34 309	39 071	40 402
Europe le l'Ouest	0	0	0	0	2 067	19 406	43 041	46 088	70 500	108 576	151 598	170 124	247 002	358 566	373 269
TOTAL	34 295	51 463	166 776	265 322	394 499	471 263	551 620	606 379	1 092 235	1 646 138	2 014 106	2 243 380	2 410 179	2 604 482	2 652 795

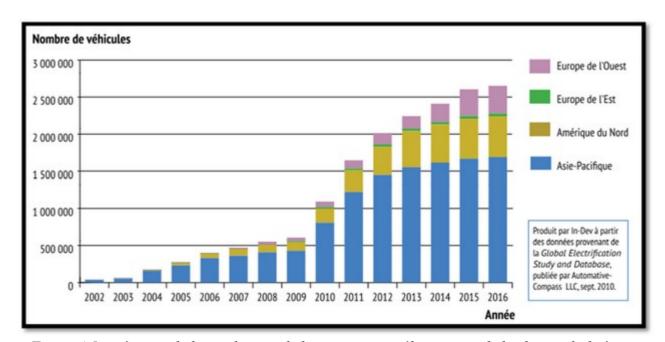


Figure 4.5: prévision de la production de la motorisation électrique et hybride mondiale à l'horizon 2016.

Ainsi, le marché des véhicules hybrides et des véhicules électriques est en progression, mais pas aussi forte que celle que les experts du secteur pouvaient espérer.

Nous allons essayer de comprendre quelles sont les raisons et les freins à ce lent déploiement, en observant le cas particulier du véhicule électrique qui cristallise le plus de critiques et met le plus en lumière les problématiques liées à la diffusion de masse des véhicules électrifiés.

4.4.3. Les problèmes qui freinent l'évolution du marché mondial des véhicules électriques :

4.4.3.1. Les consommateurs sont-ils prêts?

On parle souvent de la réticence des consommateurs à changer leurs habitudes et de leur appréhension vis-à-vis des nouvelles technologies. Cette explication avait déjà été avancée au début de l'apparition des véhicules hybrides et revient encore régulièrement à propos des véhicules électriques.

Par exemple, Cetelem a réalisé une enquête poussée dans dix pays européens afin de questionner les Européens sur la perception qu'ils ont du véhicule électrique. Un des premiers éléments qui ressort de l'enquête est que les Européens sont plutôt prêts à s'équiper. On remarquera que les Français sont parmi les plus réticents à l'achat d'un véhicule électrique, avec les Espagnols et les Anglais.

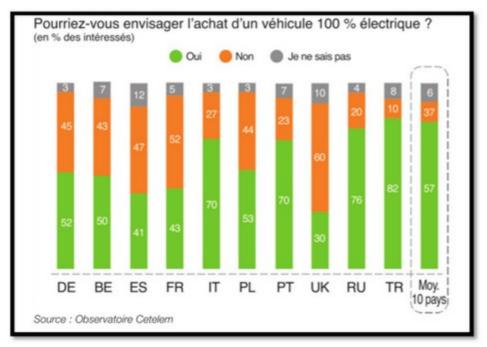


Figure 4.6: Intérêt des européens pour l'achat d'un véhicule électrique.

Alors qu'il est souvent dit que l'image des véhicules électriques est floue, on voit dans cette enquête que ce n'est pas forcément le cas.

Les clients européens sont globalement assez au fait des avantages des véhicules électriques, notamment en termes de performances environnementales : les pollutions locales (émissions de particules et d'oxyde d'azote) et les émissions de CO2 peuvent être fortement réduites suivant l'origine de l'électricité utilisée dans le véhicule.

Mais alors pourquoi les ventes de véhicules électriques ne démarrent-elles pas plus rapidement ?

4.4.3.2. Quels freins à l'achat d'un véhicule électrique ?

L'observatoire Cetelem liste également les raisons du désintérêt pour ce type de véhicule, au premier rang desquelles nous retrouvons les questions que se posent les éventuels acheteurs d'un véhicule électrique : de quelle autonomie vais-je disposer ? Quelle sera la durée de la recharge ? Pourrai-je utiliser mon véhicule à tout moment ? Est-ce si économique ? Est-ce vraiment aussi propre qu'on le dit ? Autant de questions qui peuvent paraître bloquantes. Essayons de les décrypter.

4.4.3.3. L'autonomie est-elle un point bloquant?

Le véhicule tout électrique et sa batterie sont encore sources d'inquiétudes (autonomie, réseau de recharge) : la peur de la panne représente un frein incontestable pour des consommateurs qui privilégient encore les véhicules traditionnels capables de leur assurer l'autonomie suffisante pour des déplacements longs. Les besoins de déplacements quotidiens sont pourtant largement composés de trajets courts ; plus de la moitié est inférieure à 50 km et quasiment 80 % d'entre eux sont inférieurs à 100 km sur la journée.

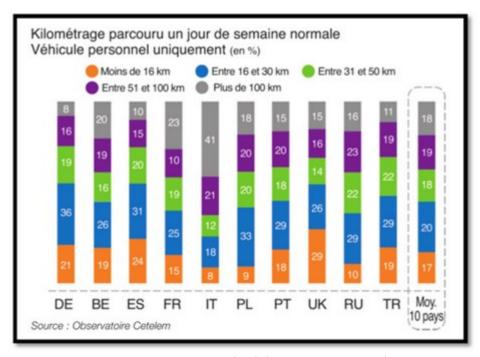


Figure 4.7: Répartition des kilométrages journaliers.

Si nous choisissions rationnellement notre véhicule en regard de nos besoins de déplacement quotidiens, un véhicule électrique conviendrait. Certes, nous ne pourrions pas partir en vacances en Espagne mais les solutions de location et les autres modes de transport pourraient être un complément idéal (sous réserve des coûts de ces solutions) à défaut d'une rupture technologique dans le domaine des batteries.

Mais il existe une réelle fracture entre les besoins des conducteurs européens et leurs critères de sélection d'un véhicule. La figure suivante montre que les consommateurs exigent souvent des autonomies surdimensionnées : la majorité estime que 250 km est le minimum vital pour ce type de véhicules. Ce qui est largement au-dessus de nos besoins quotidiens qui excèdent rarement 100 km et resterait de toute façon insuffisant pour des déplacements exceptionnels de plusieurs centaines de kilomètres. De fait, les consommateurs veulent encore conserver la flexibilité d'usage de leur véhicule.

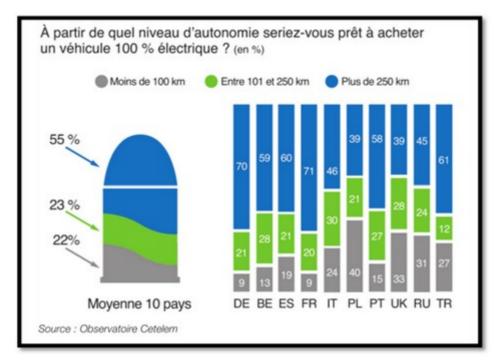


Figure 4.8: Autonomie électrique demandée par les consommateurs européens.

En effet, avec une autonomie de 250 km, partir en week-end avec son véhicule deviendrait possible. Mais même si les progrès sont réels et que les fabricants de batteries proposent des batteries plus légères et plus compactes, il est fort probable qu'un véhicule électrique n'aura jamais une autonomie équivalente à celle des véhicules thermiques actuels. Le consommateur devrait alors accepter d'acheter un véhicule dont les performances seront dégradés par rapport aux véhicules qu'il avait l'habitude d'acquérir.

4.4.3.4. Et la recharge ?

Fin 2011, la France ne comptait que 1500 à 2000 bornes de recharge (lentes ou rapides) et l'Europe un peu moins de 15000. À fin 2013, la situation devrait être de10000 bornes en France et 50000 en Europe. C'est en fait trop peu pour rassurer et attirer en masse les consommateurs vers le véhicule électrique. Alors les constructeurs et les gouvernements soutiennent le marché en installant des bornes sur la voie publique, comme la Ville de Paris ou Renault qui a encouragé ses clients à s'équiper de bornes de recharge rapide en les proposant à un tarif préférentiel.

De plus, les temps de recharge peuvent également rebuter. Il faut compter plusieurs heures (en charge lente, chez soi par exemple) pour recharger une batterie entièrement déchargée. Est-ce un problème ? Pas vraiment, car un véhicule passe en réalité beaucoup de temps stationné, et ce temps pourrait être utilisé pour la recharge. En outre, les bornes de recharge récentes proposent des solutions pour gérer les temps de recharge et profiter des tarifications heures creuses. Dans les cas d'urgence, des bornes de recharge rapide (environ 30 minutes, mais cela peut être plus rapide suivant la capacité de la batterie et le besoin réel) sont nécessaires afin de compléter le réseau de bornes classiques.

Le fond du problème reste de savoir si les consommateurs arriveront à passer outre leur inquiétude de tomber en panne ou de ne pas disposer d'un véhicule complètement rechargé à tout moment et de devoir patienter quelques heures avant de retrouver l'autonomie maximale.

4.4.3.5. Est-il économique de posséder un véhicule électrique ?

Le deuxième point bloquant concerne le prix de véhicules électriques. En effet, à l'achat, ces véhicules sont notoirement plus chers que les véhicules traditionnels essence ou Diesel. Pour les véhicules électriques, ce surcoût peut très facilement se situer entre 15 000 et 20000 € et dépend principalement de la taille de la batterie.

Pour inciter à s'équiper, de nombreux pays ont mis en place des systèmes de primes à l'achat permettant de réduire, en partie, le surcoût lié à l'électrification des véhicules.

Tableau 4.3: Objectifs nationaux et primes à l'achat en Europe.

Pays	Objectif	Prime pour véhicule hybride	Prime pour véhicule électrique
Allemagne	Parc 1 M VE		5 ans d'exemption de taxe de cirulation
Autriche		800 €	
France	Parc 2 M VE	10 % du prix d'achat jusqu'à 4 000 €	7 000 € (max 20 % du prix du VE)
Espagne	Parc 0,25 M VE + VH	2 000 €	7 000 €
Irlande		2 500 €	5 000 €
Italie	-		Bonus : 20 % du prix du VE (max 5 000 €)
Danemark			Exemption de taxe d'import (entre 105 % et 180 % du prix du véhicule)

Ce surcoût peut aussi être compensé par les économies liées à l'utilisation du véhicule. Le bilan présenté à la *figure 4.8* a été réalisé pour un véhicule électrique dont le surcoût à l'achat par rapport à la version essence est de l'ordre de 17000 €. Le calcul prend en compte toutes les dépenses réalisées pendant 15 années d'utilisation du véhicule électrique comparées à celles de véhicules essence et Diesel : dépenses en carburant et énergie, dépenses de maintenance et d'assurance.

Deux types d'usages ont été pris en compte : un usage exclusivement urbain (à gauche) et un usage moyen (à droite), représentatif d'un mélange d'usages urbains, routiers et autoroutiers sur une année.

Au-delà des problématiques d'autonomie, l'usage d'un véhicule électrique fait le plus de sens sur l'usage urbain. Effectivement, c'est sur ce profil que le véhicule électrique apporte le plus de gains en consommation d'énergie (meilleur rendement du moteur électrique et récupération d'énergie au freinage) et qu'il récupère une grosse partie de son retard économique sur les véhicules thermiques.

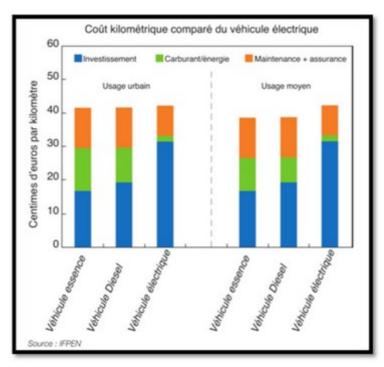


Figure 4.9: Bilans économiques comparés véhicule électrique/véhicules thermiques.

Sur un usage urbain, l'utilisation d'un véhicule électrique est économiquement au même niveau que les alternatives thermiques. Sur un usage mixte urbain/autoroutier, le véhicule électrique reste moins performant, le surcoût est alors d'environ 10 %. Le bilan pourrait s'améliorer si le prix des batteries continue de décroître et si le prix des carburants (essence et Diesel) continue d'augmenter plus vite que le prix de l'électricité. Dans le même temps, il faut rappeler que la consommation unitaire des véhicules thermiques devrait également décroître ; une évolution qui est souvent omise dans les comparaisons.

De plus, il convient de rappeler que les consommateurs font rarement un calcul de coûts complet sur plusieurs années. Le prix d'achat du véhicule reste un facteur primordial qui peut pénaliser un véhicule électrique plus cher à l'achat qu'un véhicule thermique.

4.5. Conclusion:

Si les véhicules hybrides se développent rapidement aujourd'hui et ont permis de lancer le marché des véhicules électrifiés, c'est en grand partie grâce à leur plus grande flexibilité. Le développement des véhicules électriques sera sans doute plus long; Il passera par un savant mélange entre améliorations techniques, d'une part, et acceptation plus importante des clients pour des véhicules à autonomie plus réduite, d'autre part.

Concrètement, un élargissement de l'offre de véhicules sera nécessaire : batteries plus puissantes, stockant plus d'énergie et rechargeables en des temps acceptables, sans tomber dans le suréquipement afin de rester dans des limites de prix compatibles avec les exigences des clients de l'automobile. À cet égard, la stabilité des politiques publiques (incitations, financement d'infrastructures etc.) et leur cohérence, par exemple au niveau européen, seront un élément essentiel dans ce développement. Ces mêmes clients devront, quant à eux, apprendre à appréhender ces nouveaux véhicules.

Chapitre 5:

Contexte tunisien de l'automobile.

5.1. Introduction:

Après avoir analysé le contexte mondial de l'industrie automobile et observé de près la tendance du marché mondial des véhicules électriques, nous passons maintenant à l'analyse du contexte tunisien afin d'évaluer l'opportunité de développement du marché de véhicules électriques en Tunisie.

Sachant que jusqu'à la date d'écriture de ces lignes, aucune arrivée officielle d'un véhicule électrique en Tunisie n'a été notée.

5.2. Cadre règlementaire :

La commercialisation de matériels de transport routier fabriqués localement ou importés est soumise à un cahier des charges conformément à l'arrêté des ministres du commerce, de l'industrie et du transport du 10 août 1995 (Journal Officiel de la République Tunisienne N°80 du 6 octobre 1995, à partir de la page 1900).

L'article 3 de ce cahier des charges exige que toute marque commercialisée (importée ou fabriquée localement) doit être représentée en Tunisie par l'intermédiaire d'un ou de plusieurs concessionnaires dûment agréés conformément à la règlementation en vigueur et satisfaire aux conditions exigées pour l'exercice de la profession en ce qui concerne notamment les locaux, le personnel et les effectifs spécialisés, les installations et les équipements requis ainsi que le réseau de services après-vente implantés à travers le territoire du pays.

Il est à noter que l'importation des véhicules par les concessionnaires agrées est soumise à l'octroi d'un agrément annuel (quota) pour chaque modèle à commercialiser délivré après examen du dossier technico-commercial par la Commission Interdépartementale de Suivi.

En outre, la réglementation tunisienne actuelle ne tient pas en compte jusqu'à maintenant des véhicules hybrides et électriques et il n'y a aucune mesure de promotion de cette catégorie à l'instar des pays européens qui disposent d'une réglementation spécifique pour inciter les consommateurs à s'équiper de ce genre de véhicules par la mise en place de systèmes de primes à l'achat (bonus écologique).

5.3. Le marché tunisien de l'automobile :

Longtemps « détenu » par les marques d'automobiles européennes, Le marché de l'automobile en Tunisie se diversifie récemment par l'entrée sur le marché de nouvelles marques, notamment les voitures coréennes. Cette diversification engendre une redistribution des parts de marché dans un secteur fortement contrôlé par l'état.

5.3.1. Le consommateur tunisien et l'automobile :

Alors que dans d'autres pays la flambée des prix de pétrole frappe de plein fouet le marché des automobiles, le consommateur tunisien demeure indifférent et ne se prive pas encore du luxe de s'offrir une voiture; Un engouement phénoménal que reflètent les résultats d'une étude effectuée dans ce sens par l'ambassade de France à Tunis, montrant qu'une famille tunisienne sur cinq possède une voiture.

Cette étude a pour but d'analyser les tendances du marché automobile en général à travers toutes ses composantes, à savoir la taille du parc et l'importance de l'activité dans le secteur des équipements automobiles. Les résultats de cette étude ont révélé que le parc automobile tunisien qui compte 1,1 million de véhicules place la Tunisie à la tête des pays du Maghreb en termes de nombre de voitures par rapport à la population. Le taux d'équipement automobile tunisien se situe en fait à plus de 20%. C'est-à-dire que le un cinquième (1/5) de la population possède une voiture.

Les statistiques font ainsi ressortir qu'une famille sur cinq possède sa propre voiture, ce qui témoigne de l'engouement des Tunisiens pour ce genre d'équipement surtout que l'acquisition d'une voiture est devenue plus facile par le biais des crédits bancaires offrant la possibilité du paiement échelonné. Cet engouement ne semble pas être freiné ou même ralenti par la hausse des prix des carburants contrairement à ce que l'on peut constater dans plusieurs pays ou bien évidemment par le recul du dinar tunisien contre l'euro et la hausse des prix des voitures qui en résulte. La preuve, c'est que 40% des véhicules circulant sur nos routes sont relativement neufs et dont l'âge ne dépasse pas les 10 ans.

5.3.2. Evolution du marché automobile tunisien :

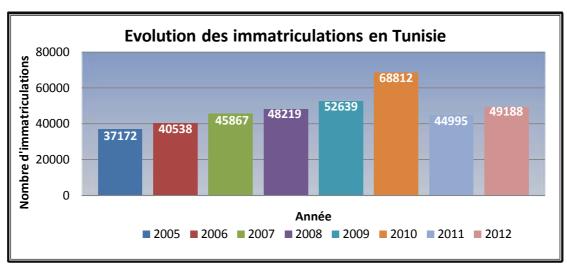


Figure 5.1: évolution des immatriculations de véhicules particuliers et utilitaires neufs en Tunisie. (Source : ministère du commerce)

On remarque bien que l'évolution des immatriculations de véhicules neufs (VP et VU) en Tunisie a régressé après la révolution suite à la décision de l'état de diminuer les importations pour réduire l'insuffisance de la réserve nationale de la devise et l'endettement excessif du consommateur afin préserver le plus que possible l'équilibre de la balance commerciale.

5.3.3. Acteurs commerciaux et concurrence:

On recense actuellement 17 opérateurs commerciaux tunisiens actifs dans le secteur de la distribution d'automobile. Ces opérateurs, appelés concessionnaires agrées, sont évidemment inscrits dans le cahier des charges conformément à l'arrêté de 10 août 1995 évoqué dans le cadre réglementaire et se « battent » pour avoir le quota annuel le plus significatif accordé par l'état.

Tableau 5.1: Liste des concessionnaires automobiles tunisiens.

	Nom et adresse du concessionnaire	Marque(s)
1	ADEV 39 Avenue Kheireddine Pacha 1002 Tunis	NISSAN
2	Afrique Auto Z.I Charguia II 2035, Tunis Carthage ARIANA	OPEL CHEVROLET
3	Alpha Ford Autoroute A1 - Sortie Hammam-lif, Mornag - Ben Arous	Ford
4	Alpha Hyundai Motor Autoroute A1 - Sortie Hammam-lif, Mornag - Ben Arous	HYUDDAI
5	Alpha International Autoroute A1, Sortie Hammam Lif ,Mornag -Ben Arous	JAGUAR -ROVER
6	ARTES RENAULT Tunisie 39, Av. Kheïreddine PACHA 1073 MONTPLAISIR TUNIS	RENAULT
7	Aures 28, Rue 8600 BP N°57 2035 TUNIS CARTHAGE ARIANA	CITROËN
8	Ben Jemaa Motors 16, rue de l'artisanat Z.I Ariana Aéroport- charguia 2	
9	BSB Zone industrielle La Marsa (à côté de Promogro)	TOYOTA
10	City Car 51, Rue Ali Darghouth - 1001 Tunis	KIA
11	Economic Auto 75, Avenue de Carthage - Tunis	mazpa
12	Ennakl Z.I Ariana - Aéroport - BP 129 1080 Tunis Cedex Tunisie	Audi SERT
13	Italcar Boulevard principal les berges du lac-2045-Tunis	

14	Le moteur Rue No. 8 ZI Charguia 1, Tunis, 2035	Mercedes-Benz
15	Sayara GP1 Km13 Route de Sousse – 2034 Ezzahra, Tunis	VOLVO
16	Sotudis Route de la ceinture, 4022 Z.I. Akouda - Sousse	SSANGYONG
17	Stafim Rue du Lac Leman - 1053 Les Berges du Lac	PEUGEOT

(Source : ministère du commerce et sites web des concessionnaires).

La marque française Peugeot a terminé l'année 2012, avec le score le plus fort en matière de ventes de véhicules toutes marques (Voitures Particulières VP et Voitures Utilitaires VU). Avec 6957 immatriculations, elle a devancé ainsi Volkswagen qui s'est retrouvée à la seconde place (6298 immatriculations), juste devant Renault classé 4ème (avec 6207 ventes) et devant Citroën qui a terminé le peloton de tête, devant Fiat et KIA.

Peugeot a enregistré même une hausse de 19,5 % de ses immatriculations de 2011 à 2012. Elle doit cela à un marché, hors quota, signé avec le ministère du Commerce. Ceci est aussi le cas de Citroën qui booste de plus de 15 % ses ventes de l'année 2012 comparativement à 2011. La hausse des immatriculations, au cours de 2012 (+9,4 %) et malgré les restrictions d'importation, s'expliquent par l'importation, en 2012, du reliquat de l'année 2011.

Tableau 5.2: Marché des véhicules toutes marques (VP & VU) pour l'année 2012.

Rang	Marque	Nombre d'immatriculations en 2011	Nombre d'immatriculations en 2012	Part de marché	Evolution 2011/2012
1	PEUGEOT	5824	6957	14.1%	19.5%
2	VOLKSWAGEN	7164	6298	12.8%	-12.1%
3	RENAULT	6138	6207	12.6%	1.1%
4	CITROEN	5068	5863	11.9%	15.7%
5	FIAT	4057	3845	7.8%	-5.2%
6	KIA	3418	3450	7%	0.9%
7	FORD	3031	2918	5.9%	-3.7%
8	DACIA	998	1659	3.4%	66.2%

9	MITSUBISHI	2757	1654	3.4%	-40%
10	CHEVROLET	841	1523	3.1%	81.1%
11	ISUZU	549	1479	3%	169.4%
12	SEAT	1105	1319	2.7%	19.4%
13	MAZDA	881	1147	2.3%	30.2%
14	TOYOTA	695	883	1.8%	27.1%
15	IVECO	412	669	1.4%	62.4%
16	BMW	382	609	1.2%	59.4%
17	SSANGYONG	336	533	1.1%	58.6%
18	MERCEDES-BENZ	285	496	1%	74%
19	NISSAN	379	464	0.9%	22.4%
20	HYUNDAI	32	417	0.8%	1203.1%
21	AUDI	412	369	0.7%	-10.4%
22	OPEL	78	173	0.4%	121.8%
23	ALFA ROMEO	85	132	0.3%	53.5%
24	LAND-ROVER	18	64	0.1%	255.6%
25	VOLVO	50	60	0.1%	20%

(Source : Ministère du Commerce).

Les marques les plus touchées par la baisse, ont été au nombre de cinq, notamment Volkswagen avec une chute de plus de 11 % de ses ventes qui ont certainement été touchées par les tensions sociales au sein de l'entreprise après la révolution.

KIA s'en tire avec une petite hausse de moins de 1 %, grâce à l'effort commercial du concessionnaire qui aura su panser les plaies de la révolution. Autre concessionnaire confisqué, Ford dont les immatriculations ont baissé de 3,7 %, en raison d'une diminution de quota. Les 3081 véhicules qui devaient être alloués uniquement à Ford, ont été répartis sur toutes les marques du groupe Alpha-Ford (Ford, Jaguar, Land rover, Man et Hyundai). Chez Fiat, la baisse de 5,2 % s'explique plus par la diminution de 11,4 % des ventes de VP, malgré

la hausse de plus de 1078 % de ses ventes en VU (271 unités en 2012, contre seulement 23 en 2011). La marque la plus touchée par cette baisse est surtout Mitsubishi avec -40 %. Divisée entre SAM de la famille Ben Jemâa pour les VP où les immatriculations ont sauté de presque 298 %, c'est surtout le VU, monté en CKD chez ICAR du groupe Mabrouk, qui enregistre une baisse de 56,6 %.

5.4. L'industrie automobile en Tunisie :

La mutation de l'industrie automobile mondiale se poursuit de manière accélérée avec une externalisation croissante de la production de pièces et composants par des fournisseurs indépendants des grands constructeurs. Une grande partie des équipementiers incorporent des anciennes filiales des constructeurs et aujourd'hui 70 à 80% par des fournisseurs externes.

La mutation est aussi géographique avec une double tendance à se rapprocher des marchés émergents et à produire à moindre coût. La localisation des équipementiers peut devancer ou suivre celle de l'assemblage. Ainsi l'implantation de Renault en Roumanie a entraîné celle de nombreux fournisseurs allant des vitres aux faisceaux de câbles, batteries et de nombreux autres composants.

Les équipementiers cherchent aussi de nouveaux sites de production qui soit à la fois rentables, compatibles avec les exigences logistiques des constructeurs (une pièce arrive sur la chaîne une demie heure avant le montage) et avec les exigences de qualité des produits surtout pour les fournisseurs de premier rang.

En conséquence, les premières implantations dans les pays émergents et en particulier en Tunisie se sont accélérées ces dernières années. Au départ, de nombreuses unités de production étaient construites pour répondre aux exigences de compensation (automobiles contre composants) qu'imposaient ces pays aux constructeurs automobiles, comme le cas de la Tunisie. Aujourd'hui le site Tunisie apparait comme très intéressant aussi bien en coût des facteurs qu'en proximité logistique d'autant que les prix dans les pays de l'est de l'Europe grimpent très vite.

Par ailleurs, les fournisseurs ne se contentent plus de fabriquer les pièces selon les spécifications des constructeurs mais agissent sur l'industrialisation et de plus sur la conception des produits. Cette conception évoluant très vite dans le temps, ces fournisseurs ont besoin de personnel qualifié pour concevoir et s'adapter à la souplesse requise par les clients. La Tunisie est encore bien placée avec le niveau de formation de ses cadres et

techniciens bien que certains profils pointus exigent des formations complémentaires non dispensée dans les instituts et écoles tunisiennes.

L'industrie automobile tunisienne rassemble trois secteurs principaux à savoir :

5.4.1. Le secteur « Carrosserie et Montage automobile » :

27 entreprises opèrent dans ce secteur dont 20 unités de Carrosseries et Remorques, 03 Unités Fabrication des Autobus et Autocars, 03 Unités de montage camionnettes et une Unité de montage Tracteur Routier.

La capacité de production du secteur Carrosserie et Montage automobile en 2012 s'élève à 600 Million de Dinars tunisiens, dont 90 Million de Dinars tunisiens comme valeur à l'export (source : ministère de l'industrie).

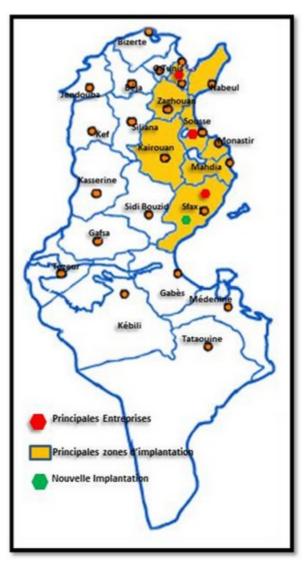


Figure 5.2: Implantation des industriels de Carrosserie et Montage automobile. (Source : ministère de l'industrie)

5.4.1.1. Principaux producteurs locaux:

Les principaux fabricants tunisiens d'automobile sont : ICAR, IMM, COMET, SICAME, SETCAR, ALPHA BUS, WallysCar, ...

Les Marques fabriquées localement sont: Camionnette Pick-up 4x2 à simple cabine (Mitsubishi, IZUSU), Camionnette < 3.5T (Iveco), Tracteur Routier (Volvo), Autobus (Mercedes, Man, Volvo, Volkswagen...).

Tableau 5.3: Principaux Fabricants d'automobile en Tunisie.

Nom du fabricant	Produit	Capacité de production par an (tous produits)	Lieu d'implantation
SETCAR	Bus, bus touristiques, bus articulés, mini bus et tracteurs routiers « VOLVO » et « SETCAR »	440 unités	Tunis
ICAR	Bus, bus touristiques « MERCEDES » et « MAN LATINA AMERICA », camions « IVECO », camionnettes « MITSUBISHI » et triporteurs « PIAGGIO ».	3500 unités	Sousse
ALPHA BUS	Bus « MAN » et « IVECO »	250 unités	Tunis
Industries Mécaniques Maghrébines (IMM)	Camionnettes et camions « ISUZU »	1200 unités	KAIROUAN
WALLYS CAR	véhicules de loisirs et de plaisance « IZIS »	800 unités	Tunis
MEDICARS	Camionnettes « MAHINDRA »	600 unités	Sousse

(Source : Ministère de l'Industrie).

5.4.1.2. Incitations et privilèges accordés au secteur:

L'activité de Montage des camionnettes bénéfice du privilège fiscal relatif au soutien de la compétitivité de l'industrie locale régie par Le décret d'application n° 2004 – 1090 du 17 mai 2004, et le carrossage des Autobus et des Autocars bénéficie également du privilège fiscal relatif à l'encouragement de l'industrie locale.

5.4.1.3. Fabricants tunisiens de véhicules particuliers :

Jusqu'à maintenant, il n'y a que deux fabricants de véhicules particuliers en Tunisie à savoir **Wallyscar** et la compagnie industrie auto **BARKIA** :

5.4.1.3.1. WALLYSCAR:

C'est un fabricant tunisien qui produit depuis 2007 des véhicules de loisirs de la marque IZIS.



Figure 5.3: le modèle IZIS du fabricant tunisien WallysCar.(source : site web de Wallayscar)

L'unité de production qui s'étale sur près de 1 hectare, regroupe l'usine d'assemblage, les aires de stockage, d'expédition et les bureaux de développement. Wallyscar a une capacité de production d'environ 800 véhicules par an. Depuis 2007, Wallyscar possède son propre site de composite ce qui lui a permis d'accroître ses performances en terme de qualité et de flexibilité.



Figure 5.4: L'usine du fabricant tunisien WallysCar (source : site web de Wallayscar)

Si Wallyscar a pu se positionner sur des marchés internationaux c'est parce qu'il a conçu son modèle IZIS en respectant le cahier des charges suivant:

- ✓ Une qualité de fabrication respectant les normes les plus strictes
- ✓ Un véhicule tout chemin amusant à conduire et maniable
- ✓ Une mécanique fiable alliant puissance et sécurité
- ✓ Un coût d'achat et d'entretien minimal
- ✓ Un réseau d'après-vente international
- ✓ Une voiture résistant aux intempéries
- ✓ Un esprit ludique

Il a choisi le laboratoire industriel UTAC (Union Technique de l'Automobile et Cycle) basé en France qui est un expert auprès des instances européennes et internationales et l'un des plus importants dans le monde pour l'homologation de son produit.

5.4.1.3.2. COMPAGNIE INDUSTRIE AUTO BARKIA:



Figure 5.5: présentation officielle de la compagnie industrie auto BARKIA. (Source : site web du fabricant)

Il s'agit d'un nouveau projet industriel proposé par un homme d'affaire tunisien et dont l'implantation est programmée dans la région de Dokhane (Hencha, Sfax). Ce nouveau fabricant n'a pas encore entré en production jusqu'à maintenant.



Figure 5.6: présentation officielle du véhicule BARKIA type Africa. (Source : site web du fabricant)

5.4.2. Le secteur « composants mécaniques automobile » :

Avec une capacité de production d'une valeur totale de 800 Million de Dinars tunisiens en 2012, le secteur des composants mécaniques automobile comporte 66 entreprises au total dont 26 d'entre elles sont totalement exportatrices. Les réalisations à l'export de ce secteur sont évaluées à 563.45 Million de Dinars tunisiens en 2012 soit 70% de la production (source : ministère de l'industrie).

Les principaux fabricants (équipementiers en composants mécaniques automobile) sont : Faurecia, SIA, DAV Tunisie (Valeo), MGI COUTIER, MISFAT, Bontaz Centre Tunisie, CENTRAX...

Les composants fabriqués localement sont: Airbag, Ceinture de Sécurité, Pompe à Eau et à Essence, Filtres, Jantes, Bloc cylindre, Culasse, crémaillères, Volant, Plaquette de Frein...

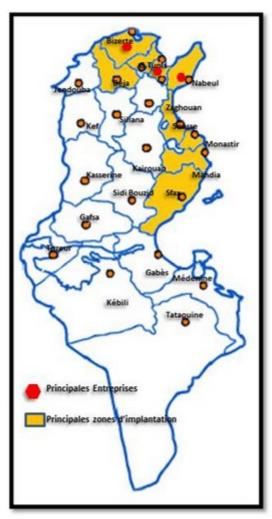


Figure 5.7: Implantation des équipementiers en composants mécaniques automobile en Tunisie. (Source : ministère de l'industrie)

5.4.3. Le secteur « câbles et composants électriques et électroniques automobile » :

La branche des composants électriques automobile a connu une très forte croissance depuis l'an 2000 et une prépondérance des entreprises exportatrices.

De nombreux leaders mondiaux se sont installés ou renforcé leur position rendant la Tunisie une des places fortes dans l'industrie des faisceaux de câbles grâce à sa proximité de l'Europe, la logistique et l'existence de ressources humaines qualifiées et d'un coût compétitif.

La branche est essentiellement concentrée sur la zone littorale entre Sousse et Bizerte. Pour les fils et câbles automobiles, la production est proche des clients et est souvent intégrée au sein des producteurs de faisceaux.

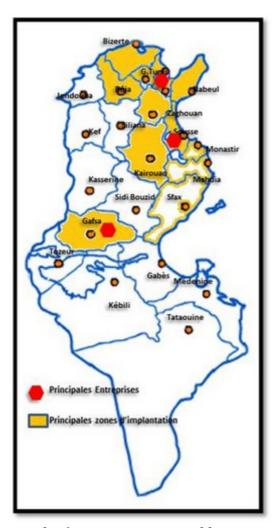


Figure 5.8: Implantation des équipementiers en câbles et composants électriques et électroniques automobile en Tunisie. (Source : ministère de l'industrie)

Composée de 120 entreprises dont 112 d'entre elles sont totalement exportatrices, la branche des composants électriques automobile exploite 35000 postes d'emploi et a une capacité de production de 2700 Millions de Dinars tunisiens en 2012 dont 2500 Millions de Dinars tunisiens est destinée à l'export (92.6 % de la production totale). (Source : ministère de l'industrie)

Cette branche regroupe des producteurs de renommée internationale comme : LEONI, KBE, CHAKIRA CABLE, METS, COFAT TUNIS, LEAR AUTOMOTIVE, KROMBERG ET SCHUBERT...

En effet, plusieurs grands équipementiers mondiaux sont installés en Tunisie, aussi bien dans les secteurs des Fils, câbles et faisceaux de câbles, les composants électroniques, plastiques que dans les autres composants électriques. A ce titre on note la présence des groupes suivants:

- Valeo (France)
- Johnson Control (Etats-Unis)
- Lear Corporation (Etats-Unis)
- Pirelli (Italie)
- Mets (Allemagne)
- Leoni (Allemagne)
- Yura Corporation (Corée du Sud)
- Kromberg& Schubert (Allemagne)
- DraxelMaier (Allemagne)
- Robert Bosch (Allemagne)
- Chakira (Tunisie)
- Yazaki (Japon)
- Era (Allemagne)
- Imtec (groupe Carghil Etats-Unis)
- Plastivaloire (France)

Les composants Fabriqués localement sont:

- ✓ Accumulateurs : Batteries, plaques et couvercles pour batteries ;
- ✓ Composants électroniques : Circuits imprimés, cartes électroniques, connectiques, commutateurs...;
- ✓ Fils, câbles et faisceaux de câbles;
- ✓ Projecteurs et blocs optiques : Blocs optiques, catadioptres (réflecteur de lumière), clignotants...;

- ✓ Autres composants électriques pour automobiles : accessoires, haut-parleurs, éléments bobinés, démarreurs, alternateurs...;
- ✓ Composants plastiques : Composants rentrants comme accessoires ou éléments supports de composants électriques (exemples : commodos, connectiques, boutons poussoirs etc.).

6 : Plan d'action pour stimuler l'industrialisation des véhicules électriques en Tunisie.

6.1. Raisons et finalité de l'implantation d'une industrie de véhicule électrique en Tunisie :

Comme nous l'avons évoqué dans les chapitres précédents, la mobilité propre est devenue une nécessité éminente dans nos jours suite la montée en puissance des préoccupations environnementales, de la volatilité du prix des carburants fossiles et de la forte médiatisation des véhicules électriques que plusieurs pays ont déjà commencé à les intégrer dans leurs sociétés.

Quoique la législation tunisienne actuelle relative à l'importation, à la commercialisation et à l'utilisation du matériel roulant garantit le maximum de conformité de ce dernier aux normes internationales de sécurité, de consommation énergétique et à un minimum de respect aux exigences de la préservation de l'environnement, l'absence d'une vraie et concrète stratégie industrielle dans le secteur automobile a impacté gravement l'économie tunisienne et a favorisé l'endettement excessif du consommateur tunisien auprès des diverses structures de financement pour acquérir un nouveau véhicule importé dont le prix est généralement en flambée croissante.

En plus, l'industrie automobile tunisienne actuelle reste insignifiante (capacité de production 600 millions de dinars) et se limite pratiquement au montage des véhicules utilitaires, spécialement les camionnettes, les camions et les bus. L'industrie des véhicules particuliers reste toujours absente et aucune stratégie d'incitation n'a été mise en place pour la promouvoir.

En outre, l'industrie des composants mécaniques et électriques automobile, ayant acquis un background technologique de très haut niveau et un know-how respectable représentant le fruit d'une longue expérience avec des partenaires équipementiers de renommée internationale, réalise près de 3000 millions de dinars comme chiffre de production occupant ainsi une place très importante dans le tissu industriel tunisien.

L'implantation d'une « réelle » industrie automobile tunisienne, exploitant les réalisations et les potentialités du secteur des composants mécaniques et électriques automobile s'avère nécessaire et représente un enjeu économique et stratégique d'une importance majeure pour la Tunisie sur tous les plans.

Un tel projet industriel, quoiqu'il contribue au développement du pays sur les niveaux économique, technologique et social, nécessite une étude de faisabilité approfondie et doit répondre à plusieurs critères économiques, technologiques, environnementaux et sociaux bien spécifiques afin de garantir son succès.

6.2. Présentation du projet industriel « AL BURAQ » :

Notre projet, nommé « AL BURAQ » « مشروع البراق », sera une réponse à un besoin stratégique de la république Tunisienne concernant le développement et la promotion de la mobilité propre en Tunisie et l'activation de l'industrialisation des véhicules électriques, des solutions de recharge, du stockage et de la maîtrise de l'énergie.

6.2.1. Ce que signifie « AL BURAQ »?

Le mot « BURAQ» est de la même famille linguistique que le mot arabe « برق » qui signifie «éclair».

« AL BURAQ » « البراق » est, selon la tradition islamique, un coursier fantastique venu du paradis, dont la fonction est d'être la monture des prophètes⁸.

Le choix de donner au projet de l'industrialisation des véhicules électriques en Tunisie le même nom que cette créature fantastique peut s'expliquer par le fait qu'il existe des similitudes entre cette dernière et les véhicules électriques à produire à savoir :

- ✓ La nature de l'énergie « motrice » : l'éclair → l'énergie électrostatique → courant électrique.
- ✓ L'absence de toute source de bruit ou de dégagement de particules polluantes lors du déplacement.
- ✓ Vitesse exceptionnelle : on ne peut pas savoir exactement la force et la vitesse de cette créature fantastique, mais chose sûre que les moyens de transport terrestres les plus rapides de nos jours sont les trains électriques (TGV, SHINKANSEN...). Les voitures électriques peuvent aussi avoir un développement technologique remarquable dans les années à venir de point de vue performances (autonomie, vitesse, confort ...) et fiabilité.

[«] جبريل عليه السلام » Selon l'histoire la plus connue, au VIIe siècle, « AL BURAQ » fut amené par l'archange JIBRIL « جبريل عليه السلام رسول الله محمد صلَّى » « pour porter le prophète Mohammed « que la paix et la bénédiction de Dieu soient sur lui » الله عليه وسلم», de La Mecque à Jérusalem, puis de Jérusalem au ciel avant de lui faire effectuer le voyage de retour au cours de l'épisode dit « Isra et Miraj » « إلإسراء والمعراج » (signifiant respectivement en arabe : «voyage nocturne» et « échelle, ascension», qui est le titre d'un des chapitres du Coran).

6.2.2. Mission et Objectif:

Le projet « AL BURAQ » est un projet industriel intégré ; il sera établi pour produire :

- ➤ Des véhicules électriques finis destinés à être commercialisés directement sur le marché local et à l'export.
- > Des différentes solutions de recharge adaptées pour ces véhicules.
- Des solutions de stockage et de maîtrise de l'énergie électrique.

Une fois démarré, ce projet doit :

- ✓ Instaurer une industrie à forte valeur ajoutée pour la Tunisie et garantir le plus haut taux d'intégration.
- ✓ Promouvoir le développement et la production les batteries adéquates pour les véhicules électriques.
- ✓ Promouvoir le développement et la production des véhicules électriques adaptés aux marchés de destination, conformes aux normes internationales de sécurité (homologués) et qui satisferont aux besoins de la clientèle de point de vue performance et esthétique.
- ✓ Promouvoir le développement et la production des systèmes de recharge pour les véhicules commercialisés.
- ✓ Promouvoir le développement et la production des systèmes de conversion et de stockage d'énergie.
- ✓ Incorporer une industrie de recyclage efficiente.
- ✓ Assurer une collaboration effective entre l'industrie, l'université et le gouvernement dans le cadre de la Recherche et le Développement des nouveaux produits.
- ✓ Utiliser exclusivement les technologies de production les plus économiques et les plus respectueuses de l'environnement.

6.2.3. Synoptique:

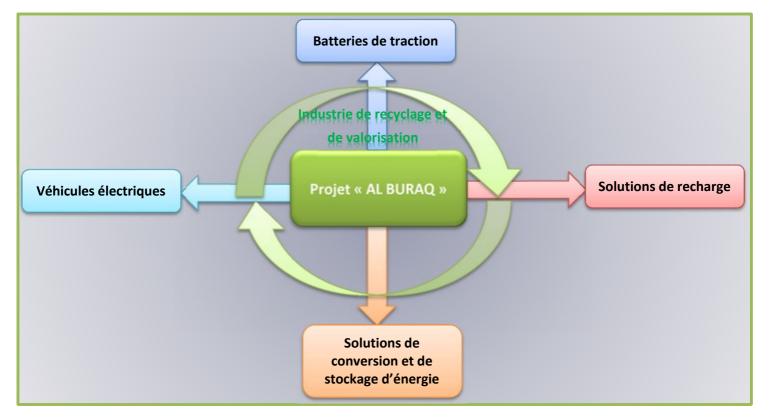


Figure 6.1: Synoptique du projet industriel « AL BURAQ ».

6.2.4. La filiale industrielle des batteries de traction:

6.2.4.1. Objectif:

Le véhicule électrique, c'est une batterie, encore une batterie, et surtout une batterie. La batterie de traction représente l'élément le plus crucial dans un véhicule électrique. Suite à cette importance, le projet « AL BURAQ » doit mener et assurer une industrie solide des batteries nouvelle génération destinées à propulser les véhicules électriques à produire et à commercialiser. Rappelons que le choix d'une batterie de traction se fait en fonction des critères suivants, par ordre d'importance :

- Energie, poids (Energie/Massique);
- Recharge (Nombre de cycles);
- Durée de vie, prix ;
- Entretien;
- Tension, encombrement (fonction de l'utilisation);
- Aptitude au recyclage.

D'après le benchmark des technologies des batteries de traction présenté dans le chapitre définitions et technologies, le choix de la technologie Li-ion, spécialement les batteries LiFePO4, sera peut-être la bonne voie pour démarrer une industrie de batteries nouvelle génération en Tunisie.

6.2.4.2. Problèmes et obstacles :

- × Absence d'un cadre de recherche scientifique et de partenariat dans le domaine de l'industrie des batteries.
- × Investissement pouvant être lourd.

6.2.4.3. Potentialités et opportunités à exploiter :

- ✓ Présence d'une industrie tunisienne solide de batterie au plomb,
- ✓ Ressources humaines qualifiés dans le secteur chimie (chercheurs, professionnels, étudiants...).

6.2.5. La filiale industrielle des véhicules électriques :

6.2.5.1. Objectif:

L'économie verte permet à la société de générer plus chaque année, tout en préservant ou en améliorant le capital naturel. Pour aider à créer une économie verte, le projet « AL BURAQ » peut fournir une solution de la ville verte par le biais de l'électrification du parc automobile tunisien existant d'une manière durable.

Les véhicules électriques produits doivent répondre aux contraintes du marché local en terme de rapport qualité/prix d'une part et aux attentes et besoins du consommateur tunisien en terme de sécurité, confort, robustesse, économie d'énergie et facilité d'utilisation d'autre part.

6.2.5.2. Problèmes et obstacles :

- × Chaines tunisiennes d'assemblage automobile très peu développées (surtout pour les véhicules particuliers),
- × Investissement lourd.
- × Réglementation actuelle régissant le secteur de l'automobile: secteur fortement contrôlé par l'état → obstacles réglementaires.
- × Absence d'une règlementation spécifique pour les véhicules électrifiés,
- × Absence d'une infrastructure de recharge adéquate,
- × Demande croissante en énergie électrique,

× Aptitude du consommateur tunisien à appréhender la mobilité électrique.

6.2.5.3. Potentialités et opportunités à exploiter :

- ✓ Réseau développé d'équipementiers opérant dans l'industrie des composants électriques et mécaniques automobile,
- ✓ Réseau de transport ferroviaire et maritime développé (chaîne logistique),
- ✓ Position géographique stratégique (ouverture à l'Europe et à l'Afrique)
- ✓ Programmes d'encouragement et d'incitation de l'industrie locale,
- ✓ Main d'œuvre qualifiée.

6.2.6. Solutions de recharge pour les véhicules électriques :

La commercialisation des véhicules électriques nécessite impérativement le développement des solutions de recharge adaptées. L'installation de bornes de recharge sur l'ensemble du territoire national doit être développée en premier lieu, tant en domaine privé que public. Ce parc de bornes est appelé « infrastructure de recharge ».

Les chargeurs peuvent avoir deux types distincts :

- Chargeurs individuels utilisés à domicile (charge lente).
- Chargeurs professionnels disponibles dans les stations de recharge privées ou publiques (charge lente ou rapide).

Le projet « AL BURAQ » doit proposer et produire des solutions de recharge adaptées aux véhicules électriques produits et contribuer ainsi au développement de l'infrastructure tunisienne de recharge pour accélérer la mutation du parc automobile du thermique à l'électrique.

6.2.6.1. Problèmes et obstacles :

- × Absence de cadre réglementaire concernant l'infrastructure de recharge,
- × Choix des spécifications techniques des bornes de recharge surtout pour la connectique.

6.2.6.2. Potentialités et opportunités à exploiter :

- ✓ Industrie électrique et électronique développée,
- ✓ Main d'œuvre qualifiée,
- ✓ Programmes d'encouragement et d'incitation de l'industrie locale.

6.2.7. Solutions de conversion et de stockage de l'énergie :

Avec l'introduction du véhicule électrique en Tunisie, la demande en énergie électrique sera de plus en plus accrue suite aux éventuelles opérations de recharge des batteries. Le recours aux énergies propres et durables sera un enjeu fondamental pour assurer la « propreté » du projet d'une part, et de développer un réseau énergétique intelligent offrant la plus haute efficience et flexibilité d'autre part.

Le projet « AL BURAQ » doit fournir des solutions pour la conversion et le stockage d'énergie électrique basées essentiellement sur le photovoltaïque pour la conversion de l'énergie solaire en celle électrique pour être emmagasinée dans les batteries nouvelles génération développées. Ceci permettra de compenser la demande supplémentaire de l'énergie engendrée et maîtriser les coûts.

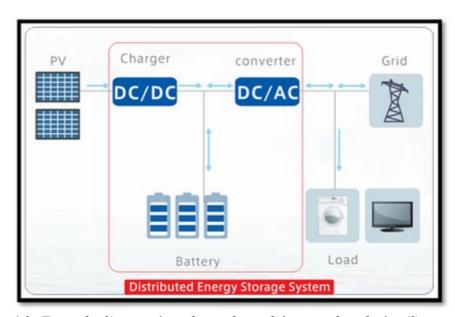


Figure 6.2: Exemple d'un système de stockage d'énergie distribuée. (Source : BYD)

6.2.7.1. Problème et obstacles :

- × Industrie des cellules photovoltaïques non développée en Tunisie,
- × Industrie des batteries nouvelle génération non développée,
- × Absence d'une règlementation organisant et favorisant l'exploitation privée de l'énergie solaire pour la production de l'énergie électrique.

6.2.7.2. Potentialités et opportunités à exploiter :

- ✓ La lumière du soleil,
- ✓ L'expansion de nouveaux projets de production de l'énergie solaire,
- ✓ La stratégie promotionnelle de l'état pour la maîtrise de l'énergie.

6.2.8. L'industrie de recyclage et de valorisation des composants automobile:

6.2.8.1. Objectif:

Le paradigme environnemental l'exige, les réglementations se renforcent, les techniques et les matériaux évoluent, les partenariats s'installent, c'est tout un réseau que se forme pour le développement durable de la voiture ainsi que son industrie.

Dans ce cadre le recyclage, en tant que production de matières premières à partir de déchets pour les réintroduire dans le cycle industriel, joue un rôle très important dans des industries intensives en matériaux tels que celle de l'automobile.

Le recyclage automobile est essentiellement une activité transversale qui doit être mise en place en réseau à l'intérieur et à l'extérieur de la filière automobile. C'est pour cette raison, le projet « AL BURAQ » doit incorporer une industrie de recyclage et de valorisation pour alimenter ses chaînes de production. A l'exception des pneumatiques de l'automobile où une unité de recyclage a été installée en Tunisie (ECOPNEUS), les autres composants automobiles finissent dans la casse des ferrailleurs. Malheureusement, à part l'industrie de ronds à béton (EL FOULADH, INTERMETAL...), aucune stratégie de valorisation des déchets ferreux n'a été mise en place en Tunisie.

Une telle industrie concernera absolument :

- Le recyclage des batteries de traction,
- Le recyclage du plastique utilisé dans l'automobile,
- Le recyclage des différents matériaux utilisés dans les composants mécaniques et électriques automobile,
- Le recyclage de la verrerie automobile.

6.2.8.2. Problèmes et obstacles :

- × Investissement très lourd.
- × Absence de règlementation spécifique pour certaines industries de recyclage (verrerie, cuivre, métaux...),
- × Monopôle d'EL FOULADH pour l'industrie ferreuse,
- × Aspect environnemental et énergétique (industrie énergivore et pouvant impacter l'environnement).

6.2.8.3. Potentialités et opportunités à exploiter :

- ✓ Parc automobile de plus en plus vieillissant,
- ✓ Lots de ferrailles inexploités importants,
- ✓ Exportations des déchets fortement contrôlée par l'état,
- ✓ Energies renouvelables disponibles pour compenser la demande en énergie.

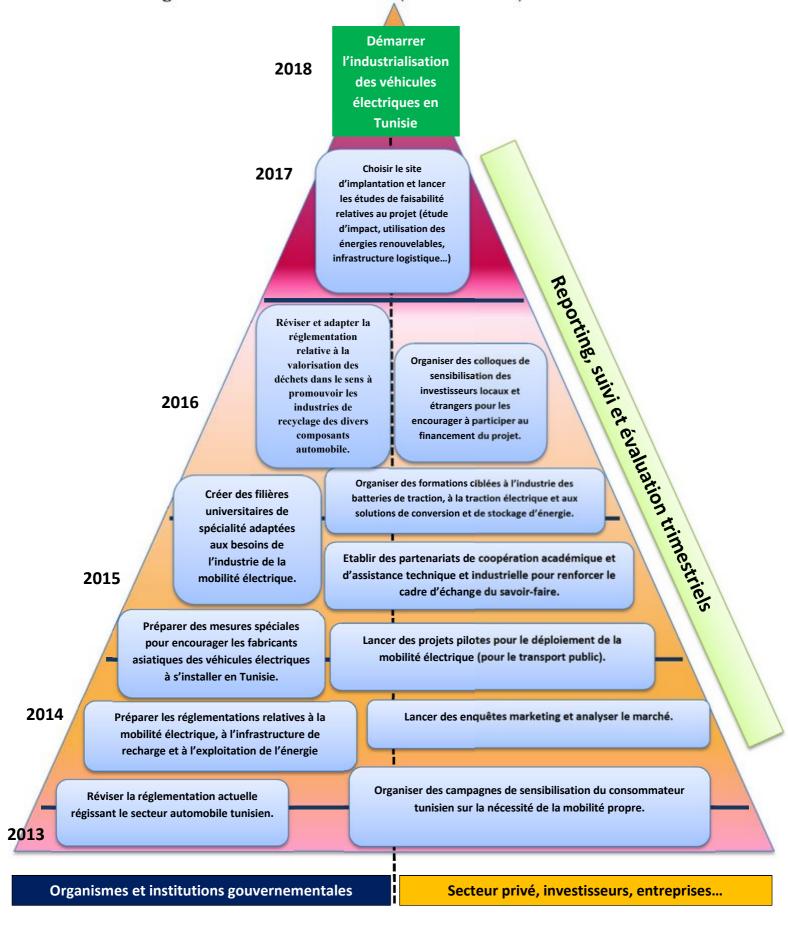
6.3. Analyse des problèmes et des obstacles qui freinent l'industrialisation des véhicules électriques en Tunisie :

Tableau 6.1: fiche d'analyse des problèmes liés à l'industrialisation des véhicules électriques en Tunisie.

Industrialisation des véhicules électriques en Tunisie Fiche d'analyse problèmes						
Situation actuelle Problème/obstacle	Situation désirable Objectif/cible	Titre du plan d'action				
Absence d'un cadre de recherche scientifique et de partenariat dans le domaine de l'industrie des batteries.	Avoir une coopération solide entre l'industrie, l'université et le gouvernement pour promouvoir les activités de R&D dans l'industrie de véhicule électriques.	 Organiser des formations ciblées à l'industrie des batteries de traction, à la traction électrique et aux solutions de conversion et de stockage d'énergie. Etablir des partenariats académiques et industriels pour renforcer le cadre d'échange du savoir-faire spécialement avec les pays d'Asie (Japon, Chine, Corée de sud). Créer des filières universitaires de spécialité dans domaines technologiques pointus (technologie de batteries, technologies de traction électrique, designautomobile, électronique de puissance). 				
Financement, investissement lourd.	Financer les différentes unités industrielles du projet.	 Organiser des colloques de sensibilisation des investisseurs locaux et étrangers sur l'importance projet pour les encourager à participer au financement de ce dernier. Etablir des partenariats de coopération et d'assistance technique et industrielle. Encourager les fabricants asiatiques des véhicules électriques à s'installer en Tunisie. 				

Réglementation actuelle régissant le secteur de l'automobile.	Avoir un cadre réglementaire adéquat favorisant le développement de l'industrie automobile tunisienne, spécialement la mobilité électrique.	 Réviser les textes règlementaires actuels concernant le secteur automobile tunisien. Créer des textes réglementaires définissant et organisant le secteur de la mobilité électrique. 	
Aptitude du consommateur tunisien à appréhender le véhicule électrique.	Consommateur tunisien prêt à appréhender le nouveau challenge de la mobilité propre.	 Lancer des enquêtes marketing et préparer les études stratégiques définissant avec précision les attentes du marché tunisien et les stratégies de lancement des produits. Sensibiliser le consommateur tunisien sur l'importance de développer une mobilité verte qui contribue efficacement à l'économie durable. Lancer des projets pilotes de déploiement de la mobilité électrique (exemple : les taxis, les louages, les bus). 	
Absence d'une infrastructure de recharge adéquate,	Développer une infrastructure de recharge répartie sur le territoire tunisien.	 Préparer la réglementation spécifiant et organisant l'infrastructure de recharge. Développer le réseau de fournisseurs de service et de stations de recharge. 	
Demande croissante en énergie électrique,	Installer et exploiter des systèmes intelligents de conversion et de stockage d'énergie.	 Développer et encourager l'industrie des cellules photovoltaïques. Préparer la réglementation qui organise et qui promet l'exploitation du photovoltaïque dans la génération de l'électricité. 	
Impact environnemental de l'industrie.	Bâtir une industrie Ecologique basée sur l'emploi des énergies propres et la valorisation des déchets.	 Lancer une étude environnementale complète sur l'impact de toutes les unités industrielles constituar le projet. Lancer une étude de faisabilité sur l'utilisation des énergies propres pour l'alimentation des besoins er énergie des différentes industries incorporées dans le projet. Réviser et adapter la réglementation relative à la valorisation des déchets dans le sens à promouvoir les industries de recyclage des divers composants automobile. 	

6.4. Etagère de réalisation future (Future Shelf):



6.5. Calendrier prévisionnel d'implémentation :

Tableau 6.2: calendrier prévisionnel d'implémentation des différentes actions programmées.

Activité	Stratégie	Responsabilité	Période	Financement
Réviser la réglementation actuelle régissant le secteur automobile tunisien.	Favoriser et promouvoir le développement futur de l'industrie automobile tunisienne.	Ministère de l'industrie, Ministère du commerce, Ministère du transport.	Septembre 2013 – février 2014	Gouvernement
Organiser des campagnes de sensibilisation du consommateur tunisien sur la nécessité de la mobilité propre.	Initier et préparer le consommateur tunisien à connaître les solutions de la mobilité électrique et à appréhender le véhicule électrique.	ANME, Organisations et associations privées, Politiciens, Media.	Décembre 2013 – décembre 2014. (rappel si nécessaire)	ANME Gouvernement Institutions privées
Préparer les réglementations relatives à la mobilité électrique, à l'infrastructure de recharge et à l'exploitation de l'énergie photovoltaïque.	Préparer l'entrée effective des solutions de la mobilité électrique en Tunisie.	Ministère de l'industrie, Ministère du commerce, Ministère du transport, Ministère de l'environnement, Autres organismes.	Janvier 2014 – janvier 2015.	Gouvernement
Lancer des enquêtes marketing et analyser le marché.	Recenser le besoin et les attentes du marché tunisien envers les véhicules électriques.	Bureaux d'études, Agences nationales, INS	Année 2014	Gouvernement
Préparer des mesures spéciales pour encourager les fabricants asiatiques des véhicules électriques à s'installer en Tunisie.	Favoriser l'installation des industriels asiatiques, leaders dans le domaine de l'e-mobility, en Tunisie.	Ministère de l'industrie, Ministère des finances.	Mars 2014 – mars 2015.	Gouvernement
Lancer des projets pilotes pour le déploiement de la mobilité électrique (pour le transport public).	Démarrer le déploiement de la mobilité électrique avec le secteur du transport public (taxis, louages, bus).	Entreprises privées, Ministère du transport, Ministère du commerce, Ministère de l'industrie, Autres organismes.	Septembre 2014 → 2015 et plus.	Entreprises privées, Fonds nationaux
Etablir des partenariats de coopération académique et d'assistance technique et industrielle pour renforcer le cadre d'échange du savoir-faire.	Préparer les ressources humaines pour les activités industrielles tunisiennes futures dans la mobilité électrique.	Organismes gouvernementaux, Coopérations internationales, Institutions de formation et de coaching	Année 2015	Gouvernement, Coopérations internationales, Etablissements privés de formation

Organiser des formations ciblées à l'industrie des batteries de traction, à la traction électrique et aux solutions de conversion et de stockage d'énergie.	Préparer les ressources humaines pour les activités industrielles tunisiennes futures dans la mobilité électrique.	Etablissements de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique, Centres de formation professionnelle, Experts consultants, Professionnels	Début 2015 → 2016 et plus.	Gouvernement, Entreprises industrielles
Créer des filières universitaires de spécialité adaptées aux besoins de l'industrie de la mobilité électrique.	Instaurer le système universitaire adéquat pour le besoin de l'industrie des véhicules électriques.	Ministère de l'enseignement supérieur, Ministère de la formation professionnelle, Ministère de l'industrie.	2015 – 2016	Gouvernement
Réviser et adapter la réglementation relative à la valorisation des déchets dans le sens à promouvoir les industries de recyclage des divers composants automobile.	Préparer l'intégration des activités de recyclage dans l'industrie automobile tunisienne.	Ministère de l'environnement, Ministère de l'industrie, Ministère du commerce, ANPE, ANGED	Année 2016	Gouvernement
Organiser des colloques de sensibilisation des investisseurs locaux et étrangers pour les encourager à participer au financement du projet.	Préparer le financement du projet.	Structures de financement, Cabinets d'experts, Entreprises industrielles, Associations	Année 2016	Diverses structures de financement (banques, fonds, entreprises)
Choisir le site d'implantation et lancer les études de faisabilité relatives au projet (étude d'impact, utilisation des énergies renouvelables, infrastructure logistique)	Lancer le projet.	Ministère de l'industrie, Ministère des finances, Bureaux d'études et de consulting, Experts internationaux	Début 2017	Parties prenantes du projet, Fonds nationaux, Structures d'appui financier

Conclusion générale:

Certes, la motorisation thermique sera encore présente pendant plusieurs décennies. Elle sera écartée progressivement lorsque l'accumulateur d'énergie et sa traction électrique seront plus compétitifs en matière de coût, d'autonomie et de fiabilité. La maturité technique et les perspectives d'évolution des véhicules électriques et hybrides rechargeables rendent cet objectif de plus en plus réalisable.

La volonté et l'engagement des gouvernements pourront accélérer cette mutation thermique – électrique d'une façon considérable et réussir à instaurer une mobilité verte dans un cadre de développement économique et environnemental durable.

L'essentielle constatation au niveau du contexte mondial est que la mobilité verte existe et elle est en train d'évoluer avec une cadence plus ou moins accélérée, ce qui prouve que dans les années futures, une reconfiguration du marché automobile mondial sera évidente.

La constatation la plus stupéfiante qu'on a pu découler de l'analyse du contexte tunisien est que la Tunisie a de très fortes potentialités lui permettant de développer une mobilité verte et même de fonder une industrie automobile selon la nouvelle tendance automobile mondiale et ce à condition qu'il y'aura une prise de considération de certains points stratégiques essentiels garantissant le succès de la stratégie planifiée.

Pour conclure, nous voudrions insister sur trois points résumant notre pensée sur la figuration d'une potentielle transition vers une économie écologique de l'automobile en Tunisie et la forte possibilité du succès de l'implantation d'une vraie industrie automobile tunisienne d'ici 2018.

Le premier point c'est que le secteur automobile en Tunisie est fortement contrôlé par l'état et ça parait à première vue un obstacle devant le développement d'une activité industrielle à forte valeur ajoutée comme celle de la fabrication des véhicules électriques. Pourtant, lorsqu'il y aura une volonté réelle à faire pousser la roue et s'engager dans la voie des pays développés, cette aptitude absolue de contrôle deviendra une force facilitatrice qui contribuera à mettre le train de développement sur les rails. En d'autres termes, le gouvernement tunisien doit faciliter ce changement en mobilisant toutes les ressources nécessaires au développement du projet.

Le second point c'est que le secteur du transport que ce soit public ou privé a longtemps souffert des pressions de diverses sources (fiscalité, lobbying pétrolier, flambée des prix, quota = corruption, pouvoir d'achat très limité...) ce qui a engendré le vieillissement de plus en plus accru

du parc automobile tunisien. Cela a posé beaucoup de problèmes de sécurité sur nos routes et n'en parlant pas de l'impact sur l'environnement et la santé; un projet industriel intégré pourra corriger cette situation désastreuse en proposant au consommateur tunisien de nouvelles solutions de mobilité plus abordables et plus économiques tout en valorisant le matériel roulant vétuste en le réintégrant dans la chaîne de valeur industrielle créée.

Le dernier point c'est que nous devons s'orienter de plus en plus aux asiatiques, et de tirer le maximum de leurs expériences et leurs aptitudes sur les plans organisationnel et technique car ce sont eux qui détiennent actuellement le savoir, la technologie et surtout la patience et l'enthousiasme de développer leurs pays et de conquérir les marchés mondiaux.

Références bibliographiques

Vinot, Simon (2013). Panorama 2013, le point sur les émissions de gaz à effet de serre des transports, IFP.

Vinot, Simon; Coussy, Paula (2009). Panorama 2009, le point sur le marché des véhicules électrifiés, IFP.

Verwilghen, Stéphane; Brendel, Philippe (2010). Tout savoir sur les véhicules électriques, ARVAL.

Couillard, Martin; Desaulniers, Guy (2012). L'industrie manufacturière des véhicules hybrides et électriques au Québec, Gouvernement du Québec.

(1997). Le véhicule électrique, Dossier technique ANFA.

Trintignac, Henri (2010). Le Véhicule Zéro Emission, Valéo.

De MEDINA, Heloisa V.; SEDILLEAU, Pascaline (2002). L'industrie automobile se réorganise pour le recyclage, CETEM.

Duysinx, Pierre (2012). Véhicules électrique, hybrides et à pile à combustible, Université de Liège.

(2010). Monographie de la branche de composants automobiles en Tunisie, API.

Vinot, Simon (2011). Panorama 2012, Le développement des véhicules hybrides et électriques, IFP.

Jullien, Bernard; Villareal, Axel (2012). La voiture électrique comme artéfact d'une transition vers une économie écologique?, GERPISA.

Schwartz and Co; AJI Europe (2011). Etude de la seconde vie des batteries des véhicules électriques et hybrides rechargeables, ADEME.

(2012). Nouvelles initiatives dans les domaines de la mobilité électrique et de la mobilité basée sur le gaz naturel, Ministère de l'Economie et du Commerce extérieur, Ministère du Développement durable et des Infrastructures.

Les véhicules électriques. CRE, 2013. [14/03/2013]. http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=vehicules-electriques>

L'histoire du véhicule électrique. Véhicule électrique.net, 2013. [18/03/2013]. < http://www.voitureelectrique.net/histoire-de-la-voiture-electrique>

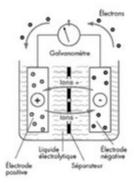
Schneider, Avie. *Timeline: The 100-Year History Of The Electric Car.* NPR, 21/11/2011. [15/05/2013]. http://www.npr.org/2011/11/21/142365346/timeline-the-100-year-history-of-the-electric-car

L'Histoire de la Voiture Electrique. Voiture électrique populaire. [28/04/2013]. < http://www.voiture-electrique-populaire.fr/vehicule/histoire>

Annexe 1 : Principe de fonctionnement de la batterie rechargeable.

Le processus de décharge

Pendant la décharge, la batterie est génératrice et débite du courant dans le moteur de traction. Pour permettre l'apparition d'un courant électrique, il est nécessaire que les électrons et les ions puissent circuler ; un récepteur va permettre la liaison entre l'électrode + et l'électrode -.



Le principe de fonctionnement pendant la décharge est le suivant : le galvanomètre joue le rôle du récepteur et le déplacement de son aiguille prouve le passage du

La batterie se décharge...

Il est rappelé que l'intensité est proportionnelle à la quantité d'électrons déplacés et à la quantité de matière mise en œuvre.

Une batterie chargée possède un excès d'électrons à sa plaque négative et un manque d'électrons à sa plaque positive.

Lorsque les deux plaques possèdent le même nombre d'électrons, la batterie ne débite plus de courant (on dit qu'elle est " à plat ").

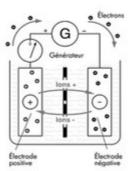
Le processus de charge

Pendant la charge, la batterie est réceptrice du courant fourni par le secteur.

Le procédé est l'inverse de la décharge.

Un générateur de courant (dynamo, chargeur) est placé aux bornes des électrodes et débite en sens inverse dans le système.

Il va permettre de déplacer les électrons de la plaque positive vers la plaque négative et redonner à la batterie son état initial.



Pendant la charge, le courant circule en sens inverse. Le galvanomètre dévie dans le sens inverse à celui de la recharge. L'intensité et la quantité de matière déplacée est toujours proportionnelle au nombre d'électrons en mouvement.

Lorsque la plaque négative est en excès d'électrons, la batterie est rechargée. L'utilisation du générateur électrochimique s'effectue en deux phases, la charge et la décharge. À l'intérieur de la batterie, l'énergie chimique se manifeste par un transfert de matière grâce à une circulation d'ions.

À l'extérieur de la batterie, l'énergie électrique se manifeste par un déplacement d'électrons. La réaction chimique fait apparaître deux autres phénomènes gênants : un dégagement de gaz et une montée en température.

Annexe 2 : Technologies et principe de fonctionnement des moteurs électriques.

Le principe de fonctionnement du moteur à courant continu

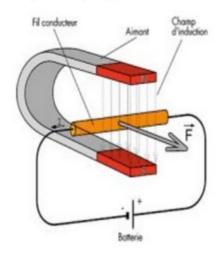
Lorsqu'un conducteur, parcouru par un courant Φ , est placé dans un champ d'induction, il est soumis à une force perpendiculaire au conducteur et au champ d'induction F (loi de Laplace).

Le sens de cette force dépend du sens du courant et de celui du champ.

C'est la force électromagnétique.

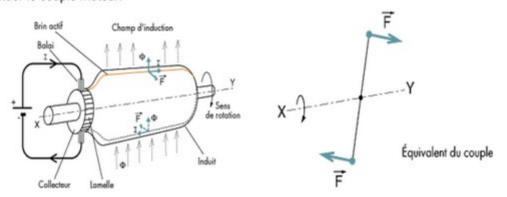
- Le fil conducteur est repoussé vers l'extérieur de l'aimant;
- Si l'on inverse la polarité de la batterie, le fil est attiré vers l'intérieur de l'aimant.

Ces forces d'attraction et de répulsion qu'exercent les aimants et les électros aimants entre eux, permettent à un moteur électrique de fonctionner.



La construction du moteur à courant continu

Un fil conducteur placé à la périphérie de l'induit * est appelé brin actif. La façon de disposer les brins actifs sur l'induit va permettre de créer des forces tangentielles qui vont constituer le couple moteur.



Chaque brin actif est soudé à ses extrémités sur deux lamelles du collecteur.

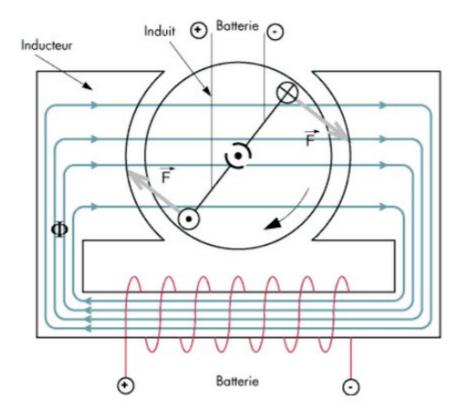
Le collecteur solidaire de l'induit alimente tour à tour chaque brin actif par l'intermédiaire des balais et des lamelles. Il assure ainsi l'alimentation synchronisée de chaque brin.

Le champ d'induction est produit par un électro-aimant fixe appelé inducteur, ou un aimant permanent.

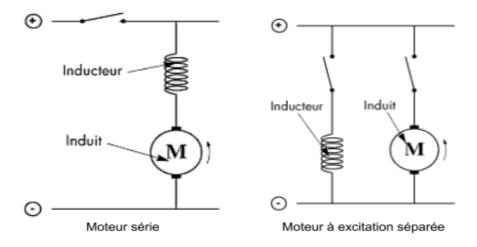
^{*} L'induit est la partie tournante du moteur électrique appelée ROTOR.

Annexe 2 (suite).

Assemblage Induit - Inducteur = moteur électrique



Pour inverser le sens de rotation, il suffit d'inverser le sens du courant dans l'induit ou dans l'inducteur. Par combinaisons des connections entre induit et inducteur, on réalise un moteur série ou un moteur à excitation séparée.



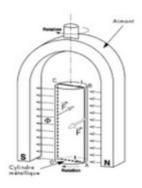
Annexe 2 (suite)

Le principe de fonctionnement du moteur à courant alternatif

L'aimant tournant produit un champ électromagnétique Φ qui traverse un cylindre métallique.

Les génératrices du cylindre placées dans le champ se comportent comme des brins actifs (AB et CD). Elles sont parcourues par un courant Φproportionnel à F et engendrent des forces perpendiculaires qui constituent le couple.

On constate que le cylindre suit la rotation de l'aimant avec un léger décalage appelé glissement.



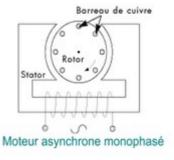
Construction du moteur asynchrone

L'aimant tournant est remplacé par le stator (électro-aimant alimenté par un courant alternatif).

Dans le rotor métallique, des barreaux de cuivre en circuit fermé sont insérés, pour canaliser les courants induits.

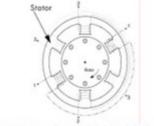
De sorte que le rotor bobiné, le collecteur et les balais sont supprimés.

Ce moteur est simple et facile à construire.



Moteur asynchrone triphasé

En disposant trois bobines sur le stator, on réalise le moteur asynchrone triphasé adapté aux grandes puissances et utilisé en traction électrique.



Moteur asynchrone triphasé (principe)

Par combinaisons des connections, on utilise deux possibilités :

- montage étoile ;
- montage triangle.



N.B.: Les moteurs asynchrones ne peuvent pas utiliser un courant continu batterie. Un " système interface " permet de transformer le courant continu en courant alternatif (II s'appelle l'onduleur).