

Université de Liège
Faculté des sciences appliquées
Département d'Aérospatiale et de Mécanique
LTAS- Ingénierie des véhicules terrestres

**Intégration de l'Ecoefficiente
dans la conception préliminaire
des véhicules propres: une
approche basée sur
l'optimisation multidisciplinaire**

Nzisabira Jonathan

Thèse présentée publiquement en vue de l'obtention du grade de
docteur en science de l'ingénieur

Directeur de recherche: Pierre DUYSINX, Professeur Ordinaire

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier le promoteur de cette thèse, le Professeur Ordinaire Pierre DUYSINX, pour m'avoir fait confiance malgré les hésitations et les craintes que j'avais au début de cette thèse, puis pour m'avoir guidé, encouragé, conseillé. Il m'a fait beaucoup voyager en me faisant parfois l'honneur de me déléguer des responsabilités. En plus de ses qualités scientifiques incontestables, Monsieur Pierre DUYSINX est un homme de cœur. J'espère qu'un jour j'aurais l'occasion de lui rendre son hospitalité et sa gentillesse mais en attendant je lui promets d'agir envers les autres comme lui a agi envers moi.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur Philippe NGENDAKUMANA, chargé de cours à l'ULg pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de ma thèse et pour les discussions enrichissantes que j'ai eu avec lui au cours de mes travaux.

J'ai été très touché par la participation au jury de Monsieur COQUERY Gérard, Directeur de recherche du Laboratoire des Technologies Nouvelles à l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS-LTN), et par l'hospitalité dont il a fait preuve envers moi à l'occasion de la réunion COST542 à Paris. Je lui remercie profondément.

Mes remerciements vont également à Monsieur Joeri VAN MIERLO, Professeur à la VUB, pour m'avoir fait l'honneur de participer au Jury de soutenance. Ses nombreux travaux de recherche notamment en ce qui concerne ECOSCORE, nous ont énormément inspiré

Je remercie tous ceux sans qui cette thèse ne serait pas ce qu'elle est: aussi bien par les discussions que j'ai eu la chance d'avoir avec eux, leurs suggestions ou contributions. Je pense ici en particulier aux professeurs Jean Louis Lilien et Olivier Léonard, qui de plus m'ont fait l'honneur de faire partie du Jury de cette thèse.

Messieurs Albert Germain, Professeur Ordinaire à l'ULG, André Jamoule, Professeur Honoraire à l'ULG et Claude Fleury, Professeur Ordinaire à l'ULG, m'ont fait également l'honneur de participer au Jury de soutenance et ont contribué par leurs nombreuses remarques et suggestions à améliorer la qualité de ce mémoire, je les en remercie beaucoup.

Mes remerciements vont également à Monsieur Yves TOUSSAINT Directeur de la spin off GREEN PROPULSION et Monsieur Remouchamps, Directeur de SAMTECH, pour les nombreuses informations, les logiciels et les références qu'ils ont mis à notre disposition.

Je tiens aussi à mentionner le plaisir que j'ai eu à travailler au sein de l'équipe de Monsieur Pierre Duysinx. Merci à Laurent, Etienne et Yannick pour l'aide, surtout dans le domaine informatique, que j'ai eu de votre part.

Au gouvernement du Burundi, je lui dois la reconnaissance pour le financement de mes études

Dédicace: A ma famille

Table des matières

Chapitre 1: INTRODUCTION	10
1.1 Aperçu général	10
1.2 Premier objectif: Mesure de l'efficacité	19
1.3 Deuxième objectif: Conception optimale des chaînes de traction	20
1.4 Troisième objectif: comparaison des systèmes de stockage d'énergie	21
1.5 Structure du rapport.....	22
Chapitre2: LES VEHICULES HYBRIDES ELECTRIQUES	23
2.1 Définitions	23
2.2 Intérêt des véhicules hybrides	24
2.3 Architecture	26
2.3.1 Hybride électrique série	26
2.3.2 Hybride électrique parallèle	27
2.3.3 Hybride doux (mild hybrid)	28
2.3.4 Autres configurations	29
2.4 Principaux composants.....	30
2.4.1 La source primaire.....	30
2.4.2 Le moteur électrique.....	32
2.4.3 Les Batteries	34
2.4.4 La transmission	35
2.5 Modélisation et simulation des véhicules hybrides: Le logiciel ADVISOR.....	36
2.5.1 Structure du logiciel	37
2.5.2 Approche de simulation	39
2.5.3 Les cycles de conduite Européens.....	41
2.5.4 Consommation et émissions.....	45
2.5.5 Stratégies de contrôle des véhicules hybrides	50
2.6 Evolution du marché des véhicules hybrides	54
Chapitre 3: LES VEHICULES HYBRIDES HYDRAULIQUES	56
3.1 Introduction	56
3.2 Principe de fonctionnement.....	57
3.3 Composants hydrauliques	60
3.1.1 Moteur/Pompe hydraulique.....	60
3.1.2 Accumulateurs hydrauliques	63
3.2 Faisabilité technique des hybrides hydrauliques	67
3.2.1 Modélisation et Simulation	68
3.2.2 Considérations économiques.....	81
3.3 Conclusions	86
Chapitre 4: LES SUPERCAPACITES.....	88

4.1	Principe de fonctionnement.....	88
4.2	Performances des supercapacités	89
4.3	Technologies et matériaux	91
4.4	Applications des supercondensateurs.....	93
Chapitre 5: CALCUL DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX.....		95
5.1	Les polluants locaux et leurs effets	95
5.1.1	Le monoxyde de carbone (CO).....	95
5.1.2	Les oxydes d'azote (NO _x)	95
5.1.3	Les composés organiques volatils (COV).....	95
5.1.4	Le dioxyde de soufre (SO ₂).....	96
5.1.5	Les particules (PM)	96
5.1.6	L'ozone (O ₃).....	97
5.1.7	Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (AHP).....	97
5.1.8	Les Hydrofluocarbures (HFC) ou gaz fluorés.....	97
5.2	Le dioxyde de carbone (CO ₂).....	97
5.3	Calcul des impacts environnementaux	98
5.3.1	Les méthodes d'évaluation environnementale.....	98
5.3.2	Les méthodes de calcul des impacts environnementaux.....	99
5.4	Calcul de l'impact environnemental	108
5.4.1	Evaluation des émissions et de la consommation	108
5.4.2	Classification des polluants par catégorie de dommages	115
5.4.3	Evaluation des dommages.....	116
5.4.4	Domages associés au véhicule de référence et normalisation.....	117
5.4.5	Pondération des dommages.....	117
5.4.6	Application	118
5.4.7	Conclusion.....	127
Chapitre 6: EVALUATION DE L'ECOEFFICIENCE		129
6.1	Notions d'Ecoefficiente	129
6.2	L'écoefficiente et l'analyse de la valeur.....	130
6.3	Evaluation de la satisfaction du besoin	131
6.3.1	Critères de mesure.....	132
6.3.2	Normalisation	138
6.3.3	Pondération.....	138
6.3.4	Application	140
Chapitre 7: INTEGRATION DE L'ECOEFFICIENCE DANS LA CONCEPTION PRELIMINAIRE.....		143
7.1	Contexte	143
7.2	Enjeux de la conception préliminaire.....	144

7.3	Optimisation multidisciplinaire.....	146
7.3.1	Modélisation et simulation.....	148
7.3.2	Résolution du problème d'optimisation multiobjectif.....	154
Chapitre 8: APPLICATIONS.....		162
8.1	Comparaison de l'effet des accumulateurs hydrauliques, des Batteries NiMH et des supercapacités sur l'ECOEFFICIENCE optimale des Bus hybrides.....	162
8.1.1	Modélisation.....	163
8.1.2	Critères de sélection.....	171
8.1.3	Simulation et modèles approchés.....	172
8.1.4	Formulation du problème d'optimisation.....	176
8.1.5	Résultats.....	177
8.2	Optimisation de l'Ecoefficiente d'une voiture hybride électrique moyen de gamme utilisant différentes technologies de batteries: la VW Golf 5.....	185
8.2.1	Modélisation et simulation.....	185
8.2.2	Critères et formulation du problème d'Optimisation.....	191
8.2.3	Résultats.....	193
Chapitre 9: CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....		197
9.1	Résumé des travaux.....	197
9.2	Contributions personnelles.....	201
9.3	Perspectives.....	202
9.4	Conclusion.....	203
Références.....		205
Annexe A: Analyse de la valeur.....		210
A.1	Définitions.....	210
A.2	Méthodologie.....	210
A.2.1	Orientation de l'action.....	210
A.2.2	Recherche de l'information.....	211
A.2.3	Analyse fonctionnelle.....	211
A.2.4	Recherche des solutions.....	215
A.2.5	Elaboration et évaluation des solutions.....	215
A.2.6	Bilan prévisionnel et proposition au décideur.....	216
A.2.7	La mise en application de la solution retenue.....	216
A.3	Conclusion.....	216
Annexe B: Procédures standards de mesure pour certains critères de définition de la satisfaction du besoin de transport.....		218
B.1	Tests NCAP et équipements de sécurité.....	218
B.1.1	Sécurité interne.....	218
B.1.2	Sécurité externe.....	224

B.2	Evaluation des alternatives: Application de l'AV	228
B.3	Pondération.....	232
B.3.1	Priorité des critères.....	232
B.3.2	Matrices de deuxième niveau	235
B.3.3	Satisfaction du besoin.....	236
Annexe C: Modélisation par approximation: surface de réponses.....		238
C.1	Introduction	238
C.2	Surfaces de réponses	239
C.3	Analyse de variance	241
C.4	Plans d'expériences	243
C.4.1	Différents types de plans	244
Annexe D: Courbes caractéristiques du moteur/pompe Parker		248
Annexe E: Caractéristiques des Batteries et des supercapacités		258
Annexe F: Performances des véhicules.....		259
F.1	Temps d'accélération pour passer d'une vitesse V1 à une vitesse V2.....	260
F.2	La plus grande vitesse maximale	260
F.3	La pente maximale franchissable	261

Chapitre 1: INTRODUCTION

1.1 Aperçu général

Actuellement, notre planète est menacée par un réchauffement global qui entraînera des changements climatiques avec des conséquences néfastes sur la vie. Ce désastre est lié à l'augmentation rapide des gaz à effet de serre. Ces gaz proviennent de presque toutes les activités humaines mais les principales sources sont les industries, le chauffage résidentiel et le transport. Car le principal gaz à effet de serre, de part ses quantités énormes présentes dans l'atmosphère, est le dioxyde de carbone (CO₂) rejeté lors de la combustion des combustibles fossiles dont le pétrole. Au niveau mondial, le transport dépend à 95% du pétrole. Ce qui représente 55% [WBCSD, 2004] de la consommation mondiale de pétrole ou 28% de l'énergie consommée dans le monde. De plus, le secteur de transport connaît une croissance moyenne de 2% par an. Concernant le transport routier, il consomme, à lui seul, 1,7 GTEP (Gigatonne équivalent de pétrole) en énergie dont 58,6% d'essence, 37,7% de gazole et le reste, soit 3,7%, concerne les carburants alternatifs dont le gaz naturel, le GPL et les biocarburants qui ne représentent que 1,5 %. Selon l'étude "The Sustainable Mobility Project" réalisée par WBCSD (World Business Council for Sustainability Development) en 2004 [WBCSD, 2004], la demande en transport routier connaît une forte croissance que ce soit pour les passagers ou les marchandises. L'étude prévoit une augmentation de la demande de transport routier de 62% pour les passagers (calculée en passagers kilomètres) et 100% pour les marchandises (calculée en tonnes kilomètres) dans les 30 prochaines années et elle sera doublée en 2050. Les régions qui connaîtront une large augmentation sont l'Afrique, l'Amérique Latine, l'Inde et la Chine. Les zones comme l'Europe et l'Amérique du nord connaissent une demande relativement stable (Figure 1.1).

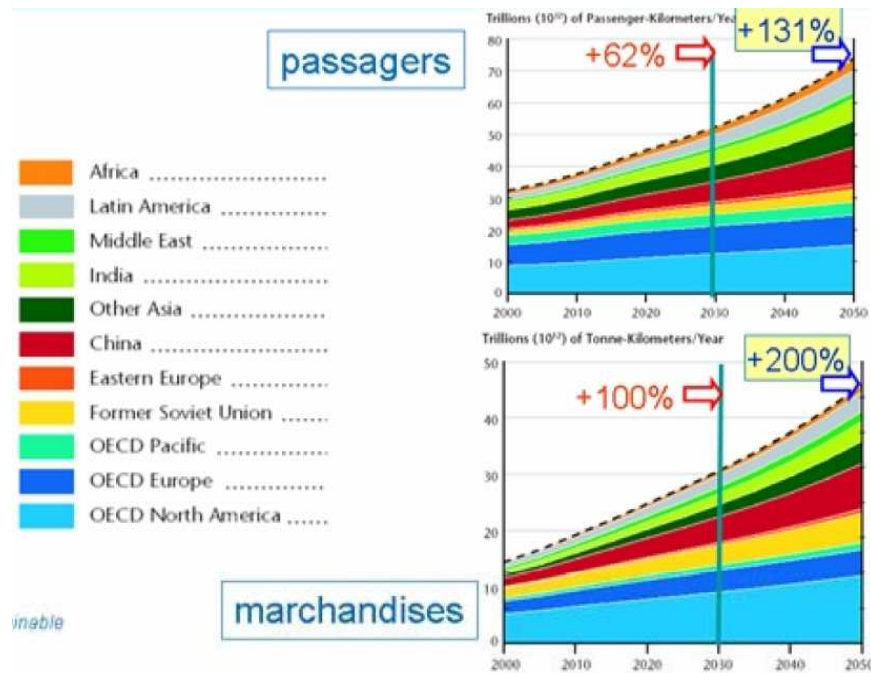


Figure 1.1: Accroissement de la demande de transport entre 2000 et 2050 [WBCSD, 2004]

Cette augmentation du trafic routier ne manque pas de conséquences désagréables:

La congestion du trafic rend inefficace le moyen de transport et limite la compétitivité. Les centres urbains sont les plus touchés et les grands axes routiers deviennent impraticables. Le coût de la congestion s'élevait à 0,5% du PIB Européen en 2001 et sera de 1% en 2010 [Dominic, 2006].

Qualité de l'air: En ce qui concerne les polluants locaux, le transport contribue essentiellement aux oxydes d'azote (NO_x) et au monoxyde de carbone (CO). En dépit des baisses de consommation et des émissions polluantes des véhicules, le transport routier reste un contributeur important de la pollution: 50% des oxydes d'azote et de monoxydes de carbone, 36% des particules lui sont imputables. La pollution sonore (bruit) devient également un problème important. Les dommages sur l'environnement, causés par les émissions issues du transport sont surtout sensibles en zone urbaine, car c'est dans les villes que l'on observe une présence simultanée d'un grand nombre de sources de pollution (voitures) et d'un grand nombre de récepteurs (habitants et bâtiments). Selon un inventaire sur les émissions atmosphériques à Londres, le secteur de transport routier représente la majeure partie de la pollution urbaine (Table 1.1).

Emissions	London	UK
NOx	75%	38%
CO	97%	62%
VOC	53%	61%
PM	77%	28%
CO ₂	29%	22%

Table 1.1: The contribution of road transport to atmospheric emissions in London and UK as a whole [Jefferson, 2002]

Une étude visant l'évaluation des coûts externes des secteurs de l'énergie et du transport a été réalisée dans le cadre du projet européen ExternE [European Commission DG XII, 1997] et a mis en évidence l'importance des dommages associés à la pollution atmosphérique d'origine automobile. Par exemple, l'impact du transport dans la Région de Bruxelles-Capitale a été évalué à 774 millions d'Euros par an [Walter et al., 2001].

Le dioxyde de carbone: L'augmentation de la demande de transport va de paire avec l'augmentation de la consommation des carburants principalement le pétrole et par conséquent une augmentation des émissions de CO₂. Le secteur du transport représente à lui seul 28% des émissions de CO₂ dans l'Union Européenne dont 84% revient au transport routier. L'accroissement des émissions de dioxyde de carbone constitue une menace pour le réchauffement global de la planète. Si rien n'est fait, l'augmentation des émissions de CO₂ atteindra les 50% entre 1990 et 2010.

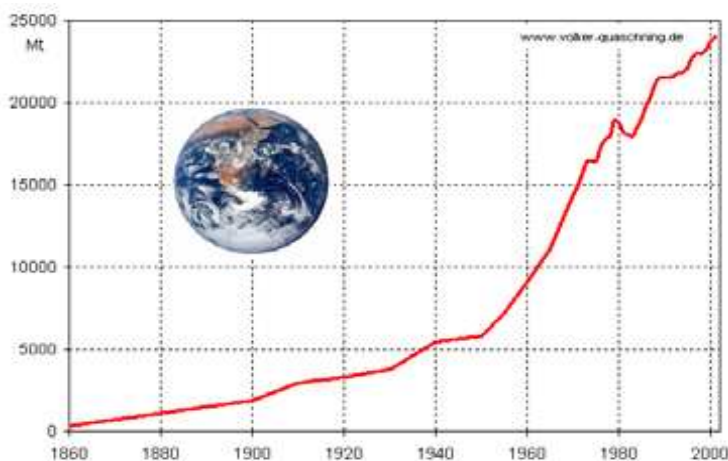


Figure 1.2: Evolution des émissions de CO₂ entre 1860 et 2000 et Mt

Sécurité routière: Bien que des progrès sensibles soient enregistrés en matière de sécurité, la route demeure de loin le moyen de transport le plus dangereux. Le coût social et économique de ce phénomène est énorme: 45.000 morts et plus de 1,3 million de blessés par an à l'échelle de l'Union Européenne [ECORYS, 2005].

Déplétion des ressources de pétrole: Le pétrole représente 35% de la demande mondiale de l'énergie primaire. La consommation mondiale de pétrole était de 83 millions de barils/jour en 2005 (contre 69,5 en 1995). L'OPEP (Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole) assure 41,7% de la production totale. D'après l'Association Internationale de l'Energie (AIE), les réserves de pétrole exploitable s'élèveraient à 130 milliards de tonnes (Gtep) soit l'équivalent de 13 années de consommation mondiale d'énergie primaire. Actuellement, la planète consomme 3,9 Gtep de pétrole par an dont 50% pour les transports (diesel, essence, LPG, kérosène...). Au rythme actuel, les réserves mondiales prouvées peuvent couvrir environ 40 années de production, mais c'est sans compter sur une augmentation vraisemblable de la demande tandis que la découverte de nouveaux gisements est de plus en plus difficile. L'OPEP dispose de 75% des réserves prouvées de pétrole.

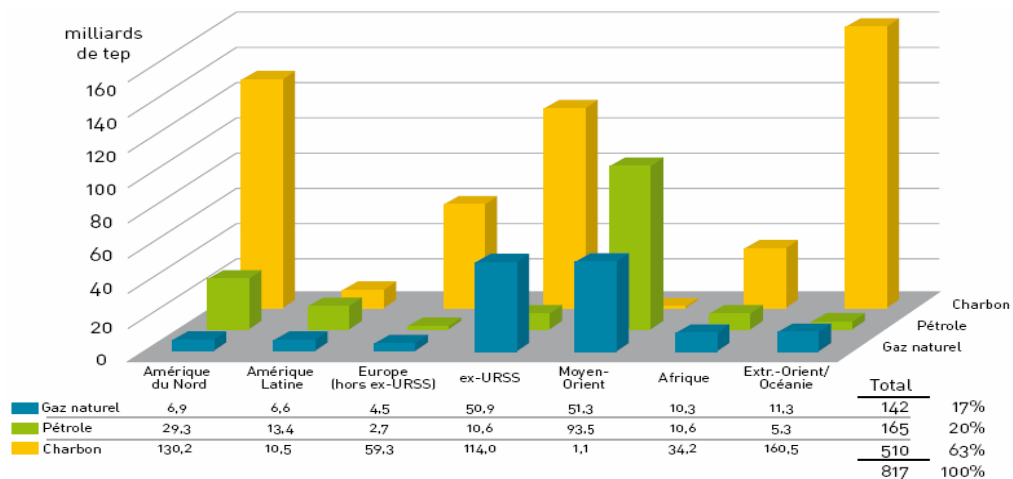


Figure1.3: Réserves prouvées de combustibles fossiles en Md de TEP [Mandil et al., 2005]

En résumé, les enjeux liés au transport routier auxquels nous devons faire face sont de trois ordres:

- La diversification des sources d'énergie pour se libérer de cette dépendance au pétrole qui n'est pas une source inépuisable et s'orienter vers d'autres sources plus propres telles que les biocarburants, l'électricité ou l'hydrogène.
- La réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) surtout le CO₂
- Et la réduction des émissions polluantes réglementées (HC, NO_x, CO, particules) et non réglementées, des nuisances comme le bruit et l'encombrement et les accidents de la route.

Les solutions à tous ces problèmes s'orientent sur trois axes: la technologie, la planification et le comportement individuel. La technologie concerne non seulement la motorisation mais également la communication (transfert d'informations entre véhicules et entre véhicules et infrastructures). La planification concerne la gestion des différents modes de transports tandis que le comportement individuel concerne le choix et l'usage du véhicule. L'amélioration de la motorisation est susceptible d'apporter plus de progrès en matière d'émissions de CO₂ et des polluants. Les moteurs (essence, diesel) et les carburants conventionnels constituent le pilier de la motorisation. C'est pour cette raison que le transport routier et surtout la voiture particulière fait objet d'une forte pression de la part de la législation en vue de réduire les émissions polluantes. Les normes d'émissions deviennent de plus en plus sévères et leur évolution montre une tendance à la convergence des limites d'émissions pour les deux types de moteurs. En effet, la Figure (1.4) montre que les limites d'émissions de NOx pour le diesel ont fortement diminuées depuis 2000 et pourront atteindre le même niveau que celles autorisées pour l'essence en 2013. Le moteur diesel devra diminuer respectivement ses émissions de NOx et de particules, de 85% et de 90%, par rapport à l'année 2000. Remarquons qu'à partir de cette année 2009 on va voir apparaître les limites d'émissions des particules pour les essences (injection directe) de même niveau que pour le diesel.

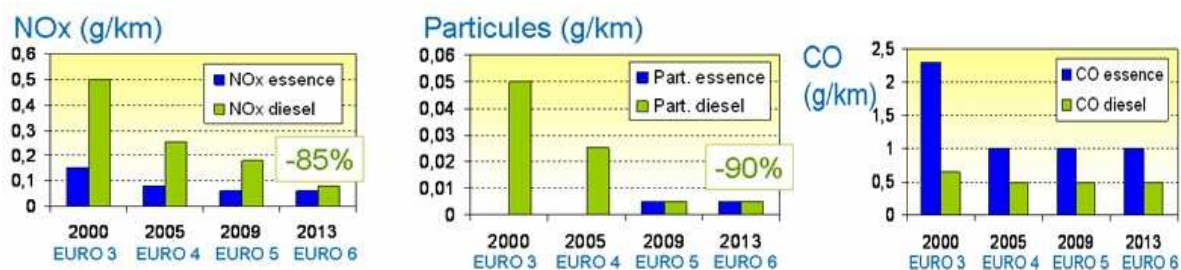


Figure 1.4: Evolution des normes Européennes

Concernant les émissions de CO₂, la situation européenne montre, d'une part, l'engagement de l'ACEA (Association des Constructeurs Automobile Européens) de réduire les émissions de CO₂ à moins de 120 g/km en 2012; d'autre part, en raison des objectifs arrêtés lors de la conférence de KYOTO, la proposition du parlement européen consiste à passer à 120g/km en 2006 pour atteindre 90g/km en 2010. Mais au regard de la situation actuelle, la moyenne des émissions de CO₂ des voitures diesel en Europe tourne autour de 150g/km et 170g/km pour les essences. On est donc loin des objectifs de KYOTO.

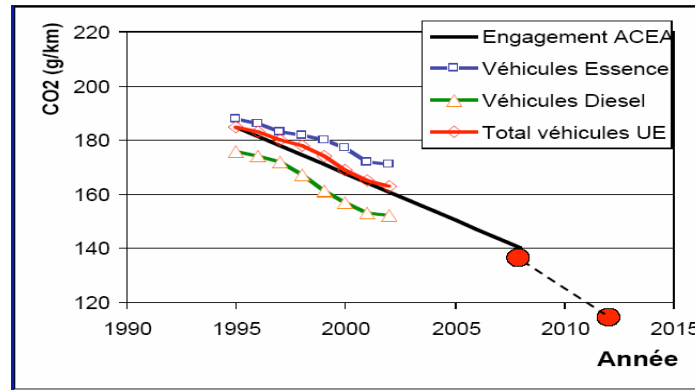


Figure 1.5: Engagement de l'ACEA pour l'année 2010 [Pinchon, 2004]

De gros efforts doivent donc être consentis pour réduire encore les émissions de NOx et de particules pour le moteur diesel et simultanément pour améliorer le rendement (émissions de CO₂) pour le moteur à essence avec un coût de plus en plus élevé.

En effet, pour le moteur à essence, les niveaux d'émissions des polluants sont généralement très bas grâce aux systèmes de post-traitement basés sur des catalyseurs à 3 voies qui éliminent simultanément le CO, les HC et les NOx. Toutefois, ces systèmes restent inefficaces au démarrage à froid et génère des pics d'émissions (70 à 85% des émissions de CO ont lieu à ce moment). Pour pallier ce problème, les recherches s'orientent vers des techniques d'amorçage du catalyseur à froid mais une solution commerciale n'est pas pour demain. Le plus grand défi du moteur à essence réside dans la réduction de ses émissions de CO₂ qui sont de 20% plus élevées par rapport au diesel. Pour y parvenir, certaines voies ont été envisagées d'autres sont en cours de développement. L'injection directe et la combustion stratifiée pour moteur à essence permet d'atteindre potentiellement des gains de 10 à 15% sur le cycle NDEC mais cette technique n'est rentable que lorsque le moteur fonctionne à faible régime et en mélange pauvre et, l'excès d'air combiné à de fortes températures entraîne la production, par réaction chimique, des oxydes d'azotes. Le catalyseur classique n'est donc plus efficace et il faut recourir aux catalyseurs permettant de piéger ces oxydes pour les réduire ensuite, ce qui conduit à une surconsommation du moteur lors des phases de déstockage de ces NOx, réduisant ainsi les gains obtenus. Le système à distribution variable combiné au downsizing basé sur la suralimentation par turbocompresseur est une technologie en développement qui permet d'envisager des gains entre 7 et 13%. Mais l'augmentation de température des gaz d'admission augmente le risque de cognement (auto allumage) et de formation des NOx. Ce qui nécessite l'utilisation d'un échangeur de chaleur au risque de l'augmentation du coût du

système et de l'énergie consommée atténuant ainsi les gains obtenus sur la consommation. Enfin de nouveaux procédés de combustion CAI (Controlled Auto Ignition) ou HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) sont étudiés et font entrevoir des gains de consommation de 10 à 15%.

La technologie diesel est très éprouvée et le rendement du moteur diesel est plus élevé que celui des moteurs à essence. L'injection directe à haute pression combinée à la suralimentation permet une diminution de la consommation de 15 à 20%, ce qui entraîne une diminution d'émissions de CO₂. L'optimisation de la combustion, le système EGR (Exhaust gaz recirculation) et la réduction de la taille du moteur (downsizing) augmentent encore le rendement. Toutefois, pour ce qui concerne les progrès à venir sur le diesel, il faut noter des émissions en oxydes d'azote et en particules qui restent importantes comparativement au moteur à essence. Ce fait est en quelque sorte reconnu par la réglementation actuelle avec des seuils d'émission de NOx supérieurs à ceux autorisés pour l'essence. Le «post-processing» des gaz d'échappement pour le diesel (Catalyseurs 4 voies, filtres à particule, Selective Catalytic Reduction (SCR), continuously regenerating trap, etc.) contribuera à la réduction des émissions polluantes avec la généralisation du filtre à particules. Mais le filtre à particules est un système complexe et coûteux qui nécessite un carburant sans soufre et entraîne une surconsommation de l'ordre de 2 à 5%. De plus, le système EGR est accompagné par un refroidisseur qui abaisse la température de combustion et réduit ainsi la formation des NOx mais la diminution de la température de combustion favorise l'augmentation du monoxyde de carbone et d'autres imbrûlés.

Notons également le développement des systèmes de contrôle de la combustion (modèles embarqués, capteurs/actionneurs) pour réduire les émissions polluantes mais ce sont des systèmes de plus en plus complexes et coûteux.

Les coefficients de résistance aérodynamique (SCx) et de frottement des véhicules ont aussi diminués grâce au nouveau design. Mais en même temps, les consommateurs continuent à exiger davantage de sécurité et de confort, ce qui se traduit en général par une augmentation du poids des véhicules défavorable à la consommation.

L'usage de carburants alternatifs (CNG, LPG, Méthanol, H₂...) a été aussi envisagé mais leur diffusion reste controversée.

De ce qui précède, le grand constat est que malgré d'autres technologies envisageables pour améliorer encore le rendement comme le HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) pour le diesel et le CIA (Combustion Control Auto Ignition) pour les essences, les technologies traditionnelles semblent avoir atteint une asymptote et ne pourront peut être plus répondre aux nouvelles exigences. En effet, il s'installe par exemple un conflit entre les techniques d'optimisation de la combustion et la réduction des émissions de polluants locaux. Les nouveaux systèmes d'optimisation de la combustion favorisent parfois une augmentation des émissions de certains polluants locaux nécessitant des systèmes de dépollution supplémentaires. L'ensemble devient complexe et consomme plus d'énergie réduisant ainsi les gains espérés.

D'autres solutions ont été envisagées et certaines ont déjà porté leur fruit: il s'agit des véhicules électriques et hybrides. Un des exemples les plus récents est la nouvelle Toyota Prius qui a déjà marqué des points en émettant moins de 120g/km de CO₂.

Le véhicule électrique est théoriquement la meilleure solution: aucune émission directe de CO₂ ni de polluants avec un bruit très réduit. De plus, ce véhicule se prête bien à la diversification des sources d'énergies car, l'électricité qu'il consomme n'est pas une source mais un vecteur d'énergie qui peut donc être produit à partir de plusieurs sources dont les énergies renouvelables. Le principal problème du véhicule électrique est lié aux batteries. L'autonomie reste faible (moins de 200km) et toute tentative d'amélioration de la capacité de stockage d'énergie entraîne une augmentation du poids (réduisant ainsi les performances du véhicule) et du coût des batteries. Les meilleures batteries en termes d'énergie stockable sont les batteries au lithium ion mais elles restent très chères. Il n'y a pas d'amélioration spectaculaire envisageable dans un proche avenir.

La pile à combustible constitue également une solution intéressante, car elle est une alternative technologique pour la conversion du carburant en électricité. Elle n'émet que de l'eau à l'échappement et son fonctionnement silencieux le rend plus adéquate en trafic urbain. Le rendement est théoriquement élevé (80%) mais en pratique, il est compris entre 50% et 60%. Toutefois, la pile à combustible est fabriquée à base de matériaux très coûteux. Il s'agit notamment du catalyseur en platine, du graphite et de la membrane perméable aux ions H⁺. En outre, plusieurs problèmes liés au réseau de production et de distribution à grande échelle de l'H₂, à son stockage ou à sa production à bord du véhicule restent toujours sans réponse. Il

existe plusieurs filières de production de l'hydrogène mais le bilan de la consommation d'énergie et des émissions globales de CO₂ reste problématique. Ces différentes filières de production devront attendre longtemps pour être validées et la pile à combustible apparaît comme une solution à long terme.

Le Véhicule Hybride est une solution intermédiaire très prometteuse. L'intérêt de ce véhicule est sa capacité de combiner les deux sources d'énergie (thermique et électrique) et bénéficier ainsi des avantages du véhicule conventionnel et du véhicule électrique. Ces systèmes de propulsion permettent de résoudre certains problèmes que l'on rencontre avec les systèmes conventionnels. Les moteurs à combustion interne ont une grande variabilité de régimes et fonctionnent parfois à très faible rendement. A l'arrêt du véhicule, dans les files ou devant les feux, le moteur thermique continue à tourner entraînant plus de consommation alors qu'avec le système hybride, on peut couper le moteur thermique et le redémarrer très rapidement ou tout simplement rouler «en tout électrique» lorsque la demande en puissance est faible. Dans d'autres cas, le moteur électrique apporte le supplément de puissance au moteur thermique lui évitant ainsi de fonctionner en dehors de ses capacités lorsque la demande en puissance est élevée. Le système hybride offre la possibilité de récupérer l'énergie de freinage (généralement dissipée en chaleur) et d'augmenter ainsi le rendement. De plus, à haut rendement, le système hybride stocke le surplus d'énergie dans les batteries quitte à l'utiliser ultérieurement. Enfin, le downsizing du moteur thermique combiné à la bonne gestion de l'énergie permet également d'obtenir un très bon rendement global. Le grand inconvénient du véhicule hybride reste son coût élevé. La masse et le volume du système de propulsion doivent aussi être optimisés sur une puissance donnée. Mais, ce véhicule a de l'avenir parce qu'il peut être décliné en plusieurs configurations, selon l'usage. L'hybride léger appelé aussi "mild hybrid" permet de gagner 10% sur la consommation bien que ses performances ne soient pas des plus appréciées mais pour un coût peu élevé. Le "full hybrid" ou hybride complet a de très bonnes performances et permet des gains de consommation allant jusqu'à 40% mais présente un coût plus élevé. Le véhicule hybride se prête non seulement à la diversification des sources d'énergie mais également à l'usage d'autres nouveaux composants comme les Supercapacités et les accumulateurs Hydrauliques ou pneumatiques. L'usage des composants hydrauliques a certes des inconvénients, liés surtout à leur masse et encombrement, mais suscite beaucoup d'intérêts au regard de leurs coûts et de leur recyclabilité moins polluante par rapport aux batteries.

Il ressort de ce qui précède qu'il existe beaucoup de solutions alternatives eu égard à la diversité des sources d'énergie d'une part et à la possibilité d'avoir plusieurs technologies de propulsion par combinaisons de différents composants d'autre part. Il est dès lors difficile de cerner les solutions les plus intéressantes sur tous les aspects lorsqu'on est encore à la phase de la conception préliminaire. Certaines filières de productions des carburants et ou de fabrication des véhicules par exemple restent méconnues quant à leur bilan énergétique et gaz à effet de serre (GES). Ainsi donc, bien que les véhicules hybrides soient prometteurs sur le plan environnemental, certaines interrogations subsistent:

- satisfont-ils mieux que les véhicules conventionnels les besoins de l'utilisateur?
- constituent-ils un réel progrès pour l'environnement?
- les performances environnementales ne sont-elles pas offertes à un prix nettement plus élevé en regard des ressources consommées?

Plusieurs outils d'évaluation des systèmes de transport automobile comme la LCA (Life Cycle Assessment), l'ECOSCORE existent mais sont orientés sur l'impact environnemental. Et pourtant, le succès sur le marché des nouvelles technologies, notamment les véhicules hybrides, est fortement lié à la satisfaction des utilisateurs potentiels. D'où l'idée de définir l'ÉCOEFFICIENCE comme un nouveau concept qui tient compte à la fois de l'impact des véhicules sur l'environnement et de la satisfaction de l'utilisateur (SU). Les contraintes environnementales sont fortes et constituent souvent un élément essentiel des évolutions technologiques et des schémas d'organisation ou de planification des moyens et infrastructures de transport. La satisfaction de l'utilisateur souvent ignorée par les outils d'évaluation des systèmes de transport est aussi un élément important pour une clientèle de plus en plus exigeante en matière de qualité et de service. Par ailleurs, les impacts sur l'environnement sont très nombreux, de nature très diverse et sont souvent antagonistes aux critères de satisfaction de l'utilisateur (ou de performances). Cela explique la nécessité de disposer dans un premier temps d'outil et de méthode d'évaluation et dans un deuxième temps d'optimisation de l'écoefficient des systèmes de transport pour guider le concepteur.

1.2 Premier objectif: Mesure de l'écoefficient

Le premier objectif de ce travail est de développer une méthode de mesure de l'écoefficient des systèmes de propulsion de véhicule. Il s'agit de fournir des indicateurs agrégés permettant une évaluation globale de l'écoefficient des systèmes de transport automobile. La

particularité de la méthode repose sur l'intégration au sein de l'indicateur de l'écocoefficience, de données scientifiques reconnues (impact sur l'environnement) et surtout des données liées aux services offerts par le système de transport (satisfaction des besoins). L'écocoefficience est une combinaison des indicateurs:

- de l'impact des moyens de transport sur l'environnement
- et du niveau de satisfaction de l'utilisateur.

L'impact environnemental regroupe tous les dommages causés par les différentes émissions du véhicule sur tout son cycle de vie et son évaluation sera fondée sur la méthode ECOSCORE. Le choix de cette méthode est surtout lié à sa simplicité et au fait qu'elle est plus orientée vers l'utilisation contrairement à la LCA plus complexe et plus orientée vers le processus industriel. L'ECOSCORE ne prend en compte que deux phases du cycle de vie du véhicule: la phase "utilisation du véhicule" et la phase "production carburant". Mais, elle est prête à intégrer les autres phases dès que les données sont disponibles. Dans notre démarche de calcul de l'impact environnemental, nous avons pris en compte la phase "Fabrication du véhicule".

La satisfaction de l'utilisateur (SU), est un indice composé de plusieurs critères (coût de transport, performances, sécurité en cas de collision, confort, esthétique...) et qui sert à évaluer la capacité du véhicule à répondre aux exigences du client en matière de transport. L'évaluation de la satisfaction de l'utilisateur sera fondée sur le concept d'ANALYSE DE LA VALEUR.

1.3 Deuxième objectif: Conception optimale des chaînes de traction

L'évaluation des différents indicateurs met en jeu plusieurs critères ou fonctions parfois contradictoires, ce qui incite à utiliser les méthodes d'analyse multicritère. Le cadre théorique du travail est cependant différent de celui de l'aide à la décision. En effet, on ne se limite pas seulement aux décisions possibles entre les solutions déjà existantes comme le veulent les méthodes d'analyse multicritère. Mais on choisit également de concevoir un système de transport en vue d'atteindre un ensemble d'objectifs en termes d'impacts sur l'environnement

et du niveau de satisfaction de l'utilisateur. En outre, suite aux nombreux paramètres entrant dans la configuration des véhicules hybrides, il est souhaitable d'utiliser des techniques d'optimisation multicritère ou multi objectifs permettant de choisir les compromis entre plusieurs objectifs et contraintes. Cette problématique implique de nombreuses disciplines comme la modélisation, le contrôle, la simulation et l'optimisation. Le deuxième objectif de ce travail est donc de pouvoir formaliser la démarche de conception rationnelle des chaînes de traction hybride basé sur une approche d'optimisation multidisciplinaire, permettant simultanément de maximiser l'indice agrégé de la satisfaction de l'utilisateur et de réduire au minimum les impacts sur l'environnement. L'apport scientifique du travail porte d'une part sur la méthodologie pour évaluer et quantifier la satisfaction du besoin et sur la démarche de conception rationnelle intégrant les indicateurs d'écocoefficienne, d'autre part.

1.4 Troisième objectif: comparaison des systèmes de stockage d'énergie

Le troisième objectif est d'exploiter l'outil développé par une application comparative des véhicules hybrides électriques utilisant les batteries NiMH comme système de stockage de l'énergie et ceux utilisant les nouveaux systèmes de stockage d'énergie comme les Supercapacités et les accumulateurs hydrauliques. L'objectif de cette application est de faire une comparaison des différentes technologies de stockage d'énergie en opérant des choix optimaux de la configuration hybride et de la taille des composants mécaniques, électriques et hydrauliques en vue de l'optimisation de l'écocoefficienne des bus hybrides pour différents scénarios de conduite.

Une deuxième application concerne une comparaison optimale de la voiture moyenne de gamme (la VW GOLF5) utilisant quatre technologies de batteries (PbAc, NiMH, Li-I, NiCd). L'objectif est ici de mettre en évidence l'effet des différentes technologies de batteries, sur l'ECOEFFICIENNE des véhicules dans la configuration série et parallèle.

1.5 Structure du rapport

Concernant la structure du rapport, le 2^{ème} chapitre concerne la revue de la littérature sur les véhicules hybrides électriques. Le 3^{ème} et le 4^{ème} chapitre portent sur des alternatives technologiques pour les systèmes de stockage de l'énergie comme les accumulateurs hydrauliques (au deuxième chapitre) et les supercapacités (au troisième chapitre). Le 5^{ème} chapitre explicite les méthodes de calcul des impacts des différents polluants sur l'environnement. La démarche de calcul de l'impact environnemental (basée sur la méthodologie ECOSCORE) qui sera utilisée dans ce travail est expliquée en détails. Les améliorations que nous avons apportées à la phase d'inventaire de la méthode Ecoscore, pour qu'elle soit plus complète, sont également évoquées dans ce même chapitre. Le 6^{ème} chapitre traite les méthodes d'évaluation de l'écocoefficiencé sur base des critères environnementaux et des critères de satisfaction de l'utilisateur. Cette évaluation de l'écocoefficiencé se fera sur des cas d'application des systèmes de transport individuel. Le 7^{ème} chapitre concerne la démarche d'intégration de l'écocoefficiencé dans la conception préliminaire des véhicules propres. Il traite le concept de la conception préliminaire et les démarches de modélisation des critères de définition de la satisfaction de l'utilisateur et de performances. Il s'agit des concepts de bases relatives à la formulation du problème d'optimisation, aux méthodes et aux algorithmes d'optimisation. La procédure que nous avons proposée est détaillée dans ce chapitre. Le 8^{ème} chapitre détaille les applications de la méthode et le 9^{ème} chapitre parle des conclusions et des perspectives.

Chapitre2: LES VEHICULES HYBRIDES ELECTRIQUES

2.1 Définitions

D'une façon générale, un véhicule hybride est un véhicule dont l'énergie nécessaire à la propulsion provient non pas d'une seule source mais de plusieurs sources. La source principale dite source primaire (primer mover) est généralement un moteur à combustion interne. Mais il peut également s'agir d'une pile à combustible, d'une turbine à gaz ou à vapeur. L'énergie provenant de la source secondaire peut être sous forme cinétique (volant d'inertie), électrique (batteries) ou hydraulique (accumulateurs hydrauliques). Ce chapitre passe en revue les différents composants et configurations des véhicules hybrides électriques. Les véhicules hybrides hydrauliques et les hybrides électriques avec supercapacités sont des technologies récentes qui seront détaillées au deuxième et au troisième chapitre respectivement. Ces deux technologies feront également objet d'application de notre démarche d'optimisation de l'ECOEFFICIENCE des véhicules hybrides.

Les véhicules hybrides électriques (VHE) sont définis comme les véhicules pour lesquels, l'énergie de propulsion provient de deux ou plusieurs sources d'énergie ou systèmes de stockage ou de conversion d'énergie avec au moins une qui délivre de l'énergie électrique. Cette définition est plus générale et offre plusieurs combinaisons possibles entre les différents composants. Elle n'est pourtant pas acceptée unanimement et beaucoup préfèrent considérer un véhicule hybride électrique comme étant simplement un véhicule ayant à la fois un moteur thermique et un moteur électrique.

Selon la taille ou les performances de la source secondaire, on peut distinguer les véhicules hybrides complets et les véhicules hybrides doux. On appelle hybrides complets ou "full hybrid", les véhicules qui peuvent se mouvoir au moins à basse vitesse sans utiliser leur moteur thermique (ou de l'énergie chimique). D'autres auteurs parlent de "full hybrid" lorsque les deux sources d'énergie peuvent être utilisées pour mouvoir le véhicule pendant un

temps significatif. La Toyota Prius II et le Lexus RX400h sont des hybrides complets. Par contre, les hybrides doux ou "mild hybrid" ont toujours besoin de la source d'énergie primaire. La source d'énergie secondaire est soit incapable de mouvoir seule le véhicule, soit elle ne peut le faire que pendant des périodes très courtes en aidant la source principale. A titre d'exemple, on peut citer la Honda Insight comme hybride doux.

Selon le concepteur, les batteries sont chargées à partir du réseau électrique ou bien seulement à partir de la source primaire (moteur thermique). Ceci donne lieu à une nouvelle distinction dans les véhicules hybrides:

- Les véhicules à "charge sustaining" ne sont capables de maintenir l'état de charge des batteries que grâce à la source d'énergie primaire,
- Les véhicules à "charge depleting" ne sont pas capables de maintenir l'état de charge des batteries qui nécessite l'utilisation d'une recharge sur le réseau électrique,
- Les véhicules hybrides "plug-in" sont ceux qui sont capables de recharger leurs batteries sur le réseau ou avec la source primaire.

2.2 Intérêt des véhicules hybrides

Les véhicules hybrides sont relativement plus économes que les véhicules conventionnels surtout en trafic urbain. Le système hybride offre la possibilité de récupérer l'énergie de freinage et améliorant ainsi le rendement global du véhicule. Compte tenu de l'apport du moteur électrique, le moteur à combustion interne peut être dimensionné pour une charge moyenne et non pour la charge maximale. Un hybride série (voir paragraphes 2.3.1) peut être muni d'un moteur relativement petit, réglé de façon optimale à un régime déterminé et fonctionnant le plus souvent à pleine puissance. De cette manière, on peut atteindre un rendement de 35 à 40% alors que le rendement d'un moteur de voiture conventionnelle ne dépasse pas 18% en trafic urbain. La consommation énergétique d'un hybride étant plus basse que celle d'un véhicule conventionnel, ses émissions de CO₂ sont par conséquent plus faibles. La Table (2.1) montre les gains en émissions de CO₂ des différentes configurations hybrides en conduite urbaine:

Type d'hybride	Fonctions	Puissance électrique	Gain en CO ₂
Mini-hybride Alterno-démarrreur Stop & Start	1 (Arrêt moteur thermique au ralenti)	2 kW	8%
Stop & Go	1 + 2 (Freinage récupératif)	3 kW	13%
Mild-hybrid	1 + 2 + 3 (downsizing moteur thermique et assistance accélération)	10 kW	30%
Full hybride série ou parallèle	1 + 2 + 3 + 4 (mode électrique pur)	30 kW	45%

Table 2.1: Degré d'hybridation et gains en consommation [Pinchon, 2004]

Suivant la configuration, les véhicules hybrides comparés aux véhicules conventionnels sont plus avantageux en termes d'émissions de polluants. Ils offrent en effet la possibilité de:

- Rouler entièrement à l'électricité, par exemple en milieu urbain, et donc sans produire aucune émission locale.
- Rouler entièrement à l'électricité au démarrage ou si la puissance nécessaire est faible et que les batteries sont suffisamment chargées.
- Rouler en mode hybride quand il faut épauler le moteur thermique en phase d'accélération et lui éviter de travailler au-delà de ses capacités et d'émettre plus de polluants en travaillant avec un mauvais rendement
- Réduire les émissions au démarrage à froid. C'est en effet pendant le démarrage qu'on observe des pics d'émissions chez les moteurs à combustion interne et ce surtout lorsque le moteur est encore froid. Les pics d'émissions lors du démarrage à froid sont principalement dus au fait que le mélange est enrichi et que le catalyseur n'est pas encore à température. Les véhicules hybrides peuvent fonctionner électriquement pendant cette première partie du trajet, en attendant que le catalyseur soit réchauffé électriquement pour passer au moteur à combustion interne.

Le grand avantage des véhicules à «charge depleting» est que les émissions de CO₂ et de polluant associées à la production d'électricité peut être relativement basse, si elle est effectuée dans des installations importantes équipées de systèmes de dépollutions, de centrales nucléaires ou à partir d'énergie verte.

Le gain des véhicules à «charge sustaining» en termes d'émissions et de consommation est souvent moindre à cause de la nécessité de devoir recharger les batteries avec le moteur à combustion interne. En revanche, ils ne demandent pas de modifications des habitudes du conducteur pour planifier la recharge des batteries qui peut être longue. C'est cette catégorie

de véhicule hybride qui sera considéré dans notre travail même si elle est assez restricteur en termes d'amélioration des performances environnementales.

2.3 Architecture

Plusieurs combinaisons des sources d'énergie des véhicules hybrides sont possibles. Elles dépendent du type de véhicule et de son usage (cycle de conduite). Les principales configurations des véhicules hybrides électriques les plus utilisées sont les suivantes:

2.3.1 Hybride électrique série

Le système hybride électrique série est le plus simple. Il s'agit, en fait, d'un moteur électrique assisté par un moteur thermique ou une pile à combustible pour améliorer l'autonomie du véhicule. La puissance mécanique délivrée par le moteur thermique est transformée en électricité via le générateur. Cette électricité peut servir à charger la batterie via le convertisseur ou à propulser directement le véhicule via le moteur électrique jouant à la fois le rôle de moteur et de transmission mécanique. L'avantage principal de cette configuration est lié au fait que le moteur thermique peut être utilisé à une vitesse constante dans sa plage de meilleur rendement. De plus, l'absence d'embrayage dans tout le lien mécanique lui confère une bonne flexibilité. Par contre, bien que sa chaîne de traction soit la plus simple, il a besoin de trois dispositifs de propulsion: deux moteurs (électrique et thermique) et un générateur. La double transformation d'énergie (mécanique-électrique-mécanique) pénalise le rendement global du système. Un autre désavantage est que les trois composants doivent être dimensionnés sur la puissance maximale pour les cycles les plus exigeants. Mais, pour de petits trajets, l'ensemble générateur/moteur électrique peut être dimensionné sur une puissance moyenne plus faible. Il est encore d'usage de définir le taux d'hybridation série comme étant le ratio entre la puissance du groupe électrogène et celle du moteur électrique de traction:

$$\tau_{série} = \frac{P_{groupe}}{P_{mot.élec.}} \quad (2.1)$$

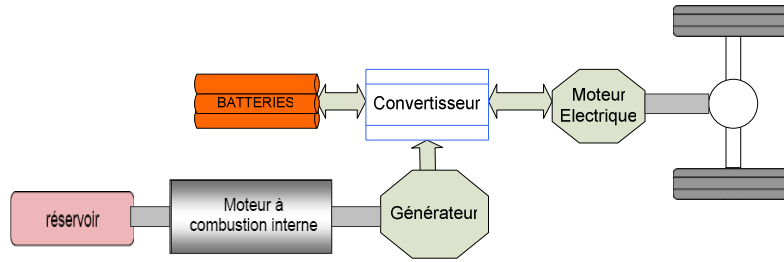


Figure 2.1: Véhicule Hybride Série

2.3.2 Hybride électrique parallèle

A la différence du système hybride série, l'hybride parallèle permet aux deux moteurs (thermique et électrique) de fournir en parallèle la puissance de propulsion au train roulant. Les deux moteurs sont généralement couplés à l'arbre de transmission par l'intermédiaire de deux embrayages. La puissance propulsive est alors fournie soit par le moteur thermique, soit par le moteur électrique ou par les deux à la fois. Conceptuellement, il s'agit d'un moteur thermique aidé par un moteur électrique pour diminuer la consommation et l'émission des polluants. La charge de la batterie est assurée par le moteur thermique quand la puissance fournie est supérieure à celle requise pour la propulsion du véhicule. Le moteur électrique peut aussi être utilisé comme générateur pour charger la batterie par le freinage récupératif. Un autre avantage est que de petits moteurs peuvent être utilisés tout en gardant les mêmes performances. On définit le taux d'hybridation parallèle par le ratio entre la puissance du moteur électrique et la somme des deux puissances du moteur électrique et du moteur thermique:

$$\tau_{\text{parallèle}} = \frac{P_{\text{mot.élec.}}}{P_{\text{mot.élec.}} + P_{\text{mot.therm.}}} \quad (2.2)$$

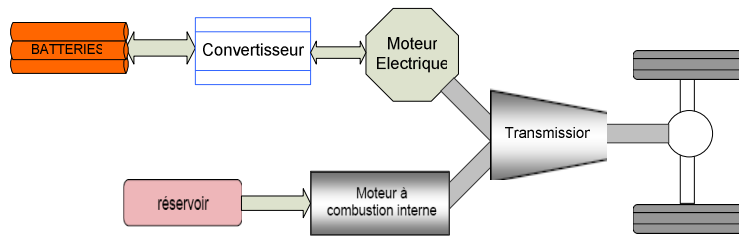


Figure 2.2: Véhicule Hybride Parallèle

2.3.3 Hybride doux (mild hybrid)

Cette configuration mérite une attention particulière, car elle s'avère être la plus prometteuse dans un avenir proche pour le marché européen et attire l'attention de beaucoup de constructeurs. La configuration particulière de l'hybride doux est bâtie sur l'hybride parallèle avec un seul arbre. L'embrayage numéro 1 (Figure 2.3) sert à déconnecter le moteur thermique de la transmission quand le véhicule roule en mode électrique pur (uniquement pour les hybrides complets).

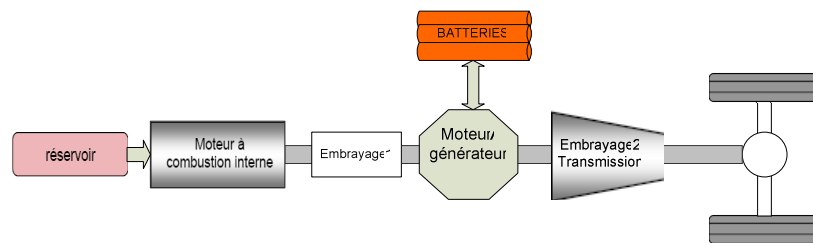


Figure 2.3: Hybride parallèle avec un seul arbre

Le moteur électrique peut être couplé au moteur thermique soit par une transmission par courroie, soit par une boîte mécanique ou alors le moteur électrique peut être directement intégré au moteur thermique. Dans ce dernier cas, on fait usage d'un Alternateur-Démarrreur Intégré avec Amortissement (ISG), couplé mécaniquement au moteur à combustion interne. L'ISG est un électromoteur d'une puissance de 5 à 10 kW. Il remplace le volant d'inertie sur le moteur et fait office de moteur de démarrage pour la mise en marche du moteur thermique et comme générateur (ou alternateur) lors du fonctionnement normal. De plus, l'ISG peut assister le moteur à combustion interne en cas de fortes charges. Les systèmes ISG permettent de:

- Couper le moteur à combustion interne à l'arrêt du véhicule et le redémarrer rapidement (fonction stop and start)

- Réduire au minimum le moteur à combustion interne (une partie du pic de puissance peut être livrée par l'ISG): c'est le downsizing. Cela permet aussi d'augmenter le rendement global du moteur à combustion interne.
- Récupérer, via l'ISG, une partie de l'énergie de freinage (même faible) pour recharger les batteries.

Cette technologie peut faire baisser la consommation de carburant de l'ordre de 15 à 20 %. Les hybrides avec Assistance du Moteur Intégrée (IMA) sont similaires aux Alternateurs-Démarrateurs Intégrés, mais ils possèdent un moteur électrique plus important (jusqu'à 25kW) qui peut être utilisé pour mouvoir effectivement le véhicule. L'intégration du moteur électrique sur le moteur thermique rend le groupe motopropulseur plus compact et permet d'utiliser la transmission traditionnelle. Ce système permet des gains intéressants en termes de consommation et d'émissions de polluants avec un coût moins élevé comparativement à celui d'un hybride complet. Le principal désavantage est que la vitesse du moteur électrique doit toujours être la même que celle du moteur thermique. Ce qui réduit fortement la flexibilité du système.

2.3.4 Autres configurations

Suite à de nouvelles combinaisons entre les systèmes série et parallèle, il est apparu, il y a quelques temps, une troisième catégorie: les véhicules hybrides électriques (VHE) série-parallèle. Depuis l'année 2000 on parlait déjà d'une quatrième catégorie: VHE parallèles complexes.

L'hybride série-parallèle est la combinaison des deux architectures précédentes avec un lien mécanique additionnel comparable au système parallèle et un générateur additionnel comparable au système série. Ce système regroupe tous les avantages liés aux deux systèmes séries et parallèles. Mais les systèmes hybrides série-parallèle et hybrides complexes sont des systèmes relativement compliqués et coûteux. Cependant, avec les avancées en technologie de commande et de fabrication, certains constructeurs préfèrent ces systèmes. La Prius II est un exemple d'hybride complexe avec une transmission souple. La liste n'est pas exhaustive, plusieurs combinaisons, aboutissant à diverses configurations sont encore possibles.

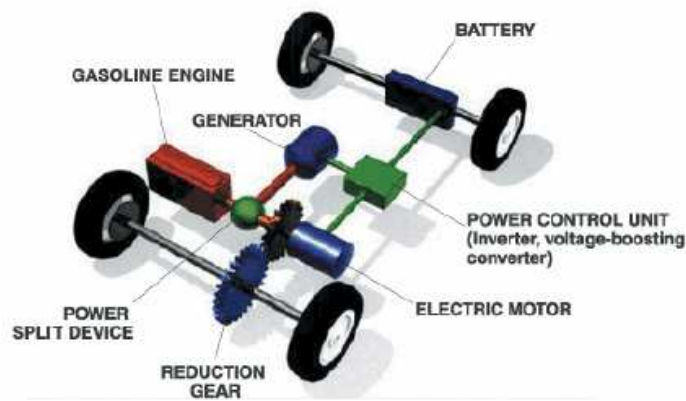


Figure 2.4: Véhicule Hybride complexe: La Prius II

2.4 Principaux composants

Les principaux composants d'un véhicule hybride électrique sont: la source d'énergie primaire, des convertisseurs pour l'énergie secondaire qui sont des machines électriques (génératrices ou moteurs), des dispositifs de modulation de cette énergie (électronique de puissance), des accumulateurs d'énergie secondaire qui sont des packs de batteries ou des supercondensateurs, un dispositif de contrôle et de gestion de l'énergie (hybrid control unit) et un système de transmission mécanique généralement évoluée.

2.4.1 La source primaire

2.4.1.1 Moteur à combustion interne

Les récents développements technologiques aussi bien pour le moteur à essence que pour le moteur diesel, rendent ces deux moteurs plus attractifs pour les véhicules hybrides électriques et ceci pour trois raisons. La première, c'est la grande densité énergétique des carburants d'origine pétrolière qui confère une grande autonomie au véhicule avec quelques dizaines de litres. La deuxième raison est liée au fait que les processus de production et de distribution des carburants pétroliers sont totalement maîtrisés et les infrastructures nécessaires à leur diffusion sont largement établies depuis longtemps. Enfin, la troisième raison est liée aux améliorations successives des moteurs à combustion interne que ce soit au niveau des systèmes de dépollution (catalyseurs trois voies ou 4 voies, filtres à particules, etc.) ou au niveau de l'optimisation de la combustion (injection directe et suralimentation, contrôle électronique et des valves de timing, etc.). L'optimisation de la combustion et la réduction de

la taille du moteur (downsizing) améliorent fortement le rendement. Le moteur diesel a un grand rendement et se prête mieux au downsizing par rapport au moteur à essence. Il constitue un premier choix pour tout type de véhicule hybride. Evolution: construction des moteurs à combustion interne de petite cylindrée spécialement adaptés au fonctionnement des hybrides (intermittent).

2.4.1.2 La pile à combustible

La pile à combustible constitue également une solution intéressante car elle n'émet que des vapeurs d'eau à l'échappement et son fonctionnement silencieux le rend plus adéquate en trafic urbain. Le rendement théorique est aussi élevé. Cependant, le succès de la pile à combustible est intimement lié à celui du carburant qu'elle utilise. L'hydrogène constitue la solution prometteuse au problème environnemental (émissions des gaz à effet de serre) et énergétique (déplétion des fossiles). Mais c'est une solution à prendre avec précautions, car l'hydrogène est un vecteur énergétique et non une énergie primaire. L'utilisation de l'hydrogène nécessite donc la mise en place de l'infrastructure de production, de transport, de stockage et de distribution avec par exemple des stations service (où l'hydrogène pourrait être obtenu par reformage du gaz naturel). L'utilisation massive de l'hydrogène comme carburant suppose que primo, des problèmes techniques soient résolus et secundo que cette solution soit économiquement viable. Mais si l'hydrogène devait être utilisé, on se retrouverait face au problème de l'œuf et de la poule: qui doit être introduit en premier, les véhicules à PAC ou l'infrastructure nécessaire? Dans tous les cas, la transition demandera du temps et des progrès technologiques. Néanmoins les acteurs économiques doivent s'en préoccuper pour être prêts dans l'hypothèse où l'hydrogène prendrait une place significative comme vecteur d'énergie. Il paraît vraisemblable que le changement dépendra d'un choix politique et stratégique, plus qu'un problème technique dans les prochaines années. Ainsi la Commission européenne envisage-t-elle 20% de substitution aux énergies fossiles d'ici 2020 [Hydrogen Workshop, 2001]. Enfin, il faut encore signaler deux obstacles qui devront encore être surmontés:

- vaincre l'inertie de l'industrie pétrolière,
- convaincre les consommateurs réticents à utiliser l'hydrogène.

2.4.1.3 Autres sources primaires

Un des avantages des véhicules hybrides électriques est que le moteur thermique peut fonctionner à charge et à vitesse constantes. Ce qui fait qu'il peut être monté en dehors de la chaîne de traction. Pour cette raison, d'autres moteurs peuvent être utilisés. Il s'agit des turbines à gaz ou à vapeur. Cependant, la littérature ne rapporte que de rares applications à l'heure actuelle [Ehsani et al., 2005].

2.4.2 Le moteur électrique

Dans beaucoup de cas, les machines électriques (moteurs et alternateurs) utilisés dans les véhicules hybrides électriques ne diffèrent pas conceptuellement des moteurs électriques classiques utilisés dans d'autres applications. Selon les performances recherchées, les moteurs électriques qui équipent les voitures peuvent être des moteurs à courant continu (shunt ou série) ou des moteurs à courant alternatif asynchrone (monophasés ou triphasés) ou synchrones monophasés. Le système de commande électronique entièrement analogique utilisé jadis a fortement évolué avec l'électronique de puissance et la commande digitale, ce qui permet de prendre en compte beaucoup de paramètres lors du fonctionnement et de minimiser la consommation d'énergie. Chaque constructeur possède ses propres algorithmes de commande. Les moteurs électriques de traction doivent être caractérisés par:

- un couple élevé à basse vitesse, ce qui permet aux véhicules électriques de s'insérer sans difficultés dans la circulation
- des puissances massique et volumique les plus élevées possibles
- une possibilité de récupération d'énergie pendant le freinage
- Une stratégie de pilotage qui optimise continuellement la consommation d'énergie.

La récupération d'énergie au freinage est possible grâce à la propriété des moteurs électriques de fonctionner de manière réversible soit en moteur, soit en générateur. La Table (2.2) évalue de façon chiffrée et sur base de six critères, les différentes technologies de moteurs électriques utilisés dans les véhicules électriques et hybrides. Les moteurs asynchrones sont avantageux quant à la fiabilité, la robustesse et surtout le coût. Ils sont peu coûteux, car leur construction est simple et ils ne nécessitent pas beaucoup d'entretien. Ils sont par contre plus lourds et de

rendement inférieur par rapport au moteur asynchrone à aimants permanents mais ils restent concurrentiels en raison de leur coût réduit.

	Moteur DC	Moteur asynchrone	Moteur brushless	Moteur SR	Moteur PM hybride
Densité de puissance	2,5	3,5	5	3,5	4
Efficacité	2,5	3,5	5	3,5	5
Contrôlabilité	5	4	4	3	4
Fiabilité	5	4	4	3	4
Maturité	5	5	4	4	3
Coût	4	5	3	4	3
Total	22	26	25	23	23

Table 2.2: Comparatif des moteurs électriques [Chan, 2002 et Wong, 2005]

Les innovations en matière de conception des moteurs électriques sont bien remarquables dans la configuration hybride parallèle qui est la plus utilisée. Par exemple la Honda Insight est équipée d'une machine électrique particulièrement performante. C'est un moteur/générateur synchrone, à aimants permanents, ultrafin (60 mm) de 41 cm de diamètre. Il est positionné sur l'arbre moteur à la place du volant d'inertie et joue en plus le rôle de ce dernier.



Figure 2.5: Machine électrique de la Honda Insight

Mais tous les véhicules n'utilisent pas évidemment le même type de moteur et de montage. Dans certains cas, le moteur électrique est connecté sur l'arbre moteur via une courroie ou directement sur la transmission via une boîte de vitesse basée sur un réducteur épicycloïdal comme c'est le cas chez la Toyota Prius.

2.4.3 Les Batteries

Les batteries constituent un tampon énergétique pour les véhicules hybrides électriques. Elles servent à stocker l'énergie électrique quand le moteur thermique travaille à haut rendement et pendant le freinage récupératif. Cette énergie sera restituée par la suite pour la propulsion du véhicule. Les caractéristiques principales des batteries utilisées dans les véhicules électriques et hybrides électriques sont:

- L'énergie spécifique (Wh/kg ou Wh/l): quantité totale d'énergie qu'une batterie peut contenir par unité de masse ou de volume à une vitesse de décharge déterminée. Ce paramètre est lié à l'autonomie du véhicule.
- La puissance spécifique (W/kg ou W/l): puissance maximale qu'une batterie peut développer par unité de poids ou de volume à un taux de décharge bien déterminé. Ce paramètre est lié à l'accélération et à la vitesse maximale du véhicule et à la capacité de freinage récupératif.

Les deux caractéristiques sont dépendantes et sont généralement antagonistes. Pour un type de batterie donné, le choix d'une grande puissance spécifique entraîne une énergie spécifique minimale et vice versa. On préfère l'énergie spécifique pour les véhicules électriques et la puissance spécifique pour les hybrides.

- Le rendement de charge/décharge (%): ratio entre l'énergie récupérée en sortie (décharge) sur l'énergie nécessaire à la recharge suivante. Le rendement dépend de l'intensité du courant et donc des puissances lors de ces opérations. Les pertes sont dues à l'effet joule et aux réactions électrochimiques internes à la batterie.
- La profondeur de décharge (%): seuil en deçà duquel la batterie subit des dommages irréversibles.
- La durée de vie (nombre de cycles): période pendant laquelle la batterie peut fonctionner en conservant des performances proches de ses performances initiales.

Il existe d'autres caractéristiques non négligeables telles que le coût, la nocivité des composants, l'autodécharge et la température de fonctionnement. Les batteries utilisées dans les véhicules électriques et hybrides sont très variées et sont sélectionnées suivant le paramètre privilégié pour un usage donné: accumulateurs acide-plomb, Nickel-Cadmium, Nickel-Métal-Hydrures, les accumulateurs au Lithium (Lithium-ion, Lithium-polymère) et la batterie ZEBRA (NaNiCl: Sodium-Nickel-Chloride).

La Table 2.3 reprend les versions les plus avancées, mais ne sert qu'à titre indicatif puisqu'il peut perdre rapidement sa validité suite au développement continue des batteries.

Batteries	Pb Acide	Ni-Cd	Ni-MH	Li-Ions	NaNiCl
Energie spécifique (Wh/kg)	30-40	40-50	50-80	80-200	90-130
Puissance spécifique (W/kg)	140-300	500	500-1400	600-3000	100-160
Rendement charge/décharge (%)	70-85	70-75	70-80	85-90	80-90
Durée de vie (cycles) @ 80% DOD	300-1000	1000-3000	500-2000	1000-3000	600-1000

Table 2.3: Comparaison des performances des versions avancées des différents types de batteries [Van Mierlo et al. 2008]

La Table 2.4 compare les performances énergétiques des batteries Li-Ions aux carburants liquides essence ou gasoil. Le problème fondamental des batteries apparaît clairement: les meilleures d'entre elles n'apportent qu'une énergie spécifique 200 fois plus faible que celle contenue dans les carburants pétroliers. Les véhicules électriques autonomes sont donc très fortement pénalisés en poids ce qui limite leur rayon d'action et leur autonomie. Mais on doit rester prudent, car l'énergie spécifique du diesel n'est pas directement comparable à celle des batteries dans le cas où on n'a pas besoin de beaucoup de capacité de stockage et quand l'efficacité énergétique est élevée (cas des véhicules électriques). Hormis peut-être pour les flottes captives de véhicules, l'autonomie des véhicules électriques est le principal frein à la multiplication des véhicules électriques. La solution réside dans l'adjonction d'une seconde source d'énergie à bord du véhicule, soit au concept de véhicule hybride.

Carburant	Essence	Diesel	Batterie Li-Ions
Energie spécifique (Wh/kg)	11833	11667	105
Rendement moyen (%)	12	18	85
Energie spécifique à la roue (Wh/kg)	1420	2100	84

Table 2.4: comparaison des performances énergétiques des batteries Li-Ions aux carburants liquides (essence ou gasoil)

2.4.4 La transmission

Dans le cas des véhicules hybrides électriques séries où c'est toujours le moteur électrique qui assure la traction du véhicule, on n'a pas un besoin réel d'un embrayage ni d'une boîte de vitesses compte tenu de la grande plage de fonctionnement des moteurs électriques, d'un couple important et à l'existence de contrôleur électronique pour faire varier le couple et la vitesse. Lorsqu'il y a un lien entre le moteur thermique et les roues, un embrayage et une boîte de vitesse sont nécessaires pour adapter les caractéristiques du moteur à combustion aux

différentes conditions de fonctionnement (couple, vitesse). Ils permettent également au moteur de démarrer depuis l'arrêt et au véhicule de s'arrêter sans caler le moteur. Les différents types de transmissions utilisées dans les véhicules conventionnels restent valables pour les véhicules hybrides en gardant les mêmes caractéristiques. La transmission manuelle (TM) est relativement efficace mais doit respecter certaines règles d'usage pour diminuer la consommation. La transmission automatique (TA) est confortable et permet d'éviter les pertes de puissance aux roues pendant le changement de vitesse. Mais elle reste complexe et coûteuse. De plus, la transmission automatique a un rendement faible (présence d'un convertisseur de couple et d'un système hydraulique) par rapport à la transmission manuelle. La transmission variable continue (CVT) est très prometteuse. Elle permet de transmettre continuellement (avec un minimum de pertes) le couple du moteur aux roues et de faire travailler le moteur dans des conditions de couples et de vitesse indépendantes de la vitesse des roues. Le problème majeur de la transmission variable est son coût et sa masse plus élevés par rapport à la transmission manuelle. Elle donne aussi lieu à des conditions de fonctionnement inhabituelles.

2.5 Modélisation et simulation des véhicules hybrides: Le logiciel ADVISOR

Les nombreux paramètres liés à la composition et à la gestion et le contrôle des véhicules hybrides les rendent plus complexes et difficiles à modéliser. Les modèles mathématiques étant difficiles à réaliser, on recourt souvent à des modèles numériques. En plus de la vitesse et de l'accélération du véhicule, la simulation va tenir compte de toutes les résistances à l'avancement appliquées au véhicule. Il est dès lors possible de calculer les sollicitations (régime et couple) instantanées du moteur sur un cycle de conduite. On utilise alors des cartographies du moteur pour calculer les émissions et la consommation à chaque instant. Deux procédés de simulation sont possibles:

- l'enchaînement direct (forward) où les forces sont imposées et on détermine l'accélération et la vitesse par intégration des équations du mouvement,

- et l'enchaînement inverse (backward) où la vitesse (accélération) est imposée par le cycle de conduite et on détermine les forces nécessaires pour créer le mouvement.

Cette méthode s'est avérée rigoureuse et flexible mais nécessite une installation du moteur sur banc d'essai. Plusieurs logiciels (SIMULCO, ADVISOR, METROPOL, SIVA, etc) ont été développés sur base de tels modèles de simulation et donnent des tendances correctes et des résultats satisfaisants dans l'ensemble. Le logiciel ADVISOR qui sera utilisé dans notre travail combine les deux procédés (backward et le forward) mais reste strictement lié au backward qui est couramment utilisé. Il a été initialement réalisé par National Renewable Energy Laboratory (NREL) [Markel, 2002] en 1994 comme outil d'analyse, au profit du département américain de l'énergie qui développait des technologies pour les véhicules hybrides électriques avec les systèmes de propulsion hybrides électriques fabriquées par Ford, General Motor et DaimlerChrysler. Il a connu des améliorations jusqu'en 2002 avant que la compagnie AVL ("Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen": Institute for Internal Combustion Engines) achète une licence pour la commercialisation.

2.5.1 Structure du logiciel

ADVISOR a été développé dans l'environnement de Matlab/Simulink. Matlab offre des facilités de programmation basée sur les matrices avec de grandes performances de calculs.

Simulink permet et facilite la représentation graphique des systèmes complexes avec l'usage des blocks diagrammes. Il y a trois principales fenêtres avec interfaces graphiques (GUI) qui guident l'utilisateur dans le processus de simulation. L'interface graphique permet à l'utilisateur d'évaluer l'impact de certains paramètres du véhicule ou d'un cycle de conduite donné, sur les performances du véhicule, l'économie de carburant et les émissions. Le modèle du véhicule est représenté dans Simulink à l'aide des blocks diagramme et permet de visualiser les liaisons entre les composants de la chaîne de traction. Pendant la simulation, le modèle prend les données d'entrée dans l'espace de travail Matlab et y retourne les résultats qui seront visualisés dans la fenêtre "résultats".

Dans la fenêtre d'entrée d'ADVISOR, l'utilisateur peut construire son propre véhicule. Les menus permettent de choisir la configuration du véhicule (série, parallèle...) et les composants de la chaîne de traction. Les cartographies des caractéristiques de performance des divers composants de la chaîne de traction sont affichées en bas à gauche de la fenêtre d'entrée ADVISOR et sont accessibles via les boutons "menus" ou en cliquant sur le

composant en question sur le schéma de voiture se trouvant en haut à gauche de la fenêtre. La dimension d'un composant (puissance nominale, le nombre de modules du système batteries) peut être modifiée en éditant la valeur de la caractéristique affichée dans la boîte se trouvant à droite dans la fenêtre d'entrée. Enfin, n'importe quel paramètre scalaire peut être modifié via le menu "édition de variable" se trouvant en bas à droite dans la fenêtre. Tous les paramètres de configuration du véhicule peuvent ainsi être sauvegardés pour un usage ultérieur.

Quand l'utilisateur est satisfait des paramètres de configuration de son véhicule, le bouton "continue" lui permet d'accéder à la fenêtre de simulation. Dans cette fenêtre l'utilisateur sélectionnent les conditions de simulation du véhicule. Parmi ces conditions, on a le cycle de conduite simple ou multiple et les tests spéciaux de procédures (test d'accélération ou de pente). Des informations (graphiques) sur les cycles et les paramètres sélectionnés peuvent être visualisées dans cette fenêtre. Par exemple si un cycle de conduite simple est sélectionné, l'utilisateur peut visualiser la courbe de vitesse en fonction du temps dans la partie supérieure gauche de la fenêtre et une analyse statistique en bas de la fenêtre. Quand tous les paramètres sont configurés, le bouton "run" lance la simulation et les résultats seront affichés dans la fenêtre des résultats.

Un résumé des résultats est affiché dans la partie droite de la fenêtre, on peut lire par exemple, la consommation de carburant, les émissions et les résultats des différents tests (temps d'accélération et pente maximale franchissable). La partie droite affiche des graphiques permettant de visualiser les variations de certains paramètres en fonction du temps (vitesse et couple du moteur, la tension des batteries...). L'interface graphique du logiciel ADVISOR permet une interaction avec les données se trouvant dans l'espace de travail Matlab. Les données relatives à chaque composant de la chaîne de traction sont stockées sous forme de fichiers textes. Suivant le composant sélectionné par l'utilisateur, les données appropriées sont chargées dans l'espace de travail Matlab. L'interface graphique permet aussi de sélectionner le modèle à utiliser. Le modèle sélectionné et affiché graphiquement sous forme de block diagramme, prend les données qui ont été chargées dans l'espace de travail, comme des paramètres d'entrées. Le modèle du véhicule est finalement constitué de l'ensemble des modèles des différents composants. Les différents modèles proposés par le logiciel pour chaque composant sont stockés dans une librairie. Le mode librairie permet l'utilisation d'un même modèle dans plusieurs configurations de véhicules et aussi d'évaluer différents modèles d'un composant sur un même véhicule. Les modèles des composants peuvent être

sélectionnés et insérés dans le modèle du véhicule. Ils sont reliés entre eux suivant le flux de vitesse, couple et puissance.

2.5.2 Approche de simulation

ADVISOR combine les deux méthodes de simulation, le backward et le forward. Le forward utilisé seul est très exigeant: pour passer d'une vitesse $V1$ à une vitesse $V2$ on doit résoudre les équations différentielles à travers toute la chaîne de traction. Le backward par contre modifie itérativement les demandes de chaque composant par rapport à tout le système dans le but de trouver une combinaison qui minimise l'erreur entre la demande du conducteur et la réponse du système. Il s'agit d'une équation algébrique à résoudre.

2.5.2.1 Le backward

Le backward permet de répondre à la question suivante: la vitesse (accélération) étant imposée, quelles doivent être les performances de chaque composant du système. Le comportement du conducteur n'est pas pris en compte ici. La force nécessaire pour accélérer le véhicule se calcule directement à partir de la vitesse imposée et sera ensuite transformée en couple qui devra être fourni par le composant directement en amont. La vitesse linéaire du véhicule se transforme en vitesse de rotation. Les calculs se transmettent, composant par composant et de l'avant vers l'arrière, à travers toute la chaîne de traction jusqu'à ce que l'énergie nécessaire soit calculée pour chaque source d'énergie. L'avantage de ce type de simulation est que les composants de la chaîne de traction se comportent comme s'ils étaient testés au laboratoire et que seule une table de rendement en fonction du couple ou de la vitesse (puissance) fournie est nécessaire. Cela signifie qu'un simple calcul algébrique permet de déterminer le rendement d'un composant et de continuer par intégration. Le temps de calcul est évidemment court. Le seul inconvénient au cas où on utilise uniquement le backward est l'imposition du cycle de conduite et l'utilisation des cartographies de rendement ou de pertes. Du moment que le cycle de conduite est imposé, ce type de simulation ne pourra pas prévoir ce qui arriverait si l'accélération demandée dépasse les capacités du système (comportement en cas de conduite réel). Les cartographies des rendements et les modèles de consommation d'énergie étant réalisés statiquement, les effets dynamiques (ou transitoires) ne sont pas pris en compte.

2.5.2.2 Le forward

Cette approche prend en compte le comportement du conducteur, ce qui permet de considérer à la fois la vitesse nécessaire et la vitesse disponible afin de réaliser les commandes d'accélération et ou de freinage. La commande d'accélération par le conducteur (appui sur l'accélérateur) est transformée en un couple fourni par le moteur et en un taux d'énergie consommée. Le couple fourni par le moteur rentre dans le bloc "transmission" qui le transforme suivant le rendement et le rapport de boîte de la transmission. Le nouveau couple ainsi calculé continue à travers toute la chaîne de traction jusqu'à ce qu'on obtienne la force nécessaire au niveau des pneus. Cette approche est particulièrement appréciée pour le développement informatique et la simulation de contrôle bien détaillée.

La méthode fonctionne avec des quantités mesurables directement sur la chaîne de traction réelle (couple réel et non couple exigé).

La principale faiblesse de cette approche est le temps de calcul, on doit en effet résoudre des équations différentielles. Les calculs de la puissance au niveau de la chaîne de traction dépendent des états du véhicule notamment les vitesses qui sont calculées par intégration et pour avoir des résultats stables et précis, l'intégration demande d'adopter des petits pas de temps.

2.5.2.3 Combinaison backward/forward

ADVISOR utilise une approche hybride de simulation qui combine les deux méthodes, le backward et le forward, mais qui reste très proche du backward. Cette combinaison se traduit par le fait qu'aucun composant de la chaîne de traction n'exigera de son voisin ascendant, plus de couple ou de force que ce qu'il peut en fournir. Le rendement d'un composant dans les calculs directs doit être tel qu'il a été prévu dans les calculs inverses.

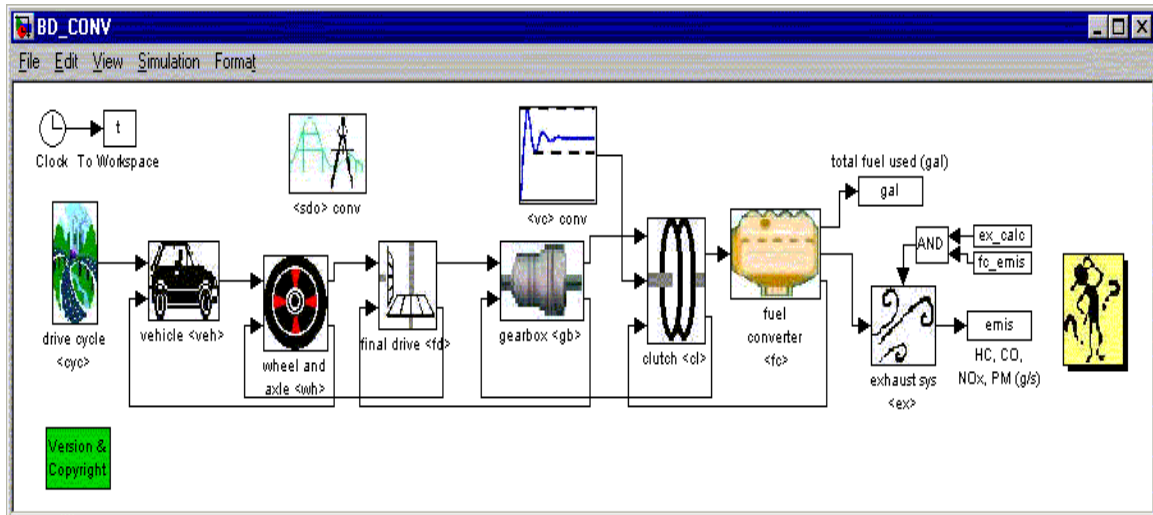


Figure 2.8: Chaîne de traction conventionnelle modélisée avec des composants d'ADVISOR.

2.5.3 Les cycles de conduite Européens

Actuellement, on utilise des cycles de conduite normalisés. Ils définissent des parcours standardisés au cours desquels la vitesse, l'accélération, ainsi que les rapports de boîte (pour les boîtes manuelles) qui doivent être suivis à chaque instant selon les spécifications du cycle. Il en existe deux types de cycles: les cycles réalistes qui sont issus directement d'observations du trafic et les cycles synthétiques qui sont élaborés à partir d'observations de vitesses, accélérations classées et pondérées en fonction de leur fréquence et de leur durée.

2.5.3.1 Euromix

Pour l'Europe, l'indice composite de consommation EUROMIX était calculé selon la réglementation 80/1268/EEC adoptée en 1978 pour la consommation. Elle considérait un cycle urbain et deux cycles en pallier à 90 et 120 km/h.

$$B_{Euromix} = 1/3(B_{city} + B_{90km/h} + B_{120km/h}) \quad (2.3)$$

L'indice EUROMIX est resté valable jusqu'en 1996 après quoi le nouveau cycle européen de consommation a été utilisé pour la consommation et la mesure des émissions. Le nouveau cycle est un cycle synthétique de trois périodes avec arrêt. Il a une vitesse en pallier importante pour la ville et utilise 3 rapports de boîte. Sa vitesse moyenne est plus élevée ce qui fait qu'il donne une plus grande importance à l'aérodynamique. Il peut être simulé sur banc à rouleaux.

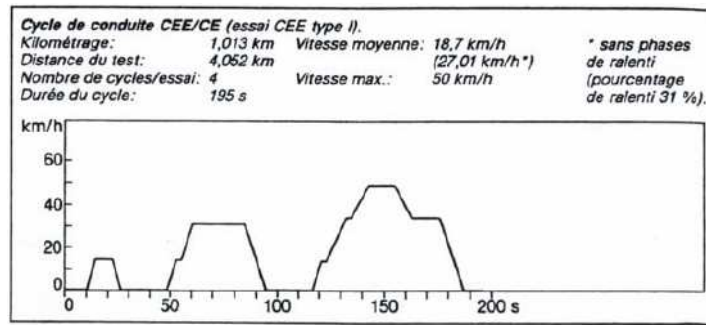


Figure 2.9: Cycle européen de base [Bosch, 2002]

Partie urbaine: 4 fois le cycle de base plus une partie extra urbaine

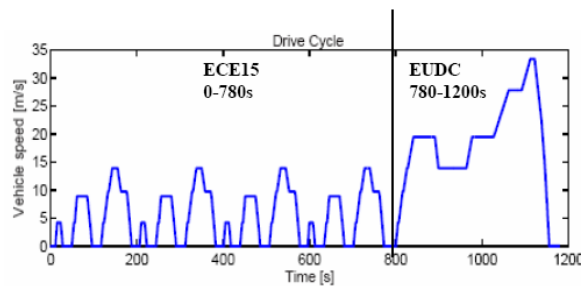


Figure 2.10: Nouveau cycle européen (1996)

Le nouveau cycle européen est valable pour la consommation et les émissions de polluants des voitures et des véhicules utilitaires légers. Il remplace les parties à vitesse constante à 90 et 120 km/h par une partie périurbaine de vitesse moyenne plus lente. Il est moins sensible à l'aérodynamique que l'EUROMIX et son influence est quasi identique à l'EPA. Les phases d'accélération augmentent l'influence de la masse. Il représente une image de la situation de conduite européenne. Cependant, il est souvent critiqué parce qu'il ne représente pas une situation réelle de conduite. D'autres cycles d'associations et de magazines d'automobile existent.

2.5.3.2 Les Cycles SORT

Les cycles de conduite sélectionnés pour la simulation des autobus sont les cycles SORT développés par l'UITP (Union International des Transports Publics) en collaboration avec les principaux constructeurs européens d'autobus. Le projet "SORT" a pour objectif la mise au point de cycles de test reproductibles des autobus destinés à mesurer les consommations de carburant en vue d'obtenir une standardisation européenne des cycles de conduite pour les véhicules de transport en commun. Les essais normatifs classiques ne suffisent pas pour simuler le fonctionnement d'un véhicule de transport en commun. C'est pourquoi il est apparu

indispensable de concevoir des cycles d'essais complets sur route pour le véhicule, sur base de données collectée dans de nombreuses sociétés européennes (vitesse commerciale, temps moyen passé aux arrêts, distance moyenne entre ceux-ci, la charge, etc.).

Avec "SORT" et pour la première fois, il devient théoriquement possible de faire une comparaison des consommations de carburant entre différents véhicules de transport urbain, mais seulement dans un cadre spécifique. Bien entendu, les résultats des campagnes de mesure de ces cycles d'essais ne doivent pas être strictement comparés avec la consommation réelle qui dépendra aussi de la façon de conduire des conducteurs, des charges variables, des conditions climatiques et topographiques locales, etc.

Des cycles d'essais sur route ont été développés pour l'environnement extra urbain. Un cycle est composé de "modules" (cycles de base), répétés autant de fois que nécessaire pour obtenir une précision suffisante. Chaque "module" est formé de 3 sections (3 trapèzes). Chacune d'elles est caractérisée par une phase d'accélération, un déplacement à vitesse constante et une phase de décélération. A la fin de chaque "section", il est prévu un arrêt (en raison des conditions de circulations, feux rouges, encombrement, sans ouverture des portes); la fin de chaque "module" se conclut par un arrêt avec ouverture/fermeture des portes (pour la montées et descentes des voyageurs). La répétition par combinaison de modules identiques définit donc un cycle d'exploitation standardisé.

En partant de cinq trapèzes, trois cycles de base ont été définis pour trois catégories de conditions de conduite, dans chaque cas avec des vitesses commerciales caractéristiques moyennes, qui correspondent aux valeurs typiques observées sous des conditions de conduite réelle:

- SORT 1, urbain
- SORT 2, mixte
- SORT 3, extra urbain.

Chaque cycle comprend un certain temps d'arrêt. Ce temps d'arrêt est adapté à la vitesse moyenne de chaque cycle. Le pourcentage de temps d'arrêt correspond largement à l'expérience d'exploitation. La vitesse commerciale peut être considérée comme un paramètre clef permettant de distinguer les différentes conditions de conduite. En effet, toute variation de sévérité d'un cycle agit sur la vitesse commerciale, et enfin, sur la consommation qui lui est inversement proportionnelle.

La diminution de la consommation consécutive à l'augmentation de la vitesse commerciale est un paradoxe bien connu des exploitants: en effet, la vitesse commerciale ne peut être influencée de manière tangible que par des actions structurelles (sites propres par exemple), et donc, diminution du nombre global d'arrêts par suppression des obstacles, ce qui est favorable pour la consommation.

1. Le cycle de conduite urbain SORT 1

Le cycle de conduite urbain SORT1 (Figure 2.11) se compose de trois trapèzes différents auxquels correspondent les vitesses de consigne de 20 km/h, 30 km/h, et 40 km/h. Au terme de chaque trapèze, une pause de 20 secondes est effectuée, ce qui donne un temps d'arrêt total de 60 secondes pour le cycle. La vitesse commerciale de ce cycle est d'environ 12 km/h.

Ce cycle SORT 1 est le plus exigeant en termes d'accélération, car il demande une accélération de $1,03 \text{ m/s}^2$, qui est la plus élevée des cycles SORT.

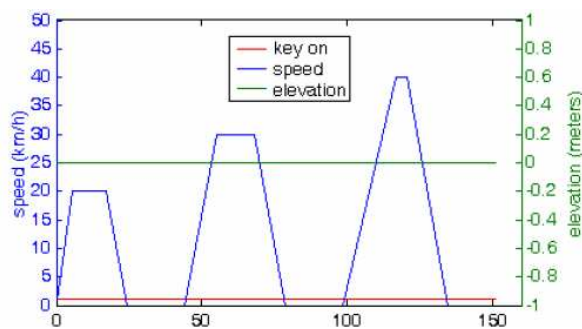


Figure 2.11: Les spécifications du cycle de conduite urbain SORT 1

Etant donné que les cycles SORT ne sont pas encore disponibles dans la librairie d'ADVISOR, nous avons créé ces fichiers afin de pouvoir simuler les bus par la suite.

2. Le cycle de conduite mixte SORT 2

Le cycle de conduite mixte SORT 2 (Figure 2.12) se compose aussi de trois trapèzes différents, auxquels correspondent des vitesses de consigne qui sont plus élevées comparativement au cycle SORT 1. Pour ce cycle, ces vitesses prennent les valeurs de 20 km/h, 40 km/h et 50 km/h. Au terme de chaque trapèze, une pause de 20 secondes est effectuée, ce qui donne un temps d'arrêt total de 60 secondes pour le cycle. La vitesse commerciale de ce cycle est d'environ 18 km/h.

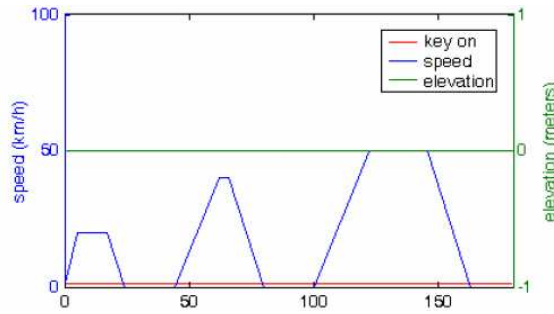


Figure 2.12: Les spécifications du cycle de conduite mixte SORT 2.

3. Le cycle de conduite suburbain SORT 3

Le cycle de conduite suburbain SORT 3 (Figure 2.13) est également composé de trois trapèzes avec des vitesses de consigne de 30 km/h, 50 km/h et 60 km/h. La différence entre les deux premiers cycles et ce cycle SORT 3 est la réduction du temps d'arrêt total, qui est de 40 secondes au lieu des 60 secondes pour le SORT 1 et SORT 2, réduction justifiée par une charge statistiquement moins importante. La vitesse commerciale du cycle suburbain SORT 3 est d'environ 27 km/h.

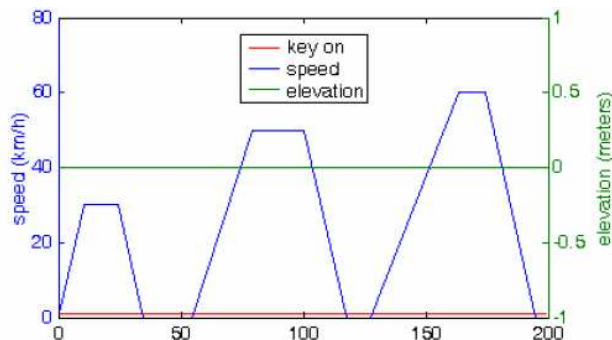


Figure 2.13: Les spécifications du cycle de conduite suburbain SORT 3.

2.5.4 Consommation et émissions

Le principe de base du logiciel est qu'à partir des efforts extérieurs appliqués au véhicule (aérodynamisme, résistance au roulement, effet de la pente et d'envirage, ...), et de sa transmission, on détermine le couple et le régime que le moteur doit fournir pour la propulsion du véhicule sur un cycle de conduite déterminé.

Sur base des cartographies du moteur établies à l'avance, on attribue à chaque instant (chaque seconde) une consommation et des émissions. Le moteur doit être monté sur le banc d'essai ce qui rend la méthode plus complexe et coûteuse. Il n'est donc pas facile de disposer de toutes les cartographies de toute la gamme de moteurs. C'est pour cela que ADVISOR dispose des

cartographies de référence pour quelques prototypes de moteurs à combustion interne (diesel, essence). Des cartographies de rendement sont aussi disponibles pour les moteurs électriques. Par exemple pour les véhicules légers, un des moteurs diesel pris comme référence est un moteur Mercedes de 1,7litre de cylindrée, une puissance maximale de 60 kW à 4000 tours par minute. Ce moteur a fait objet des essais chez ORNL (Oak Ridge National Laboratory) et les cartographies relatives à la consommation et aux émissions ont été établies. Les émissions et la consommation en fonction du couple et du régime sont consignées dans des Tables (look-up tables) qui sont éditables dans des fichiers Matlab.

S'il faut maintenant simuler un véhicule quelconque dans Advisor, il faut introduire un facteur de multiplication (du couple et du régime) ou facteur d'échelle. Ce facteur est inférieur à un pour simuler un moteur fonctionnant à l'intérieur de la plage de fonctionnement du moteur de référence et supérieur à un pour un moteur d'une plage de fonctionnement plus large que la référence. Un autre paramètre dont la variation conduit aux mêmes effets, est la puissance maximale. Le rendement maximal (0,41 pour les diesels et 0,38-0,39 pour les moteurs à essence) peut faire aussi l'objet de variation. Tous ces paramètres aident à définir ce que le moteur est capable de fournir. On introduit alors les paramètres liés au véhicule, aux conditions de conduite et aux efforts extérieurs permettant de déterminer les sollicitations du moteur. A partir de ces sollicitations et de ce que le moteur est capable de fournir, on détermine ce que le moteur doit fournir réellement. La consommation et les émissions à chaud sont alors calculées par interpolation à partir des tables cités plus haut (look-up tables). Un facteur d'échelle égal à un signifie que l'on utilise exactement les données du moteur de référence. Plusieurs autres paramètres liés aux divers composants de la chaîne de traction sont susceptibles de modification dans ADVISOR, on peut citer notamment le coefficient de traînée aérodynamique, la surface frontale du véhicule, le coefficient de résistance au roulement, etc.

2.5.4.1 Les émissions à froid

ADVISOR comporte aussi des facteurs de correction de la consommation et des émissions pour tenir compte du démarrage à froid. Ces facteurs ont été déterminés expérimentalement. Soient E_c et E_f , respectivement émissions à chaud et émissions à froid:

$$E_f = A \times E_c \text{ avec } A, \text{ facteur de correction}$$

$$A = \begin{cases} (1 + \lambda^{3.1}) & \text{fuel} \\ (1 + 7.4 \lambda^{3.072}) & \text{HC} \\ (1 + 9.4 \lambda^{3.21}) & \text{CO} \\ (1 + 0.6 \lambda^{71}) & \text{NOx} \\ (1 + 7.4 \lambda^{3.072}) & \text{PM} \end{cases} \quad (2.4)$$

Avec λ , le gradient de température

$$\lambda = \frac{fc_tstat - T_{coolant}}{fc_tstat - 20} \quad (2.5)$$

fc_tstat : température maximale que peut atteindre le moteur (généralement: 95°C)

$T_{coolant}$: température actuelle du moteur (température de fonctionnement). La température de fonctionnement à froid est considérée comme la température ambiante, soit 20°C. Le modèle de A en fonction de λ a été fait sur base des données expérimentales sur deux moteurs à essence (Murrell, 1994) et ces facteurs de correction sont supposés constants. Mais supposer ces facteurs constants ne reflète pas du tout la réalité car ils varient réellement suivant la zone de fonctionnement du moteur dans lequel on se trouve. La meilleure solution est d'avoir une cartographie des émissions à froid en fonction du couple et du régime. ADVISOR dispose d'ailleurs de quelques moteurs dont ces cartographies sont disponibles: un moteur diesel 60 kW et un moteur VW 67kW. Dans ce cas, le facteur de correction des émissions et de la consommation sera donné par:

$$Colt_use = A \times Hot_use \quad (2.6)$$

$$A = 1 + \left(\frac{Cold_map}{Hot_map} \Big|_{Torque-Speed} - 1 \right) \times \left(\frac{T_{Hot} - T}{T_{Hot} - T_{Cold}} \right) \quad (2.7)$$

Dès lors, il existe deux possibilités de correction des émissions:

- Utiliser la formule précédente pour les cas où les moteurs de référence disposent des cartographies des émissions à froid
- Ou les facteurs définis par Murrell pour les moteurs ne disposant que des cartographies pour les émissions à chaud

Il reste à déterminer la température de fonctionnement T.

2.5.4.2 Les modèles de températures

Le moteur et son environnement sont divisés en quatre parties : les cylindres, le bloc moteur, les accessoires externes et le capot du véhicule. Au niveau des cylindres, la quantité de

chaleur dégagée par la combustion du carburant Q_{fuel} se répartit en trois parties : la chaleur utile $P_{véhicule}$, la chaleur contenue dans les gaz d'échappement $Q_{exhaust}$ et la chaleur absorbée par les différentes parties du moteur Q_{fc_gen} (figure 2.14).

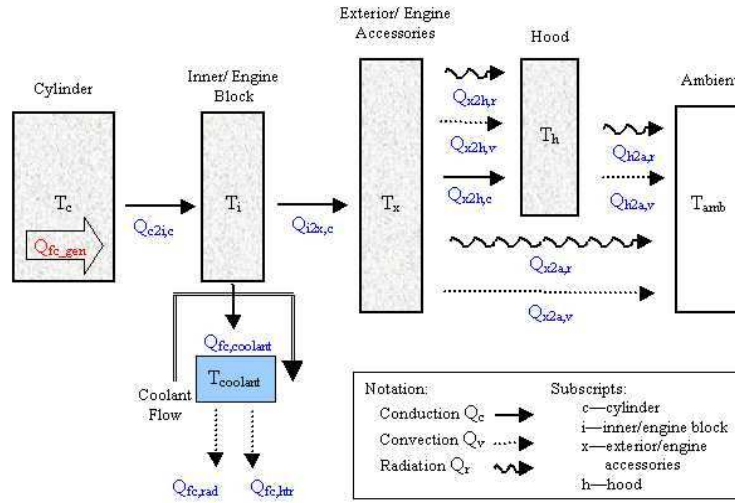


Figure 2.14: Les échanges de chaleur entre le moteur et son environnement

$$Q_{fc_gen} = Q_{fuel} - P_{vehicle} - Q_{exhaust} \quad (2.8)$$

$$Q_{fc_gen} = m_{fuel}[g/s] \times lhv[j/g] - Tw - m_{gas} \times c_{p, gas}(T_{gas} - T_{amb})$$

Une partie de cette chaleur ($Q_{c2i,c}$) est transmise au bloc moteur par conduction tandis qu'une autre ($Q_{fc_coolant}$) est prise par le liquide de refroidissement.

$$Q_{c2i,c} = fc_c2i_th_cond \times (T_c - T_i) \quad (2.9)$$

$$Q_{fc_coolant} = \begin{cases} Q_{c2i,c} - Q_{i2x,c} & T_i > fc_tstat \\ 0 & T_i < fc_tstat \end{cases} \quad (2.10)$$

La conductance ($fc_c2i_th_cond$) est précisée par l'utilisateur et la valeur représentative est de 500W/K. La chaleur n'est transmise au fluide de refroidissement que si la température du bloc moteur atteint un certain seuil fixé (fc_tstat). Si le système de ventilation de la cabine est enclenché, une partie de la chaleur (Q_{fc_htr}) peut être transmise à la cabine est une autre renvoyer à l'air par le radiateur (Q_{fc_rad}). C'est l'utilisateur qui fixe la quantité nécessaire via le rendement de l'échangeur (e.g. $fc_cl2h_eff=0.7$) et le débit massique (e.g. $fc_h_air_flow=1kg/s$).

$$Q_{fc_htr} = fc_cl2h_eff \times fc_h_air_flow \times c_{p,air} \times (T_{coolant} - T_{amb}) \quad (2.11)$$

$$Q_{fc,rad} = Q_{fc,coolant} - Q_{fc,htc} \quad (2.12)$$

La quantité de chaleur transmise des accessoires au capot par rayonnement est donnée par:

$$Q_{x2h,r} = \varepsilon\sigma \times A \times (T_x^4 - T_h^4) = fc_emisv \times 5.67E-8 \times fc_ext_sarea \times (T_x^4 - T_h^4) \quad (2.13)$$

La surface (A) du moteur est évaluée suivant le facteur d'échelle du moteur (fc_pwr_scale) soit $(fc_pwr_scale)^{0,67}$ compte tenue de la surface sphérique du moteur. La quantité de chaleur transmise des accessoires au capot par la convection naturel et forcée est donnée par:

$$Q_{x2h,v} = h_{air} \times A \times (T_x - T_h) = h_{air} \times fc_ext_sarea \times (T_x - T_h) \quad (2.14)$$

Une partie de la chaleur ($Q_{i2x,c}$) est transmise des accessoire au capot par conduction:

$$Q_{x2h,c} = fc_h2x_th_cond \times (T_x - T_h) \quad (2.15)$$

La conductance (fc_h2x_th_cond) est fixé par l'utilisateur (e.g. 10 W/K). Une quantité de chaleur est aussi dégagée des accessoires externes à l'air ambiant par rayonnement:

$$Q_{x2a,r} = \varepsilon\sigma \times A \times (T_x^4 - T_{amb}^4) = fc_emisv \times 5,67E-8 \times (0,5 \times fc_ext_sarea) \times (T_x^4 - T_{amb}^4) \quad (2.16)$$

La surface concernée (A) est supposée être 50% de la surface extérieure ($0,5 \times fc_ext_sarea$).

La quantité de chaleur transmise des accessoires externes à l'air ambiante par convection naturelle et forcée est donnée par:

$$Q_{x2a,v} = h_{air} \times A \times (T_x - T_{amb}) = h_{air} \times (0,5 \times fc_ext_sarea) \times (T_x - T_{amb}) \quad (2.17)$$

Encore une fois la surface A est supposée égale à 50% de la surface extérieure du moteur.

La chaleur transmise du capot vers l'ambiance par rayonnement est donnée par :

$$Q_{h2a,r} = \varepsilon\sigma \times A \times (T_h^4 - T_{amb}^4) = fc_hood_emisv \times 5.67E-8 \times fc_hood_sarea \times (T_h^4 - T_{amb}^4) \quad (2.18)$$

La quantité de chaleur transmise du capot à l'air ambiant par la convection naturel et forcée est donnée par:

$$Q_{h2a,v} = h_{air} \times A \times (T_h - T_{amb}) = h_{air} \times fc_hood_sarea \times (T_h - T_{amb}) \quad (2.19)$$

Pour les transferts par convection, les coefficients de transfert sont calculés à partir des données expérimentales. Pour une différence de température de 1000°C, h est égal à 6W/m²K pour la convection naturelle. Pour un débit d'air de 30 miles par heure, h est égal à 60 W/m²K pour la convection forcée. Pour le rayonnement, le coefficient d'émissivité (ε) est supposé égal à 0,9. Les différentes températures se calculent comme suit:

$$T_c = \int_0^t \frac{Q_{fc_gen} - Q_{c2i,c}}{m_{fc,c} \times c_{pfc}} dt \quad (2.20)$$

La masse de base (ensemble cylindre – bloc moteur) est évaluée à 1,8/kW et 20% de cette masse revient aux cylindres.

$$T_i = \int_0^t \frac{Q_{c2i,c} - Q_{fc_coolant} - Q_{i2x,c}}{m_{fc,i} \times c_{pfc}} dt \quad (2.21)$$

La masse du bloc moteur est supposée égale à 80% de la masse de base.

$$T_x = \int_0^t \frac{Q_{i2x,c} - Q_{x2h,r} - Q_{x2h,v} - Q_{x2h,c} - Q_{x2a,r} - Q_{x2a,v}}{m_{fc,x} \times c_{pfc}} dt \quad (2.22)$$

La masse des accessoires doit être spécifiée. Elle est estimée à 0,8kg/kW

$$T_h = \int_0^t \frac{Q_{x2h,r} + Q_{x2h,v} + Q_{x2h,c} - Q_{h2a,r} - Q_{h2a,v} - Q_{x2a,v}}{m_{fc,h} \times c_{pfc_hood}} dt \quad (2.23)$$

La masse du capot est supposée être 10% de la masse du châssis.

Comme on peut le constater, les modèles de températures utilisés sont très approximatifs. Les estimations des différentes surfaces et des masses contiennent beaucoup d'imprécisions. Les quantités de chaleurs transmises d'un élément à un autre deviennent ainsi imprécises. Ceci a des conséquences sur les résultats surtout en ce qui concerne les facteurs de correction des émissions à froid dont les modèles dépendent de la température de fonctionnement du moteur. L'efficacité des catalyseurs de l'échappement est également fonction de la température des gaz. Si les températures sont mal estimées, les émissions le seront aussi.

2.5.5 Stratégies de contrôle des véhicules hybrides

Il existe plusieurs possibilités de contrôle de l'interaction entre les différentes sources d'énergie. Les émissions et la consommation dépendent énormément de la stratégie de contrôle adoptée. ADVISOR contient des stratégies de contrôle pour les véhicules hybrides parallèles, séries et pour des véhicules spécifiques comme la Toyota Prius et la Honda Insight. Toutes ces stratégies de contrôle sont basées sur l'état de charge des batteries comme paramètre d'entrée du système de contrôle.

2.5.5.1 Stratégie parallèle

Le moteur électrique est utilisé pour fournir la puissance additionnelle (quand le véhicule en a besoin) et pour maintenir la charge des batteries. La stratégie utilisée est relativement simple et gère le moteur électrique de différentes manières:

- le moteur électrique fournit tout le couple nécessaire tant que la vitesse du véhicule ne dépasse pas un certain seuil,
- le moteur électrique fournit le couple additionnel quand le moteur thermique n'est pas capable de fournir le couple demandé dans sa plage de fonctionnement normal,
- le moteur électrique charge les batteries pendant le freinage,
- il remplace le moteur thermique lorsque celui-ci ne fonctionne pas efficacement (par exemple à basse vitesse),
- si l'état de charge des batteries est bas, le moteur thermique fournit un supplément de couple au moteur électrique pour charger les batteries,

2.5.5.2 Stratégie série

La stratégie de contrôle de l'hybride série gère le couple et la vitesse de rotation du moteur thermique suivant la demande du générateur et l'état de charge des batteries:

- le moteur peut être coupé si la charge des batteries est suffisamment élevée,
- il peut être rallumé si la puissance requise par le générateur est suffisante,
- et si l'état de charge des batteries est trop bas.

La puissance du moteur thermique doit être suffisante pour que le générateur puisse suivre la demande du véhicule. Mais le fonctionnement du moteur thermique peut être influencé de diverses manières:

- la puissance fournie peut être fonction de l'état de charge des batteries que l'on essaie de maintenir au centre de son intervalle de variation,
- la puissance délivrée peut être maintenue au-dessus d'une borne minimale,
- la puissance délivrée peut être limitée par une borne maximale, qui sera dépassée si l'état de charge des batteries est trop faible pour fournir la puissance nécessaire,

- les variations de la puissance du moteur peuvent être limitées dans un certain intervalle.

2.5.5.3 Stratégie de contrôle de la Toyota Prius

Le flux de puissance (couple) entre le moteur thermique, le générateur et les roues, est contrôlé par un système planétaire. Pour une vitesse donnée et une puissance souhaitée (demande du cycle):

- déterminer le point de fonctionnement souhaité du moteur thermique (sur la courbe de rendement),
- déterminer la vitesse du générateur pour maintenir le moteur thermique au point de fonctionnement désiré,
- déterminer le couple moteur électrique nécessaire pour fournir la puissance aux roues ou pour récupérer l'énergie par freinage,
- les batteries fournissent la puissance supplémentaire si nécessaire ou récupèrent l'énergie de freinage.

Plusieurs scénarios sont possibles:

- pour un état de charge des batteries inférieur à 0.5, le moteur thermique est toujours allumé,
- si l'état de charge supérieur au seuil maximal (SOC high), pas besoin de charger les batteries,
- si l'état de charge inférieur au seuil minimal (SOC low), il est nécessaire de charger les batteries,
- les batteries sont rechargées par le freinage récupératif via le générateur.

2.5.5.4 Stratégie de contrôle de la Honda Insight

La Honda Insight bénéficie d'une stratégie assez élaborée pour la gestion de la motorisation hybride. Les paramètres de l'algorithme de gestion peuvent être modifiés.

- Assistance du moteur électrique pendant les accélérations du véhicule et régénération pendant les phases de freinage:

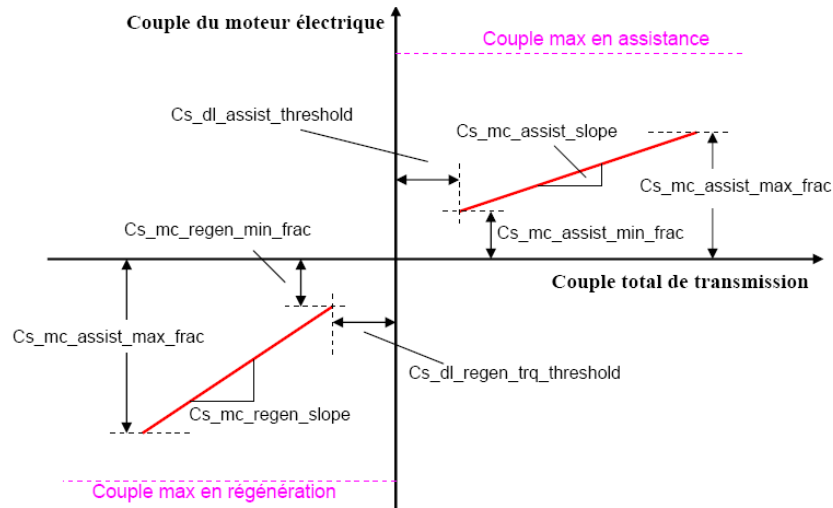


Figure 2. 15: Zones de fonctionnement optimal de la motorisation électrique dans la stratégie de gestion de l'énergie de la Honda Insight

Cs_dl_assist_threshold	Couple de transmission en dessous duquel la machine électrique n'apporte pas d'assistance	25 Nm
Cs_mc_assist_min_frac	Couple minimum fourni par le moteur électrique quand le couple de transmission est au-dessus du seuil (fraction du coup max)	0,129 Nm
Cs_mc_assist_slope	Fraction (pente de la ligne) du couple de transmission fournit par le moteur électrique quand le couple de transmission est au-dessus du seuil	1/11
Cs_mc_assist_max_frac	Couple maximum demandé au moteur électrique en assistance (fraction du couple maximum)	0,32
Cs_dl_regen_trq_threshold	Couple de transmission régénératif au-dessus duquel la machine électrique ne régénère pas à faible vitesse	-15 Nm
Cs_mc_regen_min_frac	Couple régénératif minimum fourni par le moteur électrique quand le couple de transmission dépasse le seuil de régénération (fraction du couple)	0 Nm
Cs_mc_regen_slope	Fraction (pente de la ligne) du couple négatif de transmission régénéré par le moteur électrique quand le couple de transmission dépasse le seuil	0,7
Cs_mc_regen_max_frac	Couple régénératif maximum demandé au moteur électrique en régénération/freinage (fraction du couple maximum)	1
Cs_decel_regen_threshold	Vitesse pendant la décélération en dessous de laquelle le moteur électrique ne régénère pas	4,5 m/s

Table 2.16 : Légende des paramètres de contrôle et leurs valeurs par défaut par la loi de contrôle de la Honda Insight

- Caractéristiques on-off:

Le moteur thermique reste allumé la plupart du temps. Il ne se coupe que si toutes les conditions suivantes sont respectées:

- le moteur est chaud
- le SOC de la batterie > SOC min (20 %)
- le véhicule décélère ou s'arrête
- la vitesse du véhicule < 4,0 m/s (10mph)
- le véhicule ne change pas de vitesse

2.6 Evolution du marché des véhicules hybrides

Le marché des véhicules hybrides n'a cessé de croître depuis que les constructeurs et les consommateurs ont, de plus en plus, pris conscience des problèmes environnementaux. Le nombre de voitures hybrides vendues dans le monde a atteint facilement 80000 unités pour la seule année 2003. L'augmentation du prix du pétrole et l'introduction de nouvelles technologies hybrides ont fait grimper les ventes de véhicules hybrides jusqu'à 170000 unités en 2004 et 300000 unités en 2005 [Tanaka, 2007].

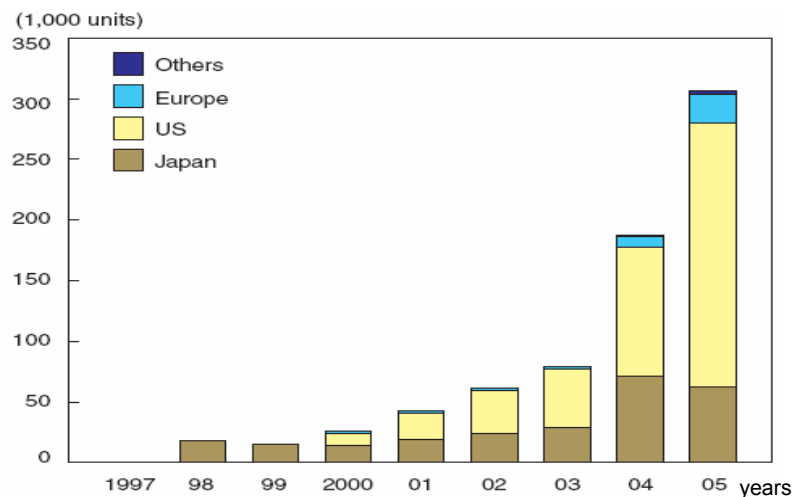


Figure 2.7: Evolution du marché des véhicules hybrides [Tanaka, 2007]

Mais cette croissance du marché des véhicules hybrides concerne essentiellement les USA avec 70% des véhicules hybrides électriques vendus, vient ensuite le Japon (20%) et l'Europe avec seulement 8% (Figure 2.7). Les marchés Américain et Européen sont dominés par Toyota Motor (80% des ventes) suivi par Honda (16% des ventes) et Ford (4% des ventes). Toyota privilégie les hybrides complets avec la Toyota Prius et la Lexus, tandis que la Honda concentre les efforts sur de petites voitures à l'instar de la Honda Insight. En effet, les

hybrides doux remplissent la majorité des fonctions de l'hybride complet (assistance de couple, freinage récupératif, assistance à la relance) à un prix beaucoup plus bas par rapport à l'hybride complet. Beaucoup de constructeurs Européens (PSA, Renault et Fiat Auto) par exemple semblent privilégier cette technologie en maintenant les systèmes de transmission traditionnels pour minimiser les coûts additionnels. La configuration hybride parallèle reste dominante du fait que les technologies des batteries ne sont pas suffisamment développées pour assurer l'autonomie du véhicule hybride série. L'hybride série pourra se développer avec l'usage simultané des batteries et des piles à combustible. Jusqu' à présent, la majorité des véhicules hybrides sont basés sur le moteur à essence. Mais les constructeurs européens semblent vouloir utiliser leurs excellents moteurs diesels pour améliorer les performances des hybrides.

Chapitre 3: LES VEHICULES HYBRIDES HYDRAULIQUES

3.1 Introduction

L'intérêt des véhicules hybrides hydrauliques a été ravivé ces derniers temps dans le souci d'explorer les alternatives aux véhicules hybrides électriques. Les batteries sont très chères et supportent un nombre limité de cycles de charge/décharge ce qui limite leur durée de vie. A cela, on doit ajouter le coût de remplacement en cas d'usure, les impacts environnementaux liés à leur démantèlement en fin de vie et leur incapacité de récupérer toute l'énergie de freinage. Les accumulateurs hydrauliques ont un très bon rendement charge/décharge et peuvent subir un très grand nombre de cycles de charge/décharge sans se détériorer (longue durée de vie). Récemment, on a vu apparaître des moteurs/pompes réversibles à haut rendement (supérieur à 90%), appropriés à l'usage automobile. La maturité industrielle des composants hydrauliques est un fait établi de sorte que leur coût est relativement peu élevé. Du point de vue de l'impact environnemental, les composants hydrauliques seraient moins polluants que les batteries (absence de métaux lourds dans les accumulateurs hydrauliques, possibilités d'utiliser l'eau comme fluide hydraulique au lieu de l'huile). Dès 1980, la société MAN [Jefferson, 2001] avait mis au point des systèmes hydrauliques de transmission et de stockage d'énergie sur les bus. Le bus "Hydrobus 3" utilise des accumulateurs hydrauliques (pouvant stocker jusqu'à 0,75 MJ) qu'il combine avec une boîte de transmission qui, à l'instar de la Prius, assure une transmission variable continue permettant de rouler en parallèle ou en série. Suite à la faible capacité de stockage d'énergie, le moteur diesel est resté le même que celui du bus conventionnel d'origine. L'Hydrobus est un exemple typique d'un hybride doux. Le système de stockage est suffisant pour récupérer l'énergie de freinage et on peut réaliser des gains de consommation pouvant atteindre 33% comparativement au bus conventionnel avec une transmission automatique. Volvo a emboîté le pas à MAN mais aucune des deux sociétés n'est parvenue à réaliser un bus vendable. Actuellement c'est l'Agence de Protection de l'Environnement des Etats-Unis EPA [EPA, 2006] qui est le leader dans la recherche visant l'application de la technologie hydraulique aux véhicules. L'EPA a conçu un camion

de livraison urbain équipé de systèmes hydrauliques servant d'assistance à la propulsion. C'est un hybride doux car le moteur thermique et la transmission restent les mêmes que ceux du camion conventionnel, le système hydraulique y est ajouté afin d'optimiser la consommation de carburant. Actuellement, l'EPA se penche sur la configuration d'un hybride hydraulique complet dans lequel la transmission du véhicule conventionnel est remplacée par une transmission hydraulique. Avec l'hybride hydraulique complet, l'EPA espère atteindre des gains de consommation de 70% grâce à l'efficacité du freinage récupératif. L'EPA a fait aussi une percée dans la conception des accumulateurs hydrauliques et des moteurs/pompes hydrauliques plus efficaces, petits et légers pour des applications automobiles. D'autre part, la société Permo-Drive Technologies [Permo-Drive, 2006] a développé un système de transmission pour les véhicules hybrides hydrauliques qui réduit la consommation de carburant des camions et des bus jusqu'à 40%. Outre l'économie de carburant, le freinage récupératif de Permo-Drive augmente significativement la durée de vie des freins et diminue les émissions de particules et d'hydrocarbures des véhicules.

L'objectif de ce chapitre est de mettre en évidence les avantages et les performances des systèmes hydrauliques comme une alternative aux véhicules hybrides électriques. Comme dans le cas d'un véhicule hybride électrique, un véhicule hybride hydraulique dispose d'une source d'énergie secondaire en plus de la principale source primaire (énergie chimique du carburant en général). La deuxième forme d'énergie est une réserve de fluide (eau glycolée, huile) sous pression. La partie hydraulique est constituée d'un réservoir à basse pression, d'un accumulateur à haute pression et d'un moteur/pompe.

3.2 Principe de fonctionnement

Suivant l'évolution la plus récente, le principe de fonctionnement des véhicules hybrides hydrauliques est illustré à la Figure 3.1. Le système hydraulique est supposé pouvoir fonctionner avec un fluide non lubrifiant, l'eau glycolée dans notre cas. Pendant les phases de freinage du véhicule, l'eau contenue dans le réservoir basse pression est pompée vers un accumulateur haute pression; la machine hydraulique fonctionne alors en pompe. Cette réserve d'énergie peut être restituée lorsque cela s'avère nécessaire (assistance en accélération, démarrage) en vidant l'accumulateur haute pression à travers le moteur/pompe qui fonctionne alors en moteur.

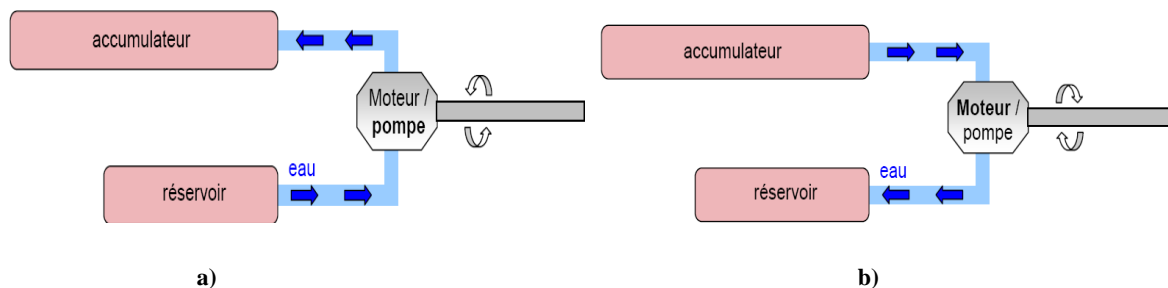


Figure 3.1: Stockage (a) et restitution (b) de l'énergie sous forme hydraulique

Comme pour les véhicules hybrides électriques, on distingue classiquement deux principaux types de configuration de véhicules hybrides hydrauliques: la configuration série et la configuration parallèle. Dans les hybrides séries, la propulsion des roues est toujours assurée par le moteur hydraulique, l'énergie transitant en série depuis le moteur thermique par une pompe, via l'accumulateur, jusqu'au moteur de traction.

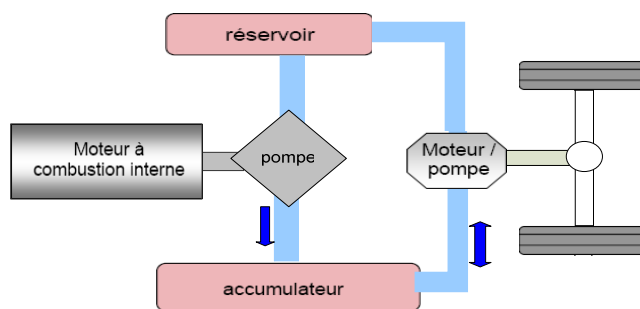


Figure 3.2: Hybride hydraulique série (transmission hydrostatique)

Le problème principal de cette configuration, plus spécifiquement dans le cas des hybrides hydrauliques, est lié au fait que le moteur hydraulique est dimensionné de façon à pouvoir apporter toute la puissance nécessaire aux roues. Ce qui peut entraîner, suivant les exigences du cycle de conduite, l'augmentation de la taille de l'accumulateur, du réservoir et du moteur/pompe lui-même et par conséquent, une augmentation importante du poids et du prix du véhicule. Avec les hybrides parallèles, l'énergie de propulsion peut être transmise aux roues soit par le moteur hydraulique, soit directement par le moteur thermique, voire par les deux simultanément.

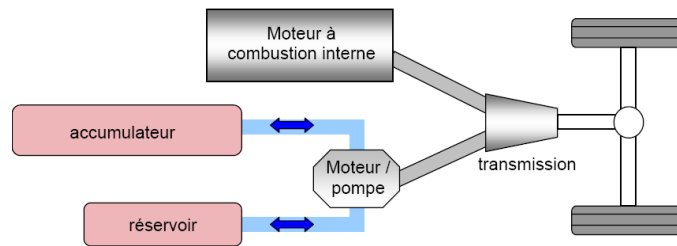


Figure 3.3: Hybride hydraulique parallèle

L'architecture parallèle est la configuration la plus économique pour les véhicules hydrauliques. La possibilité de combiner les deux sources d'énergie permet d'éviter le surdimensionnement du moteur thermique, car le supplément de puissance est fourni par la source secondaire. Le système hydraulique est couplé à l'arbre grâce à une paire d'engrenages. Le désavantage de cette configuration est que la vitesse du moteur hydraulique et celle de l'arbre de transmission doivent toujours être identiques, ce qui réduit la flexibilité du système (Figure 3.4).

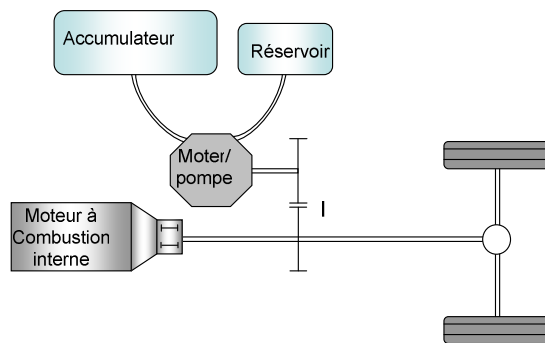


Figure 3.4: Schéma de l'architecture générale du bus hybride hydraulique

Remarquez que dans le cas où le rapport de réduction I' (Figure 3.4) entre le moteur/pompe et l'arbre de transmission est égal à l'unité, le moteur/pompe peut être monté directement sur l'arbre moteur sans devoir être débrayé. Pour ramener le rapport I' à l'unité, il suffirait de jouer sur certains paramètres du bus comme le rapport de réduction ou le rayon effectif des roues, ou même le moteur/pompe hydraulique, afin que ce dernier et l'arbre de transmission tournent à la même vitesse.

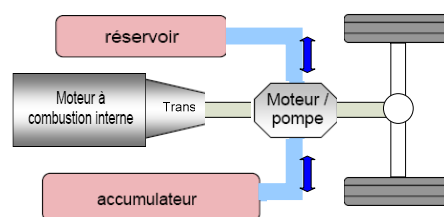


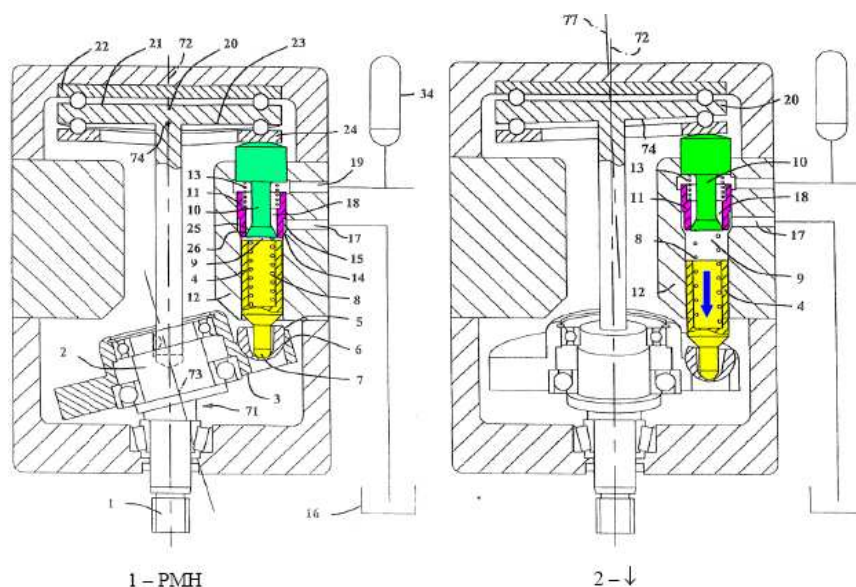
Figure 3.5: Montage du moteur/pompe sur la transmission

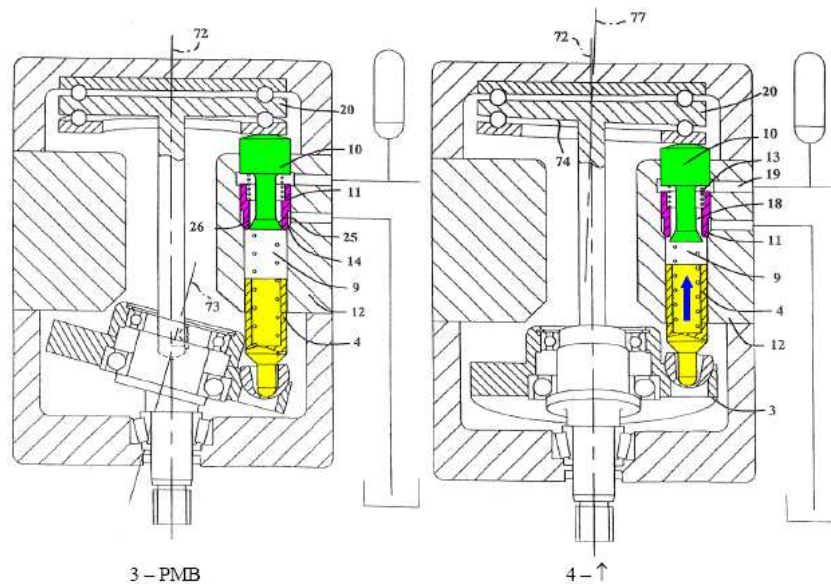
3.3 Composants hydrauliques

Les composants hydrauliques sont l'accumulateur à haute pression, le réservoir à basse pression et le moteur/pompe.

3.1.1 Moteur/Pompe hydraulique

Pour les applications automobiles, nous avons besoin d'une machine hydraulique réversible c'est-à-dire qui puisse opérer, soit comme une pompe, soit comme un moteur, avec les mêmes performances et la même efficacité. De plus, une machine hydraulique compatible avec un fluide non lubrifiant comme l'eau glycolée serait très avantageuse vis-à-vis des contraintes environnementales et du coût direct. Or, l'étude du marché des pompes et moteurs, montre qu'actuellement tous les systèmes existants souffrent de quelques défauts. Certains systèmes ne sont pas réversibles à cause de la présence de clapets anti retour (la pompe à plateau oscillant par exemple). D'autres systèmes sont incapables de travailler avec des fluides non lubrifiants (les moteurs hydrauliques à pistons possédant une glace de distribution). Le moteur qui nous intéresse et que nous avons analysé en détails dans le projet ENERCARE initié par la Région Wallonne, est un moteur dont le principe a été inventé par le Namurois Claude Waudoit [Dusynx et al., 2005].





(1-PMH= point mort haut et 2= descente; 3-PMB= point mort bas et 4= remontée)

Figure 3.6: Fonctionnement en pompe du système Waudoit

C'est un système de transformation d'énergie dont l'originalité est d'être un appareil volumétrique, hydraulique ou pneumatique, réversible, c'est-à-dire qui puisse travailler aussi bien en pompe (Figure 3.6) qu'en moteur (pour passer de pompe à moteur, il suffit de changer le sens de rotation de l'arbre), et qui soit compatible avec un fluide non lubrifiant. Le système est du type moteur et/ou pompe volumétrique dont les pistons sont équipés d'éléments d'obturation, d'alimentation et de refoulement, commandés mécaniquement. Sans clapets anti-retour d'aspiration et de refoulement, l'appareil est capable, par un dispositif commandé mécaniquement par le rotor, de mettre en communication, de manière cyclique, la cavité dans laquelle se déplace le piston avec l'enceinte haute pression et l'enceinte basse pression. Malheureusement, le développement de ce moteur est toujours au stade de projet, les caractéristiques du moteur/pompe Waudoit ne sont pas encore connues. Pour les déterminer, il faudrait lancer une campagne de tests, car les caractéristiques précises sont difficiles à déterminer par simulation numérique. On peut par contre les approcher par comparaison avec les courbes d'autres types de pompes ou de moteurs qui s'en rapprochent. En effet, il existe déjà sur le marché des moteurs (Parkers ou Bosch) dont les caractéristiques ressemblent énormément à celles du moteur Waudoit. Ce sont ces moteurs que l'on utilisera dans nos applications ultérieures en leur prêtant la qualité (qu'ils n'ont pas) du moteurs Waudoit de fonctionner à l'eau glycolée dans le circuit principal. Nous avons sélectionné pour cela les pompes Parker des séries P2 et P3 (Figure 3.7). Parker, Sauer-Danfoss ou Bosch, disposent des pompes réversibles à déplacement variable. Les pompes à piston à déplacement variable

développées par Parker Hannifin, les pompes de la série "P2", sont adaptées aux applications mobiles. Elles sont fort compactes et ont un faible niveau sonore. Elles sont très stables et répondent rapidement aux demandes des systèmes mobiles. Elles sont parfaites pour une installation dans les espaces réduits des machines mobiles modernes. La série P2 est disponible en quatre dimensions, de 60 à 145 cm³/rév, et avec différentes options de contrôle nécessaires pour la plupart des applications sur véhicules. La série P3 est disponible en trois dimensions, de 75 à 145 cm³/rév, et avec les mêmes options de contrôle que la série P2.

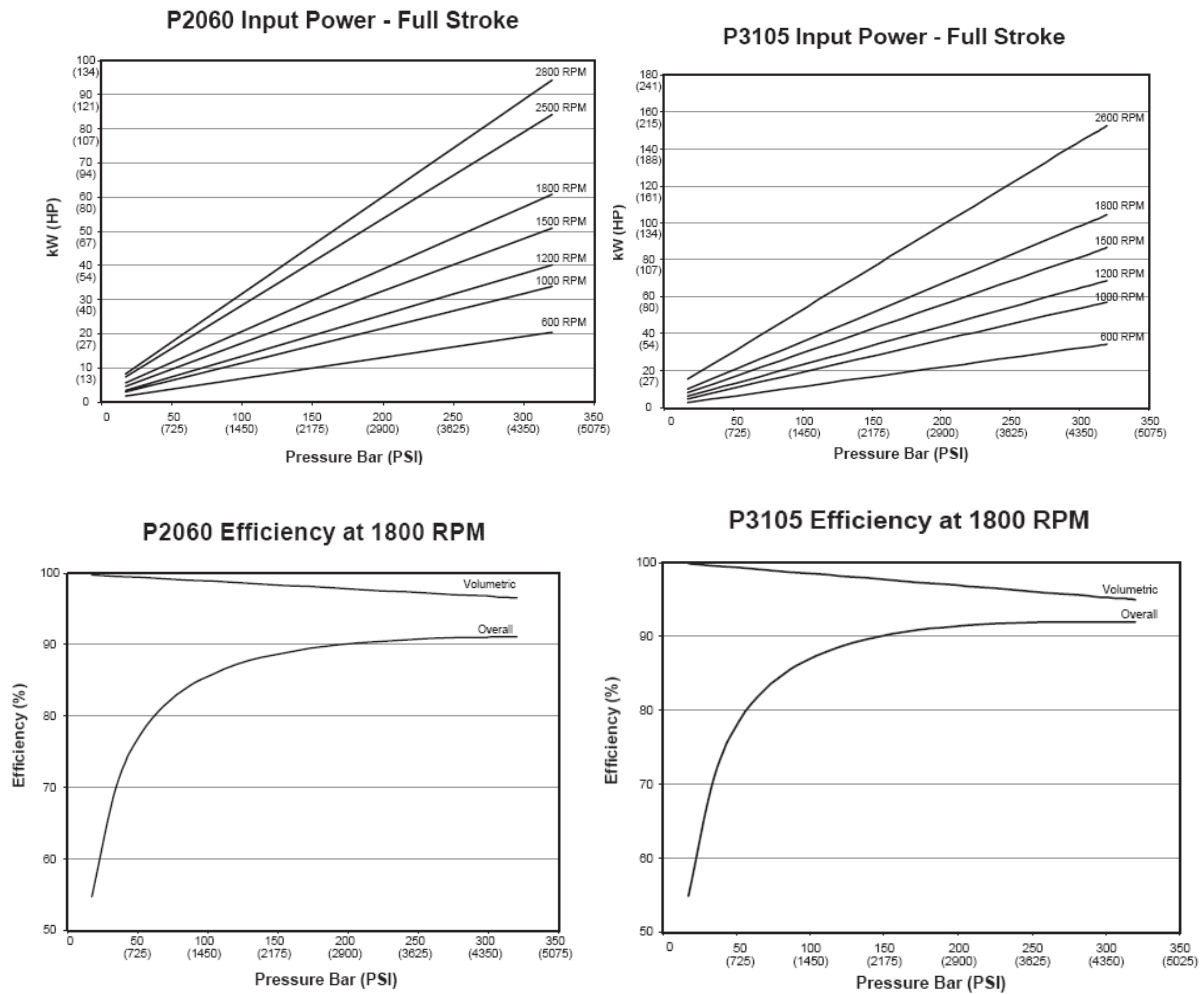


Figure 3.7: séries P2 (à gauche) et séries P3 (à droite) [Parker, 2006]

Ces deux pompes offrent les avantages suivants:

- Compactes et faciles à installer
- Faible niveau sonore
- Grande vitesse d'auto-amorçage
- Les dimensions des ports sont standards

Les caractéristiques principales (dont le rendement) de ces deux pompes sont énumérées ci-après à titre indicatif tandis que les détails complets sont fournis à l'annexe D:



OPERATING DIAGRAM (average values) measured at $V = 36 \text{ mm}^2/\text{s}$; $t = 45^\circ \text{ C}$; $p_{\text{outlet}} = 0 \text{ bar}$

1 Output power 2 Intermittent operating area 3 Continuous operating area with flushing
 4 Continuous operating area 5 Inlet pressure η_t Total efficiency η_v Volumeter efficiency

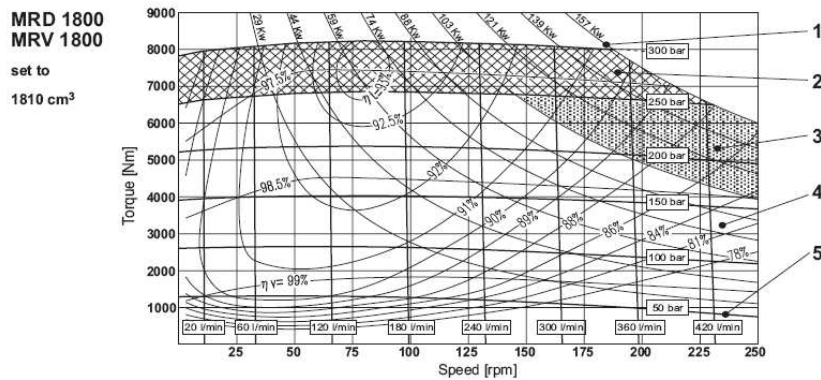


Figure 3.8: Caractéristiques des pompes Parker P2 et P3 [Parker, 2006]

3.1.2 Accumulateurs hydrauliques

Dans les véhicules hybrides hydrauliques, le stockage d'énergie est réalisé par des accumulateurs hydrauliques comprenant un réservoir rempli d'un fluide hydraulique (souvent de l'huile) dans lequel l'énergie est absorbée ou délivrée par des objets élastiques sous

pression. Ces objets peuvent être des ballons compressibles remplis de gaz. Le fluide une fois pompé dans l'accumulateur comprime le gaz dont l'énergie interne augmente. C'est cette énergie qui sera restituée par la suite, en faisant couler le fluide hydraulique de l'accumulateur haute pression vers l'accumulateur basse pression, pour entraîner le moteur hydraulique, qui travaille comme une turbine et restitue la puissance hydraulique. Le principal avantage de ce type d'accumulateur est lié à la haute densité de puissance qu'ils peuvent fournir. L'inconvénient majeur est la capacité de stockage d'énergie qui est faible comparativement aux batteries (Figure 3.9).

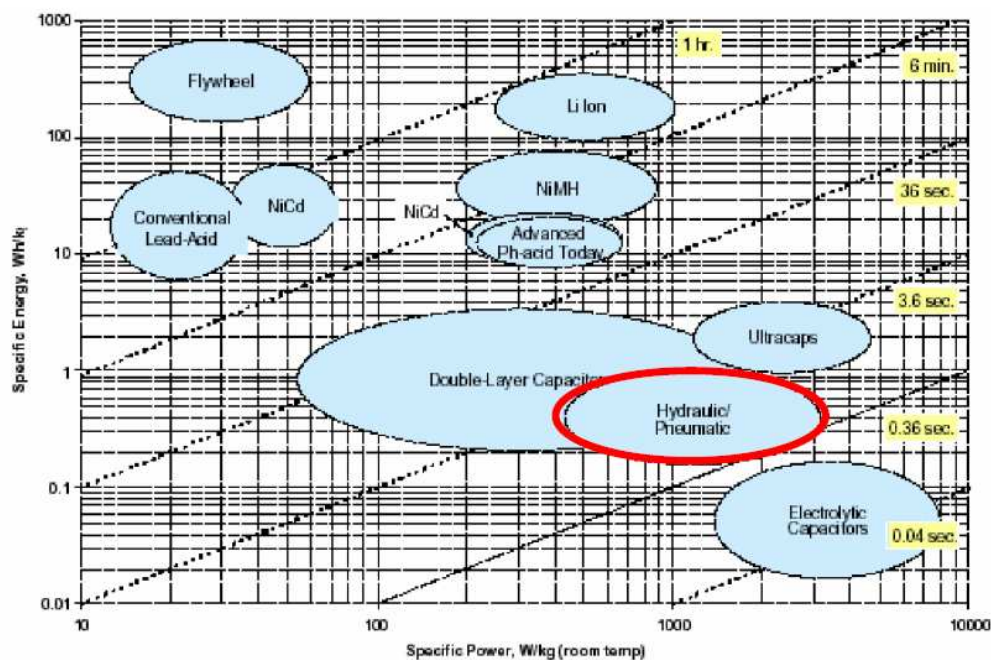


Figure 3.9: Diagramme de Ragone

3.1.2.1 Choix des accumulateurs

Nous nous intéressons ici aux accumulateurs hydropneumatiques. Dans ces accumulateurs le stockage s'opère en comprimant un gaz (en général de l'azote) qui est toujours isolé du fluide hydraulique afin d'éviter toute dissolution du gaz qui aurait deux conséquences néfastes: une diminution progressive de la quantité de gaz renfermé dans l'accumulateur, d'où une chute de la pression de gonflage, et une augmentation de la compressibilité de l'huile, ce qui entraînerait une perturbation dans le fonctionnement de l'installation. Selon la nature de l'élément de séparation, on distingue les accumulateurs (Figure 3.10).

- à vessie (1),

- à diaphragme (2),
- à piston (3).

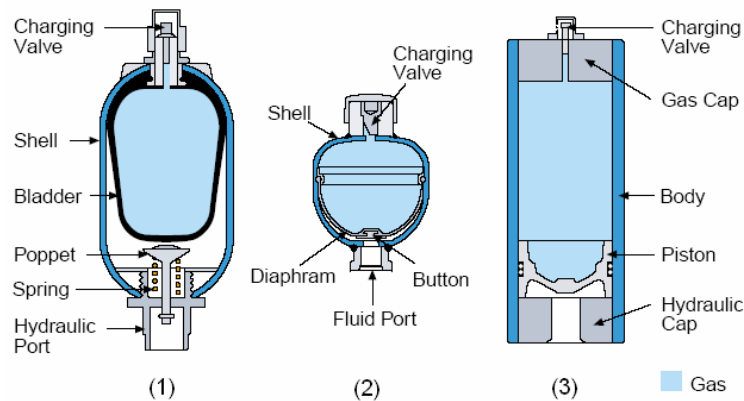


Figure 3.10: Les trois types d'accumulateurs [Hydac, 2006]

Les accumulateurs à vessie (1) sont les mieux adaptés aux applications à vitesses élevées, qui nécessitent une décompression rapide de l'azote. Ils fournissent une excellente séparation gaz/fluide. Les accumulateurs à vessie sont généralement préférés aux accumulateurs à piston (3) pour les applications avec de l'eau. Les systèmes à eau ont tendance à transporter plus de contaminants solides et la lubrification est faible. En théorie, les accumulateurs à vessie (1) et à diaphragme (2) devraient répondre plus rapidement aux variations de pression du système que ceux à piston. Il n'y a pas de frottements et ils ne doivent pas compenser l'inertie du piston. Généralement, un accumulateur à vessie est utilisé pour des applications nécessitant un temps de réponse inférieur à 25 ms, et un accumulateur à piston pour un temps de réponse de 25 ms ou supérieur. La position optimale pour tous les types d'accumulateurs est verticale, avec la partie hydraulique en dessous. Ils peuvent cependant être montés horizontalement moyennant certains inconvénients. Dans le cas qui nous concerne, ils devront être placés horizontalement pour des raisons d'encombrement. Dans une application mobile, il faut tenir compte de la force due à l'accélération du système. Les forces axiales ont peu d'effets sur les accumulateurs à vessie alors qu'elles en ont sur ceux à piston à cause de la masse du piston. Les forces perpendiculaires à l'axe de l'accumulateur n'ont aucun effet sur les accumulateurs à piston, tandis que le fluide risque de se déporter d'un seul côté dans un accumulateur à vessie. Etant donné que dans l'application qui nous concerne on travaille avec de l'eau, que les temps de réponse doivent être les plus courts possibles, que les forces dues à l'accélération du véhicule sont principalement axiales, notre choix s'oriente donc vers les accumulateurs à vessie. Notre choix est conforté par l'analyse de la littérature concernant des HHV

fonctionnant avec de l'huile, où ce sont également des accumulateurs à vessies qui ont été choisis [Filipi et al., 2003; Kepner et al., 2002; Wu et al., 2002].

3.1.2.2 Dimensionnement des accumulateurs

On observe d'abord que les accumulateurs à vessie, que nous avons sélectionnés, ne sont généralement pas recommandés pour des rapports de compression supérieurs à 4:1, cela pourrait causer de trop grandes déformations de la vessie. Dès lors, en vue de son dimensionnement, un accumulateur à vessie nécessite une pression de pré charge. Cette pression de pré charge vaut 0.9 de la pression minimale de travail. On appelle l'état de charge de l'accumulateur (SOC ou state of charge) le ratio entre le volume de fluide présent et le volume de fluide maximal admissible. La pression maximale atteinte dans les accumulateurs est choisie à 345 bars. C'est en effet la pression maximale dans les accumulateurs à vessie disponibles sur le marché. Il vient:

- Pression maximale: 345 bar (5000 psi)
- Pression minimale: 125 bar (1450,38 psi)

Pour le dimensionnement, on part de l'hypothèse que la transformation est adiabatique, car les variations de volume de fluide dans l'accumulateur sont relativement rapides. Il est dès lors aisé de déterminer les différents volumes et l'énergie stockable des accumulateurs à partir de l'équation d'état. Le programme EES (*Engineering Equation Solver*) [Klein et al., 1998] a été utilisé pour les calculs nécessaires.

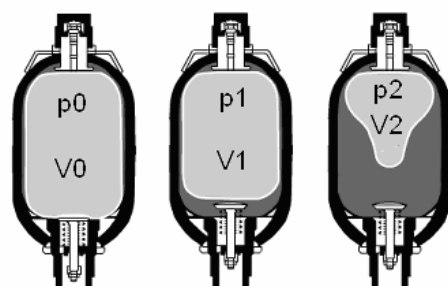


Figure 3.11: États de charge de l'accumulateur: p0 état de précharge, p1 pression minimale de travail et p2 pression maximale

Notons les états:

- { 0: à pression de précharge
- { 1: à pression minimum
- { 2: à pression maximum

En utilisant l'équation d'état pour une transformation adiabatique:

$$p \cdot V^\gamma = cste \quad (3.1)$$

avec $\gamma = 1,4$ pour l'azote

Le volume maximum d'eau que l'on peut mettre dans l'accumulateur est donc donné par:

$$\Delta V = V_1 - V_2 = V_0 \cdot \left[\left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{1/\gamma} - \left(\frac{p_0}{p_2} \right)^{1/\gamma} \right] \quad (3.2)$$

L'énergie stockée dans l'accumulateur quand la pression passe de son minimum à son maximum est donnée par:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV \quad (3.3)$$

Cette énergie représente l'énergie maximum stockable dans l'accumulateur. En utilisant l'équation d'état dans cette dernière équation, on obtient:

$$W = p_0 \cdot V_0^\gamma \cdot \left(\frac{1}{V_2^{\gamma-1}} - \frac{1}{V_1^{\gamma-1}} \right) \cdot \frac{1}{1-\gamma} \quad (3.4)$$

3.1.2.3 Dimensionnement des réservoirs

Le réservoir est un accumulateur à basse pression de structure similaire à l'accumulateur haute pression. En conséquence, il sera moins lourd que le réservoir haute pression. Ses faibles niveaux de pression lui permettront en effet d'avoir des parois nettement plus fines. La pression maximale atteinte dans le réservoir est prise à 35 bars et la pression minimum est fixée à 5 bars pour éviter tout risque de cavitation. Les formules (3.1) à (3.4) pour l'accumulateur restent valables pour le réservoir.

3.2 Faisabilité technique des hybrides hydrauliques

Le véhicule hybride hydraulique étant encore au stade de recherche et développement, la littérature n'en fournit que très peu de modèles. C'est pour cette raison que l'on souhaite explorer plusieurs types de véhicules afin de mettre en évidence les avantages et les inconvénients d'un véhicule hybride hydraulique basé sur un moteur/pompe réversible et pouvant fonctionner avec un fluide non lubrifiant. L'étude de faisabilité technique des

véhicules hybrides hydrauliques porte sur différentes catégories de véhicules à savoir: une voiture moyenne du segment C d'environ 1200kg, un Sport Utility Vehicle (SUV) d'environ 2000kg et un autobus d'environ 15000kg. En effet, la littérature rapporte qu'une des difficultés des véhicules hybrides hydrauliques réside dans l'encombrement et la masse du système hydraulique (principalement des accumulateurs) [Jefferson et al., 2002]. Il convient dès lors d'évaluer différents scénarios de véhicules hybrides hydrauliques en fonction de la pénalité du surpoids et de l'encombrement du système hydraulique. Sur base de résultats de simulation, on entend chiffrer l'ordre de grandeur des gains de consommation qui peuvent être attendus. Ceux-ci seront comparés aux consommations des véhicules thermiques classiques et aux véhicules hybrides électriques, solution actuellement retenue.

3.2.1 Modélisation et Simulation

Pour chacun des trois types de véhicules (voiture de gamme moyenne du segment C, un SUV et un autobus), trois modèles sont développés:

- Un modèle de référence: le véhicule est équipé d'un moteur thermique classique
- Un HEV: véhicule hybride électrique doux parallèle avec le même moteur thermique que le modèle de référence.
- Un HHV: véhicule hybride hydraulique doux d'architecture parallèle, toujours avec le même moteur thermique que le modèle de référence. La stratégie de contrôle du système hybride hydraulique est la même que celle du modèle hybride électrique.

Dans cette analyse, le moteur pompe est conçu uniquement pour l'assistance du moteur thermique en cas de fortes accélérations et pour la récupération de l'énergie de freinage. C'est pour cette raison que c'est la configuration hybride parallèle doux qui est considérée. Les caractéristiques des véhicules de référence considérés sont consignées dans la Table 3.1:

	Segment C	SUV	Bus
Moteur	Turbo Diesel	Essence	Diesel
P_{max} [kW]	56	102	205
C_d	0,31	0,41	0,79
S [m ²]	1,98	3,06	7,24
L [m]	2,6	3,06	5,88
Masse totale [kg]	1235	1785	15281

Table 3.1: Caractéristiques des véhicules de référence

Ces trois modèles sont simulés au moyen du programme *ADVISOR*.

Ce programme est conçu pour la simulation de véhicules hybrides électriques. Pour simuler des véhicules hybrides hydrauliques, nous nous sommes basés sur les modèles de véhicules hybrides électriques auxquels nous avons apporté les modifications nécessaires. Afin que les résultats obtenus soient significatifs, les trois types de véhicule seront étudiés sur des cycles de conduite qui leur sont appropriés. Pour la voiture et le SUV, c'est le nouveau cycle européen (ECEUDC) (Figure 2.10) qui a été naturellement choisi. Ce cycle comporte un cycle standardisé pour la circulation urbaine (quatre fois le cycle urbain de base) dont l'accélération maximale vaut la moitié de l'accélération en cas de conditions de conduites réelles et qui est suivi d'un cycle périurbain. Pour l'autobus, c'est le cycle SORT2 (figure 2.12) qui a été sélectionné.

3.2.1.1 Voiture du segment C

Afin d'évaluer la faisabilité technique des motorisations hybrides hydrauliques sur les voitures de passager, il est courant de considérer une voiture de gamme moyenne. En Europe, les voitures du segment C sont les plus vendues. Elles ont une masse moyenne (de l'ordre 1200 kg) et une cylindrée moyenne. Parmi les différents modèles qui s'inscrivent dans cette gamme (Opel Astra, Renault Mégane, Peugeot 307...) nous avons choisi de considérer la VW Golf afin de soutenir la réflexion.

1. Véhicule conventionnel

Le véhicule de référence est une voiture classique avec un moteur Diesel. Les caractéristiques de la motorisation sélectionnée comme référence sont les suivantes:

- Moteur diesel de $P_{max} = 55$ kW
- Rendement maximum de 41 %.

Mais comme la cartographie de ce moteur n'existe pas dans la librairie ADVISOR, il a été remplacé par un moteur diesel de $1,7 \text{ cm}^3$ de cylindrée et d'une puissance nominale de 60 kW et dont la cartographie de la consommation est disponible dans ADVISOR.

Le véhicule possède les caractéristiques suivantes:

- $CD = 0,31$
- FA (surface frontale) = $1,98 \text{ m}^2$
- Empattement = 2,6 m
- Coefficient de résistance au roulement = 0,008

- Rayon effectif de roulement des roues = 0,31 m

Le véhicule de référence avec sa motorisation Diesel possède une masse de 1235 kg. La consommation cumulative sur le cycle Européen telle que donnée par ADVISOR est de 5,7l/100km. C'est cette consommation qui est prise comme référence.

2. Véhicule hybride électrique

Le véhicule hybride électrique doux est dérivé du modèle et de la configuration de la Honda Insight directement disponible dans ADVISOR. Comme dans l'Insight, on retient la configuration dans laquelle le moteur/générateur électrique est placé entre le moteur thermique et la transmission, directement sur l'arbre moteur, à la place du volant moteur. On a modifié les caractéristiques du moteur thermique et les caractéristiques du châssis (aérodynamique, résistance au roulement, etc.) afin d'avoir les mêmes que ceux du véhicule conventionnel (VW Golf). La Honda Insight bénéficie d'une stratégie assez élaborée pour la gestion de la motorisation hybride. Nous en avons conservé le principe de l'algorithme de gestion. Les paramètres de l'algorithme peuvent être modifiés. La stratégie de gestion permet effectivement au moteur électrique d'assister le moteur thermique pendant les accélérations et de récupérer l'énergie de freinage, le moteur thermique restant la principale source pour propulser le véhicule. En plus, sous certaines conditions (vitesse du véhicule, état de charge des batteries, position du levier de l'accélérateur, etc.), le moteur thermique peut être coupé quand le véhicule est à l'arrêt permettant ainsi de gagner sur la consommation. Les caractéristiques du moteur/générateur qui équipe la Honda Insight sont les suivantes:

- Puissance = 10 kW
- $\eta_{\max} = 96 \%$
- masse = 60 kg.

La Honda Insight est équipée de batteries au Nickel Métal Hydrures (NiMH). Elles délivrent une tension totale de 144V et un courant de 6,5 Ah. Nous avons gardé ces mêmes batteries parce qu'elles sont standards et industrielles. Leurs caractéristiques sont reprises dans la Table.3.2.

Type de batterie	Ni-MH – taille D (33/62)
Tension nominale des cellules	1,2 V
Capacité	6,5 Ah
Cellules par module	6
Nombre de modules	20
Tension totale	144 V
Stockage d'énergie nominal	936 Wh (= 144 V * 6,5 Ah)
Masse d'un module	1,09 Kg
Masse totale (électronique de puissance, boîtier et système de refroidissement compris)	35,2 kg

Table 3.2: Caractéristiques des packs de batteries NiMH de la Honda Insight

Le véhicule hybride électrique pèse donc 1330 kg, la différence de poids avec le véhicule conventionnel est due essentiellement au moteur électrique et aux batteries. Pour gagner sur la consommation, nous avons réduit la taille du moteur thermique. Selon ADVISOR et pour éviter de s'écarter trop des caractéristiques du moteur de référence, le facteur d'échelle ne peut pas être en dessous de 0,7 ce qui fait que la taille du moteur peut être réduit jusqu'à 42kW (60kW*0,7). La simulation ADVISOR prévoit une consommation de 4,5l/100km sur le parcours européen. Le gain sur la consommation (21%) reste faible par rapport à la réalité (les véhicules hybrides doux peuvent gagner jusqu'à 30%, voir table 2.1). Cela est dû au fait que le fonctionnement du moteur thermique n'est pas optimisé mais surtout que le modèle du moteur de référence de la librairie ADVISOR (moteur diesel de 60 kW) est un modèle développé il y a une dizaine d'années (année 1999) avec les limitations du logiciel ADVISOR.

3. Véhicule hybride hydraulique

Le modèle de véhicule hybride hydraulique a été développé à partir du modèle du véhicule hybride électrique. Plusieurs modifications y sont apportées. La modification la plus importante est la masse du véhicule, le système hydraulique étant plus lourd que l'électrique. Le dimensionnement du système hydraulique à partir du système électrique peut être réalisé de deux manières différentes. La première méthode est basée sur la capacité de stockage, c'est-à-dire que l'on impose à l'accumulateur hydraulique de posséder la même énergie maximum stockable que les 20 modules de batteries du véhicule hybride électrique. Dans ce cas, l'énergie totale stockable est de 936 Wh (3369.6kJ). En utilisant les équations d'état décrites précédemment, on peut calculer le volume des accumulateurs nécessaire pour emmagasiner les 3369.6 kJ. Les calculs donnent un volume total V_0 des accumulateurs d'environ 90 gallons (340L) et 165L d'eau pour le circuit hydraulique. Comme les accumulateurs Hydac [Hydac, 2006] sélectionnés ont un volume de 15 gallons chacun, le véhicule aura besoin de 6 accumulateurs qui font une masse de $6 \times 170 = 1020$ kg. Les réservoirs

sont dimensionnés sur base du volume total d'eau dans le circuit hydraulique et des pressions minimale et maximale. Les calculs donnent un volume total des réservoirs de 64 gallons (240L). Chaque réservoir ayant un volume de 13 gallons, il faut 5 réservoirs avec un poids supplémentaire de $5 \times 52 = 260$ kg. Ainsi donc, la masse totale du circuit hydraulique est donné par: $1020\text{kg} + 260\text{kg} + 165\text{kg} = 1445\text{kg}$. La masse totale du véhicule hybride hydraulique s'élève à 2780 (1235 kg (masse du véhicule) + 1445kg (masse du circuit hydraulique) + 100kg (masse du moteur pompe)) et la consommation prévue par ADVISOR est de 7l/100km.

Comme on peut le remarquer, le dimensionnement des accumulateurs avec l'objectif qu'ils puissent stocker la même quantité d'énergie que les batteries du véhicule hybride électrique donne des résultats peu réalistes (Figure 3.14): l'emplacement d'un tank de 340l sera difficile à aménager dans une voiture (nombre élevé d'accumulateurs et de réservoirs), la masse additionnelle est supérieure à la masse du véhicule lui-même, ce qui nécessiterait des modifications profondes de la voiture (châssis, suspensions...) et on n'aura plus une voiture mais une autre catégorie de véhicule. La consommation est supérieure à la consommation du véhicule conventionnel.

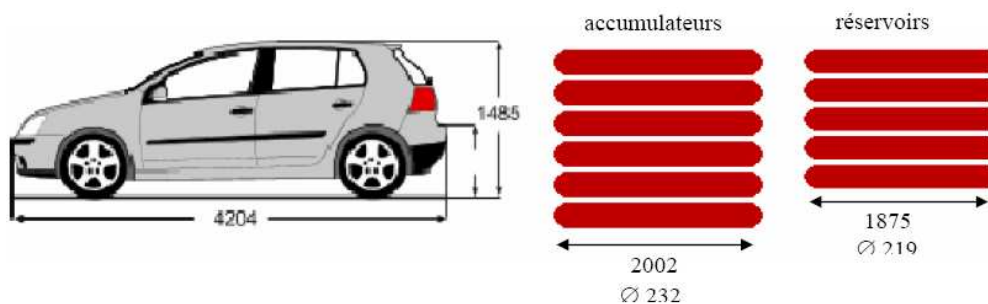


Figure 3.14: Encombrement des accumulateurs et réservoirs sur la VW Golf 5 et sur base de l'énergie stockable dans les accumulateurs

Etant donné le volume et le supplément de poids prohibitif du système hydraulique, il convient de dimensionner le système d'assistance et de récupération d'énergie sur la base des critères de poids et de volume de manière à ce qu'ils restent limités.

Prenons un accumulateur à haute densité d'énergie de 10 gallons soit 115kg. Avec un tel accumulateur, le fluide en mouvement maximum est de 18,13 l et l'énergie stockable de 370 kJ (103 Wh). En considérant les mêmes modules de stockage que pour le HEV, cela correspond à 2,2 modules de batteries NiMH pour stocker la même énergie. La tension de la batterie serait alors de 16V. Pour 18,13 l d'eau en mouvement, on obtient après calculs, un réservoir basse pression d'au moins 26,72 l. Le catalogue Hydac en propose un de 32 l et 38kg. La masse de système hydraulique: l'accumulateur, du réservoir et du fluide en

mouvement sera donc de 171kg (115+38+18). La masse totale du véhicule est donc de 1446kg (1235+171+40kg (moteur pompe)).

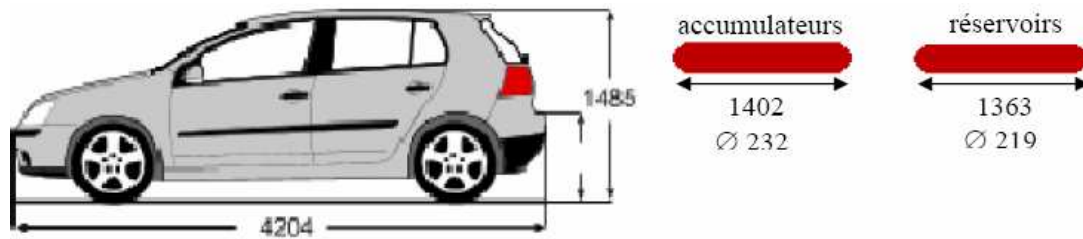


Figure 3.15: Encombrement des accumulateurs et réservoirs sur la VW Golf sur base de la masse

La simulation de la consommation du véhicule dans ADVISOR fournit la consommation normalisée de 5.2l/100km. L'encombrement et le supplément de masse sont à la limite du tolérable pour ce type de voiture. La consommation est par contre légèrement diminuée. Le coût du système hydraulique n'est toutefois pas considéré. En essayant de limiter le poids additionnel pour gagner sur la consommation dans le cas d'une voiture, on obtient des résultats peu réalistes comme par exemple une batterie de 16V.

4. Analyse des résultats

	Masse (kg)	Consommation (l/100 km)	Gain en fuel (% de la consommation du Conventionnel)
Véhicule conventionnel	1235	5.7	-
HEV	1330	4,5	-21%
HHV			
Dimensionnement sur l'énergie stockée	2780	7	+23%
Dimensionnement sur la masse du véhicule	1446	5,2	-8,7%

Table 3.3: Résultats de la simulation pour les voitures

Le premier inconvénient du système hybride hydraulique est sa masse élevée. L'énergie stockable par unité de masse est environ 70 fois inférieure pour le système hydraulique par rapport à l'électrique:

- Hydraulique: de l'ordre de 0,63 Wh / kg (accumulateur + réservoir + eau)
- Électrique: de l'ordre 43 Wh / kg (batteries)

Le second inconvénient du système hydraulique est son encombrement. Ainsi pour une même énergie stockable, la masse du HHV est deux fois plus élevée que celle du HEV. Il en résulte une augmentation significative de la consommation. En limitant le poids du HHV à moins d'une tonne et demie, le gain obtenu en consommation n'est pas suffisant pour justifier les inconvénients et le surcoût engendrés par le système hydraulique:

- La structure et les composants de la voiture vont devoir être redimensionnés à cause de la masse plus élevée (211 kg de plus que le conventionnel): châssis, amortisseurs, freins, systèmes de sécurité, etc.
- La masse plus élevée va aussi entraîner une modification du comportement routier de la voiture.
- L'accumulateur et le réservoir occupent un espace non négligeable (Figure 3.14) et ils vont être difficiles à répartir de manière à ne pas déséquilibrer la voiture.

3.2.1.2 Sport Utility Vehicle (SUV)

On procède exactement de la même façon que pour les véhicules de passager. A nouveau, la version hybride électrique du SUV est dérivée du modèle ADVISOR de la Honda Insight. La stratégie de contrôle de la motorisation hybride est également conservée. Le type de véhicule a été modifié afin de garder le même moteur que le véhicule conventionnel (Moteur essence de 102 kW, rendement maximum = 29 %). Le fait que l'on n'ait pas réalisé de downsizing du moteur peut se justifier par le fait que le moteur électrique est juste utilisé comme assistance (hybride doux). Le nombre de modules de batteries et la puissance des moteurs électriques ont été adaptés (respectivement dans le rapport de masse des deux véhicules et dans le rapport des puissances des moteurs thermiques).

Après calculs (voir [Duisinx et al., 2005] pour les détails), on aboutit sur les résultats et les conclusions suivants:

	Masse (kg)	Consommation (l/100 km)	Gain en fuel (% de la consommation du Conventionnel)
Véhicule conventionnel	1783	13,2	-
HEV	1965	11,4	-12%
HHV			
Dimensionnement sur l'énergie stockée	4679	17,7	+34%
Dimensionnement sur la masse du véhicule	2327	12,2	-7,5%

Table 3.4: Résultats de la simulation pour les SUV

A nouveau, la masse importante et l'encombrement du système de stockage hydraulique empêchent le véhicule de réaliser une économie de carburant significative. L'application du système d'hybridation hydraulique semble moins favorable que les systèmes hybrides électriques pour des véhicules de type SUV dont la masse est d'environ 2 tonnes.

3.2.1.3 Bus

L'encombrement et la masse des systèmes hybrides hydrauliques les rendent peu adaptés aux véhicules de faible tonnage tels que les voitures de passagers et même les SUV européens.

L'idée est alors de regarder l'intérêt des véhicules hybrides hydrauliques pour des véhicules lourds ou mi-lourds. Un second argument réside dans le fait que le système hydraulique dont la capacité de stockage d'énergie est assez faible ne convient que comme assistance à la relance (*launch assist*). Son efficacité sera donc faible pour un véhicule qui effectue des longs trajets sur autoroute alors qu'elle sera exploitée au mieux pour des véhicules soumis à des arrêts et à des accélérations fréquents. Ce profil d'utilisation est celui des véhicules urbains tels que les autobus ou des véhicules de livraisons (livreur, camion de ramassage). L'attention a été donc portée sur un autobus d'une masse d'environ 15 tonnes.

1. Bus conventionnel

La bibliothèque d'ADVISOR comporte un modèle de bus motorisé par un moteur diesel de 205 kW (rendement maximum = 44 %). Ce véhicule servira de référence. La simulation du véhicule sur le cycle SORT 2 prédit une consommation élevée: 58,4l/100km.

2. Bus hybride électrique

Comme la configuration convenable au système hydraulique est l'hybride parallèle doux, le bus hybride électrique doit avoir la même configuration pour une comparaison objective. La configuration parallèle peut être sélectionnée dans le menu principal des chaînes de traction disponibles dans la bibliothèque ADVISOR. A partir de cette configuration, il faut développer un modèle de bus hybride électrique avec le même type de moteur que le bus conventionnel. Il reste à sélectionner les deux principaux composants électriques: le système de stockage d'énergie et le moteur électrique. Les batteries NiMH ont été retenues pour la simulation et leur modèle est également disponible dans ADVISOR. Ce sont des batteries à haute densité d'énergie dont la technologie est maîtrisée et qui sont largement utilisés dans les véhicules hybrides électriques déjà commercialisés (Prius, Honda Insight). Le moteur électrique sélectionné appartient à la famille des moteurs à courant alternatif asynchrone dont les modèles sont également disponibles dans ADVISOR. Le modèle AC75 a été retenu. Pour le nombre de modules de batteries et la puissance du moteur électrique nécessaires, nous avons utilisé la fonctionnalité d'ADVISOR qui permet de calculer le nombre optimal de l'un et l'autre en vue de minimiser la consommation.

Il vient:

- 571 modules de batteries NiMH
- moteur électrique AC 75 d'une puissance maximale de 122kW, d'un rendement maximal de 92% et d'une masse de 149 kg.

Le choix des batteries est un peu plus délicat. En effet 571 modules de batteries en série donneraient une tension de 4111V. C'est inacceptable comme tension de travail. Il est alors indispensable de mettre les modules en parallèles et d'augmenter le courant. Une tension de 500 V est habituelle sur le bus électrique. On peut donc placer 8 blocs de 71 modules en parallèles. Il vient

- Type: NiMH (8×71 modules en parallèles)
- Tension nominale = 511 V
- Energie stockable: 26kWh ($511 * 6,5Ah * 8$)
- Masse = 570 kg

Le véhicule hybride électrique ainsi formé peut être simulé dans ADVISOR et la stratégie de gestion de l'énergie est la stratégie du système parallèle (confère chapitre 2). Les performances sur le cycle SORT2 prédisent une consommation de 47,5l/100km.

3. Bus hybride hydraulique

Comme dans le cas des voitures de passager et les SUV, le dimensionnement du système hydraulique à partir du système électrique peut être réalisé de deux manières différentes. La première méthode est basée sur de la capacité de stockage d'énergie mais nous avons constaté que le poids de l'accumulateur devient trop important et que la consommation de fuel du véhicule hybride hydraulique augmente en utilisant cette méthode. Il convient de dimensionner le système d'assistance et de récupération d'énergie sur la base des critères de poids et de volume de manière à ce qu'ils restent limités. On réalise une étude paramétrique afin de déterminer celui qui offrira le meilleur ratio entre la réduction de consommation et le supplément de poids et de coût qu'il entraîne. On évalue successivement un système hydraulique basé sur 20, 15, 10 et 5 accumulateurs. Pour ce faire, un accumulateur Hydac de 15 gallons a été choisi comme l'unité de référence. Cependant, cette méthode est plus fastidieuse que la précédente puisqu'il faut faire des simulations avec différents nombres d'accumulateurs afin de trouver la configuration qui donne la consommation minimale. Prenons l'exemple de 10 accumulateurs et déterminons le nombre de modules de batteries

NiMH qui stockeraient la même quantité d'énergie, la masse additionnelle et le volume du fluide nécessaire. Étant donné qu'un accumulateur Hydac de 15 gallons a une masse de 170 kg, 10 accumulateurs auront un poids total de: $10 \times 170 = 1\ 700$ kg. En effectuant les calculs nécessaires avec EES, on obtient un volume maximal du fluide en mouvement de 272 l et une énergie stockable de 5545 J (1540,3 Wh). En considérant les mêmes modules de stockage que pour le bus hybride électrique, il en faudrait 33 modules de (NiMH) ce qui fournirait une tension effective de travail de 237 V.

Concernant le réservoir, on obtient avec les 272l en mouvement un volume minimum de réservoir de 400l. Le catalogue Hydac propose des réservoirs de 50l. Par conséquent, on prend 8 réservoirs Hydac de 50l pour une masse totale de 416kg. Cela conduit à une masse totale de 17769kg et la simulation ADVISOR donne une consommation de 52,3l/100km.

Selon le nombre d'accumulateurs considérés, la Table 3.5 récapitule l'énergie totale stockable, le nombre de modules de batteries NiMH et la tension correspondants, le nombre de réservoirs et le volume minimum correspondants ainsi que la masse additionnelle.

Nombre d'accumulateurs hydrauliques	20	15	10	5
Energie totale (Wh)	3080	2310	1540,3	770,14
modules NiMH correspondants	66	50	33	17
Tension de travail (V)	474	355	237	119
Nombre de réservoirs	16	12	8	4
Volume minimum (L)	800	600	400	200
Masse additionnelle, kg (accu+réservoirs+eau)	4776	3582	2338	1194

Table 3.5: Dimensions des Accumulateurs

En faisant la même chose que pour les voitures et les SUV avec différents nombres d'accumulateurs, on arrive aux résultats de la simulation de consommation et aux conclusions suivantes:

	Masse (kg)	Consommation (l/100 km)	Gain en fuel (% de la consommation du Conventionnel)
Véhicule conventionnel	15281	58,4	-
HEV	16000	47,5	-18,66%
HHV			
Dimensionnement sur l'énergie stockée	57016	142,6	+139%
Dimensionnement sur la masse du véhicule			
5 accumulateurs	16555	50,5	-13,5%
10 accumulateurs	17769	52,3	-10,45%
15 accumulateurs	18983	54	-7,5%
20 accumulateurs	20187	56,1	-4%

Table 3.6: Résultats de la simulation pour les Bus

Le système hybride électrique reste le système le plus performant. Il permet un gain allant jusque 18,6% de consommation. Le système hybride hydraulique est pénalisé par le supplément de masse qu'il entraîne, annulant même parfois tous les bénéfices que le freinage régénératif et l'assistance à la relance pourrait fournir. A nouveau on constate qu'il est irréaliste de dimensionner le système hydraulique pour avoir la même capacité énergétique de stockage. La masse passe de 15 à 57 tonnes ce qui est inacceptable en pratique, car le véhicule n'arriverait même pas à suivre le cycle de conduite.

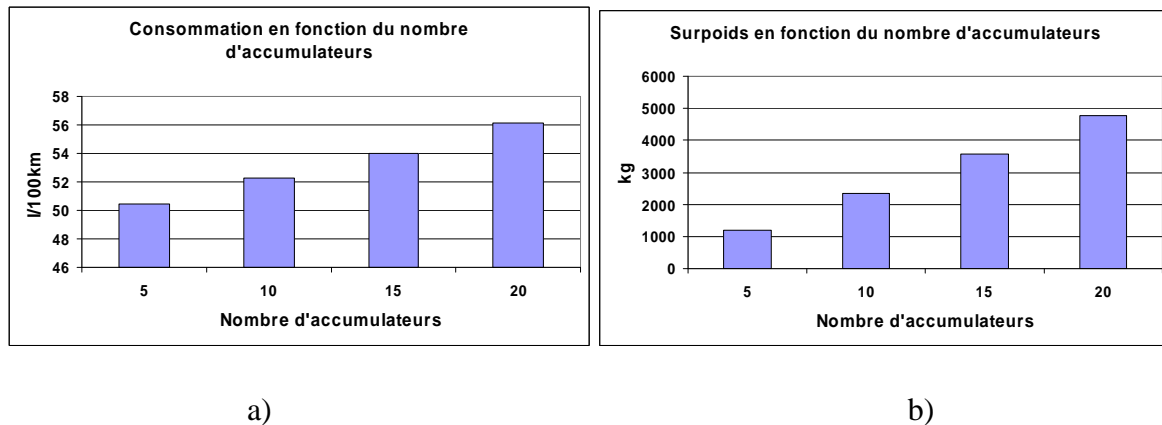


Figure 3.16: Consommation (a) et surpoids (b) en fonction du nombre d'accumulateurs

La configuration hybride hydraulique la plus favorable est celle basée sur un relativement faible nombre d'accumulateurs (5). Pour ce type de véhicule, le surpoids et l'encombrement sont peu contraignants (Figure 3.17). Avec un petit nombre d'accumulateurs, le gain de consommation peut atteindre 13,5% (18,6% avec le véhicule électrique) ce qui est très appréciable.

Le gain est plus important que pour les voitures et les SUV, car l'excédent de poids inhérent au système de stockage hydraulique est relativement moins important. L'encombrement du système de stockage est lui aussi proportionnellement moindre que dans le cas des voitures et SUV. Nous n'avons pas non plus à redouter des modifications du comportement routier puisqu'il s'agit d'un véhicule qui se déplace à faible vitesse.

Le gain de consommation supérieur de l'hybride électrique par rapport au système hybride hydraulique doit également être mis en relation avec le coût du système électrique qui serait supérieur à celui du système hydraulique. On peut donc en conclure que le système hybride hydraulique pourrait être compétitif par rapport au véhicule hybride électrique lorsque ce paramètre est pris en compte.

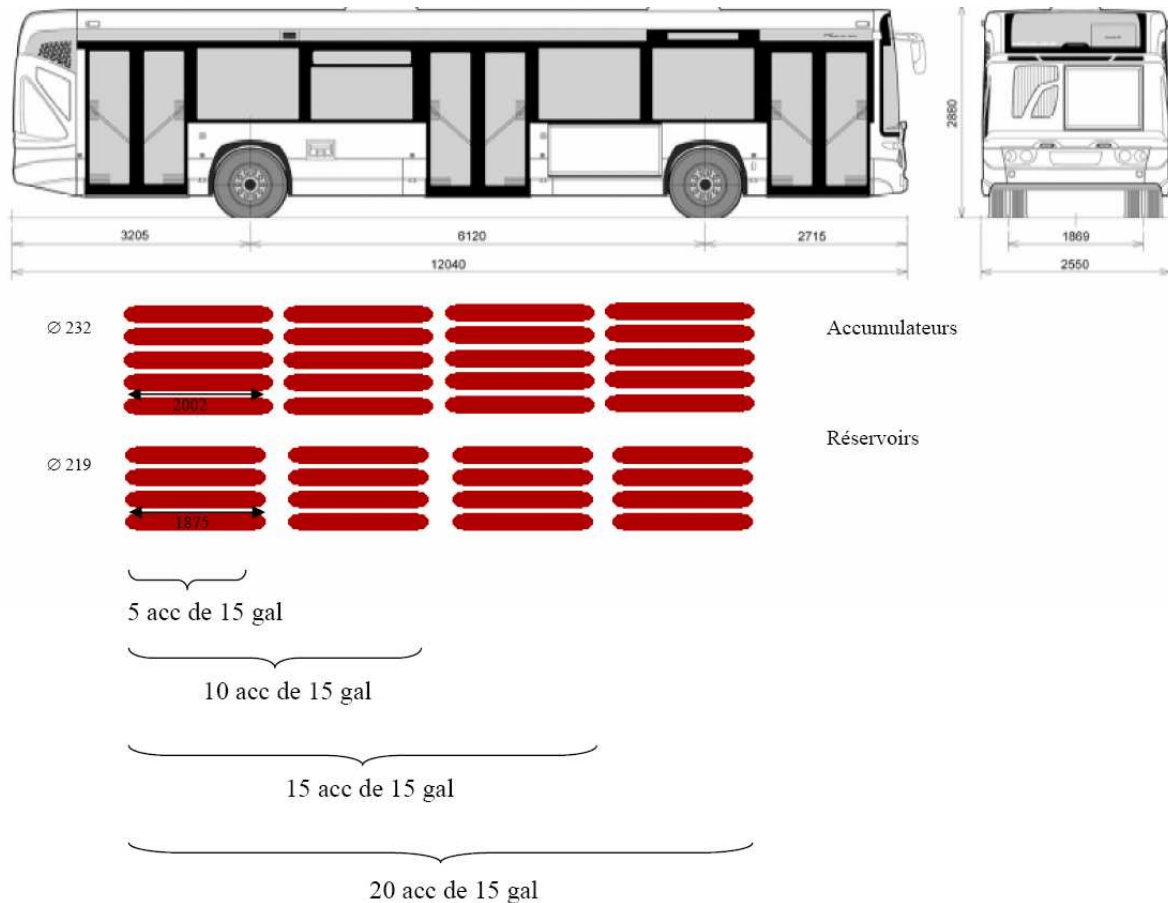


Figure 3.17: Encombrement en fonction du nombre d'accumulateurs

4. Zone de fonctionnement du système hydraulique (cas du Bus)

Nous voulons vérifier, si le système hydraulique répond suffisamment à la demande du véhicule en termes de pression dans les accumulateurs et de débit de la pompe. Pour cela, considérons le cas du bus hybride hydraulique équipé de 5 accumulateurs de 15 gallons sur le cycle mixte SORT2. Via MATLAB [Houle, 2004], on peut obtenir le niveau de charge de l'accumulateur en fonction du temps calculé par ADVISOR. Ces données sont implantées dans EES sous forme d'une table paramétrique. On peut ainsi calculer la pression dans l'accumulateur, le volume de gaz et le débit en fonction du temps. L'état de charge de l'accumulateur est défini par:

$$SOC = \frac{\text{énergie dans l'accumulateur}}{\text{énergie max stockable dans l'accumulateur}}$$

Et le débit de fluide hydraulique au travers des circuits hydraulique par:

$$\text{débit d'eau} = \frac{\Delta \text{Volume de gaz dans l'accumulateur}}{\Delta t}$$

Le volume de gaz et la pression dans l'accumulateur sont calculés pour chaque seconde du cycle avec EES et on obtient les résultats repris aux Figures 3.18 et 3.19:

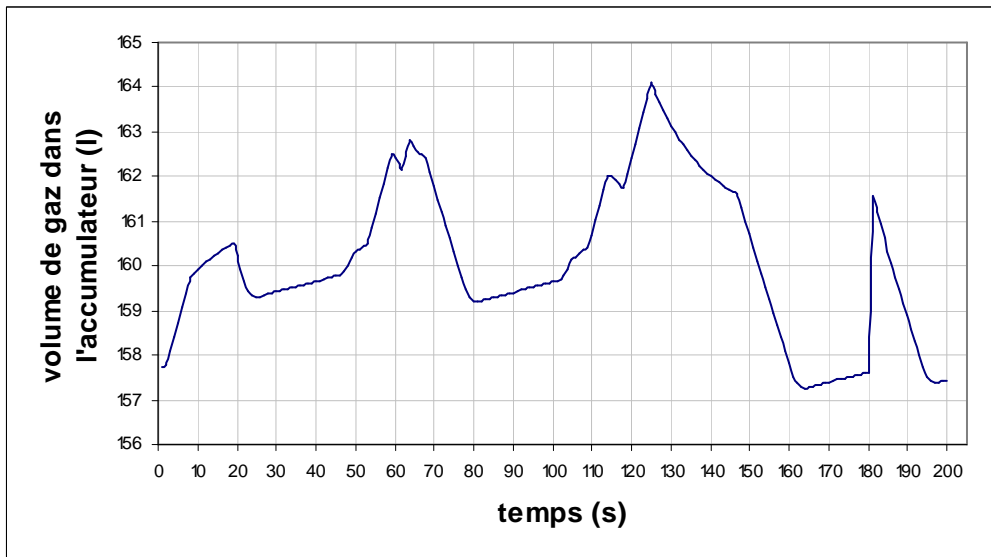


Figure 3.18: Volume de gaz dans l'accumulateur en fonction du temps

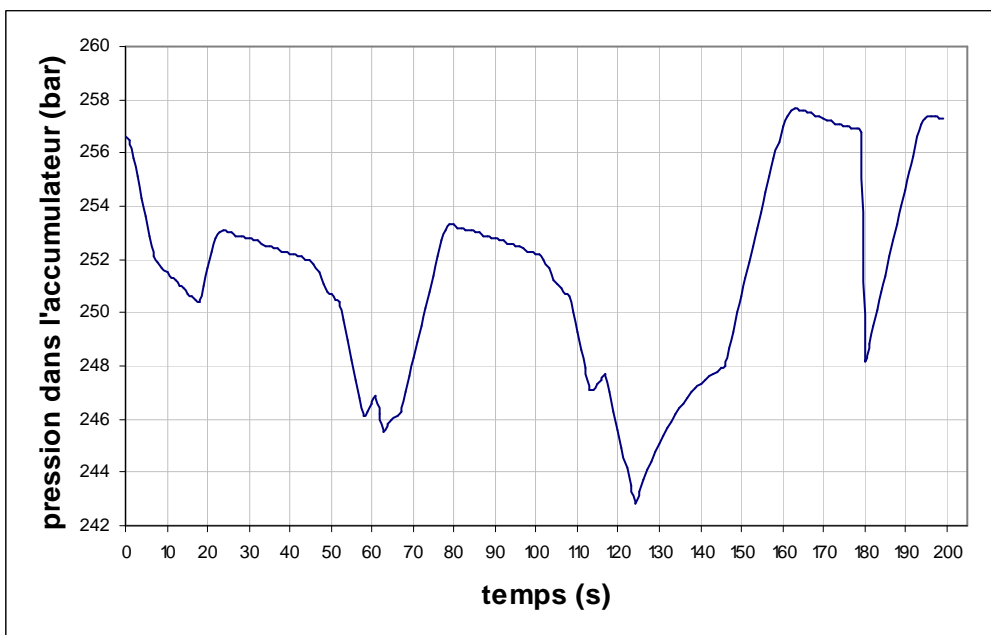


Figure 3.19: Pression dans l'accumulateur en fonction du temps

La pression débute à 256,6 bars pour un état de charge de 67,78% et fini à 257,3 bars pour un état de charge de 68,06%. Le débit à chaque instant est ensuite calculé par EXCEL.

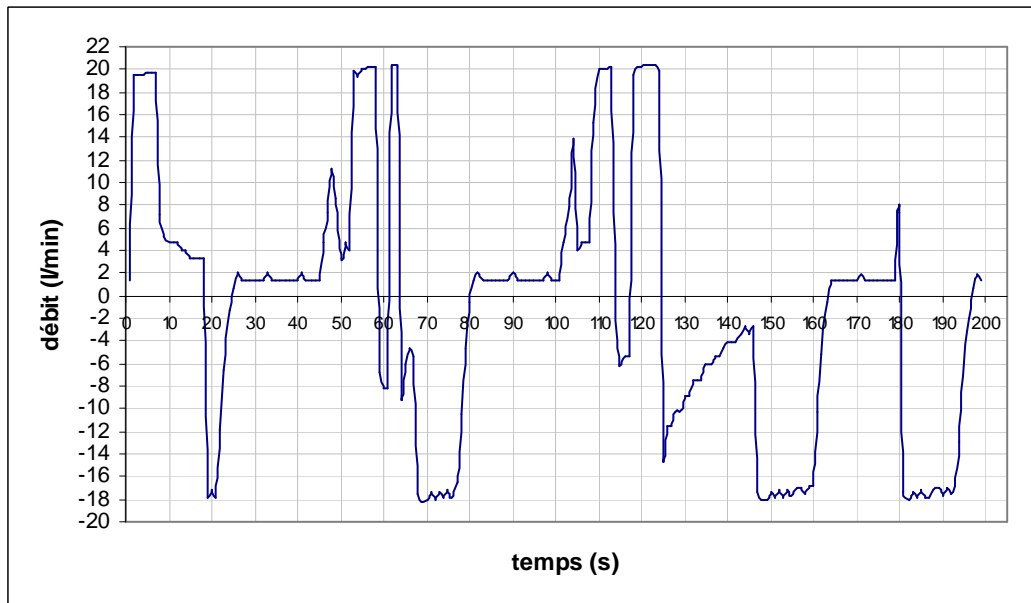


Figure 3.20: Débit au travers de la pompe en fonction du temps SORT 2

Pendant la charge, le débit est négatif et atteint 18,16 litres/min, et en décharge, le débit est positif et atteint 20,46 litres/min. La plus petite pompe de la série P2 de Parker a un déplacement maximum de $60 \text{ cm}^3/\text{rév}$, soit $0,06 \text{ l}/\text{rév}$. Avec ce déplacement, la pompe doit tourner à 330 rpm pour fournir un débit de 20 l/min. Or, cette pompe peut aller jusqu'à 2800 rpm, c'est-à-dire un débit de 168 l/min. Le système est donc largement suffisant car les débits qui entrent en jeu dans le cas qui nous concerne semblent donc facilement accessibles par ce type de pompe. On constate que la pression dans l'accumulateur varie entre 258 et 243 bars (Figure 3.19). Nous sommes donc dans la zone où le rendement de la pompe reste bon (Figure 3.8). De plus les accumulateurs Hydac de 15 gallons sont prévus pour un débit maximum de restitution de 240gpm (15 l/s). Les débits qui entrent en compte ne posent donc aucun problème à ce niveau.

3.2.2 Considérations économiques

L'hybridation entraîne toujours des coûts supplémentaires (par rapport à un véhicule conventionnel) dus aux composants additionnels requis pour la transmission hybride. En faisant référence à une étude sur la faisabilité technico économique d'un camion hybride hydraulique (ou électrique) à ordure, le surcoût dû aux composants additionnels a été évalué entre 22000 et 26000 dollars américains. Le taux de change était presque de un en 2005, ce qui fait que le surcoût varie entre 22000€ et 26000€ [Drozd, 2005]. Afin d'évaluer la viabilité économique d'un bus hybride hydraulique et de comparer ses coûts à ceux du bus

hybride électrique (la technologie hybride la plus connue aujourd'hui), nous avons développé un modèle économique simplifié [Nzisabira et al., 2008]. Ce modèle comprend le coût de développement, de fabrication et l'utilisation des différents systèmes hybrides. Ces coûts seront ensuite confrontés aux gains en consommation et en maintenance du système de freinage récupératif, réalisés par les différents systèmes hybrides sur les divers cycles de conduite. Il est ensuite possible de calculer la période de récupération (pay back) qui est la période pendant laquelle les gains en consommation et en maintenance des systèmes de freinage des véhicules hybrides par rapport aux véhicules conventionnels, auront compensé totalement les suppléments de coût dus aux composants additionnels.

3.2.2.1 Coût d'utilisation

Le coût d'utilisation est principalement lié à la consommation du véhicule et à la maintenance sur toute la durée de vie du véhicule. On considère les mêmes bus que précédemment et aux résultats de simulation sur le cycle SORT 2, on ajoute ceux de la simulation sur les cycles SORT 1 et SORT 3. Le bus hybride hydraulique considéré est celui qui minimise la consommation soit celui avec 5 accumulateurs. Les gains en consommation sont représentés dans la Table 3.7:

	Bus conventionnel	Bus hybride électrique (HEV)	Bus hybride hydraulique (HHV)
Consommation SORT 1 (l/100)	73	54,9	59,6
Gain sur SORT 1 (%)	-	-24,7	-18,35
Consommation SORT 2 (l/100)	58,4	47,5	50,5
Gain sur SORT 2 (%)	-	-18,6	-13,5
Consommation SORT 3 (l/100)	51,5	45,8	48,7
Gain sur SORT 3 (%)	-	-11	-5,5
Masse (kg)	15281	16000	16555

Table 3.7: Gain de consommation par rapport au bus conventionnel et pour chaque cycle SORT

Les gains annuels sur la consommation de carburant sont calculés sur base du prix du gasoil (le prix moyen du mazout en Belgique en 2007 était de 1,094 €) [Petrofred, 2008], de la distance annuelle parcourue (soit 45000 km) [Van hool, 2008] et des économies réalisées sur les cycles SORT par rapport au bus conventionnel. En outre, les composants additionnels d'un système hybride, soit électrique soit hydraulique, requièrent des frais d'entretien très bas. L'entretien du freinage représente le principal facteur d'économie de coûts pour les systèmes hybrides. Comme les bus hybrides utilisent le freinage récupératif, les freins mécaniques

seront utilisés seulement à basses vitesses à la fin de l'étape de décélération. Pour cette analyse de coûts, les économies réalisées sur la maintenance du système de freinage sont évaluées à 850€ par an et par véhicule [Drozdz, 2005].

3.2.2.2 Coût des composants

Les coûts supplémentaires dus aux composants électriques et hydrauliques sont principalement basés sur quelques études [CEC, 2002] et sont repris respectivement dans les Tables 3.8 et 3.9 [Drozdz, 2005]. Le système de stockage de l'énergie électrique est responsable d'une grande partie du coût total du système hybride (entre 45 et 70%). La différence de coût entre différentes solutions est principalement due au coût du système de stockage d'énergie. Les batteries sont les plus chères mais elles ont en revanche une capacité énergétique élevée et permettent de bien réduire la consommation de carburant.

Composants	Description	Prix (€)
Moteur/générateur	Solectria AC 90	1650
Boîte	Rapport de réduction unique	850
Stockage d'énergie	batteries NiMH	15700
Contrôleur		1700
Divers	Système de refroidissement, équipement électrique, etc.	2500
Total		22400

Table 3.8: Estimation du coût du système hybride électrique [Azure.Dynamics 2008, Louviny et al. 2008]

Un autre point très important dans les estimations de coûts concerne la durée de vie du système de stockage de l'énergie. Les accumulateurs hydrauliques supportent aisément un très grand nombre de cycles charge/décharge (>100000 cycles) et il est raisonnable de considérer qu'on n'a pas besoin de les changer durant toute la vie du bus. Les batteries par contre ne supportent pas un grand nombre de cycles charge/décharge et il est recommandé de respecter une certaine profondeur de décharge pour qu'elles ne se détériorent pas prématurément. La durée de vie normale des batteries dans un bus hybride électrique est estimée à six ans [Allison 2008]. Pour cela, on peut considérer que les batteries sont remplacées une fois sur toute la vie du véhicule et leur coût est donc doublé.

Composants	Description	Price (€)
Moteur/Pompe	Parker PE60 [Parker 2006]	1800
Boîte	Rapport de reduction unique	850
Stockage de l'énergie	Hydac SB600+SB40 [Hydac 2008]	8900
Contrôleur		1700
Divers	Système de refroidissement, tuyauterie, etc.	2500
Total		15750

Table 3.9: Estimation des coûts des composants hydrauliques

3.2.2.3 Coût de développement et de fabrication

A part le prix des composants, le coût total du système hybride comprend également le coût de fabrication (estimé à 15% du coût des composants) et le coût de développement. Le coût total de développement d'un prototype de chacun des systèmes hybrides est estimé à 2 millions d'euros [Drozd, 2005]. En supposant une fabrication série de 1000 véhicules (ce qui est raisonnable pour les fabricants de bus), cela impliquerait un surcoût de développement par bus et par an de 2000€ à amortir.

3.2.2.4 Délais de récupération (pay back)

A chaque cycle SORT correspond une période de récupération "payback". Le délai de récupération est calculé en divisant le coût total supplémentaire par les gains sur l'économie de carburant et les frais annuels d'entretien. Les résultats se trouvent dans les Tables 3.10 et 3.11.

	Sort 1	Sort 2	Sort 3
Coût des composants (€)	22400		
Coût de fabrication (€)	3360		
Marge bénéficiaire (€)	3360		
Coût de développement (€)	2000		
Total (€)	31120		
Coût de remplacement des batteries (€/an)	2617		
Gain sur entretien du système de freinage (€/an)	850		
Economie de carburant (€/an)	8910,63	5366,07	2806,11
Economie totale (€/an)	7143,63	3599,07	1039,11
Période de récupération (années)	4,5	8,6	30

Table 3.10: Période de récupération estimée pour le bus hybride électrique

	Sort 1	Sort 2	Sort 3
Coût des composants (€)	15750		
Coût de fabrication (€)	2363		
Marge bénéficiaire (€)	2363		
Coût de développement (€)	2000		
Total (€)	22476		
Coût de remplacement des batteries (€/an)	0		
Gain sur entretien du système de freinage (€/an)	850		
Economie de carburant (€/an)	6596,82	3889,17	1378,44
Economie totale (€/an)	7446,82	4739,17	2228,44
Période de récupération (années)	3	5	10

Table 3.11: Période de récupération estimée pour le bus hybride hydraulique

La période de récupération est clairement plus courte pour le bus hybride hydraulique. Ce qui prouve qu'au final, le bus hybride hydraulique reste compétitif suite à son coût relativement moins élevé. Le bus hybride électrique est pénalisé par le coût des batteries qui est plus élevée et auquel il faut ajouter le coût de leur remplacement. Ceci ne signifie pas que le système électrique n'est pas profitable, mais qu'il met plus de temps pour compenser les coûts supplémentaires. Une remarque très importante est à relever: les délais de récupération dépendent énormément du nombre de kilomètres parcourus par an et du coût du carburant. Plus le nombre de kilomètres parcourus par an est élevé, plus l'économie de carburant par an augmente et si le coût du carburant est élevé, les délais de récupération se raccourcissent. Prenons les deux cas de bus hybride électrique et hydraulique simulés sur le cycle mixte SORT2 et considérons les gains réalisés comme décrits précédemment. La Figure 3.21 représente les délais de récupération en fonction du nombre de km parcourus par an (à la Figure 3.21: le prix du carburant étant fixé à 1,094€ le litre) et en fonction du coût du carburant (Figure 3.22): le nombre de km étant fixé à 45000km).

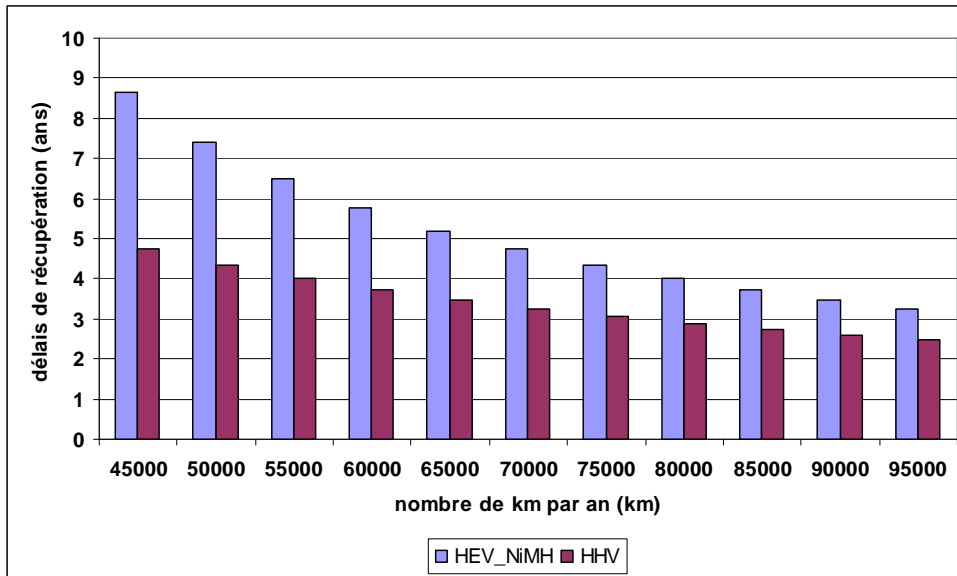


Figure 3.21: Variation des délais de récupération en fonction du nombre de km parcourus par an sur le cycle SORT 2

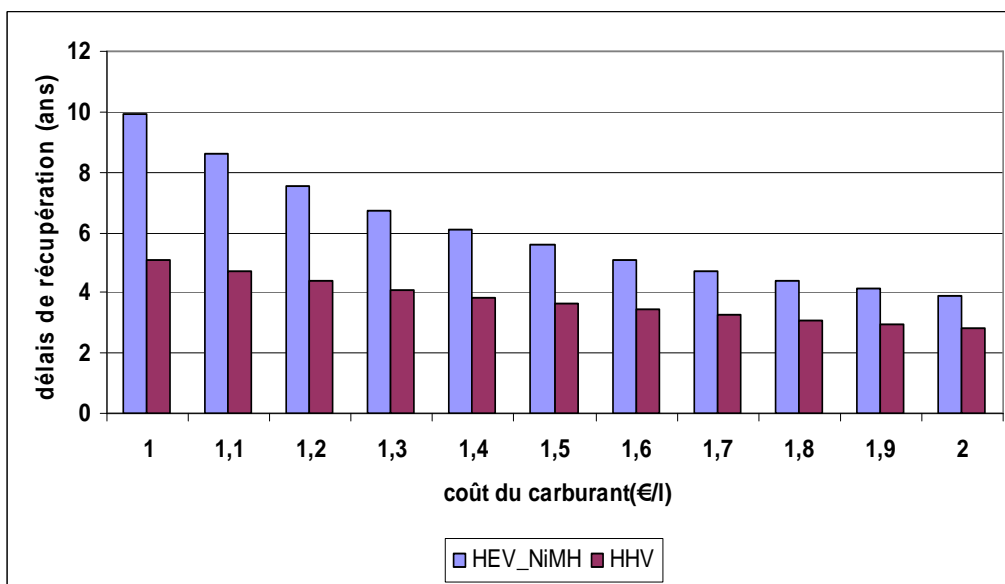


Figure 3.22: Variation des délais de récupération en fonction du coût du carburant sur le cycle SORT 2

3.3 Conclusions

Cette analyse préliminaire a montré la faisabilité technique des véhicules hybrides hydrauliques et les performances que l'on peut attendre de ces systèmes de propulsion. Il a mis en exergue les avantages et les inconvénients du système hybride hydraulique. Comparativement aux systèmes électriques, le système de stockage du fluide (accumulateurs

haute pression et réservoirs basse pression) des systèmes hybrides hydrauliques est caractérisé par une densité d'énergie stockable plus faible, de l'ordre de 0,63 Wh/kg contre une énergie spécifique de l'ordre de 43 Wh/kg pour les batteries modernes. Pour cette raison, les systèmes hybrides hydrauliques se prêtent au mieux à une architecture hybride parallèle, le système hydraulique servant principalement d'assistance au moteur conventionnel dans les phases telles que le démarrage ou les pics de puissance. La masse et l'encombrement du système hydraulique sont en général pénalisants par rapport au système électrique et ils ont un impact négatif sur la consommation de carburant. Les bus hybrides hydrauliques ont une période de récupération courte surtout quand on considère les cycles urbains. Les prix indicatifs que nous avons pu recueillir nous montrent que les systèmes d'accumulateur/réservoirs hydrauliques sont moins chers que les systèmes électriques (batteries). En conclusion, lorsque l'on considère le ratio entre le coût d'investissement et le gain de consommation, les systèmes hybrides hydrauliques sont compétitifs dans certaines applications telles que les véhicules lourds ou semi-lourds en utilisation urbaine. Il est ressorti de l'étude que nous avons menée que le concept de véhicule hybride hydraulique est inadapté aux véhicules personnels (même au SUV de type Européen). Il s'applique au mieux aux véhicules lourds ou mi lourds ayant un usage urbain (bus urbains, camions poubelles, etc.). Leur masse plus importante atténue l'effet négatif du supplément de masse dû au système de stockage. De plus le cycle urbain permet une récupération efficace de l'énergie de décélération. Cette application de niche est prometteuse. Le gain de consommation de carburant que nous avons pu obtenir par simulation est de l'ordre de 13,5% pour un bus urbain sur un cycle de conduite SORT2. Ce gain est inférieur à celui que l'on obtiendrait avec un système hybride électrique (18,6%) à cause du supplément de masse, mais le rendement de charge décharge des accumulateurs compense partiellement cette pénalité. Cette analyse préliminaire comprend beaucoup de limitations: les modèles comparés ici sont uniquement basés sur un seul critère à savoir la minimisation de la consommation. Il serait intéressant de considérer simultanément plusieurs critères tels que les performances, le coût, la consommation, les émissions, etc. L'usage des méthodes d'optimisation multi objectifs permettrait au concepteur des possibilités de choix entre plusieurs solutions optimales (front de Pareto), ainsi qu'il sera montré au cours des applications traitées au chapitre 9.

Chapitre 4: LES SUPERCAPACITES

4.1 Principe de fonctionnement

Les supercapacités ou supercondensateurs sont des condensateurs basés sur le principe de la double couche électrochimique et constitués d'électrodes poreuses, généralement identiques, immergées dans un électrolyte. Les deux électrodes sont classiquement constituées en charbon actif et baignent dans un électrolyte aqueux ou organique. Elles sont séparées par une membrane poreuse et isolante dont le rôle est d'assurer une isolation électronique entre les électrodes tout en laissant passer facilement les ions de l'électrolyte (Figure 4.1a).

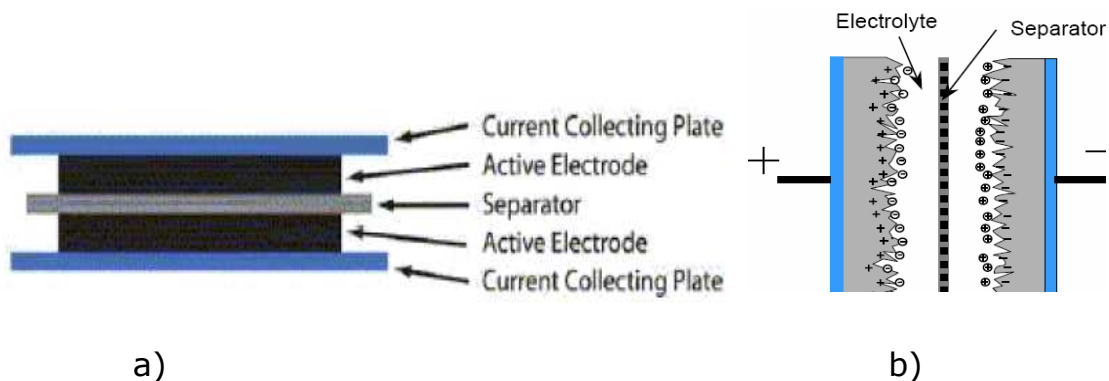


Figure 4.1: Composition (a) et fonctionnement (b) des supercapacités [Schneuwly, 2006 et Viarouge, 2008]

La particularité des supercapacités par rapport aux condensateurs classiques repose sur la formation d'une double couche électrochimique à l'interface entre l'électrolyte et chaque électrode. Pendant la charge, on applique une différence de potentiel aux bornes du condensateur qui crée un champ électrique. Ce champ électrique pousse les ions de l'électrolyte à se déplacer en direction de l'électrode de signe opposé. Quand le condensateur est complètement chargé, les anions et les cations de l'électrolyte sont localisés à proximité des électrodes de façon à équilibrer les charges en excès présentes sur le charbon actif (voir Figure 4.1b). Deux couches de charges excédentaires de polarité opposée sont ainsi constituées à l'interface électrode/électrolyte et forment la double couche électrochimique.

La capacité de stockage d'énergie est directement proportionnelle à la surface (A) de contact entre les électrodes et l'électrolyte et est inversement proportionnelle à la distance (d) entre les charges opposées dans chaque couche (formule 4.1). L'énergie stockable est quant à elle proportionnelle à la capacité de stockage et au carré de la tension appliquée aux bornes du condensateur (formule 4.2).

$$C = \frac{\epsilon_r A}{d} \quad (4.1)$$

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (4.2)$$

Les supercapacités constituent une évolution importante des condensateurs classiques. Car elles peuvent stocker des quantités d'énergies bien plus grandes par rapport aux condensateurs. En effet, les électrodes poreuses en charbon actif possèdent une très grande surface de contact avec l'électrolyte (environ 3000 m²/g) et la distance entre les charges opposées dans chaque couche est très courte (de l'ordre de 0.3 à 0.5 nanomètres contre 10 à 100 dans un condensateur électrolytique classique). Cependant, la quantité d'énergie stockable reste limitée par rapport aux batteries par le fait que la tension d'utilisation des supercapacités est très basse, limitée par la tension de dissociation de l'électrolyte.

4.2 Performances des supercapacités

Les supercapacités stockent dix fois moins d'énergie que les batteries. En effet, suite à la présence de l'électrolyte, les tensions d'utilisation des supercapacités sont très faibles. Elles varient entre 1V pour les électrolytes aqueux et 2,5V pour les électrolytes organiques. Les constructeurs tentent de résoudre ce problème et fabriquent des modules de supercapacités dont la tension nominale d'utilisation peut atteindre une centaine de volts en assemblant plusieurs éléments en série. Mais la répartition de la tension entre les éléments, dont la tension d'utilisation élémentaire est de 2,5V par exemple, nécessite des systèmes d'équilibrage utilisant des résistances qui dégradent le rendement ou des convertisseurs d'électronique de puissance qui sont très chers (Figure 4.2).

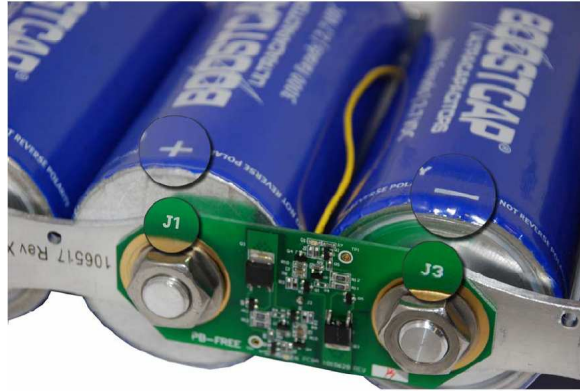


Figure 4.2: Assemblage des éléments en série [Maxwell Technologies, 2007]

Concernant toujours le stockage de l'énergie, l'avantage des supercapacités par rapport aux batteries est qu'ils peuvent stocker et restituer leur charge avec une grande efficacité et pendant un très grand nombre de cycles de charge/décharge sans se dégrader. Malgré que les résistances internes du charbon actif et de l'électrolyte, le rendement des supercapacités reste plus élevé par rapport à celui des batteries et est de l'ordre de 95 à 98%. De plus, les supercapacités peuvent être déchargées complètement sans craindre une quelconque dégradation contrairement aux batteries dont la profondeur de décharge ne peut pas dépasser un certain seuil. Les supercapacités peuvent fournir des puissances élevées en de très courtes périodes. Le diagramme de Ragone (Figure 4.2) compare la puissance massique et l'énergie massique et place les supercapacités entre les capacités classiques et les batteries.

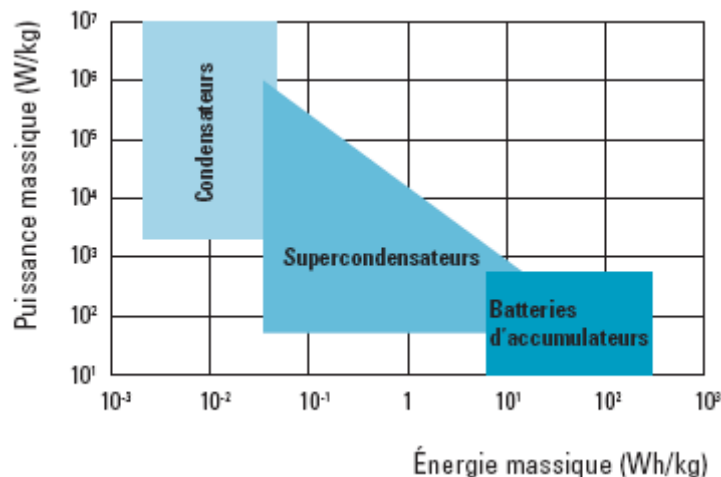


Figure 4.2: Energie et puissance massique des batteries, supercapacités et condensateurs classiques [Viarouge, 2008]

L'autre point important concerne la température de fonctionnement. Les supercapacités supportent les températures froides jusqu'à -40°C alors que les certaines batteries ne peuvent plus fonctionner en dessous de -10°C. La température tout comme le nombre de

charges/décharges influence beaucoup la durée de vie des supercapacités. Concernant la charge/décharge, les supercapacités supportent très bien la charge rapide. Le principe des supercapacités est basé sur l'effet électrostatique qui est un phénomène purement physique et très réversible. La charge et la décharge consistent en un simple mouvement d'ions dans l'électrolyte. Ce mode de stockage contraste avec toutes les technologies de batteries qui sont basées sur une formation et une dissolution des composés chimiques sur les électrodes (réactions chimiques d'oxydoréduction). Le calcul de l'état de charge d'une supercapacité est fonction de la tension et de la capacité uniquement. La capacité d'une supercapacité peut être calculée en temps réel en mesurant le courant et la variation de tension en fonction du temps. Au contraire, la détermination de l'état de charge exacte d'une batterie implique des calculs dynamiques multiples et la capacité de la batterie est souvent mise en cause et difficile à déterminer en temps réel. En comparaison, les supercapacités n'exigent pas un certain niveau de charge alors que la tension de sortie des batteries n'indique pas avec précision l'état de charge et est difficile à contrôler.

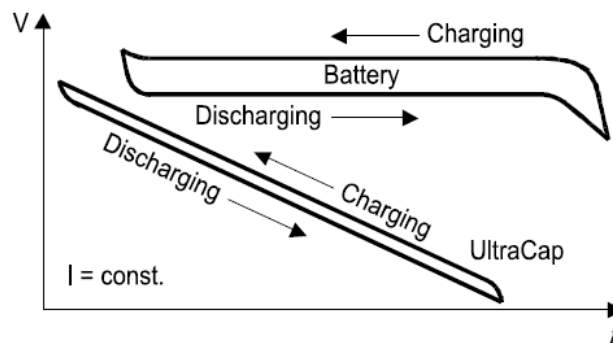


Figure 4.3: Courbes de charge/décharge pour les batteries et les Supercapacités

4.3 Technologies et matériaux

La différence entre les diverses technologies des supercondensateurs est basée sur la nature de l'électrolyte et celle des matériaux utilisés pour fabriquer les électrodes. Le matériau le plus prisé pour la fabrication des électrodes est le charbon actif. Il permet d'avoir une grande capacité de stockage grâce à sa neutralité chimique et sa grande conductibilité électrique et parce qu'il offre la possibilité d'avoir une grande surface de contact spécifique. La technique des poudres permet d'augmenter la surface spécifique et consiste à entasser les poudres de carbone sur les collecteurs de courant. Un séparateur en papier, en membrane polymère ou en fibre de verre est imprégné dans un électrolyte organique à haute conductivité ionique pour

établir le mouvement des ions pendant la charge/décharge. Un électrolyte aqueux possède une grande conductivité ionique et son impact environnemental est moindre. Mais, il limite la tension d'utilisation à environ 1V. Le dépassement de cette tension d'utilisation provoque l'électrolyse de l'électrolyte et l'apparition des gaz. Les électrolytes à base de solvants organiques sont couramment utilisés avec des tensions d'utilisation estimées à 2,5V. Les électrolytes organiques sont les meilleurs et permettent d'espérer des tensions pouvant atteindre 3V. Ils ont par contre une conductivité ionique moins élevée et nécessitent une isolation solide contre les moisissures atmosphériques. Tous les autres matériaux sont sélectionnés selon qu'ils sont compatibles avec l'électrolyte et qu'ils sont électrochimiquement neutres aux tensions appliquées. Les collecteurs de courant sont en feuilles métalliques d'acier mais l'alliage d'aluminium est de plus en plus utilisé. Tous les composants sont mis dans un boîtier métallique dont la seule partie plastique se trouve sur les terminaux pour les isoler électriquement.

Les technologies des supercapacités peuvent être classées en trois principaux groupes: les supercapacités électrostatiques, les supercapacités électrochimiques et les supercapacités hybrides.

Pour les premiers, le stockage des charges dans les interfaces électrochimiques entre les électrodes et l'électrolyte est réalisé de façon analogue aux condensateurs classiques. Ils ont souvent des électrodes en charbon actif et selon les fabricants, un électrolyte aqueux (ESMA, Elit, Evan, Skeleton Technologies, Tavrira) ou un électrolyte organique (Maxwell Technologies, Panasonic, EPCOS, Ness Capacitors, Asahi Glass).

Les seconds combinent la technique des supercapacités électrostatiques et celle des batteries. Les électrodes sont en oxyde de métal ou en polymère conducteur et l'électrolyte est constitué par l'acide sulfurique ou un sel dissous dans un solvant. Dans ces conditions, des réactions chimiques réversibles au niveau des électrodes sont possibles en plus de la double couche électrochimique.

Les derniers utilisent la technique des condensateurs classiques et celle des supercapacités. C'est-à-dire qu'une des électrodes est une anode de condensateur électrolytique alors que l'autre est une cathode de supercondensateur et l'électrolyte est une solution aqueuse d'acide sulfurique. Ce système tire profit des avantages d'un supercondensateur (puissance massique élevée) et de ceux d'un condensateur classique (énergie massique élevée).

4.4 Applications des supercondensateurs

Les supercondensateurs sont applicables lorsqu'une demande de puissance additionnelle intervient subitement et que la source principale n'est pas capable de la fournir (Figure 4.4a) ou lorsqu'on a besoin de récupérer une grande puissance en très peu de temps (Figure 4.4b).

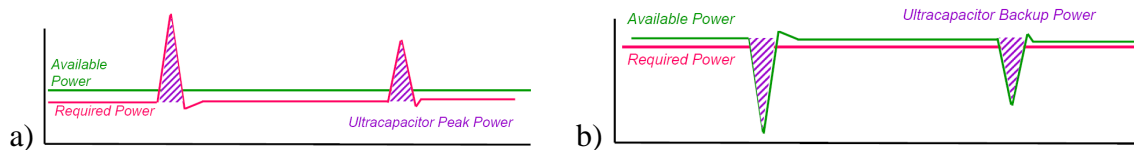


Figure 4.4: Demande(a) et récupération(b) instantanée de puissance

Ils peuvent être utilisés seuls pour des systèmes qui demandent des pics de puissance ou en combinaison avec des batteries pour des systèmes qui nécessitent à la fois une basse puissance pour un fonctionnement continu et des pics de puissances pour des charges temporaires. La Table 4.1 résume les différentes applications des Supercapacités parmi lesquelles se trouve la traction électrique et hybride.

Market domain	Application
Automotive	Hybrid drives, board net stabilization, distributed power
Trains, trams	Regenerative braking, voltage stabilization
Buses	Regenerative braking
Aerospace	Electric actuators, or latches
Pitch systems	Emergency power for windmill blades
Robotics	Peak and back-up power
Telecom	Back-up power
Material handling	Peak power for fork lifts, cranes and straddle
Elevators	Peak and emergency power
UPS/power quality	Back-up power
AMR (Automated Meter Reading)	Power supply
Consumer electronics	Power supply, burst, peak and back-up power

Table 4.1: Divers marchés des supercapacités

Concernant les véhicules électriques et hybrides, le cahier des charges dépend de la taille du véhicule (lourd, léger, utilitaire, etc.), de la configuration (hybride parallèle, série, ...), du degré d'hybridation (hybride doux, hybride complet) et de l'usage du véhicule (cycle de conduite). On constate qu'aucun système de stockage ou d'alimentation en énergie n'est capable de répondre à tout le cahier des charges des véhicules électriques et hybrides: garantir

une autonomie suffisante sans augmenter la masse totale, assurer des accélérations nécessaires et récupérer le plus possible d'énergie au freinage, supporter les nombreuses sollicitations de charges décharges et garantir donc une durée de vie élevée. Les supercapacités constituent une parfaite complémentarité des batteries car ils possèdent toutes les caractéristiques qui manquent aux batteries pour améliorer les performances du véhicule hybride. L'idéal serait donc un système qui combinerait les batteries et les supercapacités afin de profiter des atouts de l'un et de l'autre. Dans ce cas, les batteries délivrent la puissance moyenne pour la traction électrique (ou tout électrique) pendant que les supercapacités assurent, avec une grande efficacité, le démarrage, les accélérations et les freinages récupératifs qui demandent des échanges de puissances instantanés importants.

En usage séparé, chaque système est adapté à une situation donnée. Par exemple, dans le domaine des véhicules hybrides électriques, les supercapacités dont la capacité de stockage d'énergie est assez faible ne conviennent que pour l'assistance au moteur thermique. Ils seraient donc mieux exploités pour des véhicules soumis à des arrêts et à des accélérations fréquents notamment les véhicules urbains tels que les autobus ou des véhicules de livraisons (livreur, camion de ramassage). De plus ils conviennent mieux à la configuration hybride parallèle dans laquelle la propulsion du véhicule est assurée en permanence par la source principale (moteur thermique), le moteur électrique n'intervenant que pendant les phases d'accélération, de démarrage ou de freinage.

Chapitre 5: CALCUL DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

5.1 Les polluants locaux et leurs effets

5.1.1 Le monoxyde de carbone (CO)

Le monoxyde de carbone provient à 36% du trafic routier et est issu d'une combustion incomplète des combustibles. Le monoxyde de carbone est nuisible à la santé car il peut se fixer immédiatement sur les globules rouges, entraînant des troubles cardiovasculaires. A faible dose, le CO provoque des maux de tête, nausées et vertiges.

5.1.2 Les oxydes d'azote (NOx)

Les oxydes d'azote sont issus de la réaction entre l'oxygène et l'azote de l'air portés à haute température lors de la combustion. Les oxydes d'azote sont les principaux indicateurs de la pollution du trafic routier. Cinquante pour cent des émissions de NOx lui sont attribuables. Les NOx sont précurseurs de l'ozone au niveau du sol et participent aux pluies acides et à l'effet de serre. Le NO se transforme en présence d'oxygène en NO₂. Ce dernier est un gaz irritant qui pénètre dans les plus fines ramifications des voies respiratoires, notamment les bronchioles et peut causer des altérations de la fonction respiratoire, une hyper-réactivité bronchique chez les asthmatiques et chez les enfants. Il peut aussi augmenter la sensibilité des bronches aux infections microbiennes.

5.1.3 Les composés organiques volatils (COV)

Les COV proviennent d'une combustion incomplète des carburants et les HC en font partie. Ils font partie de la famille des composés qui jouent un rôle majeur dans le processus de formation de l'ozone au niveau du sol. Le transport routier représente 25% des émissions

totales. Les COV peuvent provoquer une gêne olfactive, une irritation voire une diminution de la capacité respiratoire. Certains sont aussi des irritants pour les muqueuses oculaires, d'autres sont mutagènes et cancérogènes (benzène par exemple).

5.1.4 Le dioxyde de soufre (SO₂)

Le dioxyde de soufre provient de la combustion des énergies fossiles. L'amélioration de la qualité des combustibles fait que les émissions de SO₂ sont actuellement en forte baisse. C'est un gaz irritant. Il peut déclencher des crises d'asthme, provoquer la toux et les gênes respiratoires chez l'adulte et altérer la fonction pulmonaire chez l'enfant.

5.1.5 Les particules (PM)

Les particules de suies appelées aussi "particulate matters", ou encore « poussières fines » peuvent provoquer (même à faible dose) des irritations des voies respiratoires et l'inflammation qui en résulte entraîne des effets sur le système cardiovasculaire. Elles auraient aussi un effet allergisant. Certaines particules peuvent être mutagènes et cancérogènes, particulièrement celles émises par les moteurs diesels, qui génèrent d'importantes quantités de particules (même les plus récents). Les particules de faible diamètre (PM_{2,5}), ou "ultra fines", sont les plus nocives, car elles pénètrent profondément dans l'appareil respiratoire. Les particules transportent souvent d'autres polluants, tels les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) ou des métaux (fer, cuivre, zinc, plomb, nickel, etc.).

g/km MVEG		EURO III	EURO IV
		2000	2005
Essence	CO	2,3	1
	HC	0,2	0,1
	NOx	0,15	0,08
Diesel	CO	0,64	0,5
	NOx	0,5	0,25
	HC+NOx	0,56	0,3
	PM	0,05	0,025

Table 5.1: Normes antipollution des automobiles européennes

D'autres polluants locaux primaires ou secondaires ne font pas encore partie de la réglementation car les quantités produites sont relativement basses.

5.1.6 L'ozone (O₃)

L'ozone résulte de la transformation de certains polluants dans l'atmosphère (NO_x et COV) par les rayons solaires. L'ozone est la cause de la plupart des pics de pollution estivaux qui se manifestent en général au voisinage des grandes agglomérations. C'est un gaz agressif qui provoque la toux et les altérations pulmonaires, surtout chez les enfants et les asthmatiques, ainsi que des irritations oculaires. Ses effets sont majorés par l'exercice physique.

5.1.7 Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)

Les HAP sont formés par de noyaux benzéniques. Ils proviennent de la combustion incomplète du charbon et des carburants. Les moteurs diesels sont une cause importante de la pollution de l'air par les HAP.

5.1.8 Les Hydrofluocarbures (HFC) ou gaz fluorés

Ils ont un pouvoir d'effet de serre beaucoup plus puissant que le CO₂. Les émissions de HFC ont été multipliées par 10 en 10 ans (entre 1992 et 2002).

5.2 Le dioxyde de carbone (CO₂)

Le dioxyde de carbone est le principal produit d'une combustion. Il n'est pas directement nocif à la santé, mais contribue à l'effet de serre. Son facteur de dommage sert de référence pour l'effet de serre et est de un par rapport au CH₄ qui a 21 fois plus d'impacts sur l'effet de serre. Mais les quantités énormes de CO₂ émises dans l'atmosphère et toujours en augmentation font du CO₂ la principale cause du réchauffement climatique. Des efforts énormes doivent donc être déployés pour réduire les émissions de CO₂ surtout dans le domaine des transports qui est responsable de 24% des émissions en Europe.

5.3 Calcul des impacts environnementaux

Afin de pouvoir comparer les différentes technologies de propulsion automobile du point de vue de leurs impacts sur l'environnement, il faut d'abord pouvoir attribuer à chacune d'elle un indice ou un score environnemental traduisant ces impacts. Pour cela, une évaluation environnementale des différentes technologies est nécessaire. Cette évaluation présente quelques difficultés dont la principale est liée à la diversité des dommages à considérer et de leurs unités de mesure différentes.

5.3.1 Les méthodes d'évaluation environnementale

Les méthodes d'évaluation environnementale sont nombreuses et variées. Sans être exhaustif et sans les détailler, les plus connues sont les suivantes:

- l'analyse du besoin énergétique (ABE),
- l'analyse des besoins en matières premières (ABMP),
- l'analyse de coût/bénéfice (ACB),
- l'analyse du cycle de vie (ACV),
- l'analyse des entrants/sortants (AES),
- l'analyse de risque environnementale (ARE),
- l'étude d'impact environnemental (EIE),
- l'inventaire de flux de matières /substances (IFMS),
- le système de management environnemental (SME)
- ECOVAS de TOYOTA
- Etc.

La méthode la plus complète et de ce fait, la plus utilisée dans les évaluations environnementales est l'analyse du cycle de vie (ACV) ou Life cycle analysis (LCA) en anglais. Elle consiste à faire une analyse globale des impacts environnementaux d'un produit ou d'un service sur tout son cycle de vie qui s'étend depuis l'extraction des matières premières

jusqu'à la fin de vie en passant par la production et l'utilisation. Un des points forts de l'ACV est qu'il s'agit d'une méthode standard et conforme aux normes ISO 14040 (principes et structure), 14041 (objectif et étendue, analyses d'inventaire), 14042 (évaluation d'impact du cycle de vie) et 14043 (interprétation du cycle de vie). Typiquement, l'ACV comprend 4 étapes principales:

- Définition des objectifs et des limites:

Cette étape décrit l'application couverte par l'analyse, les raisons de mettre en place l'analyse et le public visé. En plus, elle donne la description technique et détaillée du système ou du produit analysé ou d'une nouvelle alternative.

- Collecte des données et calcul de l'inventaire du cycle de vie:

Il s'agit d'inventorier et de quantifier différents entrants et sortants environnementaux liés au produit au cours de son cycle de vie. Pour chaque étape, on inventorie les entrants et les sortants et on en calcule les sommes respectives pour le système de produit étudié.

- Evaluation des impacts potentiels:

L'objectif est de comprendre et d'évaluer la grandeur et la signification des impacts environnementaux potentiels d'un système ou d'un produit.

- L'interprétation:

En fonction des objectifs et des limites prédéfinis, on tire une série de conclusions à partir desquelles on formule des recommandations ou des choix.

5.3.2 Les méthodes de calcul des impacts environnementaux

Les deux premières étapes des méthodes d'évaluation environnementale restent standards pour toutes les méthodes d'analyse. C'est à partir de la troisième étape (évaluation des impacts) que les approches divergent et diverses méthodes de calcul des impacts ont vu le jour. Les méthodes de calcul des impacts potentiels dans les ACV se réalisent généralement en trois phases:

- La classification des impacts: il s'agit d'élaborer une liste des catégories d'impacts à considérer et pour chaque catégorie, les flux de l'inventaire concernés sont spécifiés.
- La caractérisation des impacts: il s'agit d'abord de spécifier l'indicateur d'impact qui permettra de quantifier la part de chaque flux dans la catégorie considérée et de

calculer ensuite la part de chaque flux pour chaque catégorie d'impacts et enfin d'agréger, au sein de chaque catégorie, les parts calculées pour les différents flux.

- L'évaluation globale des impacts peut porter soit sur tout le cycle de vie et permettre ainsi de comparer les impacts environnementaux des systèmes différents rendant les mêmes services pour pouvoir cerner les plus respectueux de l'environnement au regard de toutes les catégories d'impacts, soit sur les différentes étapes du cycle de vie d'un même système afin de connaître les points forts et les points faibles du système sur l'ensemble de son cycle de vie et en fonction des différentes catégories d'impacts.

Nonobstant l'objectif recherché, cette dernière étape consiste en une agrégation de l'ensemble des résultats obtenus à l'étape de caractérisation pour aboutir à un indicateur environnemental global du système étudié. Suite aux différentes unités de mesure des impacts de chaque catégorie et pour une comparaison équitable entre différents systèmes, les scores obtenus dans chaque catégorie d'impacts sont normalisés par des valeurs de référence relative à chaque catégorie afin de pouvoir évaluer la contribution relative du système étudié. Aussi, avant l'agrégation complète, les résultats sont pondérés suivant l'importance relative de chaque type d'impact. Le calcul des impacts constitue actuellement le véritable aspect différenciateur des différentes démarches d'ACV. Les méthodes développées peuvent être classées en trois catégories:

- Méthodes relatives aux émissions pondérées dans les milieux de l'environnement (méthode des volumes critiques...)
- Méthodes basées sur les catégories d'impacts ou sur des thèmes environnementaux (EPS: environment priority strategy, CML, Eco-indicator...)
- Méthodes limitées à un indice de l'inventaire (consommation d'énergie et intensité de matières) ou à un indice écologique (Eco-points, Ecoscore, etc).

5.3.2.1 Méthode des volumes critiques

Le principe de cette méthode est de calculer, pour chaque polluant de l'air ou de l'eau, le volume équivalent pollué jusqu'aux valeurs limites. Ces volumes partiels, établis pour chaque polluant, restent en principe séparés selon les domaines d'impacts, air, sol ou eau. Les valeurs limites utilisées proviennent principalement des réglementations sur la protection de l'air et sur le déversement des eaux usées. A titre d'exemple, la concentration maximale admissible

de NOx est de 0,03 mg par mètre cube¹. L'avantage de cette méthode est lié à sa simplicité. Elle comporte cependant quelques points faibles:

- Les résultats sont donnés en m³ d'air critique, m³ d'eau critique, m³ de déchets solides et MJ d'équivalents énergétiques, ce qui ne permet pas une comparaison entre les polluants de l'air et de l'eau.
- Selon cette méthode, un volume donné (d'air ou d'eau) ne contient qu'un seul polluant alors qu'en réalité plusieurs polluants peuvent être contenus dans le même volume. De ce fait, les volumes obtenus ne peuvent servir uniquement que pour des comparaisons et n'ont aucun rapport avec la réalité.
- La méthode ne tient pas compte des transformations des substances et de leur dégradation ou dilution.
- Les concentrations maximales rendant compte du devenir des polluants, sont plus basées sur l'aspect légal que sur l'aspect écotoxicologique.

5.3.2.2 La méthode CML

En 1992, Heijungs [Heijungs et al., 1992] du "Centre of Environmental Science" (CML) de l'Université de Leiden a proposé la méthode d'évaluation des impacts appelée CML. Cette méthode considère un certain nombre de problèmes environnementaux qui sont classés en deux catégories principales:

- l'épuisement des ressources qui regroupe les problèmes associés à l'extraction de matières premières,
- la pollution qui regroupe les problèmes associés aux émissions de polluants.

La consommation d'énergie n'est pas prise en compte car, selon la méthode CML, il ne s'agit pas d'un problème en soi, mais plutôt d'un problème d'épuisement des supports énergétiques, de pollution et de dommages dus à l'extraction des agents énergétiques. Dix huit problèmes environnementaux sont mentionnés, mais seuls neuf d'entre eux sont traités dans la pratique: la toxicité humaine, l'écotoxicité aquatique et terrestre, la formation d'ozone troposphérique, la destruction de l'ozone stratosphérique, l'eutrophisation, l'effet de serre, l'acidification, l'utilisation des ressources (biotiques et abiotiques).

¹ un m³ d'air est pollué pour chaque 0,03 mg de NOx émis.

Pour la normalisation, les scores dans chacune des catégories d'effet sont ensuite divisés par le score mondial total pour cet effet. Ce score normalisé représente la contribution de chacune des catégories par rapport à l'effet mondial global. Mais, les inventaires globaux n'ont pas été trouvés pour certains problèmes. Dans ce cas, les données mondiales ont été extrapolées à partir des données néerlandaises en considérant le PNB. Aucune valeur permettant une évaluation quantitative n'est fournie par Heijungs [Heijungs et al., 1992]. Par contre, Guinée [Guinée 1995] propose des "target values" pour un certain nombre de classes environnementales. Ces "targets values" ont été choisis de façon partiellement arbitraire à partir de différentes sources.

5.3.2.3 La méthode Eco-indicator

La méthode Eco-indicator [Goedkoop et al. 2000] est la première méthode à tenter l'évaluation des impacts au niveau des ressources, de la santé humaine et de la qualité de l'écosystème. Les impacts sur la santé sont regroupés en plusieurs catégories: effets respiratoires, effets carcinogènes, radiations ionisantes, effets liés au changement climatique et à la destruction de la couche d'ozone. L'écotoxicité, l'eutrophisation et l'occupation de l'espace représentent les catégories d'impacts sur la qualité de l'écosystème. Les impacts sur les ressources expriment les quantités de ressources minérales et fossiles consommées par le système étudié. D'une façon simplifiée, les méthodes d'évaluation environnementale du type Eco-Indicator, distinguent cinq étapes: l'inventaire, la classification, la caractérisation, la normalisation et la pondération. L'inventaire consiste à calculer, pour chaque stade de vie du produit (production, utilisation, démantèlement...), les quantités de polluants émis. La classification regroupe les différents polluants recensés suivant les domaines qu'ils affectent: effet de serre, santé humaine, écosystème etc. La caractérisation calcule la contribution des différents polluants dans les catégories de dommages définies précédemment. Pour tenir compte de l'importance relative des différents dommages, les dommages calculés sont normalisés par une valeur de référence spécifique pour chaque catégorie de dommage et sont pondérés en attribuant des poids aux différentes catégories de dommages pour établir en fin de compte un score environnemental global. Les méthodologies Eco-Indicator 95 et 99 diffèrent dans leurs approches de classification des dommages et de pondération des effets. Elles sont plus intéressantes par le fait que le calcul des différents dommages se base sur des informations scientifiques bien fouillées et qu'elles essaient (surtout dans le cas de la version 99) de minimiser les éléments subjectifs dans le choix des systèmes de pondération.

Une brève analyse comparative des deux approches révèle, pour chacune, certains avantages dans le cadre de son utilisation pour évaluer les véhicules. La méthodologie Eco-indicator 99 est plus récente et utilise des connaissances actualisées pour évaluer les différents dommages. Son point faible, toujours dans le cadre de l'évaluation environnemental des véhicules, est qu'elle ne considère que trois catégories principales d'impacts (santé humaine, écosystèmes et ressources). Les possibilités de pondération sont donc limitées, car il ne s'agit que d'évaluer le poids à accorder aux dommages liés à la santé par rapport à ceux liés aux écosystèmes. De son côté, la méthodologie Eco-indicator 95 considère une dizaine de catégories d'impacts. Parmi ces catégories, cinq sont directement concernées par l'évaluation des véhicules. Dans ce cas, on a de plus grandes possibilités de pondération et de choix des poids à accorder à chaque dommage. Mais cette méthodologie est moins récente et non actualisée.

5.3.2.4 La méthode des Ecopoints

Contrairement à la méthode des volumes critiques qui fournit plusieurs résultats sous forme de volume critique d'air ou d'eau, la méthode des écopoints [Ahbe et al., 1990] fournit une seule réponse. Selon cette méthode, le score total (écopoints) est donné par l'équation suivante:

$$I_i = \sum_i \left(\frac{1}{F_{k,j}} \times \frac{F_j}{F_{k,j}} \times m_{i,j} \right) \quad (5.1)$$

Avec:

I_i (écopoints): nuisance environnementale du système i ,

$F_{k,j}$ (g/an ou m³/an): charge maximale annuelle admissible pour le polluant j ,

F_j (g/an ou m³/an): niveau annuel de rejets ou de consommation de j .

$m_{i,j}$ (g/an ou m³/an): émission de substance i

Le rapport $1/F_{k,i}$ exprime la contribution relative à la charge maximale admise tandis que le rapport $F_j/F_{k,j}$ revient à pondérer l'émission $m_{i,j}$ en fonction du rapport entre la contrainte réelle et la charge totale admissible. Les flux critiques (sorte de target flow) dans l'air et l'eau découlent respectivement de la stratégie de lutte contre la pollution de l'air et des réglementations sur le déversement des eaux usées. L'avantage principal de cette méthode est qu'elle aboutit à un seul résultat. Mais il faut noter que les flux critiques sont difficiles à

déterminer pour un grand nombre de substances. De plus, la transformation des substances considérées n'est pas prise en compte.

5.3.2.5 La Monétarisation

Le principe de la méthode de monétarisation est d'attribuer une valeur monétaire de dommage ou d'évitement pour chaque flux élémentaire ou catégorie d'impact. La conversion des différents impacts en valeur monétaire permet une comparaison directe des performances. De plus, l'importance des montants associés aux différents impacts du cycle de vie introduit une pondération entre ceux-ci pour aboutir à un résultat agrégé. Cette méthode permet la prise en compte de certains effets souvent négligés par les ACV par manque d'outil de quantification: le bruit, les odeurs, etc. Mais, la monétarisation constitue un domaine très complexe où des recherches importantes sont en cours. Théoriquement, tous les polluants peuvent être monétarisés mais en pratique, les développements méthodologiques sont toujours en cours et de nombreux facteurs font encore défaut ou font objet de discussion. Certaines études récentes portant sur l'application de la monétarisation dans les ACV, existent. On peut citer par exemple le projet ExterneE [European Commission DG XII, 1994] soutenu par la Commission Européenne, qui aborde les externalités dans le secteur de l'énergie.

5.3.2.6 La méthode EPS

Cette méthode a été développée en Suède. Elle vise à donner une valeur différente aux divers types de dommage en faisant appel à la notion de "willingness to pay" (volonté de payer) pour éviter un dommage. Cela signifie que cette méthode intègre la dimension monétaire. Ainsi par exemple, les dommages liés à la santé humaine sont traduits en un prix que le responsable doit payer pour soigner les victimes. La phase de classification pour la méthode EPS considère 5 domaines ou 5 thèmes environnementaux appelés également "safeguard subjects" ou domaines de sauvegarde:

- les ressources: épuisement des matières premières
- la santé humaine: nombre de morts par an
- la production: dommages économiques des effets environnementaux, par exemple les dommages industriels (corrosion) ou les dommages sur l'agriculture
- la biodiversité: disparition des espèces animales ou végétales
- l'esthétique: perception de la beauté naturelle.

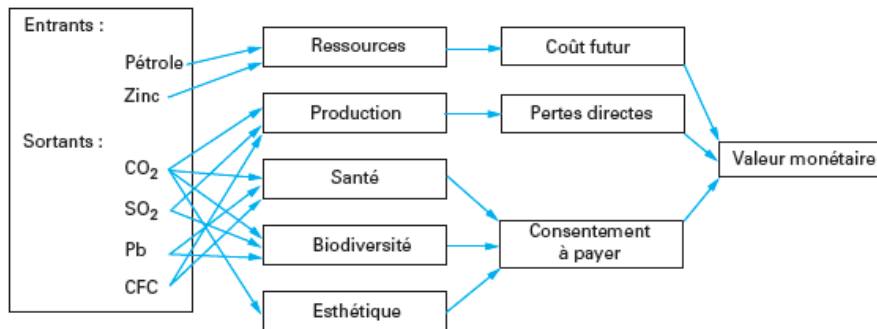


Figure 5.1: Principe de classification de la méthode EPS

Concernant la caractérisation, la méthode EPS attribue à chaque dommage, une valeur monétaire qui est calculée selon les principes suivants:

- pour évaluer l'épuisement des ressources naturelles, on calcule le coût futur de l'extraction de matières premières
- le calcul des pertes de production est basé sur les estimations de la réduction de la production agricole et des dommages industriels.
- Pour la santé humaine, la biodiversité et l'esthétique, l'évaluation est basée sur le consentement à payer

Parmi les ressources considérées dans la méthode EPS, on peut citer les hydrocarbures fossiles, les minerais, les sols cultivables, les bâtiments, etc. Pour la santé humaine, la méthode EPS se base sur la définition de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) qui considère la santé comme étant l'état du bien être complet sur tous les plans (physique, social et psychologique) et non seulement l'absence de maladies et de fragilités. Les impacts sur la santé sont classés en trois catégories: nuisance, mortalité et morbidité. Les évaluations sont basées sur:

- l'excès de mortalité qui correspond à 50% de réduction de l'espérance de vie pour les nouveaux nés soit 10^6 ELU (environmental load unit)².
- Morbidité sévère ou souffrance sévère par homme et par an: 10^5 ELU
- Nuisance sévère par homme et par an: 10^3 ELU
- Nuisance modérée par homme et par an: 10^2 ELU

La valeur de la charge environnementale (ELU) est calculée en multipliant la quantité émise par un indice environnemental. Deux types d'indices sont calculés. L'un est relatif aux ressources de matières premières et est constitué de deux facteurs l'un basé sur les ressources

² 1 ELU correspond à 1 €

théoriquement disponibles et l'autre sur une évaluation tenant compte la rareté de la ressource. L'autre indice est relatif aux émissions et est le produit de six facteurs:

$$I_{\text{émissions}} = (F_1 \times F_2 \times F_3 \times F_4 \times F_5)_i \times F_6 \quad (5.2)$$

F_1 : possibilité et coût pour éviter l'effet i du polluant concerné

F_2 : intensité et fréquence d'apparition de l'effet i

F_3 : population atteinte

F_4 : durée de l'effet i

F_5 : contribution de l'effet i par l'émission de 1 kg de ce polluant

F_6 : coût associé à l'élimination de l'émission de ce polluant

Concernant la biodiversité, le consentement à payer pour une espèce menacée se rapporte surtout aux animaux de grande taille ou de taille moyenne et les évaluations prennent les formes suivantes:

- Extinction des animaux ou des plantes de taille moyenne: 10^{15} ELU
- Impact global et général sur la biodiversité: 10^6 ELU

Le consentement à payer pour éviter la diminution de la production est considéré comme étant la perte de valeur de production c'est-à-dire que l'augmentation ou la diminution de la production se fait par rapport à une situation de référence et les évaluations sont les suivantes:

- Un kg de poisson ou de viande: 1ELU
- Un kg de bois: 0,025ELU

Les valeurs considérées pour l'esthétique sont relatives à la dégradation de la visibilité, les paysages et la contribution aux valeurs esthétiques pourrait être estimées au cas par cas.

5.3.2.7 La méthode ECOSCORE

En plus des méthodes évoquées précédemment, de nouvelles méthodes ont été proposées (Scoring, Ecolabelling, etc.) pour analyser les impacts relatifs à chaque catégorie de polluant spécifiquement, mais peu permettent de combiner les différents effets en un seul indicateur. Les méthodes Eco-indicator comportent divers avantages (développements récents, approche normalisée, applicable au transport routier) mais sont plus orientées vers les "processus industriels". Pour le cas des véhicules, nous nous sommes basés sur la méthode Ecoscore pour plusieurs raisons. La première est qu'elle suit l'approche LCA tout en étant plus orientée vers

la phase "utilisation" du système considéré. La deuxième est qu'elle peut être appliquée à chaque technologie automobile même en l'absence de certaines données. Et enfin, elle rassemble plusieurs effets en un seul score. Le calcul de l'Ecoscore se base sur les principales émissions liées à l'utilisation du véhicule et au cycle du carburant. Trois catégories de dommages sont concernées: effet de serre, qualité de l'air (santé humaine et écosystème) et le bruit. On calcule d'abord l'impact environnemental global en combinant les trois catégories de dommages en un seul score. Concernant l'effet de serre, trois types d'émissions sont concernés: le N₂O, le CO₂ et CH₄. Les poids relatifs de ces gaz à effet de serre sont déterminés par le 'global warming potential, GWP' où tous les gaz à effet de serre sont exprimés en équivalents CO₂. Les émissions dommageables pour la qualité de l'air sont: NO_x, CO, HC, PM, SO₂. Et Ecoscore utilise la méthodologie des coûts externes pour la pondération des émissions liées à la qualité de l'air. En ce qui concerne les nuisances sonores, seul le bruit du moteur est pris en compte. Des poids sont enfin attribués à chaque catégorie de dommage et le score global s'obtient par une simple addition des dommages relatifs. Pour faciliter la lisibilité, l'ECOSCORE est exprimé sous forme d'indice compris entre 0 et 100. Le 0 représente le véhicule le plus mauvais c'est-à-dire ayant un score global (SG) tendant vers l'infini (plus d'impacts négatifs) et le 100, le véhicule n'ayant aucun impact sur l'environnement. L'ECOSCORE est donc exprimé sous forme d'une fonction exponentielle inverse du score global. La référence correspond à un véhicule qui aurait comme score global 100 et un ECOSCORE égal à 70. Si le score global tend vers l'infini, l'ECOSCORE tend vers 0 et vice-versa.

$$ECOSCORE = 100 \times \frac{1}{e^{SG \times 0,00357}} \text{ [Van Mierlo et al., 2006].}$$

Dans notre étude, nous allons nous inspirer de la méthodologie ECOSCORE pour calculer l'impact environnemental sans toutefois l'appliquer intégralement. Le calcul de l'impact environnemental sera illustré par une application sur quelques véhicules particuliers (9 au total) dont certaines caractéristiques sont tirées du moniteur de l'automobile belge. Les détails sur ces caractéristiques et les paramètres de simulation seront montrés au paragraphe (5.4.6).

5.4 Calcul de l'impact environnemental

5.4.1 Evaluation des émissions et de la consommation

Dans sa phase d'inventaire, la méthodologie ECOSCORE [Van Mierlo et al., 2003], ne considère que le bruit et les émissions directes lors de l'utilisation du véhicule ainsi que les émissions associées à la production du carburant ou de l'électricité consommés par le véhicule. Les émissions correspondantes à la fabrication du véhicule et à son démantèlement en fin de vie ne sont donc pas prises en compte. Pour notre travail, nous n'avons pas tenu compte des nuisances sonores, car le logiciel de simulation que nous avons utilisé ne permet pas d'évaluer le niveau de bruit. Les émissions liées au démantèlement du véhicule et au cycle de vie des batteries ne sont pas non plus prises en compte car nous ne détenions pas d'informations y relatives. Mais par contre nous avons considéré les émissions et la consommation d'énergie liées à la fabrication du véhicule. De plus, nous avons pris en compte l'impact des émissions de SO₂ et de PM sur les bâtiments. Les nouvelles technologies sont de plus en plus équipées de systèmes de climatisation qui ont sans doute un impact significatif sur les émissions et sur la consommation du véhicule. Ce qui incite actuellement à considérer la climatisation dans l'évaluation environnementale d'un véhicule. Mais, la consommation et les émissions supplémentaires dues à la climatisation ne sont plus en compte que lorsqu'elle est mise en marche.

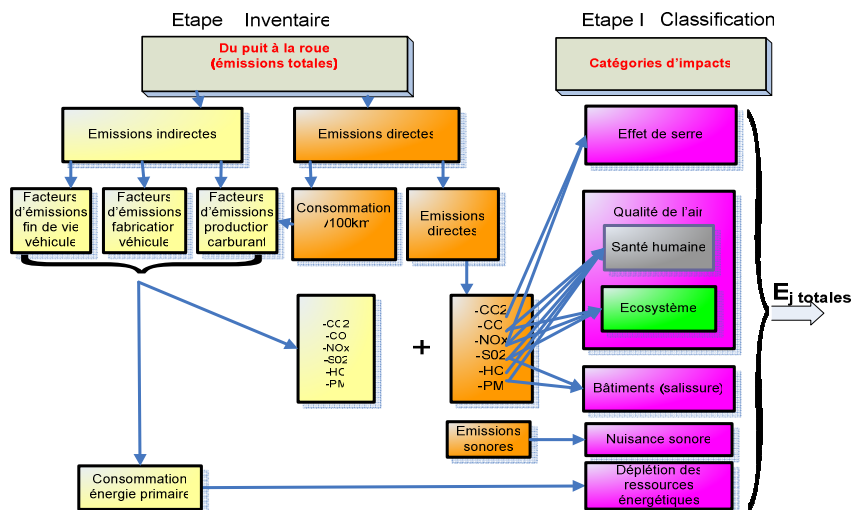


Figure 5.2: Etapes d'inventaire et de classification.

5.4.1.1 Cycle de vie du Carburant

Le cycle de vie du carburant comprend deux principales étapes. La première étape WTT (Well-To-Tank) s'étend de l'extraction de matière première (pétrole, gaz naturel...) jusqu'aux stations services en passant par la transformation des matières premières en divers carburants et le transport (de matières premières et de carburant). La deuxième étape TTW (Tank-To-Wheel) correspond à la consommation du carburant pendant l'utilisation du véhicule. A chaque étape du cycle du carburant correspond des émissions diverses.

1. Emissions indirectes

Les émissions indirectes sont celles liées à la première étape du cycle de vie du carburant. Il s'agit des émissions dégagées pendant tout le processus de production du carburant ou de l'électricité (pour le cas des véhicules électriques) qui sera utilisé par le véhicule. L'évaluation des émissions "well-to-tank" se fait donc indirectement à partir de la consommation (en carburant ou en électricité) du véhicule et sur base des facteurs d'émission caractérisant l'importance des émissions de polluants lors des processus de production des carburants.

2. Emissions directes

Parmi les émissions d'un véhicule lors de la phase de son utilisation, on distingue les émissions réglementées et les émissions non réglementées. Les émissions réglementées (CO, NOx, COV, PM) ainsi que les nuisances sonores sont évaluées en se basant sur les résultats des tests d'homologation autorisant l'introduction véhicules sur le marché. Toutefois, les

constructeurs ne fournissent pas souvent ces émissions. Nous les avons calculées par simulation directe des véhicules considérés avec le logiciel ADVISOR. Les émissions non réglementées concernent, d'une part, les polluants comme le dioxyde de carbone et dioxyde de soufre dont les quantités émises peuvent être estimées à partir de la consommation du véhicule en carburant et d'autre part, certains composés organiques (1,3-butadiène, formaldéhyde, benzène, toluène, hydrocarbures aromatiques polycycliques) ayant des effets sur la santé humaine (cancer) ainsi que sur les écosystèmes (écotoxicité). La dernière catégorie d'émissions non réglementées concerne les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ou le protoxyde d'azote (N₂O). Ces polluants sont susceptibles de provoquer des dommages non négligeables sur la santé, les écosystèmes et le climat. Toutefois, les émissions d'origine automobile sont encore insuffisamment quantifiées. Ils ne sont donc pas pris en compte dans l'évaluation environnementale que nous avons réalisée.

5.4.1.2 Cycle de vie du Véhicule

Les émissions relatives au cycle de vie du véhicule ne sont généralement pas connues comme c'est le cas pour les carburants. Mais certaines études [Zamel, 2005] ont été menées pour évaluer l'énergie consommée et les émissions. De façon générale, on considère les émissions pendant la phase de production des matériaux du véhicule, leur assemblage, leur transport et leur démantèlement en fin de vie. Il a été constaté que la phase de production des matériaux contribue pour plus de 75% des émissions (pour la seule phase de fabrication du véhicule) et elles sont fonction des quantités de matériaux nécessaires. Il vient ensuite l'assemblage du véhicule. La distribution et le démantèlement ne contribuent qu'à moins de 1% [Zamel, 2005]. Nous avons donc considéré dans cette étude les deux phases à savoir la production des matériaux et l'assemblage du véhicule. Le recyclage du véhicule n'a pas été pris en compte, car nous ne disposons pas de données y relatives mais il faut noter que cette étape du cycle de vie peut influencer sensiblement les résultats. Pour évaluer les émissions, il nous faut les paramètres suivants: la masse du véhicule, les différents matériaux, la part de chaque matériau dans la composition du véhicule et les facteurs d'émissions pour chaque matériau. Les émissions liées à la transformation des matériaux composant le véhicule sont données par la formule suivante:

$$e_j = \sum_i F_j \left(\frac{P_i \times m_v}{100} \right) \quad (5.3)$$

e_j = émission du polluant j

F_j = facteur d'émission du polluant j

p_i = pourcentage du matériau i dans la composition du véhicule

m_v = masse du véhicule

5.4.1.3 Cycle de vie des batteries

Le troisième composant du véhicule qui peut être une source de pollution significative est la batterie utilisée pour la propulsion des véhicules hybrides électriques. En plus des émissions réglementées rejetées lors du processus de fabrication, les batteries contiennent, selon chaque type, des métaux lourds (Pb, Ni, Cd...) qui peuvent causer certains dommages à l'écosystème et à la santé humaine. Les impacts environnementaux liés aux batteries dépendent du type de batterie (NiCd, NiMH, NaNiC, Li-ion, PbAc...) et indirectement du type d'application. D'autres caractéristiques propres à chaque batterie (énergie spécifique, puissance spécifique, nombre de cycles, durée de vie) jouent un rôle indirect dans le calcul des impacts. Selon les technologies, on peut considérer les véhicules purement électriques et les véhicules hybrides électriques. Et quel que soit la technologie, l'objectif principal est de calculer la masse de batteries nécessaires sur tout le cycle de vie du véhicule.

1. Véhicule électrique

Pour réaliser une analyse du cycle de vie comparative des différents types de batteries, il est nécessaire de partir sur une même base, c'est-à-dire que les batteries sont évaluées sur la base de certaines caractéristiques de fonctionnement du véhicule électrique. Il s'agit de la masse du véhicule, de sa consommation énergétique, de la distance annuelle parcourue et la durée de vie du véhicule. Toutes ces caractéristiques, surtout l'énergie consommée, diffèrent d'un véhicule à l'autre. Pour fixer les idées, prenons l'exemple d'un véhicule électrique d'une consommation énergétique de 0,12Wh/kg km, une distance annuelle de 10.000km et une durée de vie de 10 ans. De plus, on admet que l'autonomie du véhicule est proportionnelle à la densité d'énergie de chaque type de batterie. En conséquence, la batterie au plomb par exemple avec une densité d'énergie de 35Wh/kg donnera une autonomie de 80km alors que celle au Zn-air avec une densité d'énergie de 200 Wh/kg donnera une autonomie de 300km. La masse de batterie nécessaire par cycle est donnée par la formule suivante:

$$m_{bat} = \frac{(m_{bat} + m_{car}) \times c_{car} \times x_{cycle}}{e_{bat}} \Leftrightarrow m_{bat} = \frac{m_{car}}{\frac{e_{bat}}{c_{car} \times x_{cycle}} - 1} \quad (5.4)$$

Avec: m_{car} , la masse du véhicule sans batterie (kg)

e_{bat} , la densité d'énergie spécifique (Wh/kg)

x_{cycle} , l'autonomie du véhicule (km)

c_{car} , énergie consommé par le véhicule (Wh/kg km)

Le nombre de cycles peut être ainsi déterminé. Et selon la durée de vie de chaque batterie, le nombre de batteries (et donc la masse) nécessaires durant la vie du véhicule, peut être déterminé. Connaissant la masse totale des batteries et leurs composants auxiliaires, les facteurs d'émissions liés à la production des matériaux, à l'assemblage et au recyclage des batteries, on peut calculer aisément les différentes émissions y relatives. Concernant la phase d'utilisation du véhicule, il s'agit de déterminer les émissions liées au système de production du courant utilisé pour la recharge. Dans ce cas le rendement charge-décharge de la batterie et la profondeur de décharge sont pris en compte. En plus, pour la phase utilisation, on peut estimer la consommation liée au poids supplémentaire (des batteries) qui diffère selon les types de batteries.

Dans notre travail, le cycle de vie des batteries n'a malheureusement pas été pris en compte étant donné que le calcul des impacts environnementaux est basé sur les émissions alors que les données disponibles issues de l'étude "SUBAT" [Matheys et al., 2006] sont basés sur le calcul des écopoints. Dans notre cas, l'effet des batteries sur l'impact environnemental est uniquement lié à leur masse qui entraîne une augmentation de la consommation du véhicule.

2. Véhicule hybride électrique

Le rôle des batteries dans les véhicules hybrides électriques n'est pas le même que dans les véhicules électriques. Dans les hybrides, l'essentiel de l'énergie est souvent fourni par le moteur à combustion interne, les batteries n'apportent que le supplément d'énergie pendant les fortes accélérations et les reprises. Par conséquent, la puissance spécifique joue un grand rôle pour l'analyse des batteries. Pour fixer les idées, prenons l'exemple de la Toyota Prius (dont la puissance électrique est de 21 kW) et déterminons la masse des batteries nécessaire. Le nombre de batteries nécessaires pour fournir cette puissance sera obtenu en divisant la puissance souhaitée par la puissance spécifique de la batterie utilisée. Le but est de comparer les impacts relatifs des différentes technologies de batteries. On part sur l'hypothèse que la

batterie au NiMH correspondant à 21 kW, ne sera pas remplacée durant le cycle de vie du véhicule (Toyota donne 8 ans de garantie sur les batteries). La même hypothèse peut être retenue pour les autres types de batterie à l'exception de la batterie au plomb qui a généralement un nombre de cycles trois fois plus court. Ayant l'énergie spécifique et la puissance souhaitée, la masse des batteries peut être calculée pour chaque technologie et l'impact environnemental de la masse de batterie est ainsi déterminé.

5.4.1.4 La climatisation

Le nombre de voitures équipées du système de climatisation ne cesse d'augmenter en Europe. Depuis 2003, la climatisation est déjà un équipement de série dans 70% des véhicules haut de gamme et les véhicules bas de gamme en sont progressivement équipés en options [Arbusse et Gagnepain, 2003].

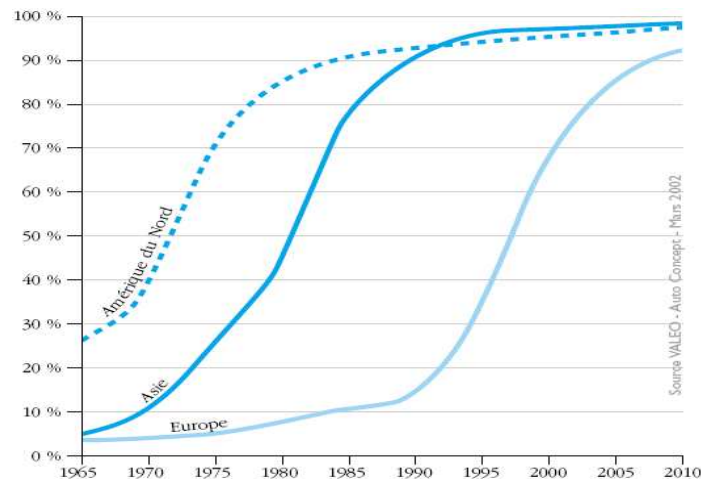


Figure 5.3: Evolution du taux d'équipement des véhicules neufs en climatisation [Arbusse et al., 2003]

Ce système consommateur d'énergie ne peut donc pas passer inaperçu lorsqu'on doit évaluer les impacts environnementaux des véhicules. La surconsommation de carburant et l'augmentation des polluants dues à la climatisation dépendent d'un certain nombre de facteurs: les conditions de roulage de la voiture (cycle de conduite: urbain, extra-urbain ou combiné), les conditions climatiques (température extérieure et la température de consigne dans l'habitacle) et le type de véhicule (la surconsommation est plus importante pour les petites voitures que pour les grosses cylindrées). L'ADEME [Arbusse, 2003] estime que la surconsommation moyenne des véhicules à essence testés sur le cycle européen mixte est de 1.7l aux 100 km soit 23%. Pour les voitures diesels, elle est de 1.9l aux 100 km, soit 27% d'augmentation. Quant aux émissions de polluants, on observe, pour les motorisations à

essence, une augmentation du CO et des NOx, d'une moyenne de 46% et 63% respectivement. Pour les diesels, les NOx augmentent en moyenne de 37% et les particules de 47%. En première approximation, pour considérer les effets de la climatisation, nous pouvons soit augmenter la consommation des accessoires en énergie électrique lors de la simulation de conduite dans ADVISOR, soit ajouter à la consommation obtenue après simulation une moyenne de 25% de la consommation. Mais, la consommation et les émissions supplémentaires dues à la climatisation ne sont plus en compte que lorsqu'elle est mise en marche.

Les liquides réfrigérants utilisés par la climatisation sont également nuisibles à la santé et contribuent énormément au réchauffement climatique. En effet la climatisation automobile fonctionne au R134a, un gaz fluoré dont le potentiel de réchauffement planétaire dépasse le facteur 150 par rapport au CO₂, en remplacement du R12 interdit depuis 2000. Les fuites du R134a sont estimées entre 31 et 52 millions de tonnes en UE sur l'horizon 2010 selon la Commission Européenne, ce qui constitue un danger réel pour le réchauffement climatique [Van Mierlo et al., 2005].

5.4.1.5 Emissions totales

Les émissions totales s'obtiennent en additionnant les émissions directes et les émissions indirectes. Les émissions indirectes concernent la fabrication du véhicule et la phase WTT du carburant tandis que les émissions directes concernent la phase utilisation du véhicule. Il importe tout de même de souligner que dans beaucoup de cas, les émissions indirectes ont lieu loin des récepteurs potentiels. Et pour tenir compte de l'effet distance, les émissions indirectes sont multipliées par un facteur compris entre 0 et 1. Plus précisément, pour les effets locaux sur la santé et les bâtiments, la bonne pratique veut que les émissions indirectes soient multipliées par 0,5 alors que, pour les autres effets régionaux et globaux, ce facteur est maintenu égal à 1. Ce facteur pourrait être beaucoup plus faible (0,2) dans le cas spécifique des particules dont une grande fraction se dépose à proximité de l'endroit d'émission.

5.4.1.6 Consommation d'énergie primaire

Nous distinguons la consommation directe (liée à l'utilisation du moyen de transport) d'une part et la consommation indirecte liée à la production, le transport et la distribution du carburant et des matériaux pour la construction du véhicule d'autre part.

1. Consommation directe

La consommation directe d'énergie primaire correspond à la consommation de carburant pendant la phase d'utilisation. Elle est obtenue pour les véhicules considérés par la simulation dans le logiciel ADVISOR et est exprimée classiquement en l/100km. En comparant les résultats fournis par ADVISOR et les données du constructeur, on a constaté qu'ils sont suffisamment proches (voir Annexe B).

2. Consommation indirecte

Cette consommation indirecte sera déduite de la consommation directe. Il s'agit en fait de calculer les quantités d'énergie consommées pour produire les quantités de carburants consommées. Pour calculer ces énergies, on se réfère aux rendements des différents processus de transformation des carburants:

Processus	Rendement (%)
Extraction du pétrole brut	96,9
Transport du pétrole brut	98,9
Raffinage de l'essence	87,4
Raffinage du mazout	95,2

Table 6.1: Rendements des processus de production des carburants [Malcolm et al., 2000]

Le transport, stockage et distribution des carburants depuis la raffinerie jusqu'aux stations services occasionnent également des pertes énergétiques de 1% en moyenne [Malcolm et al., 2000]. Ce pourcentage semble être très bas mais tout dépend du système de transport utilisé. La consommation d'énergie inhérente à la production des matériaux et à l'assemblage du véhicule est également comptabilisée parmi les consommations indirectes. Elles sont calculées en multipliant les facteurs de consommation exprimés en kJ par kg de matériaux produit par la masse totale du matériau considéré. La consommation totale d'énergie sera la somme des deux et est exprimée en kJ/km.

5.4.2 Classification des polluants par catégorie de dommages

Cette seconde étape de la méthodologie consiste à attribuer les différentes émissions polluantes calculées précédemment à la (aux) catégorie(s) de dommages à laquelle

(auxquelles) ils contribuent. La Table 5.2 résume les catégories de dommages qui sont identifiées dans Ecoscore ainsi que les polluants qui contribuent à chacun de ces effets.

	Effet	Polluant
Santé humaine	Effet carcinogène	COV (1,3 Butadiène, Benzène, formaldéhyde)
	Effets respiratoires (substances organiques)	COV (COVNM; Méthane)
	Effets respiratoires (substances non organiques)	CO; PM; NOX (en NO2 éq.); TSP (particules en suspension totale)
Climat	Effet de serre	CO2; CH4
Éco- systèmes	écotoxicité	COV (Benzène, Toluène)
	Acidification et eutrophisation	NOX (en NO2 éq.); SO2
Bâtiments	Salissure, dégradation	PM10; SO2
Bruit	gêne	Bruit en [dB (A)]

Table 5.2: Classification des polluants par catégories de dommages [Walter, 2003]

Remarque:

COV: composants organiques volatils

COVNM: composants organiques volatils non méthaniques

PM: Particulates matter (10 est le diamètre des particules)

5.4.3 Evaluation des dommages

Après la classification des différents polluants dans les catégories de dommages correspondants, on calcule la part de chaque polluant dans chaque catégorie de dommages. Remarquons qu'un même polluant peut causer plusieurs dommages différents et réciproquement un même dommage peut résulter des effets de plusieurs polluants. Par exemple, le SO₂ peut être émis dans le sol et dans l'air et affectera en même temps la santé humaine et l'écosystème. Dans ce cas, on affectera la moitié des émissions à chacune des catégories d'impacts. Pour déterminer les dommages au sein de chaque catégorie, on multiplie simplement le niveau d'émission exprimé en g/km ou en g/kWh par un facteur de dommage exprimé dans des unités propres à chaque catégorie de dommage.

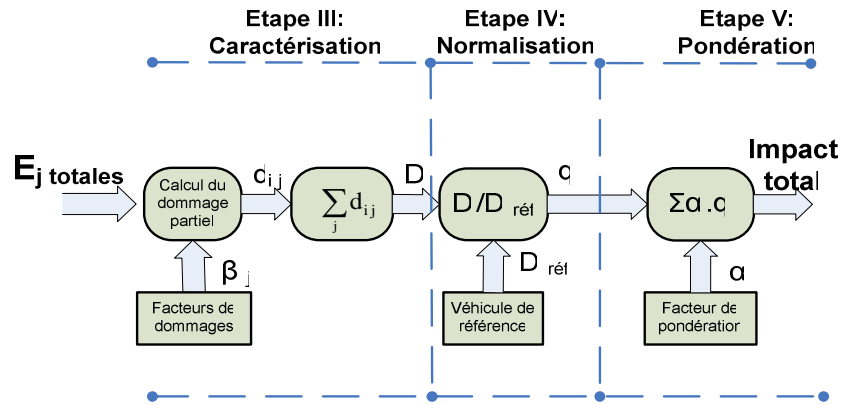


Figure 5.4: Schéma de calcul de l'impact global [Van Mierlo et al., 2006]

5.4.4 Dommages associés au véhicule de référence et normalisation

La normalisation consiste à diviser les différents dommages par des valeurs de référence préalablement définies. Cela permet pour le véhicule considéré, de visualiser l'importance des effets qu'il provoque par rapport à une situation de référence. Ecoscore prend comme référence la norme EURO IV. A chaque catégorie de véhicule correspond sa référence: voitures particulières, camionnettes, véhicules utilitaires lourds et autobus, deux-roues. Comme pour tout autre véhicule évalué, les émissions du véhicule de référence se décomposent en ses composantes directe et indirecte. Quelque soit la catégorie de véhicule considérée, les émissions de référence totales sont obtenues en additionnant les contributions directes et indirectes des véhicules de référence.

5.4.5 Pondération des dommages

L'étape finale de l'évaluation consiste à pondérer les dommages normalisés avant de les additionner pour former le score environnemental final. La pondération est une étape facultative dans les ACV et est complémentaire à la normalisation. C'est une étape très subjective; malheureusement on ne possède aucune méthode scientifique reconnue plus objective. Les méthodes utilisées actuellement laissent place à beaucoup de subjectivité dans le choix des poids:

- la monétarisation assigne une certaine valeur monétaire à un point perdu de l'acidification par exemple mais la valeur monétaire n'est pas une fonction linéaire de l'acidification
- de la distance entre une valeur standard donnée et la valeur trouvée par les ACV, on déduit une pondération par comparaison de tous les critères considérés. Mais les valeurs standards sont souvent fixées subjectivement
- on demande à une série d'experts (scientifiques, politiques...) de fixer des poids

Les poids établis par Ecoscore sont basés sur les avis de plusieurs experts et décideurs politiques. Pour notre travail, nous avons affecté plus de poids à des dommages plus sensibles tels que le réchauffement climatique, la santé, etc.

Le score environnemental global devient la somme pondérée des différents dommages.

5.4.6 Application

5.4.6.1 Véhicules considérés

Nous considérons des véhicules conventionnels de même catégorie dont des véhicules à essence et des véhicules diesels. Nous considérons également les véhicules hybrides électriques dont les modèles sont basés sur les modèles conventionnels sélectionnés pour les véhicules au diesel. Pour les hybrides à essence, nous avons préférés les modèles de la Toyota Prius et de la Honda insight qui sont entièrement disponibles dans ADVISOR et ont été validés par de nombreuses études expérimentales et numériques. L'application porte donc sur:

- Deux Renault Kangoo conventionnels, l'une à essence (RK_1.2E) avec une puissance maximale de 55kW à 4000 tours et l'autre au diesel (RK_1.5D) avec une puissance maximale de 60 kW à 4000 tours. Les deux sont simulées dans ADVISOR sur base de modèles conventionnels existants.
- Une Renault Laguna diesel (RL_1.9D) avec une puissance maximale de 88 kW et une cylindrée de 2l et une Renault Kangoo à essence (RK_1.6E) avec une puissance maximale de 70 kW et une cylindrée de 1,6l. Les deux sont aussi simulées dans ADVISOR sur base de modèles conventionnels.
- Une Renault Kangoo hybride doux (RK_MH_1.5D) simulé dans ADVISOR sur base de modèles hybrides électriques dont la stratégie de gestion est basée sur le système parallèle incorporé dans ADVISOR.

- Une Renault Kangoo full hybride (RK_FH_1.5D) simulé dans ADVISOR sur base de modèles hybrides électriques dont la stratégie de gestion est basée sur le système parallèle incorporé dans ADVISOR.
- La Toyota Prius I et la Honda Insight dont les modèles complets existent dans ADVISOR et qui représentent respectivement un full hybride et hybride doux avec un moteur thermique à essence.

Les caractéristiques de ces véhicules, les composants et les paramètres de simulation sont repris dans la Table 5.3:

	RK_1,2E	RK_1,6E	RK_1,5D	RH_MH_1,5D	RK_FH_1,5D	Honda_insight	Toyota prius	RL_1,9D
Paramètres du véhicules								
aérodynamique (Cd)	0,4	0,4	0,335	0,335	0,335	0,25	0,3	0,335
surface frontale (m²)	2,43152	2,44112	2,44488	2,44488	2,44488	1,88928	2,0128	2,002
résistance au roulement (Rr)	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,0054	0,009	0,009
rayon de la roue (m)	0,263	0,263	0,263	0,263	0,263	0,275	0,287	0,32
longueur(m)	4,03	4,035	4,03	4,03	4,03	3,53	4,32	4,51
largeur(m)	1,67	1,672	1,67	1,67	1,67	1,64	1,7	1,75
hauteur(m)	1,82	1,825	1,83	1,83	1,83	1,44	1,48	1,43
empattement(m)	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,4	2,55	2,75
hauteur centre de gravité(m)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5
masse(kg)	1055	1105	1095	1184	1238	1000	1368	1350
Moteur thermique								
type	SI	SI	CI	CI	CI	SI	SI	CI
Puissance max(kw)	55	70	60	50	41	41	43	88
Rendement	0,38	0,38	0,41	0,41	0,41	0,34	0,39	0,41
Moteur électrique								
type				MC-insight	MC-insight	MC-insight	MC-prius jpn	
Puissance max(kw)				10	20	10	31	
Rendement				0,96	0,96	0,96	0,91	
Batteries								
type				NIMH	NIMH	NIMH	NIMH	
modèle				Résistance interne	Résistance interne	Résistance interne	Résistance interne	
nb modules				20	40	20	40	
Catalyseur								
	SICC	SICC	SICC	SICC	SICC	SICC	standard SI	SICC
Transmission								
version	manuel	manuel	manuel	manuel	manuel	manuel	CVT	manuel
type	5 vitesses	5 vitesses	5 vitesses	manuel par	manuel par	5 vitesses	CVT	5 vitesses
power train control(système de contrôle)								
version	manuel	manuel	manuel	manuel	manuel	manuel	PJPN CVT	manuel
type	manuel conv	manuel conv	manuel conv	manuel par	manuel par	manuel insight	PJPN CVT	manuel conv

Table 6.3: Caractéristiques et paramètres de simulation des différents véhicules

5.4.6.2 Inventaire des émissions et de la consommation

1. Inventaire direct

Les émissions directes et la consommation des véhicules proviennent de la simulation. Le cycle de conduite sélectionné est le cycle européen normalisé (NEDC). Les polluants traités par le logiciel sont les NOx, les HC, le CO et les Particules (PM10). Le CO2 et le SO2 sont calculés à partir de la consommation et sur base des estimations des quantités de CO2 et de SO2 contenues dans un kilo de carburant:

- 1l d'essence produit 2,392 kg de CO2
- 1l de gasoil produit 2,64kg de CO2

- pour le SO₂, on considère que le carburant contient 5 ppm

Pour estimer la crédibilité des résultats d'ADVISOR sur les émissions, on peut comparer les émissions de CO₂ avec celles fournies par le constructeur pour certains types de véhicules. Comme le montre la Table 5.4, les résultats ADVISOR sont suffisamment proches des données du constructeur pour être en bon accord. Mais, on constate que les gains en consommation des véhicules hybrides par rapport au véhicule conventionnel, sont moindres (entre 10 et 13%) par rapport à la réalité, car dans notre travail, le moteur thermique n'a pas été optimisé au préalable. Pour les autres polluants, qui ne sont pas souvent fournis par le constructeur, on peut se contenter de vérifier s'ils se situent au moins dans les normes européennes sur les émissions. Il est rassurant de constater que les résultats ADVISOR ne se situent pas en dehors des normes exigées (Table 5.5).

	Consommation (l/100km)		CO ₂ (g/km)		CO (g/km)	NO _x (g/km)	SO ₂ (g/km)	PM (g/km)
	Advisor	Constructeur	Advisor	constructeur				
RK_1,2 E	7	7	163,800	165	1,100	0,084	0,070	0,000
RK_1,6E	7,6	7,5	177,840	177	1,220	0,077	0,076	0,000
RK_1,5D	5,5	5,3	143,550	139	0,531	0,280	0,055	0,026
RK_MH_1,5D	5	–	130,500	–	0,480	0,198	0,050	0,021
RK_FH_1,5D	4,8	–	125,280	–	0,458	0,179	0,048	0,020
Honda insight	4,8	–	112,320	–	1,100	0,082	0,048	0,000
Toyota Prius I	5,2	5,1	121,680	120	0,689	0,070	0,052	0,000
RL_1,9D	6,1	5,5	159,210	155	0,486	0,258	0,061	0,036

Table 5.4: Résultats de simulation et quelques données du constructeur

	CO (g/km)	HC (g/km)	NO _x (g/km)	PM (g/km)
Essence Euro II	3,2	0,341	0,252	0
Essence Euro III	2,3	0,2	0,15	0
Essence Euro IV	1	0,1	0,08	0
Diesel Euro II	1,06	0	0,81	0,1
Diesel Euro III	0,64	0	0,5	0,05
Diesel Euro IV	0,5	0	0,25	0,025

Table 5.5: Normes Européennes

Il faut noter qu'on n'a pas considéré ici les HC qui sont mal définis dans ADVISOR. En effet, on suppose que la formation des HC suit la même courbe que les PM, alors que ce n'est pas vrai en réalité. De plus les HC sont donnés globalement alors qu'ils sont composés de plusieurs autres produits (CVNM, AHP, Benzène...). Il est dès lors difficile de calculer leurs effets sur l'environnement sans connaître les détails de leur composition étant donné que chaque sous composant possède ses propres effets. Les quantités d'énergie consommées

pendant la phase d'utilisation du véhicule correspondent aux quantités de carburant consommées et sont exprimées en kJ par km. La quantité de carburant consommée est multipliée par le pouvoir calorifique inférieur du carburant.

2. Inventaire indirecte

Ici on comptabilise les émissions liées au circuit de production des carburants et à la fabrication des matériaux et l'assemblage du véhicule. Pour les émissions liées à la production des carburants, on multiplie les quantités de carburants consommées par les facteurs d'émissions. Ces facteurs sont généralement exprimés en grammes par unité d'énergie consommée en termes de carburant par le véhicule. Ils sont issus soit d'études de référence telles que le projet européen MEET [Hickman, 1998], soit de données fournies par les producteurs d'électricité comme l'Union Internationale de la Production et la Distribution de l'Energie Electrique [Van Mierlo et al., 2006].

	CO ₂ (g/kWh)	CO (mg/kWh)	NO _x (mg/kWh)	SO ₂ (mg/kWh)	PM (mg/kWh)
Essence	33,1	18,4	151,9	236,2	8,6
Diesel	24,5	16,6	129,6	174,2	3,6

Table 5.6: Facteurs d'émissions liées à la production des carburants [Van Mierlo et al., 2006]

Ayant la masse totale du véhicule, le pourcentage de chaque matériau dans la composition du véhicule et les facteurs d'émission exprimés en gramme par kilo de matériau produit, on peut calculer les émissions totales liées à la fabrication du véhicule. Nous avons utilisé les données issues d'une étude menée chez Volkswagen [Zamel et al., 2005] dans laquelle douze matériaux ont été sélectionnés parce qu'ils sont plus utilisés dans la fabrication des voitures. Les facteurs d'émissions et de consommation d'énergie pour les différents matériaux sont repris dans la Table 5.7.

g/kg	CO ₂	CO	HCS	NO _x	SO ₂	PM	Energie consommée (kJ/kg)
Fer	2352	29,02	1,4	3,33	3,37	1,85	33,18
Composites	12000	0	12	36	230	0	
Aluminium	6049	1,65	15,45	12	33,15	8,25	142,65
Cuivre	20000	0	1,40	10	658	0	83,5
Plomb	1680	0,34	0,16	2,60	7,40	0	31,17
Magnesium	10000	0	9,70	20	65	0	206,96
Nickel	20000	0	1,40	10	658	0	
Plastiques	3800	0	19	20,70	26,70	0	153,05
Caoutchouc	1700	0	5	10	15	0	60,40
Verre	760	0	0,79	2,3	2,30	0	21,75

Table 5.7: Facteurs d'émissions par kg de matériau transformé [Zamel et Li, 2005]

Ces facteurs sont supposés constants pour tous les véhicules bien que les transformations nécessaires pour un matériau peuvent dépendre du type de processus industriel. A la Table 6.8, six véhicules représentatifs de certaines technologies de propulsion ont été analysés pour distinguer la part de chaque matériau dans la composition de chaque type de véhicule. Pour une comparaison objective, les véhicules ont été normalisés à 1000 kg.

	Petrol ICE		Diesel ICE		HEV petrol-NiMH		HEV diesel-NiMH		ICE-biofuel		conversion HEV-PbAc		dedicated-PbAc	
	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	Kg	%	kg	%
Fer	599,2	59,9	611,1	61,1	597,7	59,8	609,8	60,99	620	62	475,6	47,6	340,01	34
Composites	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18,34	1,8
Aluminium	48,9	4,9	42,3	4,2	128,7	12,9	122,1	11,06	46,4	4,6	12,4	1,2	33,62	3,4
Cuivre	3,2	0,3	4,1	0,4	31,6	3,2	32,5	4,26	3,1	0,3	9,9	1	55,47	5,5
Plomb	8,6	0,9	10,7	1,1	5	0,5	7,1	0,61	8,1	0,8	154,3	15,4	283,47	28,3
Zinc	3,2	0,3	4,1	0,4	3	0,3	3,9	0,4	3,1	0,3	5,8	0,6	0	0
Magnesium	3,2	0,3	4,1	0,4	8,5	0,9	9,4	1,2	3,1	0,3	5,8	0,6	0	0
Nickel	0	0	0	0	9,2	0,9	9,2	0,9	0	0	0	0	0	0
Plastiques	158,2	15,8	154,4	15,4	119,2	11,9	115,4	11,6	150	15	140,4	14	108,19	10,8
Fluides	60,4	6	60,6	6,1	27,3	2,7	27,5	2,74	57,3	5,7	26,8	2,7	89,09	8,9
Caoutchouc	41,7	4,2	42,8	4,3	30,5	3,1	31,6	3,17	39,5	3,9	37	3,7	3,56	3,1
Verre	28,4	2,8	25,5	2,5	26,7	2,7	23,8	2,41	27	2,7	25,2	2,5	30,56	3,1
autres	44,9	4,5	40,4	4	12,5	1,2	8	1,06	42,5	4,3	106,9	10,7	10,69	1,1
total	1000	100	1000	100	1000	100	1000	100	1000	100	1000	100	1000	100

Table 5.8: Composition de six véhicules [Schweimer et al., 2000; Daniels et al., 2004 et Reva, 2005]

Pour visualiser la somme des inventaires d'émissions pour les phases de production des carburants, de la fabrication du véhicule et de son utilisation, nous avons pris l'exemple de 4 véhicules (Figure 5.5).

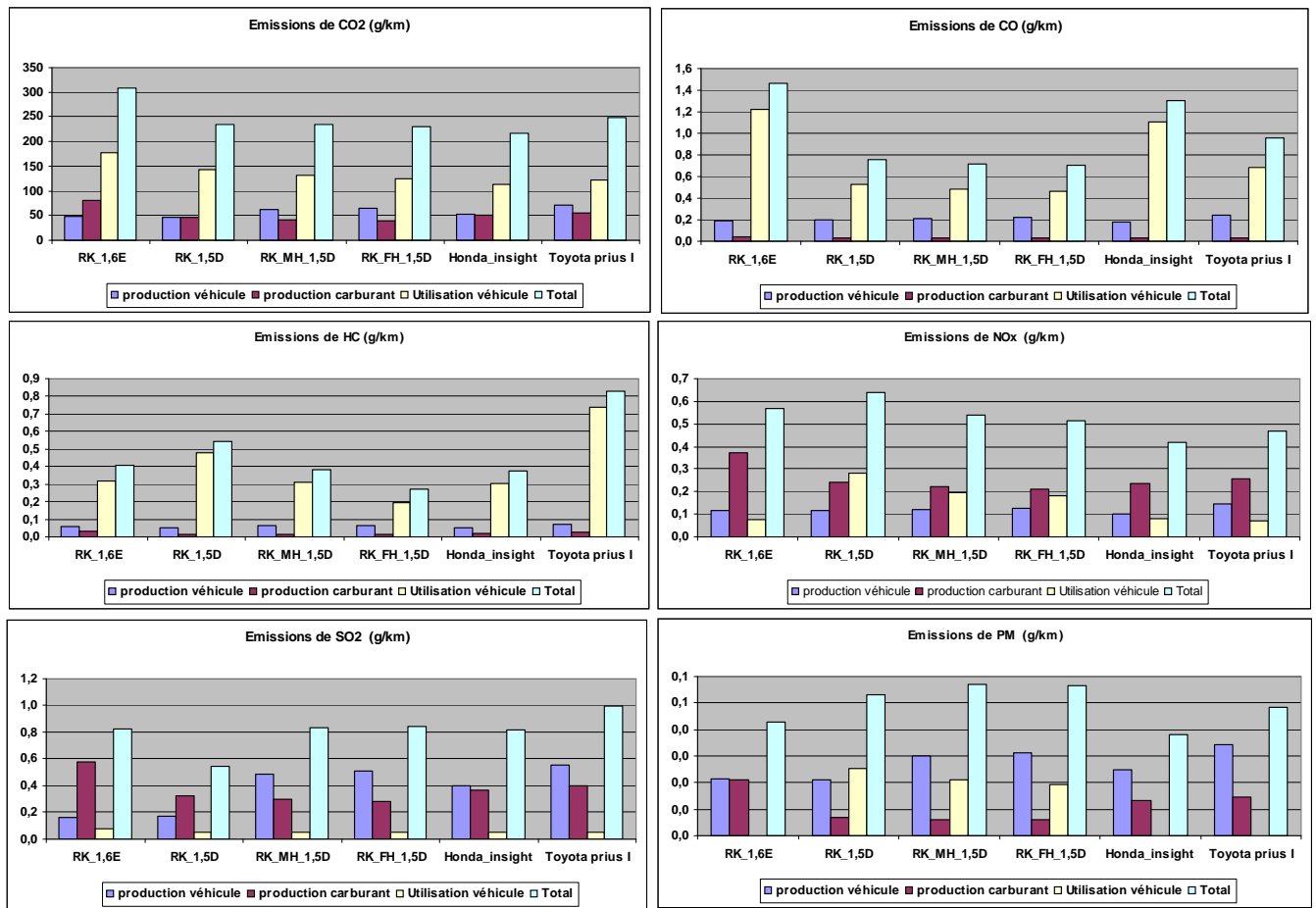


Figure 6.5: Emissions pour chaque phase de la vie du véhicule

On constate par exemple que la grande part (entre 50 et 60%) des émissions de CO₂ revient à la phase utilisation pour tous les véhicules. Les parts d'émissions de CO₂ pour les phases de fabrication du véhicule et de production du carburant varient entre 20 et 25% suivant le type de véhicule: pour les véhicules hybrides, c'est la phase de production du véhicule qui génère plus de CO₂ par rapport à celle de production du carburant alors que c'est l'inverse pour les véhicules conventionnels. Il n'en est pas de même pour les NO_x pour lesquels la part de la phase "production du carburant" augmente pour les véhicules essence (Kangoo 1.6 E) par rapport aux diesels (Kangoo 1.5 dci). Remarquons aussi que les émissions de PM et de SO₂ sont plus importantes pendant la phase de fabrication du véhicule pour tous les types de véhicules. Elles sont surtout plus importantes pour les véhicules hybrides électriques. Cela est dû au fait que la part de certains matériaux (Cuivre, aluminium, nickel) dans la composition du véhicule est plus significative dans le cas des véhicules hybrides (présence de moteur électrique, batteries) alors qu'elle est nulle (Ni) ou peu significative dans les autres cas et ces mêmes matériaux ont de surcroît un facteur d'émissions de PM et de SO₂ plus important (Table 5.7). *Cela influence beaucoup l'impact global étant donné qu'il est très sensible à la variation des données d'entrée.* En effet, les véhicules hybrides consomment moins de

carburant donc émettent moins de CO₂, mais ils peuvent reculer dans le classement par rapport à l'impact environnemental du simple fait que leurs émissions de SO₂ sont plus élevées pendant la phase de fabrication du véhicule.

5.4.6.3 Calcul des dommages

Pour chaque catégorie de dommages, les facteurs de dommages utilisés proviennent directement de la méthodologie Eco-Indicator 99 prise comme référence pour les effets sur la santé et sur les écosystèmes [Goedkoop et al., 2000] (voir Table 5.9).

	Effet	Polluants	Facteur de dommage
Catégorie de dommage			
Santé Humaine	effets respiratoires (substances non organiques)		(Daly/Kg)
		PM10	0,000375
		NO _x	0,0000887
		SO ₂	0,0000546
Effet de serre	effets de serre	CO ₂	(GWP)
			1
Ecosystème	Acidification et eutrophisation		(PDF,m2,an/Kg)
		NO _x	5,713
		SO ₂	1,041
Bâtiments	Salissure		€/Kg
		Particules	130
		SO ₂	8,26

Table 6.9: Facteurs de dommages [Goedkoop et al., 2000]

Pour les effets sur les bâtiments, les résultats d'une étude spécifique menée par le CEESE-ULB pour Bruxelles sont utilisés. Les dommages de chaque catégorie doivent être exprimés dans des unités communes pour qu'on puisse les additionner et avoir un dommage total pour la catégorie concernée.

$$d_{ij} = \beta_{ij} E_{j,totales} \quad (5.5)$$

avec β_{ij} : facteur de dommage du polluant j pour le dommage i

$E_{j,totales}$: émission totale du polluant j

d_{ij} est exprimé en unité commune comme le DALY (Disability Adjusted Life Years) ou nombre d'années de vie avec incapacité ajusté pour les effets sanitaires, le PDF.m².an (Potentially Disappeared Fraction) ou Fraction Potentiellement disparue d'espèces pour l'écosystème, le CO₂-équivalent pour l'effet de serre et l'euro pour la détérioration des bâtiments. Suivant l'unité DALY, un dommage de 1 DALY signifie soit une année de vie

d'un individu perdue, soit une personne souffrant pendant 4 années d'une incapacité à un niveau 0,25.

Le dommage total de catégorie i (D_i) est la somme des dommages partiels d_{ij} causés par différents polluants:

$$D_i = \sum_j d_{ij} \quad (5.6)$$

Les dommages totaux D_i calculés pour chaque catégorie i sont normalisés par la valeur de référence spécifique pour chaque catégorie de dommage ($D_{i, \text{référence}}$):

$$Q_i = D_i / D_{i, \text{référence}} \quad (5.7)$$

En ce qui concerne les émissions réglementées (NOx, PM, HC, CO), les valeurs imposées par la norme Euro IV sont prises comme référence. En ce qui concerne les émissions liées à la consommation de carburant, la valeur de 120g/km définie comme cible pour les émissions de CO₂ dans le cadre l'accord environnemental avec l'industrie automobile conclu au niveau européen est retenue pour les voitures particulières. Pour le SO₂, le niveau de référence est basé sur un contenu en soufre de 50 ppm prévu pour l'essence et le gasoil à partir de 2005. Les autres émissions non réglementées comme le CH₄, le NO₂, n'ont pas été considérés car elles ne sont pas quantifiées pour les véhicules.

Pour les émissions indirectes de référence, on se base sur la consommation d'énergie associée aux niveaux de référence retenus pour le CO₂ au sein de chaque catégorie de véhicules. Les émissions liées à la phase de fabrication du véhicule, la référence est un véhicule dont la masse correspond à la masse moyenne de sa catégorie (pour les voitures particulières, nous avons considéré une voiture conventionnelle de 1000kg).

Quelque soit la catégorie de véhicule considérée, les émissions de référence totales sont obtenues en additionnant les contributions directes et indirectes des véhicules de référence. Pour avoir un nombre sans dimension concernant l'énergie primaire, on prend comme cible l'énergie correspondant au niveau de référence retenu pour le CO₂. L'énergie consommée sera donc divisée par la cible. Le score environnemental global devient la somme pondérée des différents dommages.

$$\text{Score globale} = w_1 Q_{\text{santé}} + w_2 Q_{\text{effet de serre}} + w_3 Q_{\text{écosystème}} + w_4 Q_{\text{bâtiments}} + w_5 Q_{\text{énergie consommée}} \quad (5.8)$$

$$\sum w_i = 1$$

Pour la pondération, nous avons affecté plus de poids à des dommages plus sensibles actuellement tel que le réchauffement climatique:

Catégorie de dommage	poids
Santé humaine	20%
Effet de serre	50%
Ecosystème	20%
Bâtiments	5%
Déplétion des ressources d'énergie	5%

Table 5.10: Facteurs de pondération

5.4.6.4 Résultats

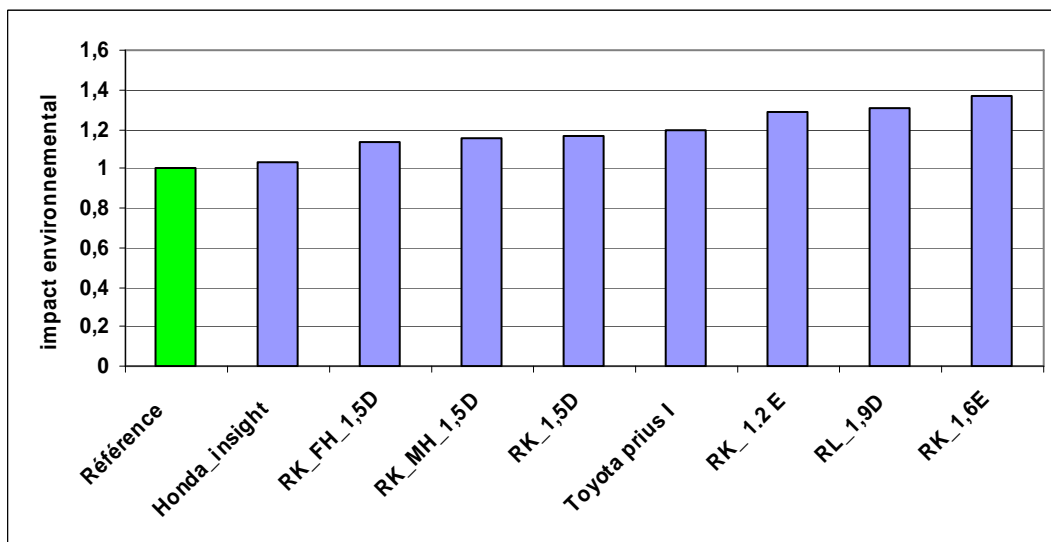


Figure 5.6: Impact environnemental

Les résultats du score environnemental pour notre échantillon de véhicules sont montrés à la Figure 5.6. Comme on peut le remarquer, plus le véhicule à moins d'impacts sur l'environnement, plus il se rapproche de la référence et plus il est propre. Par contre et comme on l'a déjà expliqué, l'ECOSCORE évolue dans le sens inverse: plus l'Ecoscore est élevé plus le véhicule est propre (Figure 5.7).

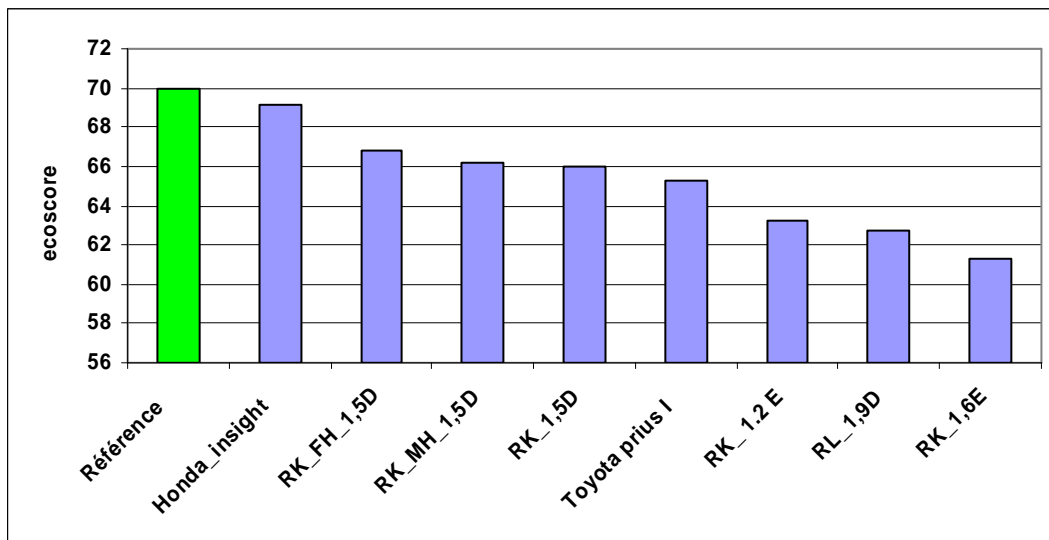


Figure 5.7: ECOSCORE

Les véhicules hybrides ont relativement moins d'impacts sur l'environnement que leurs équivalents conventionnels. Il y a certes un gain de consommation et donc moins d'émissions de CO₂ pendant la phase d'utilisation pour les véhicules hybrides, mais la phase de fabrication du véhicule atténue cet avantage. Cela est dû au fait que les émissions pendant cette phase sont proportionnelles à la masse (plus élevée pour les hybrides) d'une part et de la présence de certains matériaux en proportions plus élevées suite à l'usage des batteries et de machines électriques d'autre part. Cela s'observe notamment pour le cas de la Prius I qui consomme moins de carburant (et moins de CO₂ émis) par rapport aux conventionnels de même puissance, mais les émissions de SO₂ pendant la phase de fabrication du véhicule sont plus élevées et affectent sensiblement l'impact global. Les véhicules diesel sont mieux classés que les véhicules essence en dépit de leurs émissions de NOx et de particules plus élevées. Cela est dû au fait que nous avons pénalisé l'effet de serre, donc les émissions de CO₂, avec une pondération de 50%.

N.B: L'ECOSCORE du modèle actuel de la Prius est de 75 et non de 65 comme il est montré à la figure 5.7. Le modèle que nous avons considéré est celui de la Prius I simulé dans ADVISOR version 2.

5.4.7 Conclusion

La plupart des analystes considèrent souvent les seuls critères d'émissions de CO₂ et de consommation pour une évaluation environnementale des véhicules et ceci pour la seule phase d'utilisation du véhicule. La méthodologie Ecoscore dépasse cette habitude en

considérant, en plus du CO₂, d'autres polluants (CO, NO_x, PM, HC) qui ne dépendent pas nécessairement de la consommation, et le cycle de vie du carburant utilisé. On déplore cependant l'absence des émissions liées à la fabrication du véhicule et son démantèlement en fin de vie. Nous avons pour cela intégré dans le calcul de l'impact environnemental, les émissions et la consommation d'énergie, relatives à la phase de fabrication du véhicule. Le cycle de vie des batteries utilisées dans les véhicules hybrides et la climatisation doivent être pris en compte selon les données disponibles. L'impact environnemental présente une grande sensibilité à la variation des données d'entrée. Les véhicules hybrides électriques constituent une alternative viable à la réduction des émissions de CO₂ et de la consommation. On peut se demander cependant, si ces performances environnementales ne sont pas obtenues au détriment d'autres critères (le coût, la sécurité, le confort...) pouvant fortement influencer la satisfaction de l'utilisateur. Ceci nous incite à considérer également la satisfaction de l'utilisateur pour une évaluation plus objective et complète des véhicules. La méthode basée sur l'Eco-efficience pourrait être la meilleure méthode d'évaluation des véhicules.

Chapitre 6: EVALUATION DE L'ECOEFFICIENCE

6.1 Notions d'Ecoefficientence

Dans la littérature francophone, l'écoefficientence est souvent confondue avec l'écoefficienticité. On utilise parfois le mot écoefficientence pour désigner le delta de valeur ajoutée ramené à l'unité polluante envisagée. L'Association Française pour l'Analyse de la Valeur donne aux deux termes une signification différente; l'écoefficienticité est l'optimisation environnementale d'un produit donné, l'écoefficientence se veut plus large: n'y a t il pas un chemin plus intéressant du point de vue de l'environnement qui conduise au même service?

La littérature anglaise parle bien d'ecoeficiency et non d'ecoeficity. Le conseil international sur les métaux et l'environnement (ICME: International Council on Metals and Environment) défini l'ecoeficiency comme "*a route to maximize environmental and economic benefits, while simultaneously minimizing both environmental and economic costs*". C'est-à-dire une autre façon de faire pour améliorer les bénéfices économiques et environnementaux en minimisant simultanément les impacts (négatifs) sur l'environnement et l'économie. La norme "ISO 9000: 2000" distingue quant à elle l'efficacité, niveau de réalisation des activités planifiées et d'obtention des résultats escomptés, et l'efficience, rapport entre le résultat obtenu et les ressources utilisées. En se référant sur cette dernière définition, l'écoefficientence n'est pas une mesure globale de l'impact d'un produit ou d'un service sur l'environnement. C'est une mesure relative qui consiste à mettre en regard la performance attendue d'un produit et son impact environnemental (ou écologique). Il peut s'agir du ratio entre la satisfaction de l'utilisateur d'un produit (ou d'un service) et son impact environnemental.

6.2 L'écoefficient et l'analyse de la valeur

La valeur se définit comme étant le rapport entre la satisfaction des besoins et le coût. La définition du coût varie suivant le point de vue à partir duquel on estime la valeur: coût global dans une optique globale ou coût d'achat (ou coût d'achat + coût d'utilisation) dans une optique de l'utilisateur. L'évaluation de la valeur d'un produit se fait par la méthode d'"Analyse de la Valeur" (AV). La phase décisive de l'AV est l'analyse fonctionnelle qui consiste en une identification et une caractérisation des critères d'évaluation (Voir Annexe A). Les deux concepts (écoefficient et analyse de la valeur) ont en commun leurs unités, une satisfaction de besoin, quantifiée, au numérateur, et une consommation des ressources au dénominateur. Il s'agit d'une optimisation, d'une mise en adéquation de la satisfaction des fonctions identifiées dans le besoin, avec les coûts à y consacrer pour l'analyse de la valeur et avec les quantités de ressources naturelles nécessaires et leur impact sur l'environnement, pour l'écoefficient. Les deux numérateurs sont les mêmes: ils visent tous les deux une performance multifonctionnelle, dont on espère la reconnaissance par le marché (satisfaction du besoin de l'utilisateur). L'addition de fonctions environnementales et sociales est possible dans les deux cas. Les deux dénominateurs sont clairement différents. Autour d'un produit, on peut distinguer des coûts (internes), de marketing, de développement, d'industrialisation de fabrication, de vente, intégrant les coûts explicites de l'environnement et du social. S'y ajoutent les coûts externes ou indirects, économiques, environnementaux et sociaux. Il en est de même pendant l'utilisation et la fin de vie dudit produit. Le dénominateur de l'AV va comptabiliser les coûts internes alors que celui de l'écoefficient se limite à comptabiliser des quantités d'énergie et de matières consommées, voire des polluants rejetés. Nous essayerons d'aller plus loin en intégrant au dénominateur de l'écoefficient, l'analyse de cycle de vie. L'écoefficient vise l'optimisation des services offerts (fonctions) par le système de transport considéré par rapport aux ressources consommées (matières, énergie...) et aux différents coûts y relatifs (coûts directs liés au système lui-même et à son utilisation et les coûts sociétaux ou environnementaux). Pour ce qui nous concerne ici, le but est d'abord d'évaluer le degré d'efficacité d'un système de transport donné. Deux grandeurs sont donc à évaluer: la satisfaction de l'utilisateur et l'impact environnemental des systèmes de transport. L'impact

environnemental peut être évalué suivant la méthodologie Ecoscore (voir chapitre 5). La satisfaction du besoin de transport sera évaluée suivant le concept d'analyse de la valeur.

6.3 Evaluation de la satisfaction du besoin

Rappelons que le premier objectif de ce travail est de développer une méthode de mesure de l'écoefficient des systèmes de propulsion de véhicule. Il s'agit de fournir des indicateurs agrégés permettant une évaluation globale de l'écoefficient des systèmes de transport automobile déjà existants. Contrairement à la démarche de conception qui ne considère que les variables critères (ou fonctions objectifs) mathématiquement ou numériquement modélisables et qui dépendent directement des variables de conception, la méthode de mesure de l'écoefficient peut prendre en compte également des critères qualitatifs (ou subjectifs) exprimés sous forme de description comme l'esthétique ou le style. Elle tient compte aussi des critères qui ne dépendent pas directement des variables de conception mais des variables intermédiaires et dont l'évaluation se fait par l'intermédiaire des tests standardisés. Par exemple, les résultats d'un test de choc d'une voiture contre un piéton ne sont pas directement liés au type de moteur ou de batterie mais dépendent de la structure du véhicule, la géométrie de son capot, de sa vitesse, etc.

Comme nous l'avons déjà indiqué, la démarche d'évaluation de la satisfaction du besoin que nous avons développée s'appuie sur l'analyse de la valeur. Sans vouloir entrer en détails qui sont laissés à l'annexe 1, l'étape principale de cette méthode est l'analyse fonctionnelle. Elle consiste à rechercher les fonctions principales et secondaires qui satisfont le besoin, à les traduire en fonctions techniques puis les formaliser dans un cahier des charges fonctionnelles. Il faut ensuite caractériser les fonctions, c'est-à-dire quantifier les performances attendues des différentes alternatives pour chaque fonction. Le point de départ est la définition, pour chaque fonction, du critère de mesure ou d'appréciation (qui peut être soit simple soit une combinaison de critères) du degré de satisfaction du besoin, et les niveaux de satisfaction de référence (qui peuvent être spécifiés soit par des données chiffrées, par exemple le Coût au km, soit par des descriptions, par exemple le Confort). Les niveaux de référence sont souvent liés aux performances d'un système standard ou d'un prototype bien connu ou donnés par les normes. Ils peuvent aussi être fixés par des experts du domaine. Puis on détermine le niveau

de performance attendu par l'utilisateur et on établit si ce niveau est impératif ou s'il y a une certaine flexibilité autour de ce niveau. Enfin on cherche à mesurer cette flexibilité et plusieurs techniques existent. La définition de limites d'acceptation est une méthode relativement simple mais efficace: on définit le niveau minimum en dessous duquel l'utilisateur refuse le produit car il trouve la performance insuffisante, et le niveau maximum au delà duquel il s'agit aux yeux de l'utilisateur d'un luxe inutile. Par exemple, il n'est pas trop nécessaire que la vitesse maximale d'un véhicule de tourisme atteigne les 200 km/h, mais il est désagréable qu'elle ne puisse pas dépasser les 100 km/h. Il y a des techniques plus simples (classes de flexibilité) et des plus complexes (en plus des limites d'acceptation, on définit un taux d'échange quantifiant le rapport avantage/coût).

Nous allons passer en revue les critères de satisfaction considérés dans cette étude tout en rappelant que le système considéré ici est le système de transport individuel (voiture particulière).

6.3.1 Critères de mesure

6.3.1.1 La Sécurité

L'objectif est ici de quantifier la capacité du véhicule à assurer la sécurité de ses passagers (sécurité interne) et celle des autres (sécurité externe). Le critère "sécurité" est un critère composé de plusieurs sous critères dont deux principaux: la sécurité interne et la sécurité externe.

1. Sécurité interne

Pour les véhicules automobiles, on distingue généralement les systèmes de sécurité passifs et actifs. Les systèmes de sécurité passifs préservent autant que possible la sécurité des occupants lorsque l'accident est inévitable. Les systèmes actifs tentent quant à eux d'éviter l'apparition de l'accident en corrigeant ou en aidant les actions du conducteur.

a) Sécurité passive

Pour évaluer la sécurité passive, on peut se référer au score obtenu lors des tests Euro NCAP (New Car Assessment Program). Le NCAP effectue des crash tests (choc frontal, choc latéral et choc contre poteau) et discerne des étoiles (1 à 5) aux différents véhicules testés (Annexe B). La conversion des étoiles décernées (1 à 5) lors du test en une échelle de 1 à 5 est

immédiate. Ces crash tests offrent une comparaison objective de la sécurité des véhicules étant donné qu'ils sont effectués par un organisme indépendant. Il peut s'agir également de considérer certains équipements tels que la ceinture de sécurité et les airbags. Le troisième aspect à considérer pour évaluer la sécurité passive est le retournement du véhicule: les accidents par renversement constituent un sérieux problème pour les véhicules légers et surtout les camions légers. Pour évaluer le risque de tonneau, on se réfère soit au facteur de stabilité SSF (static stability factor) [Gillespie, 1992] du véhicule soit au test de stabilité appelé aussi "test par manœuvre dynamique" ou "manœuvre de Fishhook" (Voir Annexe B). Suivant le risque global de renversement estimé, chaque véhicule se verra attribué des étoiles (1 à 5). La Toyota Prius a décroché par exemple 4 étoiles.

b) Sécurité active

En ce qui concerne la cote pour la sécurité active, on peut se baser sur l'équipement installé à bord du véhicule: ABS, anti-patinage, système d'aide au freinage d'urgence, contrôle actif de la dynamique latérale, suspension active, radar de détection d'obstacle, aide à la vision de nuit, etc. Comme la valeur des équipements est relativement équivalente d'un constructeur à l'autre, une échelle de cotation peut alors être établie sur la base de la liste des systèmes de sécurité actifs présents à bord du véhicule.

2. Sécurité externe

A l'opposé de la sécurité interne, la sécurité externe concerne ici l'évaluation de la capacité du moyen de transport à préserver la sécurité des autres usagers de la route notamment les piétons et les autres voitures lors de collisions ou accidents. Pour évaluer la sécurité externe, deux sous critères sont considérés:

a) Choc contre piéton

Comme pour les tests de chocs (frontal, latéral, contre poteau), l'Euro NCAP effectue des tests de choc contre piétons et des étoiles sont discernées à chaque véhicule.

b) Agressivité contre les autres voitures: effet de la masse

La masse joue un rôle important dans la collision entre deux véhicules. Dans un choc impliquant deux véhicules, il a été observé que les occupants des voitures lourdes s'en sortent mieux que ceux des voitures légères. En plus des équipements de sécurité passive (ceintures, Airbag...), la cause de cette différence est le rapport de masse. Plus la différence de masse est

grande, plus les risques pour les occupants du véhicule léger augmentent. Les constructeurs automobiles sont d'accord pour dire que le taux de mortalité croît en fonction de cette différence.

La sécurité interne (crashworthiness) est bien définie pour certaines marques et certains modèles de véhicules. Des situations très spécifiques de collision sont étudiées dans des essais de conformité pour des normes de sûreté de véhicule à moteur et chez NCAP. De tels essais cependant, ne peuvent pas directement mesurer des risques de dommages réels. Ils peuvent seulement mesurer les indicateurs qui sont liés à de tels risques. C'est pourquoi, on doit recourir à l'usage des données statistiques sur les collisions réelles du trafic, pour estimer les dommages et les fatalités. L'aptitude d'une voiture à protéger ses occupants en cas de collision reflète les dommages ou les risques de fatalités aux occupants, dans des situations bien spécifiques, en comparaison avec d'autres voitures ou une voiture standard. De même l'agressivité d'un véhicule est liée aux risques de dommages que le véhicule inflige aux occupants de son partenaire en cas de collision. La situation devient complexe du fait que les risques et les dommages des occupants d'une voiture sont à la fois liés à la voiture elle-même et à l'agressivité de l'autre voiture en collision. Par conséquent, l'agressivité peut être définie par rapport aux dommages et fatalités aux occupants d'un véhicule pris comme référence ou représentant un groupe ou famille de véhicules. La référence choisie est la voiture dont le poids est la moyenne des voitures de la région considérée (les USA ont en général des véhicules plus lourds que l'Europe).

En résumé, l'évaluation de la capacité d'un moyen de transport pour assurer la protection de ses occupants et celle des autres peut se faire sous cinq critères (sécurité passive, sécurité active, stabilité, choc contre piéton et agressivité) répartis dans deux rubriques *sécurité interne* et *sécurité externe*.

6.3.1.2 Le Coût de transport au km parcouru

Le coût global de transport comprend le coût d'acquisition, l'entretien, les taxes, les assurances, le carburant et le parking et ce durant toute la vie du véhicule. En cas de revente, on doit soustraire le coût de revente. Le nombre d'années de vie du véhicule ne doit pas être très élevé du fait que plus le véhicule vieillit, plus il perd ses performances initiales et la consommation augmente en même temps que les émissions. Le coût de transport au km est égal au coût global divisé par le nombre de kilomètres parcourus durant la vie du véhicule.

6.3.1.3 Le Confort

En se mouvant à une certaine vitesse, l'automobile est soumise à un large spectre vibratoire qui affecte les passagers de manière visuelle, tactile ou auditive. Le confort se réfère communément aux sensations tactiles ou visuelles (fréquences basses: 0 -25 Hz) et le bruit caractérise les sensations auditives (fréquences plus élevées: 25 – 20.000 Hz) [Wong, 2001]. La distinction peut devenir difficile car les deux types de fréquences sont souvent reliés. L'étude du confort nécessite la compréhension des sources d'excitations et des mécanismes de perception et de tolérance aux vibrations. Elle nécessite également l'analyse de la réponse vibratoire du véhicule sur roues. Parmi les sources d'excitations, on distingue les sources externes et les sources internes. Les excitations externes sont dues principalement à la rugosité de la route qui recouvre aussi bien les trous (nids de poule, etc.) que les déviations aléatoires du profil de la route résultat des imprécisions inhérentes à la fabrication et la réparation de la surface de la route. Les vibrations internes sont issues des parties tournantes telles que les roues et pneus, la ligne de transmission et le moteur. Dans ces conditions, le jugement d'une voiture en matière de confort devient complexe et subjectif en raison de l'absence de méthodes objectives pour mesurer la performance. De plus, les limites du confort (ou d'inconfort) des humains aux vibrations sont difficiles à déterminer à cause de la variabilité de la sensibilité des individus et de l'absence d'une méthodologie acceptée uniformément pour la déterminer. Des recherches considérables sont toutefois dévouées à la question et plusieurs méthodes ont été utilisées: les mesures subjectives de la tenue de route, les tests sur Tables vibrantes, les tests en simulateur de conduite, les mesures sur véhicule, etc. Avec les années, plusieurs critères de confort ont été proposé parmi lesquels le Guide Général édité par l'ISO (ISO 2631) qui définit la tolérance humaine aux vibrations d'ensemble du corps et s'applique aux systèmes de transport ou à l'industrie. Il définit 3 limites distinctes pour les vibrations dans la gamme 1-80 Hz:

- les limites d'exposition reliées à la sécurité ou à la préservation de la santé qui ne doivent pas être dépassées qu'avec des justifications très spéciales
- les limites de fatigue ou de capacité décroissante, liées à la préservation de l'aptitude au travail. Elles s'appliquent aux tâches telles que la conduite de véhicules ou de tracteurs
- les limites de confort réduit, qui concernent la préservation du confort, ce qui, dans les moyens de transport, correspond à la capacité de lire, écrire ou manger dans les véhicules

Dans le cas qui nous concerne, il n'y a pas de données relatives à l'environnement vibratoire de chaque véhicule. Il faut noter que le confort ne dépend pas uniquement de l'aspect vibratoire mais d'autres critères entrent en jeu: la tenue de route, la maniabilité, la visibilité, etc. L'évaluation du confort peut être référencée au bruit dont les limites sont reprises dans la

norme EURO. On peut également se référer au Moniteur de l'Automobile Belge qui qualifie le confort à travers trois postes: le total conduite, le total confort et le total fonctionnalité. Le Moniteur de l'Automobile effectue des évaluations de confort sur des échantillons de véhicules et attribue à chaque véhicule une note sur 600. Trois critères sont pris en compte (conduite, fonctionnalité et confort) et chaque critère compte un certain nombre de points à considérer.

6.3.1.4 La Fiabilité

Il s'agit ici d'évaluer et de quantifier la fiabilité (réaliser ce qui a été promis) du moyen de transport. La fiabilité d'une voiture donnée est difficile à évaluer du fait qu'il n'est pas aisé de calculer les pannes potentielles. Certaines des questions que l'on peut se poser sur la fiabilité ne trouvent pas de réponses directes ou précises:

- le véhicule est-il reconnu pour certains problèmes techniques?
- certains éléments doivent-ils être remplacés plus ou moins souvent que ceux des autres?
- combien de temps peut-on le conduire sans devoir effectuer des réparations majeures?

La meilleure façon de trouver les réponses à ces questions est de faire appel:

- aux avis de rappel des fabricants,
- aux sondages auprès des utilisateurs,
- ou aux organisations faisant des tests d'essai de collision comme Euro NCAP

Mais on ne doit pas se fier aux chiffres car certains fabricants rappellent des voitures pour des fins d'image de leur société (éviter des ennuis aux clients pour des défaillances mineures). De plus les avis des utilisateurs varient suivant la façon dont ils utilisent leur véhicule (façon de conduire, type de route, chargement, entretien...).

Par contre, les constructeurs peuvent fournir des informations importantes sur la fiabilité à travers la garantie qu'ils donnent. Une garantie à long terme prouve que le constructeur est persuadé que l'élément couvert ne fera pas souvent objet de réparation ou de remplacement. A titre d'exemple, la Toyota Prius offre une garantie de 8 ans et 100 000 km (8 ans et 160 000 km pour la partie électrique) sans réparation majeure.

Il existe deux formes de garanties:

- la garantie constructeur dont la durée et les conditions d'application sont mentionnées sur le contrat d'achat: le véhicule est couvert contre toute panne ou usure anormale durant cette période
- et la garantie légale ou des vices cachés: selon la règle en la matière, tout défaut de fabrication ou usure anormale survenant après la fin de la garantie constructeur doivent être pris en charge par ce dernier sans limitation de temps ni de kilométrage.

A défaut de toute autre donnée, la garantie du constructeur sur le moyen de transport peut servir à l'évaluation de sa fiabilité. L'échelle de cotation correspondra au nombre d'années de garantie: le minimum de fiabilité pour une année de garantie et le maximum pour cinq ans de garantie.

6.3.1.5 Les Performances

Les performances d'un moyen de transport lui permettent de remplir de manière satisfaisante, sa fonction principale à savoir le déplacement d'un point à un autre. Le trajet doit être réalisé dans les délais raisonnables. Pour accomplir cette tâche, le moyen de transport doit être capable de produire des accélérations suffisamment courtes pendant les dépassements et les reprises. Il doit aussi pouvoir gravir des pentes. Classiquement, les sous critères considérés pour évaluer les performances d'un véhicule de passager sont: le temps d'accélération partant de zéro jusqu'à 100 km/h, le temps d'accélération pendant les dépassements et les reprises (de 60 à 100 km/h), la vitesse maximale et la pente maximale franchise à 80 km/h. Dans notre étude, le niveau de performances peut être mesuré avec suffisamment de précision par simulation du véhicule avec le logiciel ADVISOR (tests d'accélération et de pente).

6.3.1.6 L'image

L'image peut couvrir ici plusieurs aspects (économie, sport, aventure, environnement...) mais nous en retenons les principaux à savoir l'image liée à l'aspect extérieur (esthétique), image liée au contenu (haute technologie) et l'image liée aux performances environnementales (image verte). C'est un critère très subjectif qui varie d'une personne à l'autre. Les statistiques de vente d'une catégorie de véhicule peuvent refléter la perception qu'ont les clients sur le véhicule. Mais le problème est que certains critères sont contradictoires: plus le niveau de l'esthétique est élevé, plus le véhicule coûte cher. Et ainsi, les préférences des clients exprimées à travers le nombre de ventes peuvent être liées au coût et non à l'esthétique.

6.3.2 Normalisation

Etant donné que tous les critères n'ont pas les mêmes unités de mesure, il va falloir normer les niveaux de performances atteints par des niveaux de référence. Les niveaux de satisfaction de références sont liés aux performances d'un système standard ou d'un prototype bien connu ou données par les normes. A titre d'exemple nous avons considéré les cibles suivantes pour les critères de performances, de sécurité et de confort:

- Vitesse maximale: 140 km/h (voiture particulière)
- Accélération de 0 à 100 km/h en moins de 12s
- Sécurité passive (test de chocs): 4 étoiles (test NCAP)
- Bruit: <75 dB (norme)

6.3.3 Pondération

Les critères d'évaluation de la satisfaction du besoin n'ont pas toujours la même importance. Pour arriver à un indice de satisfaction globale, on effectue une somme pondérée des différentes évaluations correspondantes aux critères sélectionnés. Les poids à accorder à chaque critère dépendent des préférences du décideur et de l'objectif recherché. Nous avons utilisé la méthode du tri croisé (méthode AHP: Analysis Hierarchic Process) pour hiérarchiser les critères selon l'importance de chacun. La méthode d'Analyse Hiérarchique se distingue des autres méthodes multicritères par sa façon de déterminer les poids des critères: elle procède par combinaisons binaires à chaque niveau de la hiérarchie par rapport aux éléments du niveau supérieur.

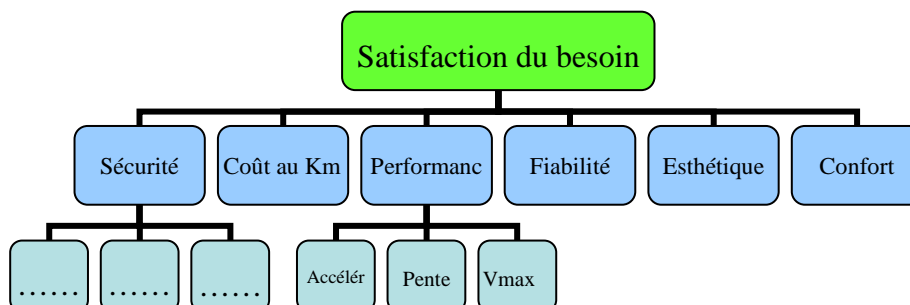


Figure 6.1: Organigramme hiérarchique.

Il faut comparer l'importance relative de tous les critères appartenant à un même niveau de la hiérarchie pris deux par deux, par rapport à la fonction du niveau immédiatement supérieur. Il faut ensuite configurer une matrice carrée réciproque formée par les évaluations des rapports des poids ($K \times K$), K étant le nombre d'éléments comparés. On obtient de cette façon: a_{ij} (a_{ij} = évaluation par comparaison entre l'élément i et l'élément j) avec $a_{jj}=1$ et $a_{ji}=1/ a_{ij}$ (valeur réciproque). Toutes les paires de comparaison doivent être établies:

- Comparaison entre les 6 critères principaux pris deux à deux par rapport à l'objectif;
- Comparaison entre les critères de 2^{ème} niveau pris deux par deux par rapport au critère principal
- Etc.

Pour chaque comparaison on doit choisir le critère le plus important et exprimer son jugement quant à son importance. Par exemple, on pourrait dire que le prix est plus important que le niveau de fiabilité. La mesure pour déterminer l'importance relative pourrait être exprimée par échelle de 1 à 9 avec la possibilité d'avoir des valeurs intermédiaires. L'inconvénient de la méthode est lié au nombre de matrices à construire qui peut être relativement élevé.

Jugement verbal	Valeur numérique
Extrêmement plus important	9
Très fortement plus important	7
Fortement plus important	5
Modérément plus important	3
Importance égale	1

Table 6.1: Echelle pour l'importance relative des critères

En relation avec cette échelle, on construit la matrice réciproque qui permet de calculer la priorité de chaque critère par rapport aux autres. La procédure mathématique est assez complexe et se résume en trois étapes (voir pour plus de détails l'Annexe b):

- On fait la somme des valeurs de chaque colonne de la matrice.
- On divise chaque élément de la matrice par le total de sa colonne (normalisation).
- On calcule la moyenne des éléments de chaque rangée de la matrice. Ces moyennes donnent une estimation des priorités du critère (vecteur propre)

6.3.4 Application

Pour illustrer la satisfaction du besoin, nous avons gardés les mêmes véhicules considérés au chapitre 6 pour le calcul de l'impact environnemental. Ces véhicules sont sélectionnés sur une liste de véhicules du "Moniteur de l'Automobile Belge". Pour les véhicules conventionnels, les caractéristiques extérieures fournies par le constructeur sont introduites dans le modèle conventionnel existant dans ADVISOR. Pour les architectures hybrides, les mêmes caractéristiques de bases des modèles conventionnels sont introduites dans les modèles hybrides électriques existants dans ADVISOR en y ajoutant cette fois les modèles des composants électriques (moteur électrique, batteries...) au choix. Seules la Prius et la Honda Insight, dont les modèles sont au complet, ont été exploitées telles qu'elles sont dans ADVISOR.

Les évaluations des véhicules considérés par rapport aux différents critères se font soit par calcul (facteur de stabilité par exemple), soit sur base des résultats de la simulation (performances par exemple) ou sur base des données du constructeur (test NCAP). Les limites de satisfaction (ou échelle de cotation) sont fixées par référence aux pratiques d'usage actuelles. C'est ainsi que les coûts considérés ici reflètent le marché local et les limites de performances sont référencées sur les performances actuelles des véhicules. L'évaluation des véhicules sur un critère composé sera donnée par la moyenne des évaluations par rapport à ses sous critères. En supposant qu'une note de 4 sur 5 pour un critère donné est très satisfaisante, nous avons fixé la cible à 4 pour normaliser les évaluations. Il reste à construire une matrice combinée contenant les critères et les alternatives. La priorité des critères est combinée aux évaluations des alternatives pour obtenir la préférence globale du décideur. Le lecteur intéressé trouvera en Annexe b les détails sur les évaluations et la pondération. La satisfaction du besoin de transport pour les véhicules considérés peut être visualisée à la Figure 6.2:

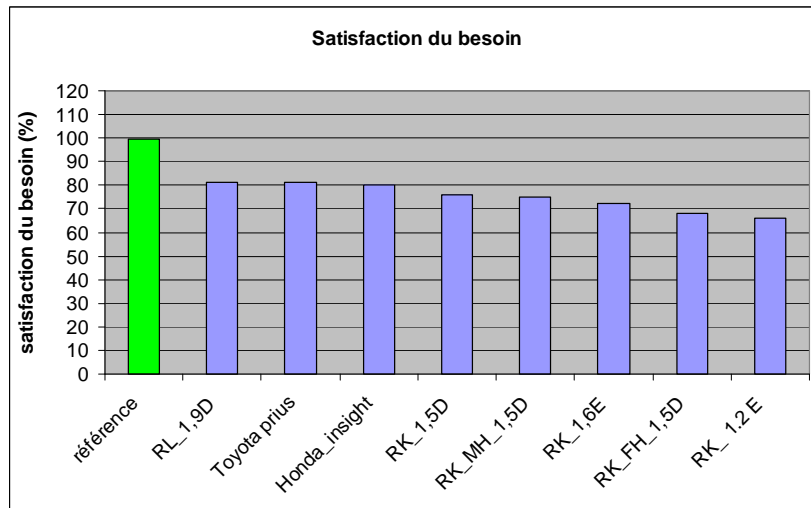


Figure 6.2: Exemple de niveaux de Satisfaction du besoin pour quelques véhicules

Selon les modèles considérés dans ce travail, il n'apparaît pas clairement de différence entre les véhicules hybrides électriques et leurs semblables conventionnels quant à leur niveau de satisfaction de l'utilisateur. La différence est parfois moindre voire inexistante. Cela est dû d'une part à la subjectivité des évaluations qui dépendent de chaque décideur et de l'objectif recherché et à la comparaison des solutions non optimisées d'autre part. Pour un petit degré d'hybridation, les véhicules hybrides à charge sustaining, satisfont moins bien le besoin de transport que leurs semblables conventionnels. En effet, la recharge des batteries est faite par le moteur thermique et les gains en consommation sont parfois moindres pour compenser le coût. Mais là aussi, tout dépend de la taille du véhicule (de sa masse) car la Honda Insight se classe bien en raison de sa masse très limitée.

Si par contre, le degré d'hybridation est élevé, les véhicules hybrides satisfont mieux l'utilisateur que les véhicules conventionnels (cas de la Prius I dans notre exemple). Mais la masse élevée des véhicules hybrides par rapport à leurs équivalents conventionnels limite les gains en consommation et en performances. Si les véhicules hybrides sont plus performants en montée (profitant du couple élevé du moteur électrique à basse vitesse), ils le sont moins pour les accélérations et les vitesses maximales suite au supplément de masse. Pour plus d'objectivité, une telle comparaison exige l'usage de données plus fiables (plus de précision sur l'évaluation des critères) et une optimisation préalable de certains paramètres des véhicules hybrides. Notons que dans le cadre de la conception préliminaire, seuls les critères quantitatifs et modélisables seront pris en compte. La satisfaction des besoins de l'utilisateur sera basée sur les performances du véhicule et celles-ci peuvent être calculées par simulation

avec ADVISOR. De plus, d'autres critères liés à la satisfaction du besoin comme le coût utilisateur, la sécurité en cas de collision sont évalués suivant des modèles simples ou à partir des bases de données expérimentales disponibles dans littérature et que nous avons eu le soin d'ajouter dans ADVISOR.

Chapitre 7: INTEGRATION DE L'ECOEFFICIENCE DANS LA CONCEPTION PRELIMINAIRE

7.1 Contexte

Un nouveau produit est conçu à partir d'un besoin exprimé par le marché. La conception est un processus d'identification et de définition des fonctionnalités que doit remplir le produit pour la satisfaction du besoin. Il s'agit de synthétiser des systèmes qui réalisent les fonctionnalités et les performances souhaitées. Il existe plusieurs démarches de conception qui diffèrent essentiellement par la proportion de nouveaux éléments à intégrer ou de nouvelles connaissances à mettre en œuvre [Culverhouse, 1995].

La reconception concerne un produit déjà commercialisé mais qui nécessite des modifications visant la satisfaction de nouvelles exigences ou l'amélioration des performances. On parle aussi d'une mise à jour pour maintenir la compétitivité du produit sur le marché.

La conception routinière part des principes de solutions réalisables, le problème général est nouveau mais les sous problèmes ont des solutions déjà connues. Scaravetti [Scaravetti, 2004] parle de "repeat design", il s'agit des modifications visant la réduction des coûts et la simplification d'une conception existante en utilisant des techniques de conception établies.

Deux types de conception rentrent dans cette catégorie:

- la conception adaptative: les principes de solution sont connus mais la structure fonctionnelle déjà établie doit être adaptée aux exigences modifiées.
- le "variant design" nécessite jusqu'à 20% de nouvelles connaissances [Culverhouse, 1995], il concerne par exemple l'extension d'un produit existant: la taille par exemple.

La conception innovante apporte 20 à 50% pour cent de nouvelles connaissances [Culverhouse, 1995], il s'agit d'une recombinaison des éléments existants ou de l'usage de nouvelles technologies sur un produit existant. La décomposition du problème est connue, mais il n'existe pas de solutions connues pour tous les sous problèmes.

La conception créative concerne un produit entièrement nouveau.

La démarche d'intégration de l'écoefficiente dans la conception préliminaire des véhicules propres que nous proposons se reconnaît en même temps dans la reconception et dans la conception adaptative. Dans les deux cas, les principes de solutions des nouvelles technologies de véhicules hybrides sont connus, mais ces véhicules doivent répondre à de nouvelles exigences environnementales et sociétales. On peut parler aussi de conception innovante parce qu'il s'agit de l'usage de nouvelles technologies de composants notamment les accumulateurs hydrauliques et les supercapacités sur des véhicules hybrides déjà existants. Il s'agit également de l'utilisation de nouvelles méthodes et de nouveaux outils de simulation et d'optimisation.

7.2 Enjeux de la conception préliminaire

De façon générale et selon Pahl [Pahl et al., 1996], le processus de conception suit une séquence de quatre étapes: l'analyse du besoin, la recherche des concepts de solutions, la conception architecturale et la conception détaillée. Le principal reproche à cette démarche séquentielle est que les remises en cause interviennent tardivement au risque d'entraîner des délais et des coûts supplémentaires. Pour éviter ces éventualités, d'autres processus ont vu le jour. Il s'agit de l'ingénierie concourante et l'ingénierie simultanée. Toutes les deux méthodes rentrent dans le cadre de la conception intégrée et visent une meilleure coordination des équipes, une prise en compte simultanée des contraintes de chaque métier et un cheminement parallèle de toutes les tâches de conception. La conception préliminaire se limite aux trois premières étapes et n'est pas concernée par la dernière étape qui aboutit à la mise en production du produit. L'enjeu principale de la conception préliminaire est d'orienter le plus tôt possible la conception vers les meilleures solutions au regard des exigences techniques, économiques et environnementales. Mais on éprouve à ce niveau des difficultés de prendre une décision car les choix optimaux sont souvent basés sur des critères difficilement comparables ou antagonistes. Il faut donc viser à améliorer les choix de conception par l'intermédiaire du calcul et/ou de l'optimisation. Il s'agit d'évaluer et de prédire les performances liées au comportement physique d'une solution par l'intermédiaire d'un modèle mathématique. Mais il s'avère que les travaux relatifs à l'intégration du calcul dans la

conception s'orientent souvent vers le calcul de validation. Ce qui signifie que l'on procède à une validation d'une solution à travers son modèle dont les caractéristiques ont été choisies *a priori*. Le calcul intervient pour valider ou remettre en cause les choix de conception effectués à l'avance. Le calcul de validation concerne donc la conception détaillée et non la conception préliminaire. Certains travaux [Hamdi et al., 2003], ont abordé la problématique générale de l'utilisation de modèles de calcul dans les phases préliminaires de la conception mais il n'y a pas assez de recherches sur les modèles en conception préliminaire [Yannou, 2001]. Cependant, certaines techniques de modélisation sont adaptées à la conception préliminaire: les modèles qualitatifs et les modèles d'approximations. Dans les modèles qualitatifs, les variables ne sont pas des valeurs réelles mais représentent des espaces de variation ou des intervalles. Le comportement physique du système est modélisé dans un contexte mal défini, la description du système reste abstraite. L'inconvénient de tels modèles est que leurs solutions aboutissent parfois à des indéterminations ou des comportements irrationnels. Par contre, les modèles d'approximation s'avèrent intéressants pour l'intégration du calcul en conception préliminaire. La méthode part d'un modèle de simulation du système (souvent un modèle numérique) pour construire une approximation mathématique du modèle à l'aide de fonctions d'approximation (polynômes, Kriging, splines, réseaux de neurones, etc.). Vernat [Vernat, 2004] reproche à cette approche d'être parfois longue et coûteuse parce qu'on doit passer par un modèle de simulation parfois complexe puis par une approximation. De plus, la modification des objectifs ou des contraintes entraîne une reconsidération du modèle de simulation. Toutefois, ce reproche de Vernat peut être écarté dans certains cas tels que les véhicules hybrides électriques. Car en effet, les modèles de simulation des véhicules hybrides électriques sont parfois plus flexibles et permettent de modifier facilement les modèles des composants. Nous citerons par exemple le logiciel ADVISOR que nous avons utilisé dans cette démarche et qui est conçu pour la modélisation et la simulation des véhicules conventionnels et hybrides. Vernat propose la méthode des contraintes qui modélise les systèmes en s'appuyant sur des restrictions à respecter. La méthode consiste à trouver, à partir d'un ensemble de variables appartenant chacune à un domaine précis, un ensemble de solutions appartenant également au domaine réalisable et satisfaisant simultanément un certain nombre de contraintes. Notre démarche s'appuie sur les modèles d'approximation. Les systèmes de véhicules hybrides électriques comportent beaucoup de composants et de paramètres liés à la configuration et à la gestion énergétique. Pour cela, des techniques d'optimisation multicritère et ou multi objectifs doivent être utilisées afin de cerner les solutions les plus réalistes du point de vue technique, environnemental, économique et

sociale. Cette problématique implique de nombreuses disciplines comme la modélisation, le contrôle, la simulation et l'optimisation.

7.3 Optimisation multidisciplinaire

Dans certains problèmes, la démarche de conception fait intervenir beaucoup de disciplines, ce qui nécessite le développement des techniques de conception et d'optimisation permettant d'intégrer de façon efficace les différentes techniques développées et utilisées par chaque discipline. Ces techniques permettent en outre la recherche de compromis entre les différentes disciplines et d'aboutir à un système complet optimisé. Dans beaucoup de cas, les problèmes réels d'optimisation sont multi objectifs et certaines disciplines ont chacune sa propre fonction objectif à optimiser. L'amélioration des performances de calcul des algorithmes d'optimisation et le développement des méthodes d'approximation ont permis le développement de nouvelles méthodes de résolutions des problèmes multi objectifs. Ces méthodes permettent une exploration de l'espace de solution aboutissant non pas à une seule solution mais à un ensemble de solutions non dominées. Ainsi le concepteur a la possibilité de choisir la meilleure solution dans des délais raisonnables. De façon classique, un problème d'optimisation multidisciplinaire consiste à déterminer un vecteur des variables de conception du système qui minimise un ensemble de fonctions objectifs du système et satisfaisant simultanément toutes les contraintes.

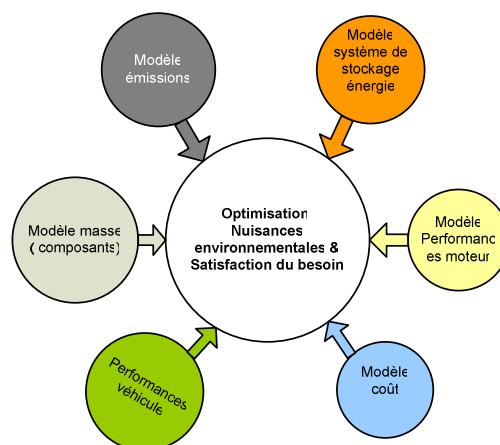


Figure 7.1: Système multidisciplinaire

Dans le cas qui nous concerne (Figure 7.1), l'objectif principal de l'hybridation des véhicules est de minimiser la consommation et les émissions de polluants tout en maintenant un niveau de performances acceptable. Pour répondre à ces critères, le choix des composants

mécaniques, électriques et ou hydrauliques du système hybride est crucial. Certains systèmes de stockage d'énergie répondent mieux aux exigences environnementales pendant que d'autres ont un bilan environnemental mitigé. En plus du choix des composants, l'efficacité des véhicules hybrides dépend également de la gestion optimale de l'énergie. De ce fait, le processus de conception des véhicules hybrides fait appel à plusieurs variables et paramètres incluant la configuration du véhicule, la taille et le type de composant (électrique, mécanique ou hydraulique) ainsi que les paramètres de gestion de l'énergie ou de contrôle. De plus, le concepteur fait face à un grand nombre de contraintes conflictuelles de conception et à des objectifs visant simultanément la minimisation des impacts sur l'environnement et la maximisation des performances et des critères de satisfaction des besoins de l'utilisateur en matière de transport. L'approche de conception des véhicules hybrides que nous proposons est basée sur l'optimisation multidisciplinaire et utilise les algorithmes génétiques et la méthode des surfaces de réponse.

Le déroulement de la démarche de conception est le suivant: sélectionner les composants mécaniques, électrique et hydrauliques (taille du moteur thermique, électrique et des systèmes de stockage de l'énergie) en vue de minimiser l'impact environnemental et de maximiser la satisfaction des besoins sous un certain nombre de contraintes liées aux choix des composants. Suite aux nombreux paramètres, les approches de conception basées sur les essais et erreurs sont lentes et lourdes. Par contre, une démarche de conception rationnelle basée sur la simulation numérique et les algorithmes d'optimisation est efficace. Mais étant donné que les fonctions réponses sont souvent bruitées et discontinues, les algorithmes d'optimisation méta-heuristiques sont préférables par rapport aux algorithmes de programmation mathématique basés sur le gradient (par exemple SQL ou SQP). Cependant, ces méthodes demandent beaucoup d'itérations et sont très coûteuses en temps de calcul pour des problèmes qui requièrent beaucoup de temps pour l'évaluation de la fonction objectif (simulation dans notre cas). A titre indicatif, pour avoir un résultat d'une simulation, il faut 3 à 5 minutes (tout dépend du cycle de conduite et de la puissance de l'ordinateur utilisé). Imaginons que pendant le processus d'optimisation, l'évaluation de la fonction objectif se fait par simulation directe. Pour faire 1000 itérations, il faudra 5000 minutes ou 4 jours. Ce qui est énorme chaque fois que l'on veut tester une solution donnée. Pour pallier ce problème, des techniques d'approximations telles que les surfaces de réponse sont adoptées. A partir de ces méta-modèles, l'ingénieur de conception peut explorer les différentes solutions et concevoir les motorisations aptes à rencontrer des objectifs/et contraintes en terme d'efficacité et trouver les meilleurs compromis entre arguments conflictuels. L'optimisation de la surface

ainsi construite par des algorithmes bien adaptés fournira les indicateurs (objectifs) et les paramètres (variables de décisions) optimaux.

Les méthodes d'optimisation mathématique sont souvent exploitées en deux étapes:

- Étape de modélisation: elle consiste à formaliser le problème étudié en un modèle d'optimisation.
- Étape de résolution: elle consiste à résoudre le modèle proposé.

7.3.1 Modélisation et simulation

7.3.1.1 Outil de simulation

Le logiciel ADVISOR est utilisé pour la simulation de la consommation, des émissions et des performances des véhicules. Les différents composants nécessaires pour construire la chaîne de traction du véhicule peuvent être sélectionnés à travers une interface utilisateur ou par des commandes externes. C'est cette dernière option que nous avons exploitée dans notre démarche en établissant des «drivers» et des «scripts» pour communiquer avec MATLAB et lancer l'exécution d'ADVISOIR. Parmi les nombreux composants de la chaîne de traction hybride, les moteurs (thermique et électrique) et les systèmes de stockage de l'énergie sont les plus critiques. Une sélection adéquate de ces composants influence significativement les caractéristiques et les performances du véhicule. Pour mettre en évidence l'effet de la taille des composants dans la conception optimale des véhicules hybrides, notre approche part d'une configuration de base et la taille des principaux composants est modifiée par un facteur d'échelle à chaque itération pendant le processus d'optimisation. Par exemple, pour les batteries, un pack de batteries est sélectionné au départ et le nombre de modules est chaque fois modifié. Dans ce cas, le facteur d'échelle est naturellement considéré comme une variable de conception. Un ou plusieurs cycles de conduite sont sélectionnés en relation avec l'application considérée.

7.3.1.2 Modélisation

Un modèle est une représentation schématique de comportement d'un phénomène physique. Il permet, en conception, d'évaluer les performances d'une solution par l'intermédiaire du calcul et de limiter les essais et le nombre de prototypes. Il s'agit de déterminer les valeurs des critères les plus pertinents de la conception. Les valeurs des grandeurs physiques qui sont des

fonctions des choix de conception sont déterminées en utilisant des modèles mathématiques qui font intervenir classiquement des équations et des variables. Les grandeurs de simulation peuvent être de plusieurs catégories:

- Les variables de conception sont des variables dont les valeurs permettent de distinguer les différentes solutions. Par exemple dans le cas des véhicules: la puissance maximale du moteur, le nombre de modules de batteries pour les véhicules hybrides électriques, etc.
- Les critères qui sont des fonctions de qualification des solutions. On peut citer par exemple la vitesse maximale d'un véhicule. Les critères dépendent des variables de conception. Ils peuvent représenter les fonctions objectifs dans le cadre de l'optimisation.
- Les variables intermédiaires (variables internes ou variables d'état) qui peuvent être liées à l'influence du milieu extérieur (température extérieure) ou au système lui-même (aérodynamisme).

Suite à un nombre très élevé d'évaluations de la fonction objectif nécessaires pour tout le processus d'optimisation et plus spécialement quand on utilise les algorithmes génétiques, la stratégie adoptée par l'optimisation structurale et multidisciplinaire est de recourir aux modèles approximatifs globaux ou locaux appelés surfaces de réponse [Roux 1998]. Les approximations remplacent les simulations directes pendant le processus d'optimisation et sont mises à jour au cours de certaines étapes majeures. Elles fournissent des relations explicites et permettent une évaluation rapide et moins coûteuse des fonctions objectifs. Cette approche évitera l'augmentation dramatique du temps de simulation lié à la procédure de résolution itérative. Concernant les approximations globales, l'idée de base qui sera utilisée ici est de construire un modèle approché à partir des valeurs de la fonction objectif (obtenues par simulation ou par calcul mathématique) relatives à un échantillon de points de l'espace de conception sélectionnés suivant des méthodes de plans d'expériences [David, 1998].

Le logiciel BOSS QUATTRO a été utilisé pour l'implémentation. C'est un outil d'aide à la conception paramétrique destiné à analyser et à optimiser l'influence des paramètres sur les réponses obtenues par des logiciels externes [Rodovic et Remouchamps, 1998]. Conçu dans une architecture ouverte, BOSS-QUATTRO transmet les paramètres et récupère les résultats à travers une couche d'interfaces appelées "drivers". Et pour commander l'exécution des tâches, il utilise des "scripts". Des liens avec des codes de simulation courants (SAMCEF, CATIA, NASTRAN et MS-EXCEL), sont disponibles à travers l'interface utilisateur pour explorer

l'espace de conception. Etant donné qu'ADVISOR est conçu dans l'environnement Matlab/Simulink et qu'aucun code de simulation avec MATLAB n'est prévu dans BOSS-QUATTRO, nous avons pu établir des "drivers" et des "scripts" permettant de communiquer avec MATLAB et de lancer ADVISOR pour la simulation. Chaque variable de conception possède des bornes de variation (domaine) définies par des limites inférieure et supérieure et qui sont souvent normalisées de -1 jusqu'à +1. Une fois que le plan d'expérience est choisi; BOSS-QUATTRO génère la table contenant toutes les configurations de paramètres à calculer. Chaque configuration de paramètres sera renvoyée vers le logiciel de simulation (ADVISOR) et les réponses (valeurs des différents critères) sont récupérées et stockées dans la base de données par BOSS-QUATTRO. Une fois que les réponses sont connues aux points de l'espace de conception correspondants au plan d'expérience, il peut être intéressant d'exploiter cette connaissance au travers de surfaces de réponses (voir Figure 7.2).

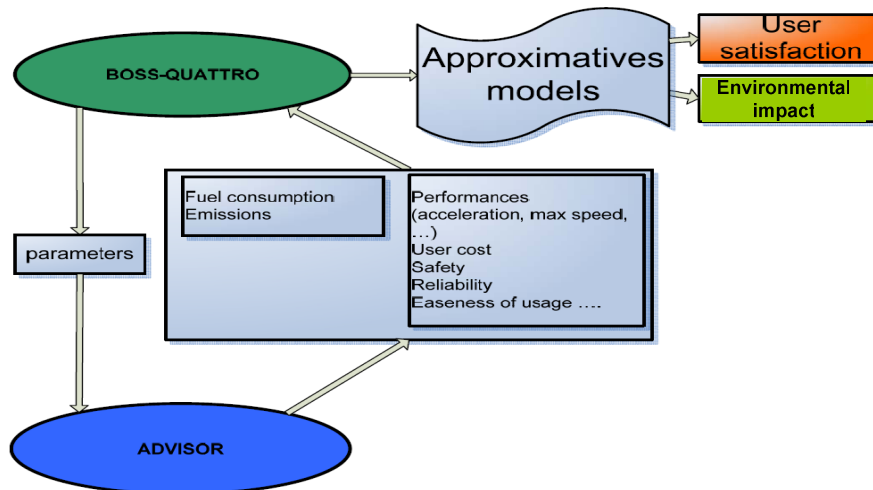


Figure 7.2: Déroulement de la méthode

Il existe plusieurs méthodes d'approximations et la plus populaire est celle basée sur les polynômes [Jin, 2001]. Des techniques d'analyse statistiques comme ANOVA (analyse de variance) sont utilisées pour vérifier la qualité du métamodèle (voir annexe 3). Un polynôme d'ordre approprié est ajusté sur un ensemble de points donnés de telle façon que la somme des carrés des erreurs soit réduite au minimum. Supposons N_p , le nombre de points de l'échantillon et N_c le nombre de coefficients du polynôme. L'erreur e_i correspondant au point (i) est calculée comme suit:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (7.1)$$

y_i est la valeur réelle de la fonction concernée et \hat{y}_i est la valeur prédite (estimée par le modèle). Il vient:

$$\sigma_a = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_p} e_i^2 / (N_p - N_c)} \quad (7.2)$$

Si N_t est le nombre de points additionnels pour tester la qualité de l'approximation, le carré moyen des erreurs σ_a est donné par:

$$\sigma_a = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_t} e_i^2 / N_t} \quad (7.3)$$

La capacité de prédiction du méta modèle est donné par le coefficient de détermination R_{adj}^2 définit comme suit:

$$R_{adj}^2 = 1 - \sigma_a^2 (N_p - 1) / \sum_{i=1}^{N_p} (y_i - \bar{y})^2 \quad (7.4)$$

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^{N_p} (y_i / N_p) \quad (7.5)$$

Pour une meilleure approximation, R_{adj}^2 doit être très proche de l'unité. En outre, dans cette analyse, des métamodèles de chaque critère de performances ont été développés. Ils sont ensuite agrégés dans les différentes fonctions si nécessaire.

1. La satisfaction de l'utilisateur

La satisfaction de l'utilisateur en matière de transport est basée sur plusieurs critères tels que le coût de transport, les performances du véhicule, la fiabilité, la sécurité, etc. Certains critères comme le coût ou les performances sont facilement quantifiables pendant que d'autres comme la fiabilité ou le confort sont qualitatifs de sorte qu'ils ne peuvent être évalués que par simple description. Dans le cadre de l'optimisation, seuls les critères quantifiables et modélisables sont pris en compte.

a) Les performances

Les performances concernent la vitesse maximale que peut atteindre le véhicule et les performances en termes d'accélération et de pente maximale franchissable. Ces performances peuvent être évaluées par simulation dans ADVISOR suivant les approches standards décrites dans la théorie classique sur le comportement dynamique des véhicules [Gillespie, 1992 et Wong, 2001]. Ceux-ci ont été rappelés à l'annexe F.

b) La sécurité

Elle peut être basée sur plusieurs critères comme les équipements de sécurité à bord du véhicule, les résultats des tests de sécurité (tests de chocs NCAP), le facteur de stabilité statique estimant la résistance au renversement isolé, etc. Comme nous comparons ici les mêmes véhicules qui diffèrent uniquement par rapport à leur système de propulsion, nous pouvons grossièrement supposer que le niveau de sécurité des passagers reste le même pour tous les véhicules. Mais la masse du véhicule constitue un facteur déterminant quant à la sécurité des autres usagers de la route surtout en cas de collision. En se basant sur une base de données statistiques (FARS: Fatal Analysis Reporting System), Hans [Hans et al., 1998] a établi la relation liant le ratio entre les masses des deux véhicules en collision et le ratio entre le nombre de dégâts (ou de morts) dans chaque véhicule:

$$\frac{F_2}{F_1} = \left(\frac{m_1}{m_2} \right)^4 \quad (7.6)$$

Les masses des deux véhicules sont représentées par m_1 et m_2 et les dégâts subis par les occupants de chaque véhicule par F_1 et F_2 . Par exemple, si le rapport de masse est de 2/1, la formule de Hans prévoit un ratio des dégâts de 16/1 entre le véhicule le plus léger et le véhicule le plus lourd. Cela signifie que pour deux véhicules en collision et dont la masse de l'un est le double de la masse de l'autre, à chaque dégât dans le véhicule le plus lourd correspond 16 dégâts dans le véhicule le plus léger. Ainsi donc, toutes autres choses restant égales, il nous apparaît important de baser l'évaluation de la sécurité sur le rapport de masse entre le véhicule considéré et un véhicule de référence de sa catégorie. Dans ADVISOR, la masse du véhicule varie en fonction des composants sélectionnés.

c) Le coût

Un simple modèle de coût a été développé et il comprend deux variantes: le coût d'utilisation et le coût d'investissement. Le coût d'utilisation est relatif à la consommation et à la maintenance du véhicule sur tout son cycle de vie.

$$C_{op} = c_{fuel} M_{fuel} + c_{maintenance} \quad (7.7)$$

M_{fuel} correspond à la quantité de carburant consommé sur tout le cycle de vie et est obtenue à partir de la consommation du véhicule sur le cycle de conduite, donnée en l/100km. Le coût d'investissement correspond essentiellement au coût des composants auquel il faut ajouter le coût de développement, la main d'œuvre, le coût de fabrication et le bénéfice. Le coût des composants est calculé comme suit:

$$C_{Comp} = c_{engine} P_{engine} + c_{elec} P_{elec} + c_{bat} N_{bat} + C_{fixed} \quad (7.8)$$

c_{engine} et c_{elec} représentent le coût par kW respectivement pour le moteur thermique et les composants électriques tandis que P_{engine} et P_{elec} sont les puissances nominales des moteurs thermique et électrique. Le coût par module du système de stockage d'énergie est représenté par c_{bat} et le nombre de modules par N_{bat} . Le coût fixe C_{fixed} est supposé être le même pour tous les véhicules de même catégorie et n'est donc pas pris en compte. Même si en réalité, l'augmentation de la taille des principaux composants (moteurs) entraîne celui des autres composants (la suspension, les freins, etc.) et le coût devait suivre. Le modèle de coût considéré est très simple car le coût n'est pas une fonction linéaire de la puissance et du nombre de batteries. Mais ce modèle permet de visualiser plus ou moins le coût quotidien qui correspond en grande partie à la consommation du véhicule.

d) Critères agrégés

Lorsqu'on travaille avec des méta heuristiques notamment les algorithmes génétiques, il se pose un problème de gestion des contraintes de conception. Pour y parvenir, l'une des stratégies est de définir une fonction agrégeant plusieurs fonctions objectifs ou plusieurs contraintes. La satisfaction de l'utilisateur peut ainsi être agrégée en effectuant une combinaison linéaire des différents critères avec des poids appropriés et des valeurs cibles pour la normalisation des résultats.

$$S\tilde{U} = w_1 \times \frac{\tilde{V}_{max}}{V_{cible}} + w_2 \times \frac{t_{cible}}{\tilde{t}_{acc}} + w_3 \times \frac{\tilde{p}_{max}}{P_{cible}} + w_4 \times \frac{m_{cible}}{\tilde{m}} + w_5 \times \frac{C_{cible}}{\tilde{C}} \quad (7.9)$$

Avec $\sum w = 1$

- \tilde{V}_{max} la vitesse maximale estimée du véhicule (à maximiser)
- \tilde{t}_{acc} temps d'accélération estimé (de 0 à 100 km/h) (à minimiser)
- \tilde{p}_{max} pente maximale franchissable estimée (à maximiser)
- \tilde{m} masse du véhicule estimée (à minimiser)
- \tilde{C} coût estimé (à minimiser)

L'usage des valeurs cibles comme référence permet également de normer les unités de mesure qui sont différentes d'un critère à l'autre. Pour plus de précision, la procédure standard dans l'optimisation multidisciplinaire est d'estimer chaque critère séparément en utilisant les approximations par la méthode des surfaces de réponse et de calculer ensuite la satisfaction de l'utilisateur par une combinaison linéaire des métamodèles.

2. Score environnemental

L'indicateur environnemental comprend différents impacts environnementaux des véhicules routiers répartis dans différentes catégories: effet de serre, écosystème, santé humaine, bâtiments (salissure). Il est calculé à partir des émissions et de la consommation (obtenues par simulation) du véhicule concerné et des émissions liées à la production des carburants et à la fabrication du véhicule (confère chapitre 6).

7.3.2 Résolution du problème d'optimisation multiobjectif

Deux grandes familles de méthodes d'optimisation multi objectif existent: les méthodes *a priori* et les méthodes *a posteriori*. Les méthodes à priori consistent à résoudre, sur base des indications du concepteur, un problème mono objectif dérivé du problème multi objectif initial. Selon le type d'information fourni, on distingue:

- les méthodes d'agrégation (le goal programming, la méthode de combinaison linéaire, méthodes des distances, le Compromise Programming, méthode du critère global...) dans lesquelles, les fonctions objectifs sont agrégées en une fonction unique ou fonction de préférence et les choix portent sur les valeurs que peuvent prendre les coefficients de pondération
- les méthodes de priorité (méthodes des contraintes et méthodes d'ordonnancement lexicographique) dans lesquelles une des fonctions objectifs, jugée prioritaire par le concepteur devient l'objectif et les autres constituent des contraintes supplémentaires.

Nous n'entrerons pas en détails pour ces méthodes, le lecteur intéressé peut consulter [Kelner, 2003]. L'optimisation de la fonction de préférence ainsi obtenue se réalise par les méthodes classiques notamment la méthode du gradient (pour autant que la fonction soit continue et dérivable) ou par une méthode métaheuristique. Le principal inconvénient de cette approche *a priori* est qu'au terme de l'étape de recherche, une seule solution optimale est trouvée. Pour avoir un autre point du front de Pareto, on doit à nouveau relancer le processus d'optimisation avec de nouveaux coefficients de pondération ou d'autres priorités des objectifs. Ce qui peut coûter cher en temps de calcul. De plus, si aucune information préalable sur la forme du front de Pareto n'est disponible, il est difficile d'avoir une répartition homogène des points le discrétisant.

Les méthodes *a posteriori* quant à elles fournissent, sans informations préalables, un ensemble de solutions optimales parmi lesquelles le concepteur choisit celle qui satisfait le mieux ses besoins. Cela fait gagner beaucoup de temps par rapport à la phase de modélisation des préférences pour les méthodes *a priori*. Les algorithmes génétiques [Montazeri-Gh et al., 2006] que nous avons utilisés dans ce travail constituent un bel exemple des méthodes *a posteriori*.

7.3.2.1 Concepts de base

Un problème d'optimisation multi-objectifs ou multicritères comprend généralement un vecteur X de n variables de décision, un vecteur Y de k fonctions objectifs et un ensemble de m contraintes. Les fonctions objectifs et les contraintes sont des fonctions des variables de conception. L'optimisation multicritères consiste donc à déterminer un vecteur X^* des variables de décision satisfaisant toutes les contraintes et optimisant le vecteur d'objectifs. Le vecteur d'objectifs contient des fonctions qui traduisent mathématiquement des critères de performance et sont généralement en conflit les unes par rapport aux autres. Elles ne peuvent pas être optimisées isolément. Optimiser Y revient donc à déterminer un compromis acceptable pour l'ensemble des fonctions objectifs:

Déterminer X^*

Optimisant

$$Y = f(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_{nfo}(X)]^T \quad (7.10)$$

Sous

$$h(X) = 0$$

$$g(X) \leq 0$$

$$X^i \leq X \leq X^s$$

L'ensemble de "satisfaisabilité" ou des configurations admissibles est défini comme l'ensemble des vecteurs de décision X qui satisfont toutes les contraintes:

$$Q_{ad} = \left\{ X \in \mathfrak{R}^n \mid X^i \leq X \leq X^s, h(X) = 0, g(X) \leq 0 \right\} \quad (7.11)$$

L'image de Q_{ad} dans l'espace des objectifs constitue l'ensemble des objectifs réalisables:

$$F_{ad} = f(Q_{ad}) \quad (7.12)$$

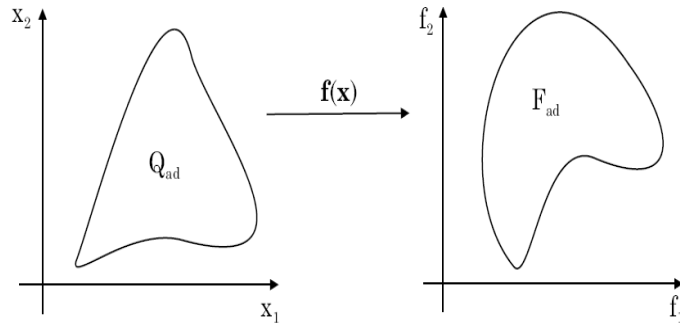


Figure 7.3: Q_{ad} (2 variables de conception) et F_{ad} (2 fonctions objectifs)

La solution idéale X^I est celle qui minimiserait simultanément toutes les fonctions objectifs:

$$f(X^I) = \min f_k(X), \forall k \in \{1, \dots, n_p\} \quad (7.13)$$

Dans l'espace des objectifs, l'objectif idéal est l'image de X^I :

$$f^I = f(X^I) = \min f(X) = \left[\min f_1(X), \dots, \min f_{n_{fo}}(X) \right]^T \quad (7.14)$$

Si X^I est admissible ($X^I \in Q_{ad}$), f^I constitue l'unique optimum recherché (Figure 7.4).

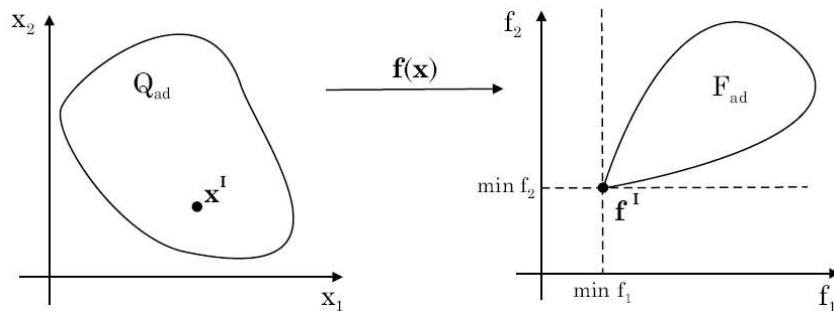


Figure 7.4: Configuration idéale située dans le domaine admissible

Mais cette situation est rare sinon inexistante en pratique. La solution idéale se trouve généralement en dehors du domaine admissible (Figure 8.5).

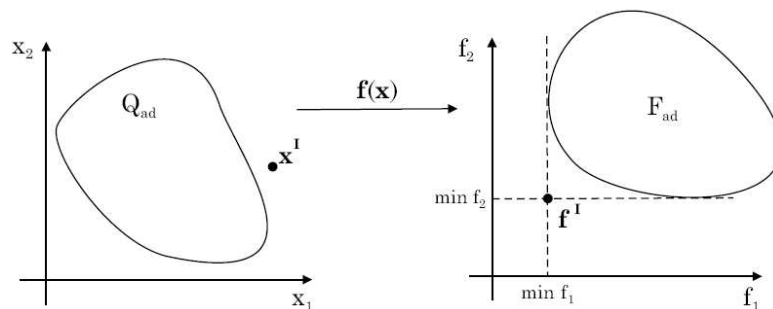


Figure 7.5: Configuration idéale en dehors du domaine admissible

En optimisation mono objectif, l'ensemble admissible (Q_{ad}) est totalement ordonné selon une fonction objectif f . Avec deux solutions X^A et X^B , on a soit $X^A \geq X^B$ soit $X^A \leq X^B$ le but étant de trouver une solution (ou des solutions) qui donne à l'unique fonction objectif f la valeur optimale. Par contre, lorsque plusieurs objectifs sont concernés, Q_{ad} est généralement non ordonné totalement mais l'est partiellement. Il convient donc de trouver une autre façon de trancher entre plusieurs configurations pour trouver celle qui constitue la solution optimale.

7.3.2.2 Optimalité de Pareto

Dominance de Pareto

En cas de minimisation, le vecteur $f^A = [f^A_1, \dots, f^A_{n_{fo}}]^T$ domine le vecteur $f^B = [f^B_1, \dots, f^B_{n_{fo}}]^T$ si les deux conditions suivantes sont simultanément remplies:

- $\forall k \in \{1, \dots, n_{fo}\} : f^A_k \leq f^B_k$
- $\forall k \in \{1, \dots, n_{fo}\}, \exists k \in \{1, \dots, n_{fo}\} : f^A_k < f^B_k$

Une solution X^* est non dominée au sens de Pareto, s'il n'existe aucune autre solution X admissible ($X \in Q_{ad}$) telle que $f(X)$ domine $f(X^*)$. Cela signifie qu'un vecteur de décision X^* est optimal s'il ne peut être amélioré sur aucun objectif sans dégrader au moins un autre objectif. Les solutions optimales X^* appelées aussi solutions non dominées ou non inférieures forment l'ensemble de Pareto Q_p inclus dans Q_{ad} .

$$Q_p = \{X^* \in Q_{ad} \mid \nexists X \in Q_{ad} : f(X) \leq f(X^*)\}$$

L'image de l'ensemble de Pareto dans l'espace des objectifs détermine l'ensemble des solutions non dominées (Figure 8.6) et s'appelle généralement le front de Pareto $F_p \subset F_{ad}$:

$$F_p = f(Q_p) = \{f(X^*) \in F_{ad} \mid f(X^*) \text{ est non dominée}\}$$

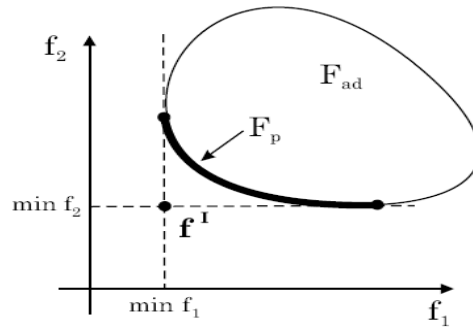


Figure 7.6: Front de Pareto homogène

Remarquons enfin que l'ensemble des solutions non dominées n'est pas *a priori* régulier. Seule les problèmes multi-objectifs ayant à la fois un espace de conception convexe et des fonctions objectifs continues peuvent générer un front de Pareto non convexe et ou discontinue. L'ensemble optimal de Pareto comprend la globalité des solutions optimales. Cependant, comme pour les problèmes à objectif unique, il peut y avoir plusieurs solutions non dominées qui constituent des optima locaux dans un certain voisinage. On parle d'ensembles optimaux locaux et globaux de Pareto (Figure 8.7).

Considérons un ensemble A de vecteurs de décision inclus dans Q_{ad} , l'ensemble A est dénommé ensemble optimal local de Pareto si et seulement si:

$$\forall X^A \in A : \nexists X \in Q_{ad} : X \leq X^A \text{ et } \|X - X^A\| < \varepsilon \text{ et } \|f(X) - f(X^A)\| < \delta$$

Avec $\|X - X^A\|$ et $\|f(X) - f(X^A)\|$, des métriques de distance et ε, δ , des nombres strictement positifs.

L'ensemble A est par contre dénommé ensemble optimal global de Pareto si et seulement si:

$$\forall X^A \in A : \nexists X \in Q_{ad} : X \leq X^A$$

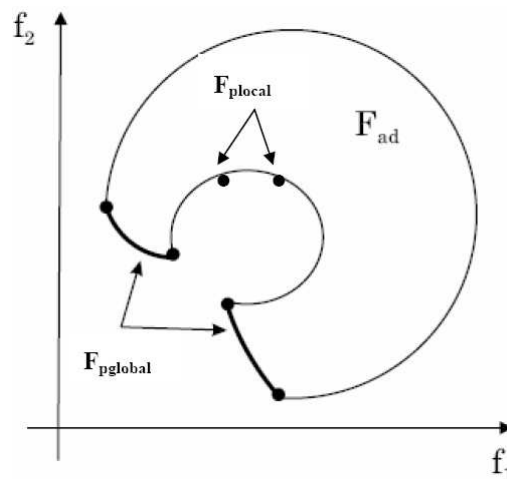


Figure 7.7: Irrégularité du Front de Pareto

La détermination analytique du front de Pareto est impossible dans la plupart des cas. La résolution du problème multi-objectif revient alors à discrétiser le front de Pareto en déterminant, par une méthode appropriée, une ou plusieurs solutions non dominées.

7.3.2.3 Les Algorithmes génétiques

Les techniques *a posteriori* procèdent par une optimisation simultanée de toutes les fonctions objectifs. Dans une première étape, un ensemble de solutions optimales est proposé à la fin de chaque processus et dans une deuxième étape, on utilise les préférences du décideur pour explorer cet ensemble et déterminer la (les) meilleure(s) solution(s). Les algorithmes génétiques fournissent un ensemble de solutions candidates qui s'améliorent de génération en génération et l'usage de l'opérateur de partage (sharing) rend le front de Pareto plus homogène. Dans sa forme basique, l'algorithme génétique opère à partir d'une population d'individus (solutions potentielles), chaque individu étant un vecteur encodé (chromosome) contenant des variables de décision (gènes). L'algorithme génétique suit un processus itératif basé sur les cinq principales étapes:

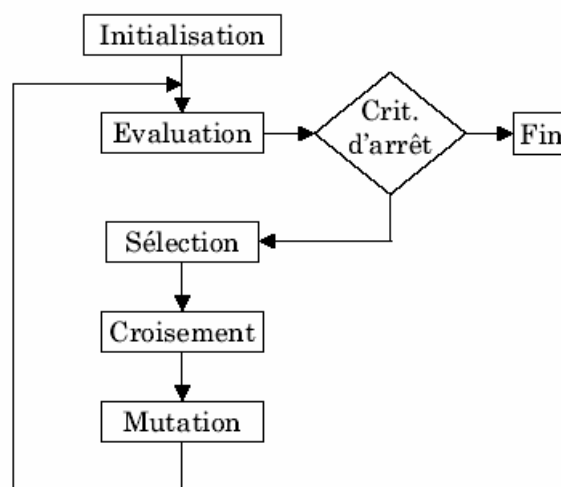


Figure 7.8: Déroulement d'un algorithme génétique

- Générer une population initiale P_0 ,
- Evaluation de la qualité de chaque individu p_i à satisfaire la fonction objectif
- Sélection des meilleurs individus pour les reproduire et créer une nouvelle génération
- Appliquer les opérateurs génétiques (croisement et mutation)
- Reproduire les étapes 2 à 4 jusqu'à atteindre les critères d'arrêt

Tout d'abord, une population initiale est générée de façon aléatoire et on procède ensuite à une évaluation de l'adaptation de chaque individu de la population. Il s'agit de calculer les valeurs des fonctions objectifs pour l'ensemble des points de l'espace d'état repris dans la population. On sélectionne alors les meilleurs individus, comme étant ceux qui minimisent les fonctions objectifs. Ces individus sélectionnés vont donc pouvoir se reproduire en combinant les chromosomes d'une paire d'individus parents au travers de l'opérateur de croisement. La mutation consiste à changer un ou plusieurs gènes de certains individus avec une faible probabilité. C'est ce mécanisme qui est à la base de la diversification dans l'exploration de l'espace de conception, et qui permet d'éviter les optima locaux. Une nouvelle population est ainsi créée et constitue la génération suivante, qui va suivre le même schéma itératif. Différents critères d'arrêt existent, dont les plus courants sont le nombre maximum d'itérations ou un seuil d'évolution minimal des fonctions objectifs.

Implémentations

Sans les détailler, les implémentations les plus utilisées sont:

- VEGA (vector evaluate genetic algorithm)
- NPGA (niche Pareto genetic algorithm)
- MOGA (multi objective genetic algorithm)
- NSGA (nondominated sorting genetic algorithm)

Elles ne diffèrent que de la façon dont elles prennent charge l'aspect multi objectif. Dans notre cas, nous avons choisi MOGA qui est disponible dans BOSS_QUTTRO [Radovic et al., 2002]. Cette algorithm généralise, au cas multi-objectifs, le schéma de sélection basé sur le classement et s'organise comme suit:

- A chaque génération, les individus reçoivent chacun un classement $r(i)$ défini comme suit: $r(i) = 1 + p(i)$ où $p(i)$ désigne le nombre d'individus j de la population qui possèdent un vecteur d'objectifs $f(j)$ dominant $f(i)$.
- Pour chaque individu une valeur intermédiaire de la fonction d'adaptation est déterminée à l'aide d'une fonction de son classement: $f'_{ad}(i) = f'_{ad}(r(i))$

- Une moyenne de $f'_{ad}(i)$ est effectuée sur l'ensemble de la population et permet de déterminer la valeur finale de la fonction d'adaptation de chaque individu.

$$f_{ad}(i) = N_{pop} \frac{f'_{ad}(i)}{\sum_{i=1}^{N_{pop}} f'_{ad}(i)}$$

- Un opérateur de sharing est appliqué aux individus de même classement et ce, dans l'espace des objectifs
- Une roue de loterie avec échantillonnage stochastique permet de réaliser le processus de sélection.

Chapitre 8: APPLICATIONS

8.1 Comparaison de l'effet des accumulateurs hydrauliques, des Batteries NiMH et des supercapacités sur l'ÉCOEFFICIENCE optimale des Bus hybrides

L'approche de conception des véhicules hybrides que nous avons proposée est basée sur l'optimisation multidisciplinaire et utilise les algorithmes génétiques et la méthode des surfaces de réponse. L'objectif est ici de faire une comparaison des différentes technologies de stockage d'énergie en opérant des choix optimaux de la configuration hybride et de la taille des composants mécaniques, électriques et hydrauliques en vue de l'optimisation de leur efficacité. Les applications considérées portent sur des bus hybrides lors de différents scénarios de conduite. Les bus hybrides hydrauliques et électriques sont tout d'abord simulés dans ADVISOR. Les émissions sont ainsi déterminées et on peut calculer l'impact environnemental de chaque véhicule. La satisfaction des besoins de l'utilisateur est basée sur les performances du véhicule et celles-ci peuvent être calculées également par simulation avec ADVISOR. Dans le cas du bus, l'utilisateur peut être à la fois le conducteur et les passagers. Puisque les performances du véhicule et la sécurité les intéressent tous. De plus, d'autres critères liés à la satisfaction du besoin comme le coût d'usage pour le propriétaire, la sécurité en cas de collision, sont évalués suivant des modèles simples que nous avons ajoutés dans ADVISOR. La procédure développée part d'une configuration de base (pour chaque type de véhicule) qui va être modifiée à chaque itération pendant le processus d'optimisation. Les modèles de base sont définis dans les paragraphes suivants et les performances des différents bus hybrides sont comparées à celles du bus conventionnel.

8.1.1 Modélisation

8.1.1.1 Bus conventionnel

Les modèles des trois bus à comparer (hybride électriques avec batteries NiMH ou supercapacités et hybride hydraulique) sont basés sur un modèle de bus conventionnel de type A300 de la société VANHOOL illustré à la Figure 8.1. C'est un bus classique de 12 mètres de long, utilisé dans le transport en commun en Belgique.



Figure 8.1: Bus Vanhool 300 [Vanhool, 2008]

Il possède 33 places assises et une capacité maximale de 110 passagers. Le bus possède un moteur MAN de 205 kW. Il est modélisé par une chaîne de traction conventionnelle se trouvant dans la librairie standard d'ADVISOR (Figure 8.2). La chaîne de traction est constituée d'un moteur thermique, un embrayage, une boîte de vitesse à 5 vitesses et une transmission.

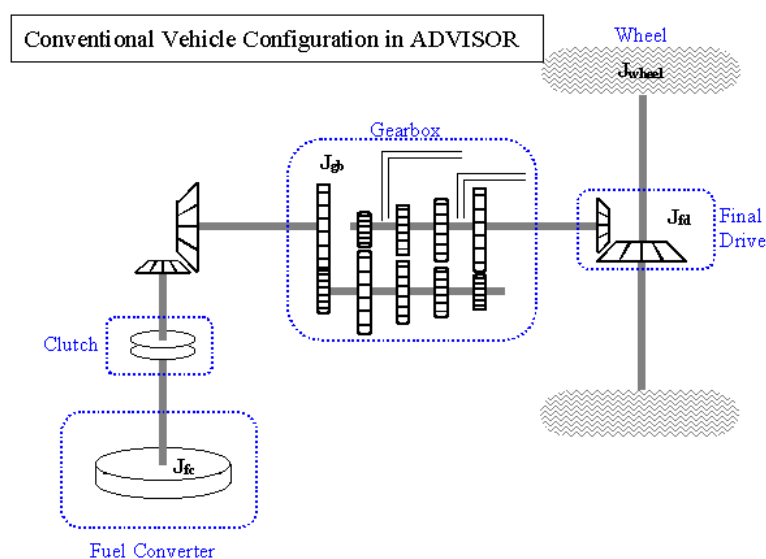


Figure 8.2: Configuration d'un véhicule conventionnelle dans ADVISOR

La gestion du moteur thermique et de l'embrayage est basée sur les principes définis par les variables reprises dans la Table 8.1. Le moteur doit rester au ralenti quand le véhicule est à l'arrêt ($vc_idle_bool=1$). Les décélérations s'effectuent avec la pédale d'accélérateur relâchée et l'embrayage embrayé ($vc_clutch_bool=0$). Les changements de rapport dépendent de la charge et non pas des vitesses fixées ($tx_spd_dep=0$) et la durée de changement de vitesse (gb_shift_delay) est nulle pour dire que les pertes dues au changement de vitesse ont été négligées.

Paramètres	Noms	Valeurs	Unités
Ralenti autorisé	vc_idle_bool	1	/
Vitesse de ralenti	Vc_idle_spd	68	rad/s
Embrayage débrayé lors des décélérations	vc_clutch_bool	0	/
Vitesse d'embrayage	vc_launch_spd	85	rad/s
Durée du changement de vitesse	gb_shift_delay	0	s
Changement de rapport à des vitesses fixes	Tx_spd_dep	0	/

Table 8.1: Paramètres de gestion du bus conventionnel dans ADVISOR

Comme aucune information sur le moteur original MAN n'était disponible, il a été substitué dans notre étude par un moteur diesel de 205 kW dont la cartographie est disponible dans ADVISOR et est reprise à la Figure 8.3.

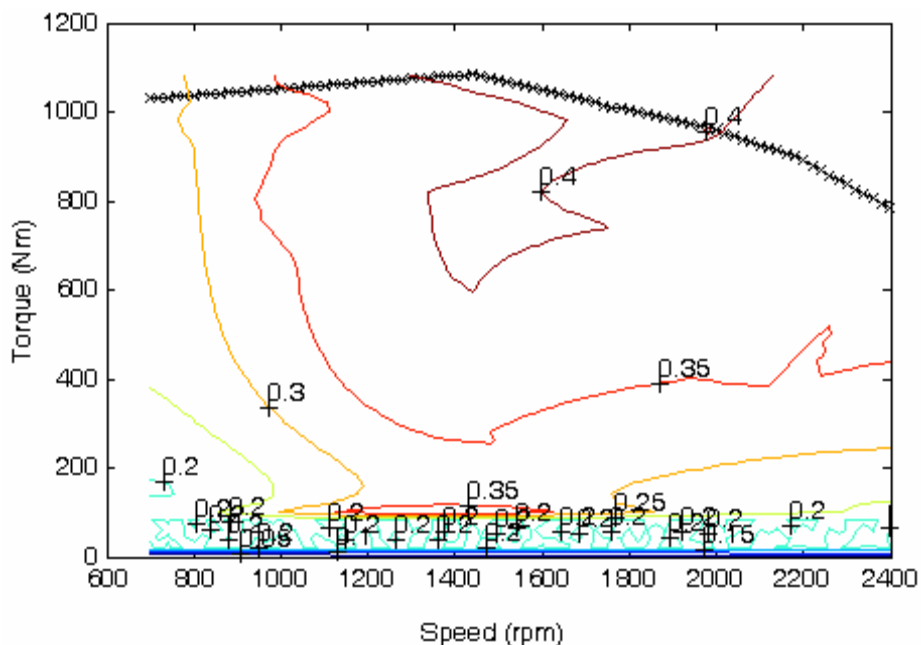


Figure 8.3: Cartographie du rendement du moteur thermique

La masse totale du véhicule pour la simulation est égale à la masse du châssis plus la masse de la cargaison. Suite à des fluctuations de fréquentation le long de la journée, le nombre de passagers a été fixé arbitrairement à 66 personnes en supposant que le bus est toujours rempli

à 60% en moyenne. Ce qui donne une masse de 4950 kg en raison de 75 kg par passager. Toutes ces caractéristiques et hypothèses seront maintenues pour les bus hybrides électriques et hydrauliques.

Moteur ICE	Puissance maximale	205 kW
	Rendement maximal	44%
Aérodynamiques	Surface frontale	7,24 m ²
	C _x	0,79
Pneumatique	Résistance au roulement	0,00938
	Rayon des roues	0,5 m
Masse	Masse	16242 kg

Table 8.2: Caractéristiques du bus conventionnel de référence

8.1.1.2 Bus hybride électrique avec batteries NiMH

Pour une comparaison objective, l'architecture hybride parallèle douce a été retenue. Comme on l'a déjà expliqué, les systèmes hybrides hydrauliques et électriques avec supercapacités sont plus adaptés à une architecture hybride parallèle quoi que l'architecture série puisse également être utilisée dans certaines applications particulières. Il faut développer un modèle de bus hybride électrique avec le même type de moteur thermique que le bus conventionnel à partir de configuration parallèle disponible dans ADVISOR.

2.6.1 Les batteries

Les batteries NiMH ont été retenues pour la simulation pour les mêmes raisons évoquées au chapitre 3. Le modèle des batteries NiMH sélectionné dans ADVISOR est représenté par une source de tension mise en série avec une résistance interne (Figure 8.2). Mais la caractéristique importante est la résistance à la charge/décharge en fonction de l'état de charge des batteries (Figure 8.3). Sur la Figure 8.3, la courbe de dessus représente la résistance à la décharge et celle en dessous la résistance à la charge. La tendance de la courbe suggère qu'il ne faut pas décharger trop la batterie car il sera difficile de la recharger. Il ne faut pas la charger trop non plus parce qu'il sera difficile de soutirer de l'énergie par la suite. Mais le cas des batteries NiMH ne pose pas de problème à ce niveau car la résistance charge/décharge est faible. La profondeur de décharge influe sur la durée de vie des batteries et permet de déterminer la quantité d'énergie nécessaire à la recharge et les émissions liées au système de production du courant pour le véhicule électrique. Mais dans notre modèle, c'est le moteur

thermique qui recharge les batteries et l'énergie consommée à cet effet se retrouve dans la consommation du véhicule. La profondeur de décharge correspond au seuil minimal de décharge fixé par les paramètres de contrôle. La table 9.4 donne un état de charge minimal (cs_lo_soc) de 0,4 qui correspond à une profondeur de décharge de 60%.

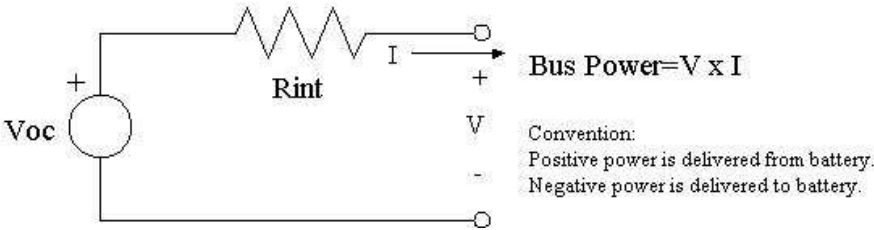


Figure 9.2: Modèle de batterie ADVISOR

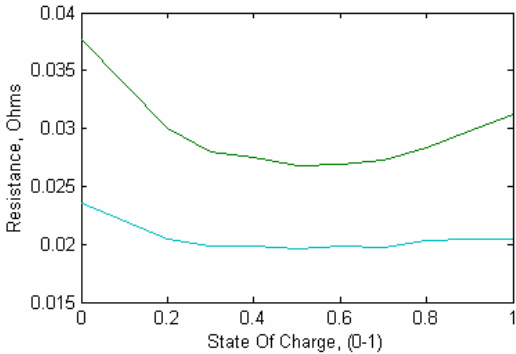


Figure 8.3: Résistance à la charge (bleu) et à la décharge (vert) des batteries NiMH

Type de batterie	Ni-MH – taille D (33/62)
Tension nominale des cellules	1,2 V
Capacité	6,5 Ah
Cellules par module	6
Masse d'un module	1,09 Kg

Table 8.3: Caractéristiques des batteries NiMH

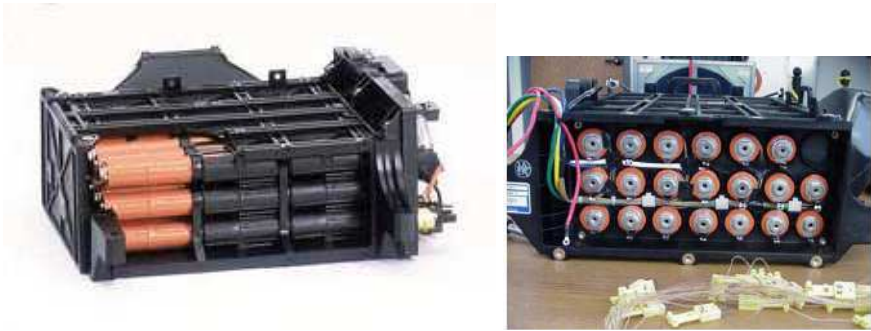


Figure 8.4: Pack de batteries NiMH de la Honda Insight

2.6.2 Le moteur électrique

Le moteur électrique sélectionné est un moteur asynchrone à courant alternatif dont les modèles basés sur le rendement sont également disponibles dans ADVISOR (Figure 9.5). Le modèle AC75 a été retenu et ses caractéristiques sont les suivantes:

- Puissance maximale: 75 kW
- Rendement maximal: 92%
- Poids: 91 kg

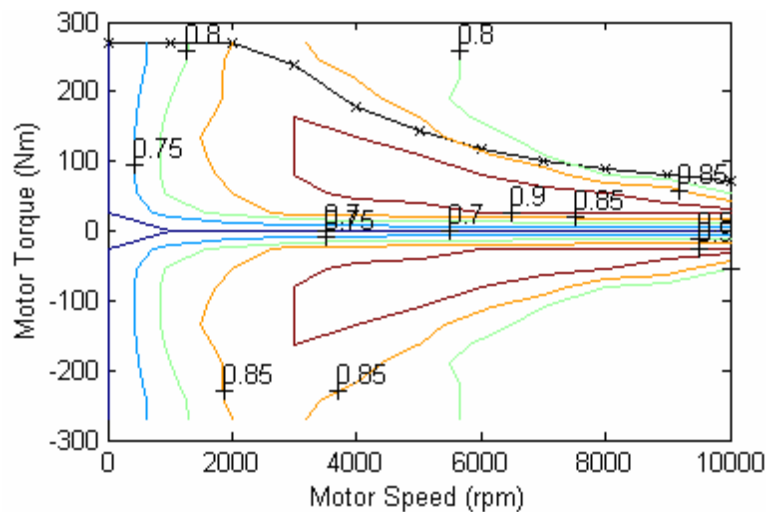


Figure 8.5: Courbes de rendement du moteur électrique AC75

2.6.3 Stratégie de gestion de l'énergie

La stratégie de contrôle sélectionnée est celle du système parallèle pour les véhicules hybrides électriques doux basée d'une part, sur l'utilisation du moteur électrique lorsque une puissance additionnelle est nécessaire, et sur le fait que le système essaie de maintenir la charge des batteries d'autre part. Le moteur électrique est utilisé dans plusieurs cas:

- Le moteur électrique fournit le couple nécessaire à la propulsion pour autant que la vitesse du véhicule ne dépasse pas un certain seuil.
- Le moteur électrique sera sollicité pour fournir le complément de couple si le couple exigé est plus grand que ce que peut fournir le moteur thermique sans dépasser sa plage de fonctionnement optimal.
- Le moteur électrique charge les batteries par freinage récupératif.
- Quand le moteur thermique tourne inefficacement à une vitesse donnée, il est coupé et le moteur électrique produit le couple exigé.

- Quand l'état de charge (SOC) est bas, le moteur thermique fournit un excès de couple qui est employé par la génératrice pour charger les batteries.

Les variables qui déterminent les limites de la stratégie de contrôle sont reprises à la Table 9.4 et leur influence sur le fonctionnement du moteur est montrée sur la Figure 9.6.

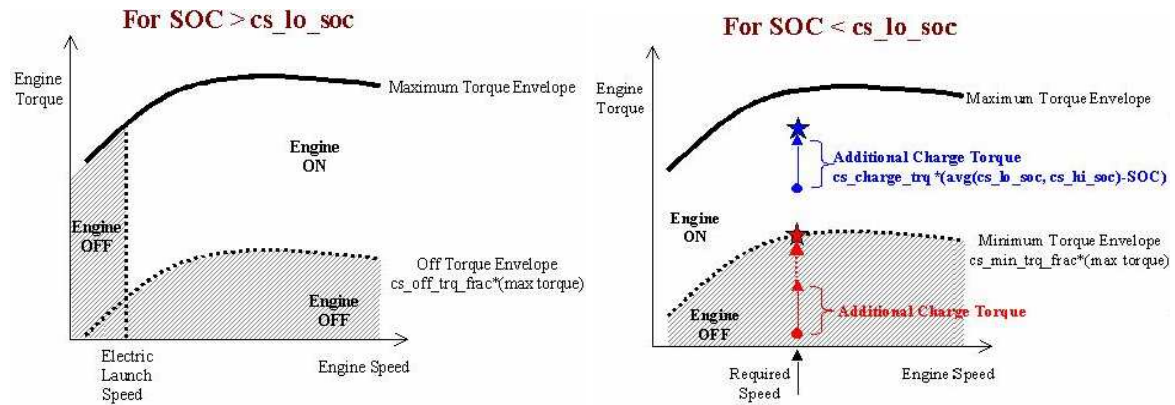


Figure 8.6: Influence de la stratégie de contrôle sur le fonctionnement du moteur

VARIABLE	DESCRIPTION	VALEURS PAR DEFAUT
cs_hi_soc	Limite supérieure de l'état de charge des batteries	0.7
cs_lo_soc	Limite inférieure de l'état de charge des batteries	0.4
cs_electric_launch_spd	Vitesse du véhicule en-dessous de laquelle la propulsion est assurée uniquement par le moteur électrique (zéro émissions)	0
cs_off_trq_frac	Couple en-dessous duquel le moteur est coupé si $SOC > cs_lo_soc$ (fraction du couple maxiaml)	0
cs_min_trq_frac	Couple minimal en-dessous duquel le moteur thermique peut charger les batteries via le moteur électrique (générateur) si $SOC < cs_lo_soc$	0.4
cs_charge_trq	Couple nécessaire pour recharger le pack de batteries lorsque le moteur électrique est allumé.	0.25. min (fc_max_trq)
vc_idle_bool	Variable booléenne pour autoriser (1) ou non (0) le ralenti	0

Table 8.4: Description des variables de la stratégie de contrôle électrique parallèle

Le fonctionnement en "tout électrique" n'a pas été autorisé ($cs_electric_launch_spd = 0$ et $cs_off_trq_frac = 0$) pour favoriser le fonctionnement en hybride doux où le moteur électrique est uniquement appelé pour l'assistance au moteur thermique pendant les phases d'accélération et à la relance. Le ralenti n'est pas non plus autorisé ($vc_idle_bool=0$), c'est-à-dire que le moteur est coupé à l'arrêt et est relancé par le moteur électrique.

8.1.1.3 Bus hybride électrique avec Supercapacités

Le modèle du bus hybride électrique avec supercapacités est semblable au modèle du bus hybride électrique avec batteries. La seule différence réside dans les caractéristiques des systèmes de stockage d'énergie. ADVISOR dispose d'un modèle de supercapacités. Nous avons opté pour le modèle Maxwell BMOD0018-390V qui est plus récent et dont les caractéristiques sont mieux connues notamment le coût (3200€ par module) [Maxwell, 2008]. De plus c'est un modèle conçu pour la traction des véhicules lourds. Les caractéristiques du module Maxwell BMOD0018-390V sont à la Table 8.5.

Item	Performance
Nominal operating Voltage [Vdc]	390 V
Nominal capacitance [F]	17.8F
DC serie resistance [mΩ]	65
Energy Available (Whr)	282
Self discharge [% of initial V]	50%
Maximum Continuous Current [A]	150 A
Max current [A]	950A
Lifetime 390V, RT [hours]	150000
Cycles 390 to 62.5 Vdc, RT [cycles]	1 000 000
Isolation Voltage [Vdc]	3500V
Min operating T [°C]	-40
Maximum Operating T [°C]	+65
Sizes (mm): LxWxH	1200x629x288
Weight (kg)	165

Table 8.5: Caractéristiques du module Maxwell BMOD0018-390V [Maxwell, 2008]

Un module du modèle Maxwell BMOD0018-39 correspond à 153 modules du modèle ADVISOR en termes d'énergie stockable.

8.1.1.4 Bus hybride Hydraulique

a. Dimensionnement des composants hydrauliques

Comme il n'y a pas de modèles des composants hydrauliques dans ADVISOR, des modèles électriques équivalents ont été développés à partir des composants électriques disponibles. Le rapprochement des systèmes hydrauliques et des supercapacités en termes de faible capacité de stockage d'énergie et d'une puissance énergétique élevée par rapport aux batteries suggère de dériver le modèle hybride hydraulique à partir du modèle hybride électrique avec supercapacités. Pour le dimensionnement, il nous faut trouver le nombre de modules de supercapacités correspondant à un accumulateur hydraulique en termes de quantité d'énergie

stockable et la masse équivalente est déterminée à partir de la masse des accumulateurs, des réservoirs et du volume de liquide nécessaires.

Accumulateurs:

Les accumulateurs Hydac [Hydac, 2006] de 15 gallons sont considérés dans cette analyse. Au chapitre deux, nous avons trouvé que 5 accumulateurs Hydac pouvaient stocker 770Wh avec un volume minimal de 200l d'eau, ce qui correspond à 4 réservoirs Hydac de 50l chacun. Un modèle de supercapacités est disponible dans ADVISOR et ses caractéristiques sont les suivantes:

- Puissance spécifique: 2.5kW/kg
- Énergie spécifique: 6Wh/kg
- Capacité: 2,1Ah
- Tension par cell: 2,5V
- Masse par module: 0.408kg

Le système hydraulique de 5 accumulateurs et 4 réservoirs pèse 1194 kg (voir chapitre 3). Pour stocker 0,770 kWh, il faut 129kg de supercapacités dans le modèle ADVISOR (770Wh/6Wh/kg). Ce qui fait 316 (129kg/0.408kg/module) modules de supercapacités dans le modèle ADVISOR ou 2 modules du modèle Maxwell BMOD0018-390V (on sait qu'un modèle Maxwell BMOD0018-390V correspond à 153 modules du modèle ADVISOR). Au final, un module de supercapacités dans le modèle ADVISOR correspond à 0,0158 (5/316) accumulateurs avec 0,01975 (5/4*0,0158) réservoirs. Le fluide considéré est l'eau parce que nous avons pu montrer la faisabilité technique d'un moteur pompe qui puisse fonctionner à l'eau [Duysinx P. et al. 2005] sans avoir besoin de lubrifiant. L'avantage d'utiliser l'eau comme fluide hydraulique au lieu de l'huile est lié au fait que l'eau est moins chère et est propre en matière de pollution de l'environnement.

Moteur pompe:

Concernant le moteur pompe, le modèle PE60 décrit au chapitre 3 a été considéré ici. Comme pour les moteurs pompes hydrauliques, les modèles des moteurs électriques disponibles dans ADVISOR sont basés sur le rendement. Le modèle du moteur/pompe est donc dérivé du modèle d'un moteur AC75 asynchrone disponible dans ADVISOR. La masse doit être corrigée car le moteur électrique est plus lourd que le moteur pompe. Par contre le rendement du moteur reste le même car le moteur pompe PE60 atteint un rendement de 92% à 300 bars

(voir caractéristiques au chapitre 3). Mais cette comparaison est très approximative, car le moteur électrique et le moteur pompe ont des caractéristiques différentes.

8.1.2 Critères de sélection

8.1.2.1 La satisfaction de l'utilisateur

1. Les performances

Les performances concernent la vitesse maximale que peut atteindre le véhicule et les performances en termes d'accélération et de pente maximale franchissable. Dans le cas des bus le temps d'accélération pour passer de 0 à 60 km/heure ne doit pas dépasser les 12s. La vitesse maximale et la pente franchissable à 48 km/h doivent être au moins de 100km/h et de 6% respectivement.

2. La sécurité

Comme expliqué au chapitre 8, le critère de sécurité a été modélisé par le ratio entre la masse du bus considéré et celle d'un bus de référence en cas de collision. La masse de référence a été fixée à 20 tonnes. Pour mettre en évidence l'influence des principaux composants sur la masse totale du bus, nous avons supposé que les trois bus transportent le même nombre de passagers et que la masse du châssis est la même. Ce qui n'est pas vrai en réalité car l'augmentation de la masse des composants (hydrauliques par exemple) nécessite une structure plus solide, donc plus lourde. Dans ADVISOR, la masse du véhicule varie en fonction de la taille et du type de composants sélectionnés.

3. Le coût

Pour évaluer le coût utilisateur, nous partons sur l'hypothèse que la durée de vie d'un bus est de 10 ans avec 500000 km [Vanhoof, 2008] en raison de 50000km par an. Le coût du fuel a été surestimé à 1,15 € le litre suite aux différentes fluctuations du prix du gasoil sur le marché durant l'année 2008. Le coût d'investissement correspond essentiellement au coût des composants auquel il faut ajouter le coût de développement, la main d'œuvre (15% du coût de chaque composant), le coût de fabrication (20% du coût de chaque composant) et le bénéfice (15% du coût de chaque composant). Le coût total de référence a été fixé arbitrairement à 500000€.

Composants	Description	Prix
Moteur/générateur	Solectria AC 75	60 (€/kW)
Moteur/Pompe	Parker PE60	30 (€/kW)
Moteur thermique	Diesel	100 (€/kW)
Stockage d'énergie	batteries NiMH	2200€/kWh ³
	Supercapacités Maxwell BMOD0018-390V	2000 €/kWh ⁴
	Accumulateur HYDAC + ses accessoires	1780 (€/accu) ⁵
Engrainage moteur		1000 €
Système de contrôle		4000 €

Table 8.6: Coût des composants [Molyneaux et al., 2003 et Andreu, 2006]

4. Critères agrégés

La satisfaction de l'utilisateur est calculée en agréant les estimations des différents critères de satisfaction. La technique de combinaison linéaire a été utilisée avec des valeurs cibles jouant le rôle de normalisation des critères et des poids pour tenir compte de l'importance de chaque critère. Les poids ont été déterminés suivant la méthode d'analyse multicritères AHP (Annexe A). La relation (7.9) qu'il faut maximiser devient donc:

$$S\tilde{U} = 0,1 \times \frac{\tilde{V}_{\max}}{100} + 0,1 \times \frac{12}{\tilde{t}_{acc}} + 0,1 \times \frac{\tilde{p}_{\max}}{6} + 0,33 \times \frac{20000}{\tilde{m}} + 0,37 \times \frac{500000}{\tilde{C}} \quad (8.4)$$

8.1.2.2 Score environnemental

Comme on l'a déjà expliqué au chapitre 5, les dommages environnementaux sont basés sur les résultats de simulation. Un indice global est calculé à partir des émissions de polluants et de la consommation.

8.1.3 Simulation et modèles approchés

Pour simplifier le temps de calcul inhérent au grand nombre d'itérations et de paramètres d'optimisation, notre démarche propose l'usage de modèle approché de tous les critères de sélection. Il s'agit de construire un modèle approché à partir des valeurs des fonctions objectifs (obtenues par simulation ou par calcul) correspondantes à un échantillon de points de l'espace de conception sélectionnés suivant les méthodes des plans d'expériences [David,

³ Confère annexe E, les coût estimés des batteries NiMH varient entre 700€/kWh et 1500€/kWh. Nous avons pris la moyenne et comme on suppose que les batteries seront remplacées une fois, le coût a été doublé.

⁴ Confère annexe E, les coûts estimés varient entre 1700€ et 2300€/kWh, nous avons pris la moyenne soit 2000€/kWh

⁵ Confère chapitre 3

1998]. Nous avons utilisé le factoriel de 3^è niveau (table 8.7 gauche) mais le central composite (table 8.7 droite) donne des résultats précis.

n° de série	Pengine	Pmotor	Nbat
1	150	50	400
2	200	50	400
3	250	50	400
4	150	75	400
5	200	75	400
6	250	75	400
7	150	100	400
8	200	100	400
9	250	100	400
10	150	50	600
11	200	50	600
12	250	50	600
13	150	75	600
14	200	75	600
15	250	75	600
16	150	100	600
17	200	100	600
18	250	100	600
19	150	50	800
20	200	50	800
21	250	50	800
22	150	75	800
23	200	75	800
24	250	75	800
25	150	100	800
26	200	100	800
27	250	100	800

n° de série	Pengine	Pmotor	Nbat
1	150	50	400
2	250	50	400
3	150	100	400
4	250	100	400
5	150	50	800
6	250	50	800
7	150	100	800
8	250	100	800
9	200	75	600
10	139	75	600
11	261	75	600
12	200	45	600
13	200	105	600
14	200	75	357
15	200	75	843

Table 8.7: Plans d'expérience: 3-level factorial (gauche) et central composite (droite)

On part d'une configuration de base et la taille des principaux composants est modifiée par un facteur d'échelle à chaque itération pendant le processus d'optimisation. Dans ce cas, le facteur d'échelle se substitue en une variable de conception. Les configurations de base pour les trois bus sont montrées à la Table 8.7.

		Bus hybride électrique Batteries	Bus hybride électrique supercapacités	Bus hybride hydraulique
Composants	Moteur thermique	Moteur Diesel: 205 kW, Cylindrée: 7,2 Rendement: 0,44	Moteur Diesel: 205 kW, Cylindrée: 7,2 litres, Rendement: 0,44	Moteur Diesel: 205 kW, Cylindrée: 7,2 litres, Rendement: 0,44
	Moteur électrique	Moteur AC reversible: 75 kW, rendement: 0,92	Moteur AC reversible: 75 kW, rendement: 0,92	Moteur AC reversible: 75 kW, rendement: 0,92
	Batteries/supercap /Accumulateurs hydrauliques	571 modules NiMH6: 8 × 71 modules en parallèle 26,7 kWh	306 modules (supercap_advisor) ou 2 modules (Maxwell BMOD0018-390V) 774Wh	306 modules (supercap_advisor) ou 5 Accumulateurs hydrauliques +4 réservoirs 774Wh
Aérodynamique	Surface frontale	7,24m ²	7,24m ²	7,24m ²
	Cx	7,9	7,9	7,9
Roues	Rr	0,00938	0,00938	0,00938
	Rayon effectif	0,5m	0,5m	0,5m
Masse		16912 kg	16673 kg	17505 kg

Table 8.8: Caractéristiques des configurations de base pour les Bus hybrides

Le cycle de conduite sélectionné pour cette application est le cycle SORT2. C'est un cycle de conduite dit "mixte", comportant une partie urbaine et une partie simulant une circulation périurbaine. Pour rappel, les caractéristiques principales de ce cycle sont les suivantes:

- temps: 179 s
- distance: 0,92 km
- vitesse maximum: 50 km/h
- vitesse moyenne: 18,4 km/h
- accélération maximum: 1,03 m/s²
- décélération maximum: - 0,8 m/s²
- nombre d'arrêts: 3

Pour les schémas d'approximation globale, nous avons utilisé typiquement les modèles du premier et du second ordre et leurs inverses sous forme de fonction polynomiale linéaire ou quadratique. Pour vérifier la précision du métamodèle, un coefficient de détermination (R_{adj}^2) a été calculé pour les six métamodèles construits. Comme on peut le constater à la Table 8.8, l'inverse du polynôme quadratique est le meilleur estimateur pour toutes les fonctions avec un coefficient de détermination proche de l'unité.

	Polynôme 1er ordre	Polynôme du 2ème ordre	Inverse du 1er ordre	Inverse du 2ème ordre
SE	0,8154	0,9714	0,77641	0,9714
V_{max}	0,89686	0,9534	0,9033	0,9572
Tacc	0,9025	0,9840	0,9228	0,9867
Pente max	0,9297	0,9818	0,9241	0,9824
Masse	1,0000	1,0000	0,9720	1,0000
Cout	0,9505	0,9918	0,96232	0,9959

Table 8.9: Coefficients de détermination R_{adj}^2

Sur la Figure 8.7, nous avons fait un test sur la consommation du bus hybride électrique avec batteries NiMH pour comparer les consommations du véhicule obtenues par simulation directe (ligne noire) et celles obtenues par approximations polynomiales du second ordre (ligne grise) pour onze points. On remarque que l'erreur d'approximation reste petite et que les approximations polynomiales sont adéquates pour notre problème. La Figure 8.8 montre deux des surfaces de réponse des différents critères de performance: la première (Figure 8.8 a) représente le temps d'accélération (de 0 à 60km/h) et la deuxième (Figure 8.8 b), la consommation du véhicule en fonction des puissances des deux moteurs (thermique et

électrique) dans les deux cas. Nous rappelons que pour une meilleure précision, les métamodèles sont construits séparément pour chaque critère.

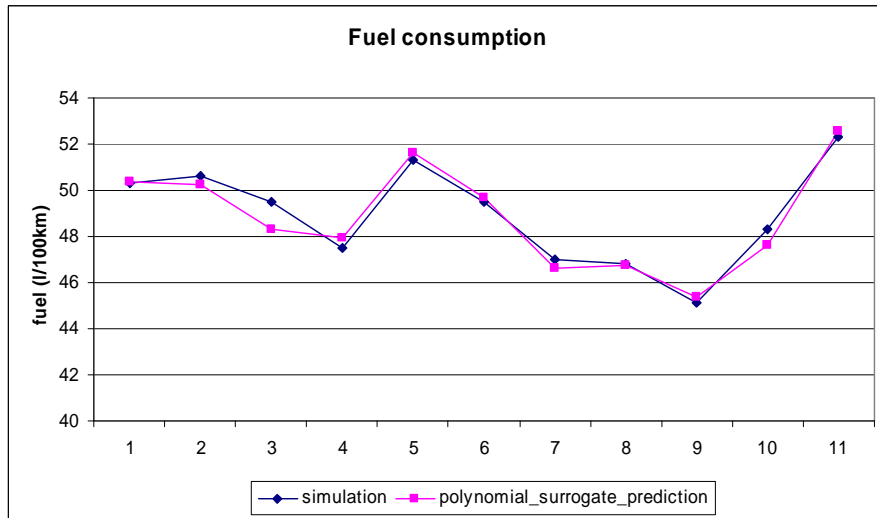


Figure 8.7: Consommations obtenues par simulation et par le méta modèle (Bus hybride électrique avec NiMH)

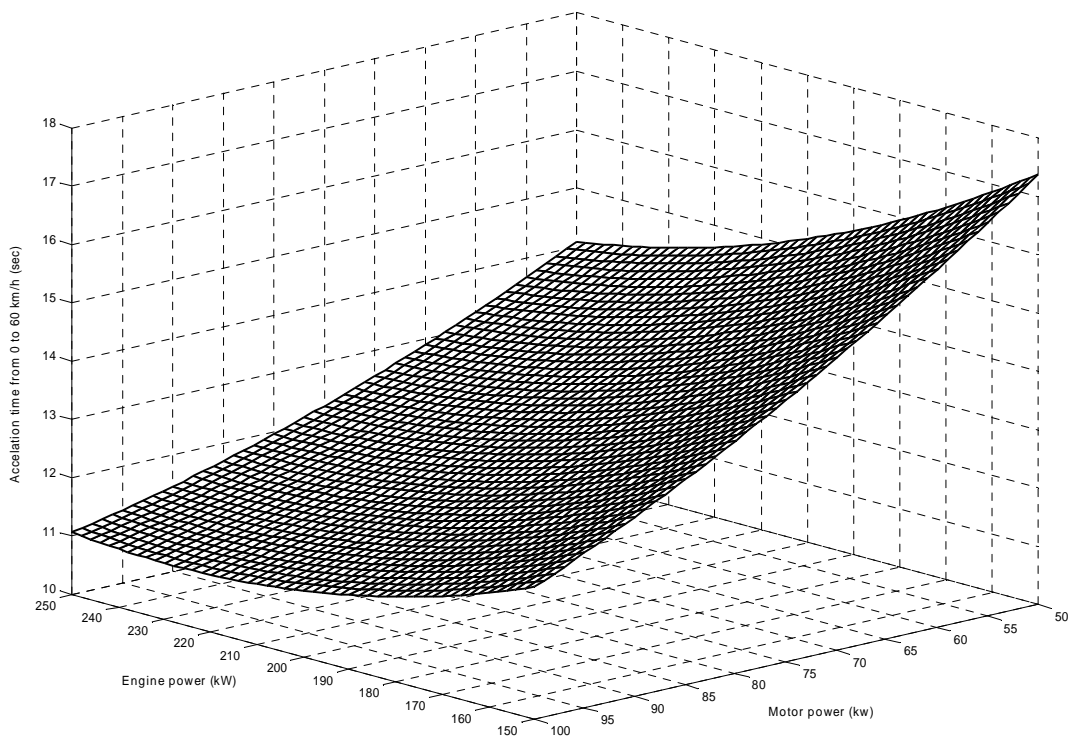


Figure 8.8 a: Surface de réponse du temps d'accélération (Bus hybride électrique avec NiMH) en fonction de la puissance du moteur à combustion et de la puissance de la machine électrique

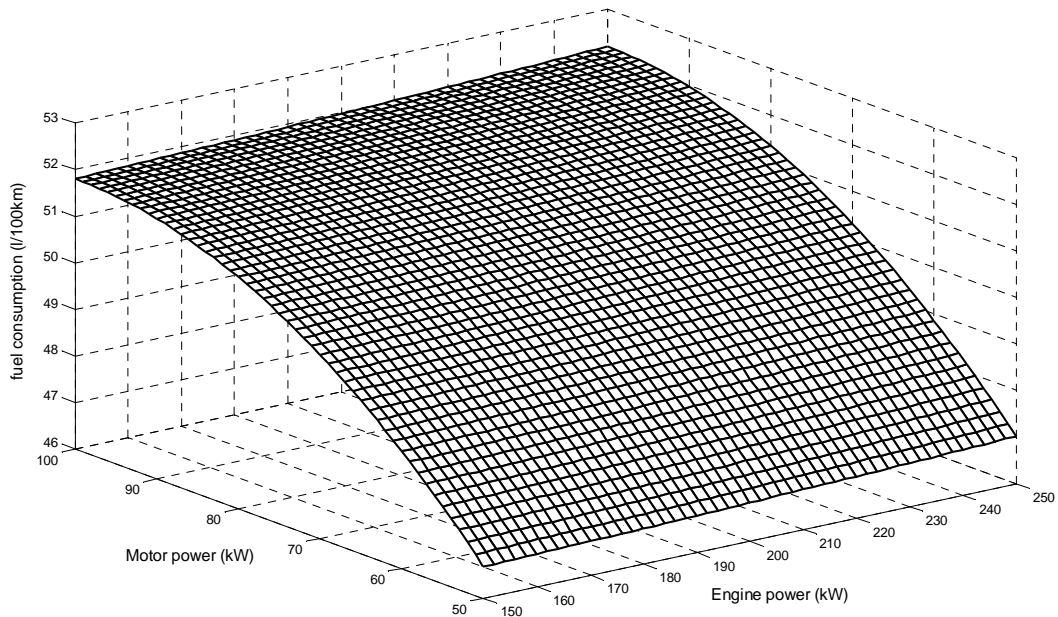


Figure 8.8 a: Surface de réponse de la consommation (Bus hybride électrique avec NiMH) en fonction de la puissance du moteur à combustion et de la puissance de la machine électrique

Dès lors que les métamodèles sont disponibles, le processus d'optimisation peut être mené avec moins de difficultés.

8.1.4 Formulation du problème d'optimisation

L'objectif est d'opérer un choix optimal des principaux composants du bus hybride en vue de minimiser les impacts sur l'environnement (maximiser ECOSCORE) et de maximiser la satisfaction de l'utilisateur sur le cycle de conduit UITP (SORT2) et sur le cycle newyorkais (CYC_NYCC). Comme on peut le constater dans les équations (8.14), nous avons deux objectifs et huit contraintes. L'exemple est simple pour une question de facilité, mais avec notre démarche, on peut faire autant de formulations qu'on veut avec plusieurs variables de conceptions (paramètres de contrôle et ou de configuration), plusieurs objectifs et contraintes (en éclatant l'indice de l'impact environnemental et la satisfaction de l'utilisateur) et en considérant plusieurs scénarios de conduite.

La formulation mathématique du problème de conception multi objectifs des bus hybride peut prendre la forme suivante:

Minimiser

$$F(x) = (f_1(x) = S\tilde{E}; f_2(x) = 1/S\tilde{U})$$

Avec

$$X = (P_{engine}, P_{motor}, N_{bat})$$

Sous contraintes

$$\tilde{t}_{acc} \leq 12s$$

$$\tilde{v}_{max} \geq 100kph$$

$$\tilde{p}_{max} \geq 6\%$$

$$\tilde{m} \leq 20000kg$$

$$\tilde{C} \leq 500000\text{€}$$

$$150 \leq P_{engine} \leq 250$$

$$50 \leq P_{motor} \leq 100$$

$$400 \leq N_{MB} \leq 800$$

(8.14)

8.1.5 Résultats

8.1.5.1 Cycle SORT2

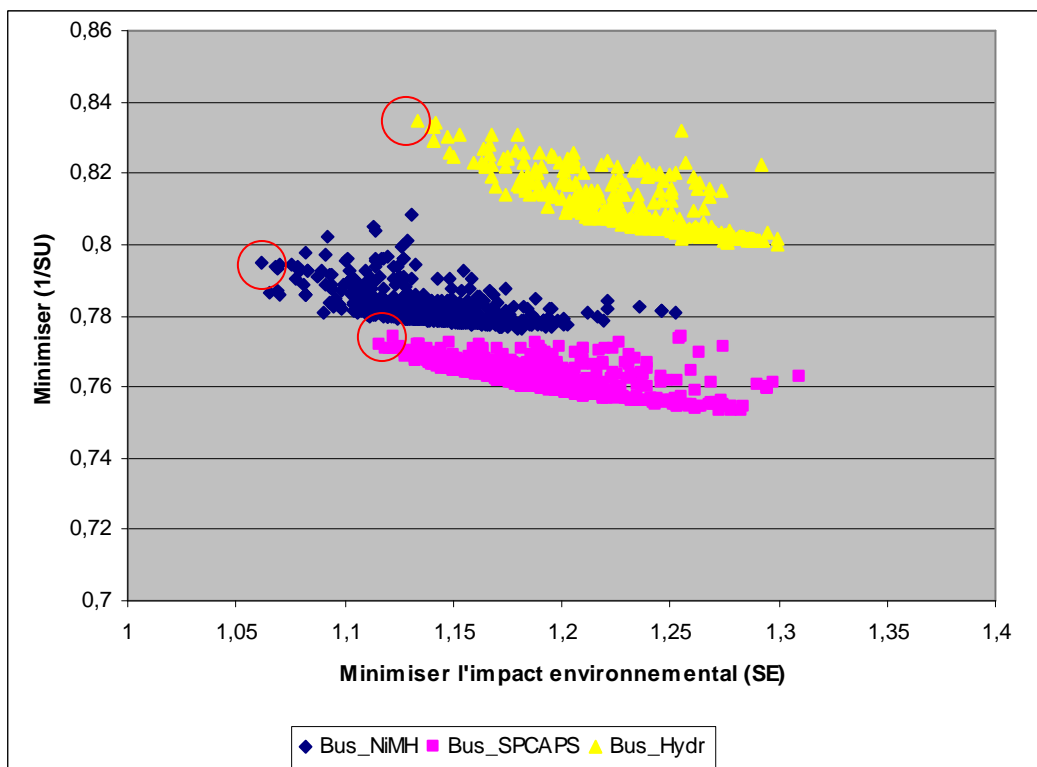


Figure 8.9: Résultats front de Pareto ECOSCORE/SATISFACTION sur le cycle SORT2

L'optimisation multiobjectif est réalisée avec l'approche MOGA. La population initiale est de 50 individus sélectionnés de façon aléatoire et uniformément répartis dans le domaine admissible. Le fait de sélectionner moins d'individus au départ accroît le risque de convergence prématurée. D'un autre côté, le choix d'un nombre élevé d'individus de la population initiale nécessite plus de générations avant d'avoir la convergence et donc beaucoup de temps de calcul. Il faut remarquer aussi que l'intervalle de variation des variables de conception n'est pas très large. Le choix de 50 individus pour la population initiale est donc raisonnable. Les principaux paramètres d'optimisation sont repris dans la Table 8.9:

Opérateur	Technique	facteur
Population initiale	-	50
Sélection	Par tournoi	
Croisement	Recombinaison intermédiaire étendue	0,9
Mutation	Mutation réelle (gaussienne)	0,1

Table 8.10: Paramètres d'optimisation

Après 50 générations, les valeurs optimales des fonctions objectives sont représentées par les spectres de points répartis en front de Pareto comme le montre la Figure 8.10.

Components	P _{ICE}	P _{motor}	Nombre de modules des systèmes de stockage
CONV_Bus	205		
HEV_NiMH	155	95	735 modules (34kWh)
HEV_SCAPS	188	84	591 (sc_advisor) ou 4 (modules Maxwell) 1,45 kWh
HHV	198	85	604 (sc_advisor) ou 10 (accumulateurs hydrauliques + 8 réservoirs) 1,48 kWh

Table 8.11: Configurations optimale qui minimisent l'impact environnemental sur le cycle SORT2

	Conventionnel	HEV_NiMH	HEV_SC	HHV
Fuel (l/100km)	62	45	49	52
Tacc (0 - 64km/h)	20	12	11	12
Vmax (km/h)	106	105	104	103,5
Pmax @ 48km/h	6,3	11	7,2	6,6
NO _x (g/km)	133	51,3	54,7	56
CO ₂ (g/km)	1 786	1 297	1 412	1 498
CO (g/km)	6,5	2,8	3,2	3,4
SO ₂ (g/km)	0,62	0,42	0,45	0,47
M (kg)	16 242	16 901	16 925	18 622
C (€ (5 ans))	394 500	392 922	322 163	351 909
SE (à minimiser)	1,43	1,07	1,12	1,13
SU (à maximiser)	1,08	1,25	1,30	1,20

Table 8.12: Performances des configurations qui minimisent l'impact environnemental sur le cycle SORT2

Les configurations optimales pour les trois technologies au regard d'un score environnemental (SE) minimal et en respectant les contraintes, sont montrées dans la Table 8.10 et sont entourées en rouge sur la Figure 8.9. Pour toutes les technologies hybrides, on constate un downsizing du moteur thermique. Pour le bus hybride électrique avec batteries NiMH, la puissance maximale du moteur thermique est descendue jusqu'à 155 kW (référence à 205kW du bus conventionnel) et celle du moteur électrique reste plus élevée (par rapport aux deux autres), car le système peut profiter de la grande quantité d'énergie que peuvent stocker les batteries pour exploiter au mieux le moteur électrique. Pour les deux autres (hybride électrique avec supercapacités et hybride hydraulique), la puissance maximale du moteur thermique est restée plus élevée surtout pour le bus hybride hydraulique pour compenser la faible quantité d'énergie stockée étant donné qu'on ne peut pas augmenter le nombre de modules au risque d'augmenter le poids du véhicule. Les puissances des moteurs électriques dans ces deux cas sont moins élevées par rapport au premier pour les mêmes raisons. La table 8.11 compare les performances des configurations optimales des bus hybrides qui minimisent le score environnemental à celles du bus conventionnel. La consommation et les émissions de NOx se sont améliorées dans les trois cas par rapport au bus conventionnel. Par conséquent, l'impact environnemental a été diminué. Les performances (pente maximale et temps d'accélération) des bus hybrides se sont améliorées. Cela est éventuellement dû au fait que les bus hybrides électriques ou hydrauliques profitent de l'apport de couple du moteur électrique/hydraulique pour gravir des pentes. En se référant à l'ensemble des points (Figure 8.9) représentant les solutions possibles du front de Pareto optimal, on constate que les performances atteintes par les trois technologies sont très proches pour les deux objectifs. Mais les batteries offrent de meilleures possibilités pour les impacts environnementaux en raison de la basse consommation du véhicule. Les supercapacités quant à elles ont un léger avantage quant à la satisfaction de l'utilisateur en raison du coût utilisateur le moins élevé. Le HHV est pénalisé par son poids (consommation élevée) mais il constitue une alternative au bus hybride électrique si le coût est pris en compte. De plus, la maturité industrielle, la longue durée de vie et l'absence de métaux lourds dans les composants hydrauliques les rendent compétitifs dans une niche.

Concernant la récupération de l'énergie de freinage, la quantité d'énergie récupérée par le système hybride hydraulique pendant le freinage est légèrement supérieure à celle récupérée par les autres systèmes. Selon les résultats de simulation, le bilan énergétique montre que le système électrique a récupéré 943kJ (262 Wh) pendant le freinage alors que le système

hydraulique en récupère 1117kJ (310 Wh) sur tout le trajet. Mais la consommation reste élevée pour le HHV en raison de son poids.

Il y a une routine ADVISOR qui impose que l'état de charge des systèmes de stockage d'énergie à la fin du trajet soit égal à l'état de charge initial. Sur la Figure 8.10 a, on remarque que le bus hybride avec batteries ne retrouve pas totalement son état de charge initial (rendement charge décharge moins élevé par rapport aux supercondensateurs: entre 70 et 80%). Par contre, le système électrique avec supercondensateurs et le système hydraulique (Figure 8.10 b et c) sont capables d'absorber rapidement l'énergie (rendement charge décharge élevé: plus de 95%) pour que les accumulateurs retrouvent l'état de charge initial.

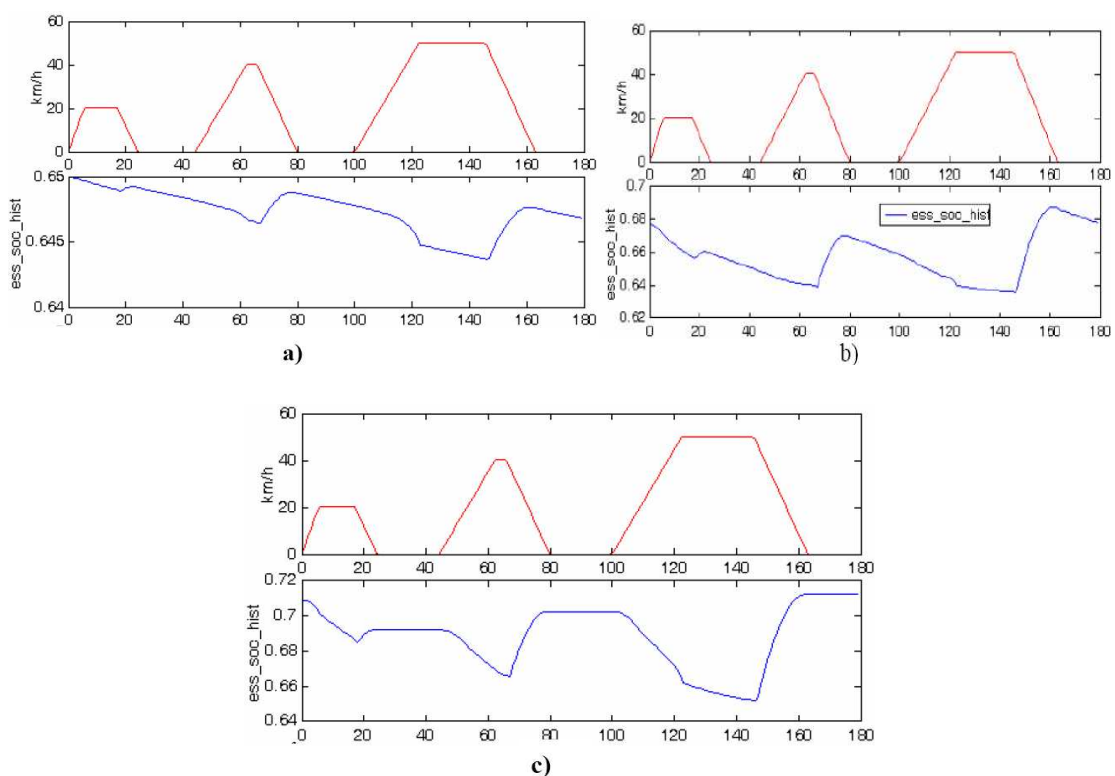


Figure 8.10: Variation de la charge pour le bus HEV_NiMH (a), HEV_SC (b) et HHV (c) sur le cycle SORT2

Il faut noter que ses résultats pourraient changer si les paramètres de contrôle du moteur thermique sont optimisés. Mais, on remarque tout de même, sur la figure 8.11, que dans le cas des véhicules hybrides électrique et hydraulique, les points de fonctionnement du moteur thermique ne s'écartent pas beaucoup de la zone de rendement maximal. Ils sont même concentrés dans la zone de rendement maximal pour le bus hybride électrique (figure 8.11 b).

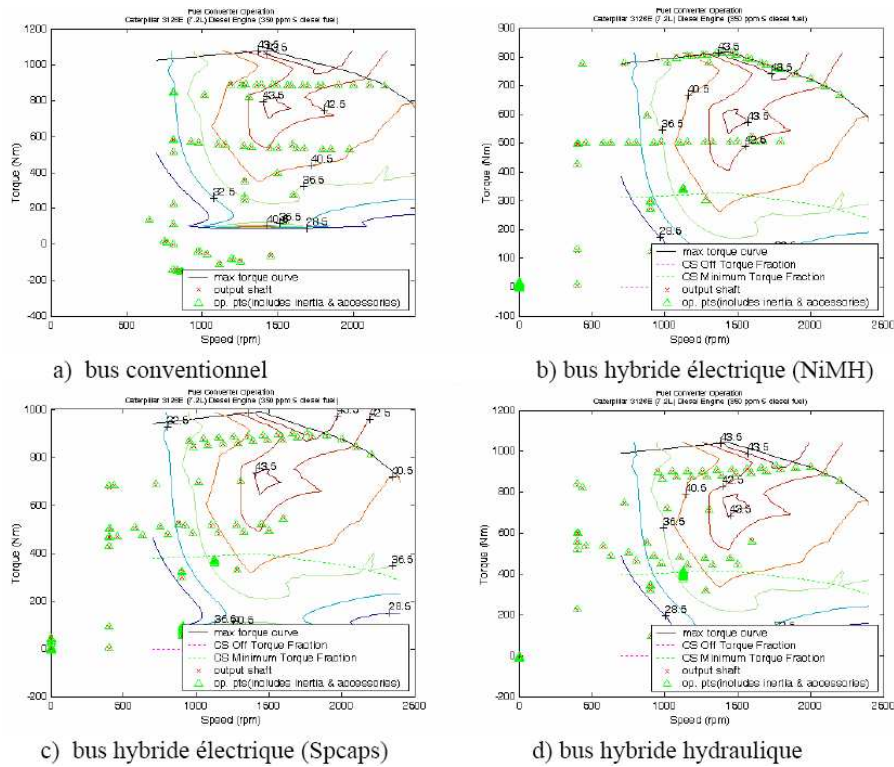


Figure 8.11: Points de fonctionnement du moteur thermique

8.1.5.2 Cycle Newyorkais CYC_NYCC

Les conclusions précédentes en rapport avec le cycle SORT2 nous conduisent à dire que le système hybride hydraulique et les supercapacités seraient plus profitables sur des cycles de conduite comportant des arrêts fréquents et des décélérations/accélération plus fortes. Pour cela, nous avons fait l'optimisation des trois technologies de bus (en partant des mêmes configurations de base de la Table 8.7) sur le cycle Newyorkais (CYC_NYCC: New York City Cycle) (voir Figure 8.14) représentant le trajet d'un bus dans la ville de New York. Ce cycle comporte un grand nombre d'accélération/décélération et surtout des arrêts fréquents. Sa vitesse maximale est plus basse. Les fréquents cycles d'accélération/arrêt permettraient de mettre en évidence si le système hybride est réellement capable de récupérer plus d'énergie pendant le freinage. La Figure 8.13 montre les nuages de points représentant les solutions réalisables qui satisfont les contraintes. La grande surprise est que le bus hybride hydraulique occupe la meilleure position en ce qui concerne l'impact environnemental car il consomme moins que les autres bus. En effet, la Table 8.12 reprend les solutions optimales qui minimisent les impacts environnementaux et la Table 8.13 compare les résultats des trois technologies par rapport au bus conventionnel. Mais le moteur thermique a été

surdimensionné au-delà des 300kW. Rappelons que le moteur de référence dans ADVISOR est un moteur de 205 kW. Selon ADVISOR et pour éviter de s'écarter trop des caractéristiques du moteur de référence, le facteur d'échelle doit être compris entre 0,7 et 1,25, ce qui fait que le moteur thermique doit être dimensionné entre 150 kW et 260 kW. Mais comme le cycle newyorkais est très exigeant, nous avons commis l'erreur de dépasser les limites et de dimensionner le moteur thermique jusqu'à 330 kW pour que le véhicule conventionnel puisse suivre le cycle. Pour les bus hybrides, le moteur thermique reste dans la marge du tolérable. Au regard des résultats donc, le bus hybride hydraulique consomme moins que les autres (82l/100km contre 88l/100km pour le HEV_SC et 89l/100km pour le HEV_NiMH). On a les mêmes constatations que pour le cycle SORT2 concernant la récupération de l'énergie de freinage. L'énergie récupérée par le bus hybride hydraulique (3728 kJ ou 1035Wh) sur tout le trajet est légèrement supérieure à celle récupérée par le HEV_SC (3540kJ ou 983 Wh) et le HEV_NiMH (3525kJ ou 979 Wh). La littérature rapporte que l'intérêt des véhicules hybrides hydrauliques réside dans leur capacité de générer et de récupérer plus d'énergie pendant le freinage mais l'exemple ne le montre pas clairement, la différence avec le bus hybride électrique est faible. Pour le bus HEV_NiMH, les batteries ne retrouvent pas l'état de charge initial à la fin du trajet (Figure 8.14 a) alors que dans les deux autres cas, les états de charge initial et final sont les mêmes (Figure 8.14 b et c). Le bus HHV est légèrement meilleur que le bus HEV_SC dans la récupération de l'énergie de freinage alors que le modèle hydraulique a été dérivé à partir du modèle de supercapacités. Cette différence est due à la différence de poids. En effet, l'énergie récupérée dépend non seulement des vitesses initiale et finale (arrêt complet) mais aussi de la masse du véhicule.

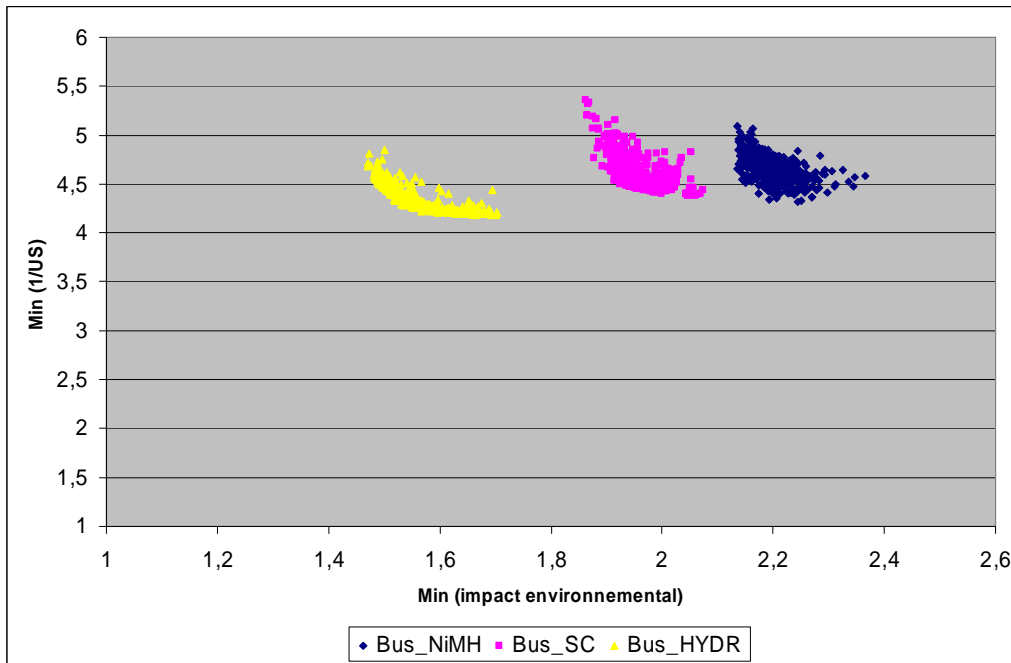


Figure 8.13: Résultats front de Pareto impact environnemental /SATISFACTION sur le cycle CYC_NYCC

Components	P _{ICE} (kW)	P _{motor} (kW)	Nombre de modules des systèmes de stockage
CONV_Bus	330		
HEV_NiMH	271	83	800 modules (37,44 kWh)
HEV_SCAPS	264	106	627 (sc_advisor) ou 4(modules Maxwell) : 1,53kWh
HHV	245	98	540(sc_advisor) ou 7(accumulateurs hydrauliques + 8 réservoirs): 1,32kWh

Table 8.13: Configurations optimale qui minimisent les nuisances environnementales sur le cycle CYC_NYCC

	Conventionnel	HEV_NiMH	HEV_SC	HHV
Fuel (l/100km)	98	89	88	82
Tacc (0 - 64km/h)	14	9,8	7,8	11
Vmax (km/h)	105	105	106	105
Pmax @ 48km/h	11	14	10	8
NOX (g/km)	346,15	288	239	113
CO2 (g/km)	2 557	2 323	2 296	2 140
CO (g/km)	7	2,52	2,7	2,54
HC (g/km)	186,27	223	244	174
SO2	0,98	0,88	0,88	0,82
M (kg)	16 731	17 409	17 221	18 583
C (€)	661 500	660 925	651 160	555 607
Impact environnemental	2,4	2,14	1,9	1,47
SU	5,6	6,5	6,2	5,4

Table 8.14: Performances des configurations qui minimisent les nuisances environnementales sur le cycle CYC_NYCC

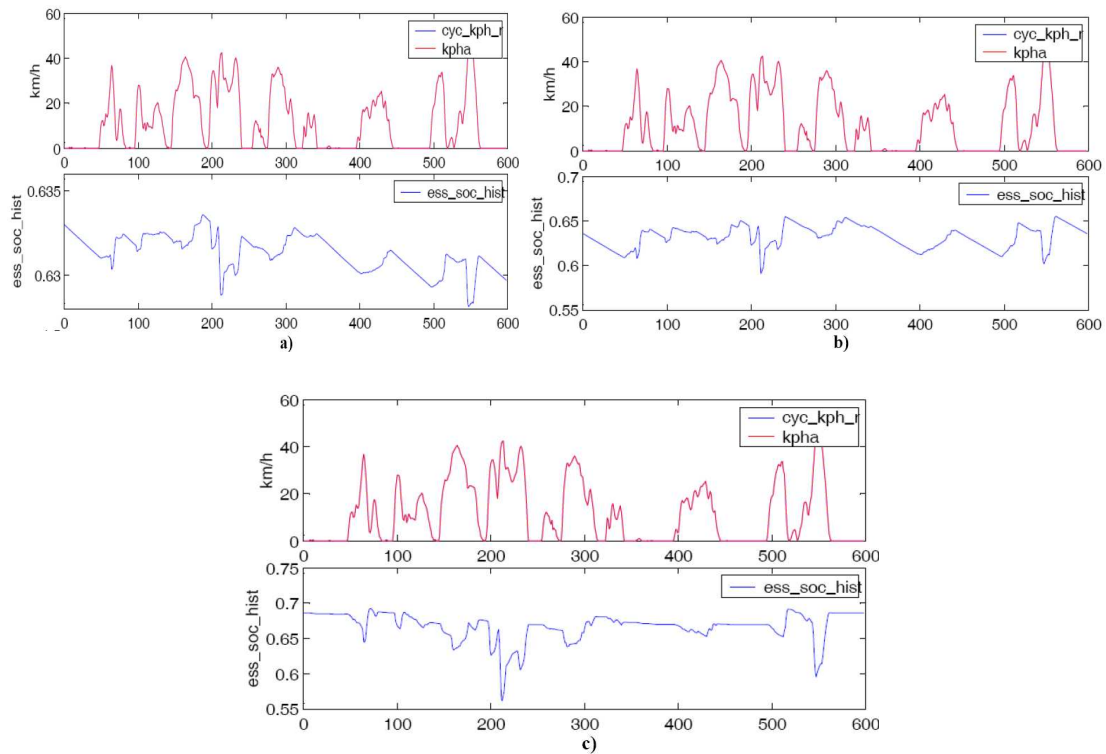


Figure 8.14: Variation de la charge pour le bus HEV_NiMH (a), HEV_SC (b) et HHV (c) sur le cycle CYC_NYCC

Remarque:

- Les résultats de cet exemple sont douteux, car nous ne saurions pas expliquer pourquoi le bus hybride hydraulique consomme moins de carburant alors qu'il a une masse très élevée. La quantité d'énergie récupérée pendant le freinage n'est pas très différente dans les trois cas pour justifier cette différence de consommation. Cependant, cela prouve que notre méthode d'optimisation automatique permet de trouver des solutions difficiles à déceler avec la seule intuition humaine.
- Dans cet exemple, nous n'avons pas considéré la pondération de la satisfaction de l'utilisateur.

8.2 Optimisation de l'Ecoefficiente d'une voiture hybride électrique moyen de gamme utilisant différentes technologies de batteries: la VW Golf 5

Cette deuxième application a pour but de mettre en évidence l'influence des différentes technologies de batteries sur l'Ecoefficiente des voitures de passagers hybrides électriques. Elle portera sur une voiture moyen de gamme: la Golf 5. Il s'agit de comparer les configurations optimales (série, parallèle) de la Golf 5 hybride électrique qui optimisent l'Ecoefficiente en utilisant différentes technologies de batteries. Les technologies de batteries les plus connues et qui sont déjà commercialisées à grande échelle ont été considérées dans cette application. Il s'agit des batteries au plomb, des batteries au lithium-ion, des batteries nickel Cadmium et des batteries Nickel métal hydrure. Les différents modèles de voitures hybrides électriques seront développés sur base du modèle conventionnel de la Golf 5 en utilisant le même moteur thermique. Les performances des voitures hybrides électriques seront comparées à celles de la voiture conventionnelle de même type.

8.2.1 Modélisation et simulation

8.2.1.1 La Golf 5 conventionnelle

La voiture de référence est une Golf 5 classique avec un moteur à essence de 55kW de puissance nominale et un rendement maximal de 35%. Le véhicule possède les caractéristiques suivantes.

- $CD = 0,31$
- FA (surface frontale) = $1,98 \text{ m}^2$
- Empattement = $2,6 \text{ m}$
- Coefficient de résistance au roulement = $0,008$
- Rayon effectif de roulement des roues = $0,31 \text{ m}$

- Masse totale: 1129kg



Figure 8.15: La Golf 5

Elle est modélisée, dans ADVISOR, par un modèle conventionnel tel que décrit dans l'application précédente (Figure 8.2). Le moteur thermique de 55kW est modélisé par un autre moteur de 41 kW et dont la cartographie du rendement (Figure 8.16) est disponible dans ADVISOR. La simulation dans ADVISOR sur le cycle européen normalisé (CYC_ECE_EUDC) donne une consommation de 6,6 l/100km (le constructeur donne la même consommation de 6,6 l/ 100km).

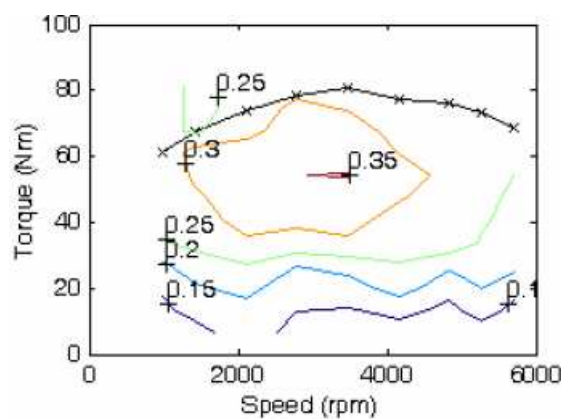


Figure 8.16: Cartographie de rendement du moteur thermique

8.2.1.2 La Golf 5 hybride électrique

Les configurations hybrides électriques sont basées sur le modèle conventionnel avec le même moteur thermique et les mêmes caractéristiques extérieures du véhicule. Les modèles des composants électriques (moteur électrique, batteries) seront les mêmes pour les configurations série et parallèle sauf qu'il faut ajouter un générateur pour la configuration série. La configuration et la stratégie de contrôle du système parallèle restent les mêmes que celles décrites dans l'application précédente sauf qu'ici le moteur électrique ne se limite pas seulement à l'assistance mais peut aussi mouvoir le véhicule. Pour les hybrides électriques séries, nous avons gardé la configuration série disponible dans ADVISOR (Figure 8.17). On

n'a pas besoin de boîte de vitesse pour la configuration hybride série. La boîte de vitesse sur la figure 8.17 est une boîte de vitesse par défaut à vitesse unique. Elle n'a pas d'effet négatif, car pendant la simulation, le rendement et le rapport de transmission sont égaux à un, les forces d'inertie et de frottement sont mises à zéro.

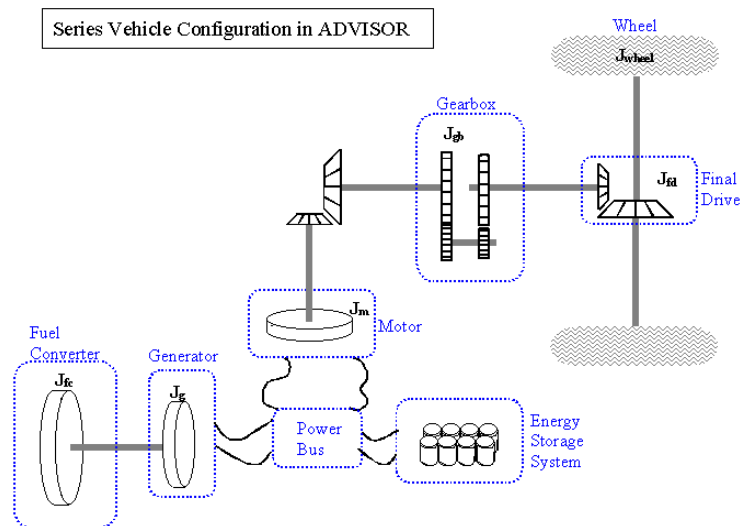


Figure 8.17: Configuration Hybride Série dans ADVISOR

La stratégie de contrôle de l'hybride série détermine le couple et la vitesse de rotation du moteur à combustion interne en fonction de la demande du générateur et de l'état de charge des batteries. La modélisation de cette fonctionnalité dans ADVISOR, offre une certaine flexibilité de fonctionnement au moteur thermique:

- il peut être éteint si les batteries sont suffisamment chargées,
- il peut être rallumé si la puissance requise est élevée,
- il peut également être rallumé si l'état de charge des batteries est trop bas.

1. Le moteur électrique

Pour le moteur électrique, nous avons choisi le modèle du moteur synchrone qui équipe la Honda Insight. C'est un moteur très performant et compact dont les caractéristiques sont les suivantes:

- Puissance = 10 kW
- $\eta_{\max} = 96 \%$
- masse = 60 kg

Dans le cas des véhicules hybrides séries ou parallèles, la puissance du moteur électrique sera calculé par interpolation à partir de la cartographie du moteur électrique de la Honda Insight.

2. Le générateur électrique

Pour le générateur, nous avons sélectionné le modèle de la Toyota Prius. C'est un moteur générateur à aimant permanent qui n'est pas très performant mais il est léger et est déjà commercialisé pour la propulsion hybride. Il a les caractéristiques suivantes:

- Puissance = 15kW
- $\eta_{\max} = 84 \%$
- masse = 33 kg

Comme pour le moteur électrique, le générateur sera modélisé par interpolation à partir de la cartographie du générateur qui équipe la Toyota Prius dans le cas des véhicules hybrides séries.

3. Les packs de batteries

Les batteries NiMH

Les modèles de batteries nickel métal hydrure considérés ici sont les mêmes que celles déjà décrites dans les chapitres précédents. Mais pour entrer plus en détails par rapport à l'encombrement que pourrait entraîner l'utilisation de tels modèles, nous avons pris le modèle Panasonic (Figure 8.18) qui a exactement les mêmes caractéristiques que le modèle ADVISOR.

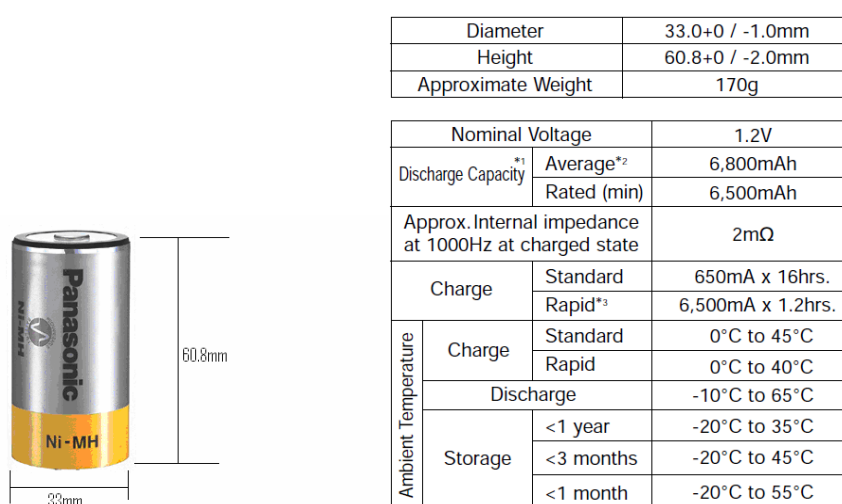


Figure 8.18: Modèle HHR-650D/FT de batterie NiMH [Panasonic_NiMH, 2005]

Le modèle de la Figure (8.18) est une cellule ayant une tension de 1,2V, une capacité de 6,5 Ah et une masse de 170g. Un module est constitué de 6 cellules et a donc une tension de 7,2V


(1,2Vx6) et une masse de plus d'1 kg (170gx6). Ce qui correspond au modèle décrit dans ADVISOR.

Les batteries PbAc

Parmi les modèles de batteries au plomb disponibles dans ADVISOR, nous avons sélectionné le modèle «ESS_PB_25» qui est une batterie de type VRLA (valve regulated lead acid) et dont les caractéristiques sont les suivantes:

- capacité nominale (C/5): 28Ah
- tension d'un module: 12V
- rendement de coulomb: 90%
- masse par module: 11kg
- Energie spécifique: 30,5Wh/kg

Pour être plus réaliste et en savoir plus sur les dimensions réelles de tel type de batteries, nous avons fait un rapprochement avec le modèle «LC-X1228P/AP» commercialisé par PANASONIC. Il possède les mêmes caractéristiques que le modèle ADVISOR et ses dimensions sont données à la Figure 8.19



Nominal voltage		12 V
Nominal capacity (20 hour rate)		28 Ah
Dimensions	Length	165 mm
	Width	125 mm
	Height	175 mm
	Total Height	LC-X1228P: 179.5 mm LC-X1228AP: 175 mm
Approx. mass		11 kg
Terminal		M5 Bolt and Nut type/ M5 threaded post

Figure 8.19: Module de batterie Acide Plomb LC-X1228P/AP [Panasonic_VRLA, 2005]

Les batteries Li-Ion

Le seul modèle de batterie Li-I disponible dans ADVISOR est le modèle «ESS_Li17_temp» dont les caractéristiques sont les suivantes:

- capacité nominale (C/3): 6Ah
- rendement de coulomb: 98%
- tension maximale: 12V
- masse par module: 1 kg

- Energie spécifique: 72 Wh/kg

Le modèle fabriqué par SAFT et qui se rapprochent du modèle ADVISOR est le modèle VL7P dont les caractéristiques sont reprises dans la Table 8.14.



Figure 8.20: Batteries au Lithium ion [Saft, 2005]

	VL7P	VL20P	VL30P
Tension nominale (V)	3,6	3,6	3,6
Capacité moyenne (Ah)	6,5	18,5	28
Poids (kg)	0,37	0,80	1,1
Dimensions (DxH)(mm)	41x145	54x163	54x222

Table 8.15: Caractéristiques des batteries Li-Ion [Saft, 2005]

Un modèle ADVISOR correspond à 3 cellules VL7P avec une tension de 11V (3,6x3), une capacité de 19,5 Ah (6,5x3) et une masse d'environ 1kg (0,37x3).

Les batteries NiCd

Le modèle unique de batteries NiCd disponible dans ADVISOR est le modèle "ESS_NICAD102" dont les caractéristiques sont les suivantes:

- capacité (C/5): 102 Ah
- rendement de coulomb: 98%
- tension nominale: 6V
- poids par module: 13 kg
- Energie spécifique: 47Wh/kg

Le modèle SAFT qui se rapproche du modèle ADVISOR est le "STM 5-100" (Figure 8.21) dont les caractéristiques sont dans la Table 8.15.



Figure 8.21: Batteries au Ni-Cd modèle SAFT [Saft, 2007]

	STM_100	STM5_100	STM5_140
Tension nominale (V)	6	6	6
Capacité, C/3 (Ah)	100	100	136
Energie spécifique à C/3 (Wh/kg)	55	55	54
Densité d'énergie à C/3 (Wh/dm ³)	88	87	95
Puissance spécifique à 80% DOD	122	120	108
Densité de puissance (W/l)	203	200	190
Poids (kg)	12,9	13,2	17
Dimensions (mm)	248x120x260	246x123x260	244x153x260
Volume (dm ³)	7,74	7,87	9,7

Table 8.16: Caractéristiques des batteries Ni-Cd [Saft, 2005]

8.2.2 Critères et formulation du problème d'Optimisation.

La démarche d'optimisation suit exactement le même schéma que l'application précédente. On part d'une configuration de base pour construire les métamodèles des différents critères. La Table 8.16 montre les configurations de base pour les véhicules hybrides électriques série et parallèle.

		VW_Golf_PbAc	VW_Golf_NiMH	VW_Golf_LiI	VW_Golf_NiCd
Composants	Moteur thermique	Moteur essence 41 kW, Cylindrée: 1 Rendement: 0,35	Moteur essence 41 kW, Cylindrée: 1 Rendement: 0,35	Moteur essence 41 kW, Cylindrée: 1 Rendement: 0,35	Moteur essence 41 kW, Cylindrée: 1 Rendement: 0,35
	Moteur électrique	Moteur synchrone: 10 kW, rendement: 0,96	Moteur synchrone: 10 kW, rendement: 0,96	Moteur synchrone: 10 kW, rendement: 0,96	Moteur synchrone: 10 kW, rendement: 0,96
	Batteries	20 modules PbAc 6,7 kWh	20 modules NiMH 1 kWh	20 modules Li-I 1,44 kWh	20 modules Ni-Cd 2,8 kWh
	Générateur (uniquement pour les configurations série)	Moteur à aimant permanent: 15 kW	Moteur à aimant permanent: 15 kW	Moteur à aimant permanent: 15 kW	Moteur à aimant permanent: 15 kW
Aérodynamique	Surface frontale	1,98m ²	1,98m ²	1,98m ²	1,98m ²
	Cx	0,31	0,31	0,31	0,31
Roues	Rr	0,008	0,008	0,008	0,008
	Rayon effectif	0,31m	0,31m	0,31m	0,31m

Table 8.17: Configurations de base des Véhicules hybrides électriques

Les critères d'optimisation sont également les mêmes que dans l'application précédente sauf que les intervalles de variation des variables et des paramètres d'optimisation sont différents.

Minimiser

$$F(X) = (f_1(x) = \tilde{E}; \quad f_2(x) = 1/U\tilde{S})$$

Avec

$$X = (P_{engine}, P_{motor}, N_{bat})$$

Sous contraintes

$$\begin{aligned}
 \tilde{t}_{acc} &\leq 12s \\
 \tilde{v}_{max} &\geq 140kph \\
 \tilde{p}_{max} &\geq 12\% \\
 \tilde{m} &\leq 1200kg \\
 \tilde{C} &\leq 15000\text{€} \\
 30 &\leq P_{engine} \leq 60 \\
 20 &\leq P_{motor} \leq 60 \\
 20 &\leq N_{MB} \leq 80
 \end{aligned} \tag{8.15}$$

Le temps d'accélération est limité à 12s mais c'est pour passer de 0 à 100km/h (et non 60 km/h pour le bus), la pente maximale franchissable doit être au moins de 12% à la vitesse de 80 km/h et la vitesse maximale est d'au moins 140 km /h (au lieu de 100km/h pour le bus). La masse de référence est la moyenne des masses des voitures de moyen de gamme et tourne autour de 1200kg. La différence de coût entre la voiture conventionnelle et les voitures hybrides électriques est essentiellement due aux composants additionnels. Les coûts des composants électriques que nous avons considérés sont repris dans la Table 8.17.

Composants	Description	Prix
Moteur/générateur	Solectria AC 75	60(€/kW)
Moteur thermique	Essence	90 (€/kW)
Stockage d'énergie	batteries NiMH	1100€/kWh ⁶
	batteries PbAc	290/€/kWh
	batteries LiI	1000€/kWh
	batteries NiCd	700€/kWh
Engrainage moteur		1000 €
Système de contrôle		4000 €

Table 8.18: Coût des composants [CEC 2002, Drozd 2005 et Matheys 2005]

La vie du véhicule est supposée être de 10 ans avec 200000 km. Le coût de l'essence a été exagérer à 1,5€ le litre suite aux fluctuations du coût du pétrole observées cette année.

8.2.3 Résultats.

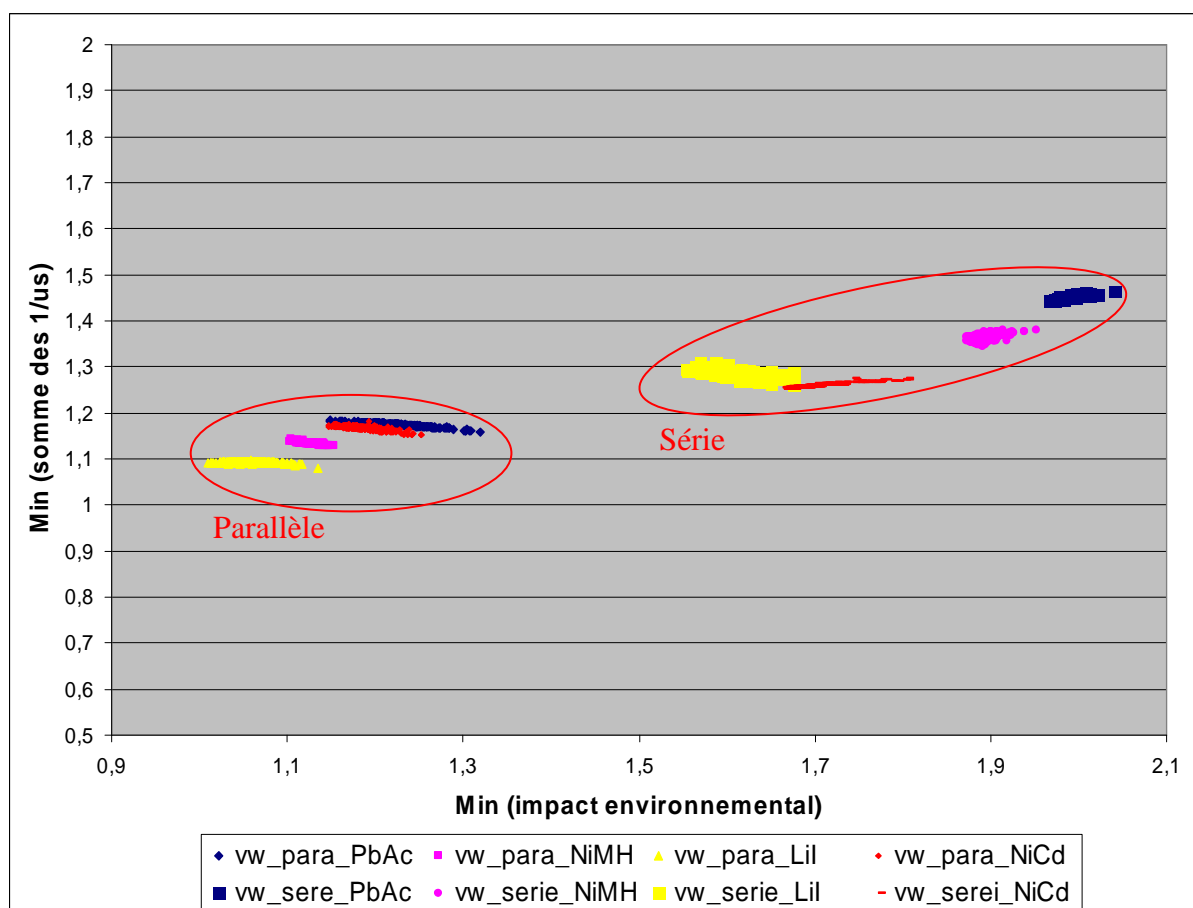


Figure 8.22: Résultats front de Pareto ECOSCORE impact environnemental/Satisfaction sur le cycle CYC_ECE_EUDC

⁶ Annexe E, nous avons pris la moyenne des coûts maximal et minimal. Le prix des batteries au plomb a été doublé en supposant que ces batteries vont être changées une fois sur la durée de vie.

Components	P _{ICE} kW	P _{motor} kW	Nombre de modules de batteries
vw_conv	55		
vw_NiMH	36	21	60 (2,81 kWh)
vw_LiI	30	28	32 (2,3 kWh)
vw_PbAc	37	37	20 (6,7 kWh)
vw_NiCd	31	41	46 (6,5 kWh)

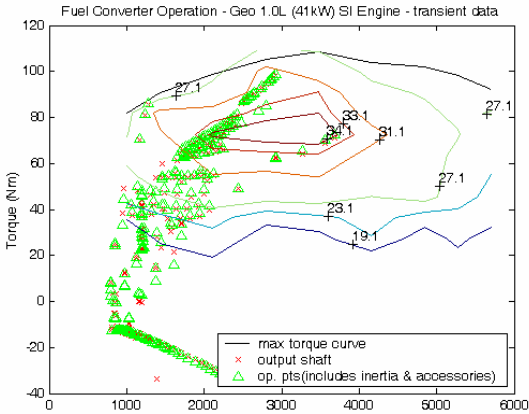
Table 8.19: Configurations optimales qui minimisent l'impact environnemental (et maximise ECOSCORE) sur le cycle CYC_ECE_EUDC pour les configurations parallèles

	Conventionnel	HEV_NiMH	HEV_PbAc	HEV_LiI	HEV_NiCd
Fuel (l/100km)	6,6	5,22	5,58	4,86	5,31
Tacc (0 - 100km/h)	14	11	12	11	11
Vmax (km/h)	170	175	177	179	181
Pmax @ 80km/h	12	12	10,4	13,2	12,35
CO (g/km)	2	1,44	1,84	1,52	1,74
CO2 (g/km)	207	175	191	165	183
NOx	0,48	0,31	0,34	0,31	0,33
HC	0,67	0,55	0,57	0,51	0,56
SO2	0,25	0,25	0,28	0,24	0,27
PM	0,024	0,03	0,029	0,025	0,028
M (kg)	1 129	1 316	1 571	1 298	1 523
C (€)	26 670	23 251	24 233	21 260	25 730
Impact environnemental	1,3	1,05	1,14	1	1,13
SU (à maximiser)	0,85	0,87	0,849	0,92	0,85

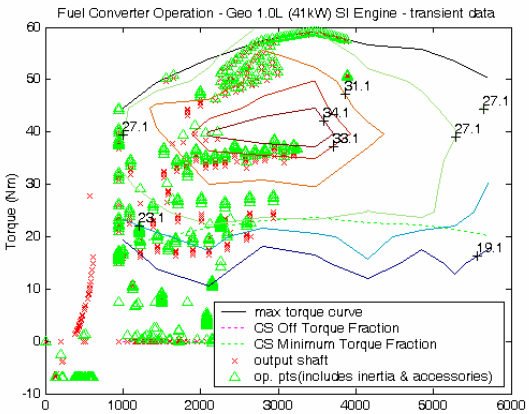
Table 8.20: Performances des configurations qui minimisent l'impact environnement sur le cycle CYC_ECE_EUDC pour les configurations parallèles

Au regard du spectre de points (Figure 8.22), représentant les solutions optimales, les véhicules hybrides parallèles sont beaucoup plus appropriés au cycle européen normalisé par rapport au véhicules hybrides séries. Le problème des configurations hybrides série apparaît clairement quand elles doivent être conçues pour un cycle plus ou moins exigeant. Le groupe électrogène et le moteur électrique doivent être dimensionnés sur la puissance maximale et le coût et le poids du véhicule augmentent, entraînant une consommation plus élevée. Il n'y a donc aucun intérêt pour ce type de configuration sur le cycle européen normalisé. Le classement des différentes technologies de batteries (pour les deux types de configuration) en rapport avec les deux objectifs met en avant les technologies Li-Ion et NiMH, viennent ensuite les batteries nickel cadmium et les batteries au plomb. Cette distinction reflète la consommation due au supplément de masse des batteries. Les premières étant plus légères entraînent une moindre consommation (les émissions et la consommation liées à la fabrication des batteries ne sont pas prises en compte). De plus, dans un véhicule hybride on a besoin plus de la puissance que de l'énergie. La masse des batteries nécessaires pour fournir une puissance donnée varie d'une technologie à une autre. Les batteries au lithium et les batteries

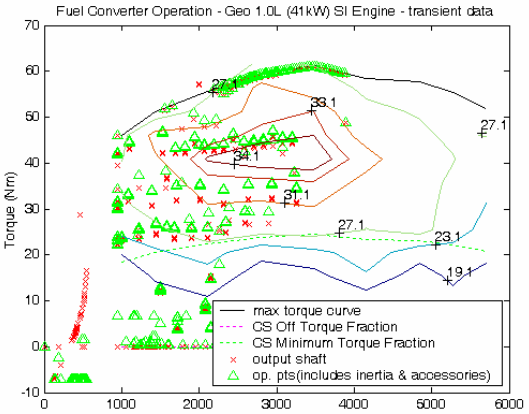
au NiMH ont des densités de puissance plus élevées (1800 W/kg et 1000W/kg respectivement) et peuvent fournir la puissance nécessaire avec une masse additionnelle réduite. Ainsi, elles sont légèrement meilleures pour les nuisances environnementales (consommation réduite) et la satisfaction du besoin. Les technologies NiCd et PbAc sont pénalisées par leur poids. Les puissances des deux moteurs doivent être suffisantes pour la traction de cette masse supplémentaire et pour compenser la faible densité de puissance des batteries car ne pouvant pas augmenter le nombre de modules au risque d'augmenter le poids du système. Les résultats de cette application viennent appuyer le constat que les constructeurs automobiles privilégient la configuration parallèle pour les véhicules de passagers hybrides électriques. La configuration série étant adaptée à des applications particulières notamment pour des circuits ayant des arrêts fréquents (distribution du courrier en ville par exemple). Il faut rappeler enfin que ces résultats seraient différents si le moteur thermique est optimisé au préalable. La consommation et les émissions directes des véhicules hybrides seraient encore plus réduites. Mais, les points visités du moteur thermique ne s'écartent pas tout de même de la zone de rendement maximal (figure 8.23)



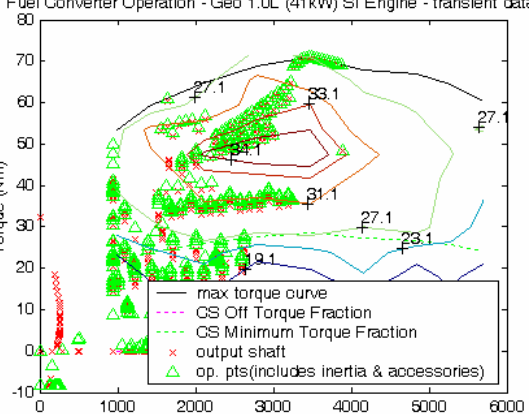
a) vw_conv



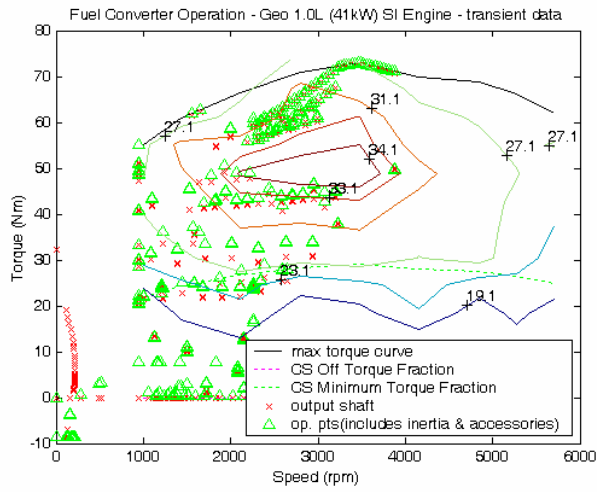
b) vw_LiI



c) vw_NiCd



d) vw_NiMH



d) vw_PbAc

Figure 8.23: Points de fonctionnement du moteur thermique

Chapitre 9: CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

9.1 Résumé des travaux

Les travaux qui ont été présentés dans cette thèse avaient pour objectif de développer une nouvelle méthode d'évaluation et d'optimisation de l'écoefficient des véhicules hybrides. Corollairement, la méthodologie développée a permis d'étudier et de montrer la faisabilité technique et la viabilité économique de nouvelles technologies de stockage d'énergies telles que les supercapacités et les accumulateurs hydrauliques. Les résultats et les conclusions de cette analyse ne sont pas à généraliser, car des modèles simples ont été utilisés avec les limitations d'ADVISOR (non optimisation du fonctionnement du moteur thermique dans le cas des véhicules hybrides électriques). Cette optimisation jouerait inévitablement en faveur du véhicule hybride électrique en ce qui concerne l'économie de carburant et le coût utilisateur. Cependant, ces résultats donnent une bonne indication des avantages que pourraient procurer certains systèmes de propulsions hybrides contrairement aux idées reçues. Ils prouvent également que la méthode d'optimisation développée est une méthode efficace qui met en jeu plusieurs outils d'analyse des performances des véhicules. La méthode serait encore plus efficace si une investigation profonde est menée dans le domaine de l'environnement, du socio-économique et de la technologie.

L'Ecoefficient :

Jusqu'ici, les méthodes d'évaluation des moyens de transport automobile considéraient le seul aspect environnemental en ignorant la satisfaction de l'utilisateur. La méthode de mesure de l'écoefficient que nous avons développée consiste à quantifier par des indices agrégés les impacts des véhicules sur l'environnement et la satisfaction de l'utilisateur.

Concernant la satisfaction de l'utilisateur, nous avons proposé une démarche de quantification de la satisfaction de l'utilisateur qui aboutit à un indice agrégé intégrant à la fois les critères quantitatifs tels que les performances du véhicule, le coût utilisateur, la sécurité et les critères qualitatifs tels que l'esthétique, la fiabilité et l'image. L'étape clé de la méthode concerne le choix des critères de mesure ou d'appréciation de chaque fonction du véhicule et

l'établissement des bornes de variation. Suivant les performances réalisées, une note comprise entre le minimum et le maximum peut être attribuée pour chaque fonction. Pour tenir compte de l'importance relative de chaque critère par rapport aux autres, des poids sont attribués et c'est la méthode d'analyse multicritères AHP que nous avons retenue et utilisée pour la pondération. L'application de la méthode sur certains véhicules conventionnels de passagers en comparaison avec les véhicules hybrides (dont les modèles sont basés sur les modèles conventionnels), montre que les véhicules hybrides électriques sont capables de réaliser les mêmes performances que les véhicules conventionnels. Tout dépend du degré d'hybridation, du choix des composants et de la gestion d'énergie et de la puissance. Dans certains modèles comme les hybrides électriques à "charge sustaining", la charge des batteries est assurée par le moteur thermique et les gains en consommation sont parfois moindres pour compenser le coût. Cependant, selon la configuration et l'usage, les véhicules hybrides restent bel et bien compétitifs si l'on considère à la fois l'aspect environnemental et la satisfaction de l'utilisateur.

L'évaluation environnementale (calcul des impacts) des véhicules est un sujet très complexe. La diversité des dommages à considérer et de leurs unités de mesures différentes complique la tâche et les méthodes proposées sont nombreuses et dépendent chacune des objectifs recherchés et du domaine d'application. Parmi ces méthodes, peu aboutissent à un score environnemental unique alors qu'il serait souhaitable que les impacts sur l'environnement soient exprimés par un indice global afin de pouvoir comparer aisément les véhicules. Pour notre travail, nous sommes appuyés sur la méthode ECOSCORE sans toutefois l'utiliser en intégralité. La raison de ce choix est qu'elle est plus simple à mettre en œuvre et qu'elle aboutit à un score environnemental unique. Cependant, dans sa phase d'inventaire des émissions, elle ne considère que le cycle de vie du carburant. Nous avons ajouté à cette phase d'inventaire, les émissions liées à la fabrication du véhicule. Mais notre modèle reste limité car nous n'avons pas considéré le recyclage du véhicule qui peut changer significativement les résultats. Les résultats de l'application que nous avons menée montrent que les véhicules hybrides ont relativement moins d'impacts sur l'environnement que leurs équivalents conventionnels. Il y a certes un gain de consommation et donc moins d'émissions de CO₂ pendant la phase d'utilisation pour les véhicules hybrides, mais la phase de fabrication du véhicule atténue cet avantage. Cela est dû au fait que les émissions pendant cette phase sont proportionnelles à la masse (plus élevée pour les hybrides) d'une part et de la présence de certains matériaux en proportions plus élevées suite à l'usage des batteries et des machines électriques d'autre part.

La subjectivité dans la pondération et la normalisation des dommages reste un problème important.

Les véhicules hybrides hydrauliques et les supercapacités :

La totalité des modèles de véhicules hybrides actuels sont des hybrides électriques avec des systèmes de stockage d'énergie basés sur les batteries. Or ces technologies sont loin d'être satisfaisantes par rapport au cahier des charges des véhicules hybrides. Les nouvelles technologies de stockage d'énergie telles que les supercapacités et les accumulateurs hydrauliques sont toujours au stade de développement. Nous avons fait une analyse de la faisabilité technique et de la viabilité économique des véhicules hybrides hydrauliques puis, en établissant une comparaison avec les véhicules hybrides électriques avec batteries, nous avons pu démontrer leur intérêt comme alternatives viables aux technologies des batteries et nous avons relevé quelques observations importantes.

Au niveau technique, le concept de véhicule hybride hydraulique est inadapté aux véhicules personnels (même aux SUV de type européen). Il est mieux adapté aux véhicules lourds ou mi lourds ayant un usage urbain (bus urbains, camions poubelles, etc.). Leur masse plus importante atténue l'effet négatif du supplément de masse dû au système de stockage. Et comme nous l'avons démontré dans les applications, le cycle urbain avec des arrêts fréquents, permet une récupération efficace de l'énergie de décélération et des gains intéressants en consommation pouvant atteindre 14%. Cette application de niche est prometteuse. En outre, les véhicules hybrides hydrauliques se prêtent au mieux à une architecture hybride parallèle, le système hydraulique servant principalement d'assistance au moteur conventionnel. Il en est de même pour les supercapacités. Leur capacité de stockage est faible mais ils sont très efficaces en récupération d'énergie de freinage. Ils conviennent bien aux véhicules lourds jouant le rôle d'assistance au moteur thermique.

Du point de vue économique, les bus hybrides hydrauliques ont une période de récupération courte (pay-back) surtout quand on considère les cycles urbains. Les prix indicatifs que nous avons pu recueillir nous montrent que les systèmes d'accumulateur/réservoirs hydrauliques sont moins chers que les systèmes électriques (batteries). En conclusion, lorsque l'on considère le ratio entre le coût d'investissement et le gain de consommation, les systèmes hybrides hydrauliques deviennent compétitifs dans certaines applications telles que les véhicules lourds ou semi-lourds en utilisation urbaine. Quant aux supercapacités, leur coût par unité d'énergie utile est moins élevé par rapport aux batteries. En effet, les batteries sont dimensionnées sur les bases d'une grande capacité de stockage (entraînant un coup élevé)

alors qu'on ne sait utiliser qu'une partie de l'énergie stockée pour préserver la vie des batteries (profondeur de décharge). Pour les supercapacités par contre, on peut récupérer la totalité de l'énergie stockée sans craindre un endommagement quelconque.

L'optimisation multidisciplinaire :

La diversité des composants (et configurations), des sources d'énergies et la complexité des processus de production des carburants rendent le bilan CO₂ et le bilan énergétique très problématiques. En outre, les composants additionnels des véhicules hybrides par rapport aux véhicules conventionnels compromettent les performances et le coût du système qui devient complexe et nécessite une mise en place d'un système de gestion et de contrôle sophistiqué. Cela rend encore plus difficile le choix d'une solution optimale qui puisse être satisfaisante sur tous les points de vue. Il est donc nécessaire de faire un compromis acceptable et la mesure de l'écocoefficience des véhicules hybrides n'est pas suffisante. Nous avons proposé une démarche d'intégration de cet indicateur dans le processus de conception même du véhicule. La conception efficace des véhicules hybrides exige un choix judicieux et un dimensionnement optimal de ses composants mécaniques et électriques ou hydrauliques. Elle nécessite également une gestion optimale d'énergie (stratégie de contrôle). Dans ce cas, nous sommes en présence d'une grande variété de variables de conception incluant la configuration, la taille des principaux composants, les paramètres de contrôle et de plusieurs objectifs et contraintes. Le problème devient complexe et la modélisation mathématique du système s'avère difficile. Dans le cas des véhicules hybrides électriques peu de travaux utilisent l'optimisation structurale et multidisciplinaire pour la conception. La plupart se concentrent sur une seule fonction objectif et les émissions sont limitées à la consommation du carburant. Notre démarche d'optimisation se propose de considérer le problème de conception des véhicules hybrides comme un problème d'optimisation multi objectif et multidisciplinaire et d'utiliser la modélisation numérique (simulation). Dans ce cas les algorithmes heuristiques (tels que les algorithmes génétiques) sont préférés aux algorithmes de programmation mathématique à cause du caractère discret des variables et du bruit numérique des réponses de simulation. Ils coûtent cependant très chers en temps de calcul pour une évaluation directe (par simulation) des fonctions réponses. Une de nos contributions majeures pour réduire le coût en temps de calcul a été de développer des méthodes d'approximations des performances et des critères environnementaux, basées sur les surfaces de réponse. L'optimisation devient donc aisée et consiste simultanément à minimiser l'impact environnemental et à maximiser l'indice agrégé de la satisfaction de l'utilisateur.

L'implémentation de l'outil d'optimisation est facilitée grâce à la flexibilité du logiciel ADVISOR et a été réalisée au sein du logiciel BOSS-QUATTRO. ADVISOR est conçu dans l'environnement Matlab/Simulink. Aussi une partie de notre travail a porté sur la création d'un environnement intégré permettant d'intégrer les outils basés sur ADVISOR et l'environnement BOSS QUATTRO.

9.2 Contributions personnelles

Arrivé au terme de ce travail, il convient de résumer nos différentes contributions personnelles qui portent sur:

- Le développement du concept d'écofficience appliqué aux véhicules à propulsion propre. Les contributions personnelles à ce niveau portent notamment sur les aspects méthodologiques incluant la définition détaillée et affinée des critères de mesure de la satisfaction du besoin et de leurs limites de variation et l'application de l'analyse de la valeur. Nous avons également travaillé sur la problématique de la pondération des critères en exploitant les méthodes d'analyses multicritères notamment la méthode AHP.
- L'extension de la phase d'inventaire des émissions de polluants: notre contribution à ce niveau a été de considérer les émissions et la consommation d'énergie liées à la phase de fabrication du véhicule. Cette phase peut influencer significativement l'impact environnemental global. Mais, si en plus de la fabrication du véhicule, on considère le recyclage du véhicule, les résultats peuvent changer.
- Le développement d'une approche de conception préliminaire des systèmes de propulsion propres et écoefficients basée sur l'optimisation multidisciplinaire et la réalisation d'un outil de conception intégré fondé sur les logiciels ADVISOR et BOSS QUATTRO.
- La comparaison des différents systèmes de stockage d'énergie et de puissance (batteries, supercapacités, accumulateurs hydrauliques). Nous avons pu mettre en évidence des résultats qui vont à l'encontre des idées généralement admises concernant l'efficacité des systèmes de stockage tels que les supercapacités et les accumulateurs hydrauliques.

9.3 Perspectives

Concernant le concept d'écoefficiente, la méthode d'évaluation de la satisfaction de l'utilisateur mérite des améliorations en utilisant par exemple la logique floue avec des seuils d'appréciation. Une étude statistique basée sur les résultats des enquêtes auprès des utilisateurs pour les critères qualitatifs serait également intéressante. Quant aux critères environnementaux, l'aboutissement d'un travail bien fait requiert la collecte des données plus fiables et complètes.

L'outil d'optimisation mérite également une extension en testant d'autres modèles pour les approximations (kriging, réseaux de neurones...) et en combinant des métaheuristiques avec des algorithmes de recherche locale. D'autres algorithmes plus récents tels que le «particular swarm optimization» (PSO) pourraient améliorer les résultats. L'extension de l'outil d'optimisation pourrait concerner également une optimisation topologique de la chaîne de traction hybride en incluant en même temps les paramètres de configuration (série, parallèle, complexe...), de gestion d'énergie (lois de contrôle) et des composants optimaux. La difficulté majeure de l'optimisation de la configuration et de la topologique réside dans la complexité liée à la paramétrisation du modèle de la chaîne de traction.

Au niveau des applications, de nouvelles technologies combinant les batteries et les supercondensateurs pourraient présenter de grands intérêts. Elles offrent une complémentarité en termes de puissance et de densité énergétique. La considération d'autres types de moteur à combustion (turbine à gaz, pile à combustible...) serait aussi intéressant à étudier.

Toujours dans le cadre des applications, notre outil d'optimisation pourrait servir dans les études paramétriques et statistiques des flottes de véhicules. A partir des données disponibles sur le parc, on en déduit la moyenne et l'écart type des principaux paramètres des véhicules (puissance, Cx...). En supposant une distribution gaussienne par exemple des différents paramètres et par étude de Monte Carlo, on peut réaliser une optimisation des paramètres considérés pour déterminer la consommation et les émissions moyennes souhaitées pour le parc de véhicules en question. On peut aussi analyser l'effet sur les émissions et la consommation que pourrait avoir une diversification d'un parc par l'augmentation du nombre de véhicules hybrides.

L'encombrement et le poids prohibitif des systèmes hydrauliques affectent la structure mécanique (châssis, train roulant...) du véhicule et la tenue de route de manière qu'un design préliminaire est nécessaire. L'emplacement des accumulateurs et des réservoirs peut faire objet de discussion, car ils occupent un espace non négligeable et influencent l'aérodynamique du véhicule. Ils pourraient être placés sur le toit ou sous les sièges. Mais là aussi, on doit tenir compte du bruit causé par le fluide hydraulique en mouvement. Si on place le système hydraulique sur le toit du véhicule, les passagers risquent d'être exposés à ce bruit ce qui nécessiterait l'isolement du système hydraulique au risque d'un coût supplémentaire. Cet exemple illustre également la nécessité de considérer dans le futur non seulement la chaîne de traction, mais également d'autres modèles du véhicule permettant de tenir compte de son architecture générale et de sa structure. Les travaux permettront alors de débroussailler la conception préliminaire globale du véhicule.

9.4 Conclusion

Au terme de notre travail, nous pensons avoir mené une discussion détaillée sur le concept d'écoefficiente, élément clé pouvant servir comme critère de choix des véhicules propres. Plusieurs thèmes intéressants ont été abordés et analysés en détails et nos travaux nous ont permis de proposer des méthodes d'évaluation et d'optimisation de l'écoefficiente. Ces méthodes ont été validées dans plusieurs applications et les résultats obtenus sont très positifs et prouvent que nos méthodes sont matures. De plus ces résultats ont permis de mettre en lumière les atouts des nouvelles technologies de stockages d'énergie (hydraulique et supercapacités) qui sont souvent écartées à tort par des idées préconçues.

L'écoefficiente est un critère objectif d'évaluation ou de comparaison des systèmes de propulsion automobile, car il englobe deux aspects essentiels à savoir l'aptitude du moyen de transport à respecter simultanément les exigences environnementales et la satisfaction des utilisateurs potentiels alors que beaucoup d'autres méthodes ne considèrent souvent que le seul aspect environnemental et se limitent parfois à une ou quelques phases du cycle de vie.

L'indice d'écoefficiente a de l'importance, car il reflète non seulement le niveau de "propreté" du véhicule en question mais aussi son niveau d'appréciation par le marché. A l'instar du label CO₂ déjà utilisé en Europe et de l'Ecoscore en passe d'être appliquée en Belgique, l'indice

d'écocoeffcience pourrait guider les pouvoirs publics et les acheteurs privés dans les différentes décisions en matière de promotion des véhicules propres et de développement durable.

La procédure d'optimisation de l'écocoeffcience développée est intéressante et répond bien aux attentes des concepteurs. Elle permet aux constructeurs d'automobile d'opérer des choix optimaux qui sont souvent difficiles en conception préliminaire et de prédire le plus tôt possible les performances techniques, économiques et environnementales de la solution envisagée. Elle permet également une remise en cause moins coûteuse de la solution sélectionnée grâce aux métamodèles. Cet outil d'optimisation ouvre des voies à des extensions intéressante notamment l'optimisation topologique et le design préliminaire des véhicules hybrides utilisant les nouvelles technologies de stockage d'énergie et leur système de contrôle.

Références

- Ahbe S. et al. (1990). "Method for Environmental Life Cycle Assessments". BUWAL, publication 133, Bern Switzerland.
- Ahbe S. et al. (1990). "Methodology for Ecobalances Based on Ecological Optimization". BUWAL, (SAFEL) Environment Series No. 133, Bern
- Ahlvik P., Eggleston S., N. Gorissen, D. Hassel, A. J. Hickman, R. Joumard, L. Ntziachristos, R. Rijkeboer, Z. Samaras et K. H. Zierock (1997). "COPERT II: methodology and emission factors". Draft Final Report. *European Environment Agency, European Topic Centre on Air Emissions*, Copenhagen, Denmark.
- Allison (2008). "Transmission hybrid system", <http://www.allisontransmission.com/product/electricdrive>
- Andersson C. (2004). "On auxiliary systems in commercial vehicles, doctoral dissertation", Lund University
- Andreu N. (2006). "Simulation et étude technico-économique comparative de bus hybrides électriques et hydrauliques", master thesis, University of Liège.
- Arbusse S. et Gagnepain L. (2003). "La climatisation automobile: Impact énergétique et environnemental". Données et références
- Ari R. (2002), J. Spadaro. "Air Pollution Damage Estimates: the cost per kg of Pollutant"
- Auer J., G. Sartorelli, J. Miller (2007). "Ultracapitors improving energy storage for hybrid vehicles", Proceedings of *EET2007, Brussels*
- Azure dynamics (2008), Solectria AC motors, <http://www.azuredynamics.com>
- Back (1993). "Optimal Mutation Rates in Genetic Search", Proceedings of *The Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, p. 2-8, Morgan Kaufmann Publishers, SanMateo, California
- Bartley T. (2005). "Ultracapacitors and batteries for energy storage in heavy-duty hybrid electric vehicles", presentation to *The 22nd international battery seminar and exhibit* in Fort Lauderdale
- Béguin F. (2009). "Materials for supercapacitors Research Centre on Divided Matter", CNRS/Orléans University, France, *COST Meeting*, Glasgow.
- Bosch R. (2002). "Automotive Handbook". 5th edition. Society of Automotive Engineers (SAE)
- Buchmann I. (2001). "What is the perfect battery?" Cadex Electronics Inc. isidor.buchmann@cadex.com
- CEC (2002). "Analysis and forecast of the performance and cost of conventional and electric-hybrid vehicles", California Energy Commission, Technical Report.
- Chan C. (2002). "The State of the art of Electric and Hybrid Vehicles", Proc. *IEEE* vol. 99, USA.
- Christians S. (2004). "Effect on hybrid electric vehicle component selection on fuel consumption", Cranfield University.
- Culverhouse P. F. (1995). "Constraining designers and their CAD tools", Design studies n° 16
- David S. (1998). "Les plans d'expériences et les surfaces de réponse dans BOSS QUATTRO", Internal Report. SAMTECH S.A.
- Dominic S. (2006). "Mid-term review of the European Commission's 2001 Transport White Paper". OTB Research Institute for Housing, *Mobility and Urban Studies* Delft University of Technology
- Drozdz P. et Guerette C. (2005). "Hybrid Refuse Truck Feasibility Study", Development Centre of Transport Canada
- Dufoix M., Mastrangelo J. F., Valmage F. (2004). "Quelle place pour l'hydrogène dans les systèmes énergétiques?"
- Duysinx P., Christiaens S., Van Loo F., Nzisabira J. et Mathieu P. (2005). "Etude de l'efficacité énergétique et de la faisabilité technique d'un nouveau moteur pompe hydraulique et de ses applications" Rapport final. *Projet ENERCARE. Partim Etude Technique*. Appel CAIMAN 2. Région Wallonne, DGTRÉ, division Energie.

- Duysinx P. (2006). "Gestion énergétique des véhicules", Notes de cours, Université de Liège
- Ecorys et Swov (2005). "Impact Assessment Road Safety Action Programme". *Assessment for mid term review*. Final Report
- Eggleston S., Gaudioso D., N. Gorissen, R. Joumard, R. C. Rijkeboer, Z. Samaras and K H Zierock (1993). "CORINAIR Working Group on Emission Factors for Calculating 1990 Emissions from Road Traffic". Volume 1: *Methodology and emission factors*. Final Report. Document of the European Commission ISBN 92-826-5571-X.
- Ehsani M., Y. Gao, S Gay et A. Emadi. (2005). "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell vehicles. Fundamentals, Theory and Design". CRC press. 2005.
- EPA (2006). United States Environmental Protection Agency, Hydraulic Hybrid Research. Internet Source: <http://www.epa.gov/otaq/technology.htm>
- Eshelman L., Schaffer J. (1993). "Real-Coded Genetic Algorithms and Interval Schemata, Foundations of Genetic Algorithms". Morgan Kaufmann Publishers, Inc.
- European Commission, DG XII (1997). "ExternE project: Externalities of Energy, Vol 2 – methodology". A report produced for the European commission, Luxembourg.
- European Commission DG XII (1994). "Externalities of Fuel Cycles", *ExterneE project - Summary Report*.
- Filipi Z. L. Louca, B. Daran, C.-C. Lin, U. Yildir, B. Wu, M. Kokkolaras, D. Assanis, H. Peng, P. Papalambros, J. Stein, D. Szkubiel, and R. Chapp (2004). "Combined optimisation of design and power management of the hydraulic hybrid propulsion system for the 6x6 medium truck", *Int. J. of Heavy Vehicle Systems* Vol. 11, Nos 3-4, pp 372-402.
- Frackowiak E. (2006). "Development of high voltage super capacitor materials", *presentation to COST-542 action* in Liège
- Garcelon T. Markel K. Wipke (2000). "Hybrid vehicle design optimization", American Institute of Aeronautics and Astronautics, Long Beach CA,
- Genta G. (1997). "The motor vehicle dynamics: modelling and simulation", World Scientific
- Gillespie T. (1992). "Fundamentals of vehicle Dynamics", Society of Automotive Engineers
- Goedkoop M. et R. Spriensma (2000). "The Eco-Indicator 99", *A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment*
- Grandhaye J.P. (2002). "Analyse fonctionnelle et analyse de la valeur des produits", procédés et services
- Guinée J.B. (2001). "Life Cycle Assessment". *An operationnal Guide to the Iso standards*. Final report
- Habersatter, K. (1991). "Bilan écologique des matériaux d'emballage - Etat en 1990". Suisse: *ETH, 1991*, 166p. Rapport n132.
- Hajela P. (1992). "Stochastic Search in Structural Optimization: Genetic Algorithms and Simulated Annealing", in *Progress in Astronautics and Aeronautics Series, V-150*, American Institute of Aeronautics & Astronautics, Hardback.
- Hamdi A., Yannou B., Landel E. (2003). "Une stratégie de modélisation conceptuelle pour la prise en compte de performances vibro-acoustiques en préconception d'un berceau automobile", *Mécanique & Industries*, volume 4, n°4.
- Hans J., Dawn M. et Robert P. (1998). "Vehicle Aggressivity: Fleet Characterization Using Traffic Collision Data", U.S. Department Transportation National Highway Traffic Safety Administration
- Heijungs J. (1992). "Environmental life cycle assessment of products", Backgrounds. CML, Leiden university, Leiden, The Netherlands
- Hewitt R.G. (2005). "Rapport d'étude de faisabilité des autobus hybrides", Rapport au Comité des Transports d'Ottawa. Internet Ressources: <http://www.ottawa.ca/calendar/ottawa/citycouncil/occ/2005/11-30/trc/ACS2005-PWS-FLT-0001.htm>, *Visité en 2007*
- Hickman A. (1998). "Methodology for calculating transport emissions and energy consumption", *MEET project report SE/491/98*, Transport research laboratory.
- Houle A. C. (2004). "Introduction à Matlab"

- Hucho W.H. (1998). "Aerodynamics of Road Vehicles". 4th edition. SAE International.
- Huijbregts et Alii (1999). "Normalisation Data for the Netherlands (1997), West-Europe (1995), and the World - CML 1999"
- Hydac (2006). Accumulator catalog: <http://www.hydacusa.com/literature/accumulators/Accumulators.pdf>. Sources Internet. visité en 2009
- ISO "International Standard 14043- Environmental management - Life cycle Assesment - Life Cycle Interpretation".
- ISO "Technical Specification 14047- Illustrative examples on how to apply ISO14042 Life Cycle Assesment - Life cycle Impact Assesment".
- Jefferson C.M et Barnard R.H. (2002). "Hybrid Vehicle Propulsion", WIT press,
- Jin R., W. Chen, et T. Simpson (2001). "Comparative studies of metamodelling techniques under multiple modelling criteria", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 23, no. 1, pp. 1–13.
- Jouineau C. (1982). "L'analyse de la valeur. Méthodes, mise en oeuvre, applications". *Entreprise moderne d'édition*, 253 p.
- Kargul J. (2006). "Hydraulic Hybrids: Cost-Effective, Clean and Efficient Urban Vehicles", Environmental Protection Agency (EPA), Mai
- Kelner V. (2003). "Développement d'un algorithme génétique et application à des problèmes complexes d'optimisation", Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies en Sciences Appliquées, Université de Liège.
- Kepner R. (2002). "Hydraulic power assist demonstration of hydraulic hybrid vehicle regenerative braking in a road vehicle application", *SAE Paper* 2002-01-3128
- Khalifa Khalil (1999). "Analyse du cycle de vie: Problématique de l'évaluation des impacts". *Techniques de l'Ingénieur, traité Génie industriel, G5610*.
- Klein S A et F.L. Alvarado (1998). "E E S: Engineering Equation Solver" Pour Microsoft Windows F-Chart/CSTB Software. Copyright 1992-98
- Louvigny Y., J. Nzisabira, P. Duysinx (2008). "Analysis of hybrid hydraulic vehicles and comparison with hybrid electric vehicles using batteries or super capacitors". EET-2008 European Ele-Drive Conference International Advanced Mobility Forum Geneva, Switzerland, March 11th-13th, 2008
- Malcolm A. Weiss, John B., Heywood, Elisabeth M., Drake, Andreas S., Felix F. et AuY. (2000). "On the road in 2020: A life-cycle analysis of new automobile technologies"
- Mandil C. et F. Loos (2005). "Le défi énergétique du transport routier", Challenge Bibendum <http://www.challengebibendum.com/challengeBib/document.DocumentRepositoryServlet?codeDocument=2614&codeRepository=MICHA&codeRubrique=RAPPORT2006FR>
- Markel T. et A. Booker (2002) "Advisor: a system analysis tool for advanced modelling" *Journal of Power Sources*, ol.111, no. 2, pp. 255–266
- Martel J.M, (1999). "L'aide multicritère à la décision: méthodes et applications"
- Matheson P. et Stecki J. (2003). "Development and simulation of a hydraulic hybrid powertrain for use in commercial heavy vehicles", *SAE Paper* 2003-01-3370
- Matheys J., Autenboer V. et Mierlo V., (2006). "Sustainable batteries". Final report
- Maxwell Technologies (2007). http://www.maxwell.com/pdf/uc/manuals/Integration_Kit_manual.pdf User Manual Integration Kit – Doc. No. 1011158.3
- Maxwell Technologies, (2008) http://www.maxwell.com/pdf/uc/datasheets/mc_power_series_390_1011285_rev2.pdf
- Molyneaux A., G. Leyland et D. Favrat (2003). "Multi-Objective Optimisation of Vehicle Drivetrains". Swiss Transport Research conference
- Montazeri-Gh M., A. Pourmasad (2006). "Application of genetic algorithm for simultaneous optimization of hev component sizing and control strategy". *Int. J. Alternative Propulsion*, vol. 1, no. 1, pp. 63–78.

- Ntziachristos L., Samaras Z. (2000). "COPERT III: Computer program to calculate emissions from road transport". *Methodology and emission factors (Version 2.1)*, Technical report n° 49
- Ntziachristos L., C. Kouridis, S. Geivanidis, A. Mamakos, Z. Samaras (2007) "COPERT 4: Computer program to calculate emissions from road transport". *User manual (Version 5)*.
- Nzisabira J., P. Duysinx, Y. Louvigny (2008). "Eco-efficiency optimization of Hybrid Electric Vehicle based on response surface method and genetic algorithm" EET-2008: European Ele-Drive Conference International Advanced Mobility Forum Geneva, Switzerland, March 11 – 13, 2008
- Nzisabira J., P. Duysinx and Y. Louvigny (2009). "Comparison of Ultra capacitors, Hydraulic accumulators and Batteries technologies to optimize Hybrid Vehicle Ecoefficiency" POWERENG'2009 - 2nd International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Hotel Costa da Caparica, Lisbon, Portugal March 18 to 20,
- Olivares A. (2007). "Simulation et étude technico-économique comparative de bus hybrides hydraulique et électrique avec supercondensateurs". Master thesis, University of Liège
- Pahl, G. et Beitz W. (1996). "Engineering Design: A Systematic Approach, 2nd edition". London: Springer.
- Panasonic_VRLA (2005). http://www.panasonic.com/industrial/battery/oem/images/pdf/Panasonic_VRLA_LC-X1228P_LC-X1228AP.pdf
- Panasonic_NiMH (2005). <http://www.actec.dk/Panasonic/pdf/HHR650D.pdf>
- Parker Hannifin Corporation. (2008). "Parker PE series Piston Pumps variable Displacement". Catalog HY13-2657-001/US et HY13-1552-002/US. <http://www.parker.com/pumpmotor/cat/english/1552a001.pdf>
- Permo-Drive Technologies Ltd. Source Internet <http://www.permo-drive.com/> visité en Avril 2006
- Petrolfed: fédération pétrolière belge, <http://www.petrolfed.be>, visité en janvier 2008
- Pinchon P. (2004). "Futures évolutions des motorisations dans l'automobile". *L'automobile du futur: les technologies de l'IFP*. 6 mai 2004. http://www.ifp.fr/IFP/fr/espacepresse/Dossier_AutomobileDuFutur/2_ConfPress_eIFP-FuturesEvolutionsMotorisations.pdf
- Radovic Y., A. Remouchamps (2002). "Boss quattro: an open system for parametric design, Structural and Multidisciplinary Optimization". vol. 23, no. 2, pp. 140–152.
- Rousseaux P. (2000). "Analyse du cycle de vie, les méthodes d'évaluations environnementales". Laboratoire d'Évaluation Environnementale des Procédés et des Systèmes Industriels (LAEPSI) de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon
- Rousseaux P. (1998). "Analyse du cycle de vie: Evaluation des impacts". *Techniques de l'Ingénieur, traité Génie industriel*, G5605.
- Roux W. J., N. Stander, et R. T. Haftka (1998). "Response surface approximations for structural optimization". *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 42, no. 3, pp. 517–534.
- Roy B. et D. Bouyssou (1993). "Aide multicritère à la décision: méthode et cas". *Economica*
- Saft (2007). http://www.saftbatteries.com/Produit_STM_High_energy_module_for_traction_293_44/Language/en-US/Default.aspx#DL2
- Saft (2005). <http://www.houseofbatteries.com/pdf/VL7P>
- Scarvetti D. (2004). "Formalisation préalable d'un problème de conception pour l'aide à la décision en conception préliminaire". Thèse de doctorat
- Schneuwly A. (2006). "Designing auto power systems with ultracapacitors". *Embedded Systems Conference Silicon Valley*
- Szymkowiak S. (2002). "Application de l'analyse de la valeur à l'élaboration d'un projet de territoire"
- Van Mierlo J. et al (2008). "Life-cycle assessment of batteries in the context of the EU Directive on end of life vehicles"
- Van Mierlo J. et al (2005). "Coûts financiers directs et indirects engendrés par l'installation de systèmes d'air climatisé dans les voitures particulières"

- Van Mierlo J., J. M. Timmermans, J. Matheys et P. Lataire (2006). "Environmental rating of vehicles with different fuels and drive trains: a univocal and applicable methodology"
- Van Mierlo J. et al. (2003). "Establishment of an environmental indicator adapted to all existing or future road vehicles". *Science of the Total Environment*, issn: 0048-9697, reviewing
- Vanhool (2008). <http://www.vanhool.be>, visité en janvier 2008
- Vernat Y. (2004). "Formalisation et qualification de modèles par contraintes en conception préliminaire". Thèse de doctorat
- Viarouge P (2008). "Les supercapacités". EEPIC, Département de génie électrique et de génie informatique Université Laval, Québec
- Walter H., (2003). "Etablissement d'un indicateur environnemental adapté à l'ensemble des véhicules actuels ou à venir". *Premier colloque international «Environnement et Transport»* Avignon, France
- Walter H., V. Favrel, T. Pons, K. Marechal, P. Claeys et C. Ferdinand (2001). "Analyse des impacts sur l'environnement". *Evaluation des externalités physiques et monétaires*, Rapport final.
- WBCSD (2004). The Sustainable Mobility Project, Full Report. <http://www.wbcd.org/web/publications/mobility/mobility-chapter1-2.pdf>
- Wong J.Y (2001). "Theory of Ground Vehicles". 3rd edition.
- Wu B. et al. (2004). "Optimal power management for a hydraulic delivery truck", *Vehicle System Dynamics* Vol. 42 Nos 1-2, pp 23-40.
- Yannou B. (2001). "Préconception de produits". *Mémoire d'Habilitation à diriger les recherches*. École Centrale Paris.
- Yuki Tanaka et Yukio Shigeta (2007). "Upcoming Advances in Hybrid vehicles Market". NRI paper n°114.
- Zamel Z. et Xianguo L. (2006). "Life cycle comparison of fuel cell vehicles and internal combustion engine vehicles for Canada and the United States"

Annexe A: Analyse de la valeur

A.1 Définitions

L'analyse de la valeur est une méthode de conception (value engineering) ou de re-conception des produits et services qui permet à ceux-ci d'assurer, au coût juste nécessaire, la satisfaction du besoin de l'utilisateur. L'analyse de la valeur est une méthode de compétitivité, voire même une méthode de management (value management), qui recentre l'entreprise sur son produit, sur l'adéquation de celui-ci à son marché et sur la préoccupation permanente de sa performance économique. La norme NFX50-150 définit l'analyse de la valeur comme une méthode de compétitivité organisée et créative visant la satisfaction du besoin de l'utilisateur par une démarche spécifique de conception fonctionnelle, économique et pluridisciplinaire.

Pour un produit, l'analyse de la valeur consiste à en identifier les différentes fonctions. Le but est de vérifier, pour chacune de ces fonctions, si elle correspond à un réel besoin, quel est son coût et comment il peut être réduit. L'analyse peut également porter sur la valeur ajoutée à chacune des étapes de la fabrication. Cette méthode s'adapte aussi bien à la conception d'un nouveau produit qu'à un produit existant.

A.2 Méthodologie

L'analyse de la valeur comprend sept étapes: l'orientation de l'action, la recherche de l'information, l'analyse fonctionnelle, la recherche des idées de solutions, l'élaboration et l'évaluation des solutions, le bilan prévisionnel et proposition au décideur et la mise en application des solutions.

A.2.1 Orientation de l'action

Cette étape a pour but de bien cadrer tous les paramètres de l'étude. La préparation de cette étape implique au minimum le décideur et l'animateur. D'autres personnes peuvent y être associées en fonction de la situation. En fin d'étape, le contenu est présenté au groupe de travail AV et discuté en vue d'obtenir un consensus d'accord de démarrage sur des bases solides. Les différents points abordés lors de l'étape d'orientation sont les suivants:

- objectif: préciser les objectifs de l'étude
- limites et contraintes: Les limites sont les choses que l'on pourrait en théorie changer mais que dans les circonstances actuelles on ne veut absolument pas changer. Quel est donc le champ d'action: qu'est-ce qui fait partie du sujet AV et qu'est-ce qui n'en fait pas partie? Quel est le degré de nouveauté recherché / refusé? Les contraintes sont des choses que l'on ne peut pas changer, même si on le souhaitait. A titre de simple exemple, des règlements, des lois, des standards, des propriétés industrielles, des délais impératifs, Se limiter à celles qui sont particulièrement significatives pour le projet concerné.
- méthode de travail et délais: On précise les délais tant pour le projet global (si le projet AV est une partie d'un projet plus global) que pour le projet AV au sein de ce projet global.
- Composition du groupe AV: Quelles sont les personnes membres du groupe de travail AV? S'il y a des entités concernées qui ne sont pas représentées au sein du groupe de travail AV, faut-il prévoir une procédure pour les tenir informées? Quel est le décideur? Ou éventuellement les décideurs (Comité de décision)?
- Consensus d'accord de démarrage: Accord de tous sur le projet AV ainsi défini, et notamment sur la cohérence entre les objectifs d'une part, et les limites et contraintes d'autre part; la cohérence entre les plannings et délais d'une part, et la charge de travail des membres du groupe AV d'autre part. La disponibilité en temps utile des informations détaillées (besoins des utilisateurs, coûts...) nécessaires.

A.2.2 Recherche de l'information

Cette étape permet de connaître le produit à traiter et son contexte actuel. Elle rassemble toutes les informations (techniques, industrielles, économiques, commerciales, sociales, environnementales, réglementaires...) liées au besoin, aux produits concurrents, à la conception, la fabrication et la distribution du produit. C'est un véritable état des lieux du domaine étudié.

A.2.3 Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle constitue la pierre angulaire de la méthode de l'analyse de la valeur. C'est d'elle que dépend au final la qualité du produit. L'objectif de cette phase est de

rechercher les fonctions principales et secondaires qui satisfont les besoins, puis à les traduire en fonctions techniques. Ces différentes fonctions sont formalisées au sein du **cahier des charges fonctionnel (CdCF)**. La réalisation d'une analyse fonctionnelle détaillée, passe par les étapes suivantes:

1. Identifier et recenser les fonctions
2. Ordonner les fonctions
3. Caractériser les fonctions
4. Hiérarchiser les fonctions
5. Lister les contraintes et les limites
6. Synthèse: Cahier des Charges Fonctionnel (CdCF)

Identifier et recenser les fonctions

L'expérience montre que cette identification est loin d'être aisée. Ceci ne doit étonner personne: il faut vaincre la tendance naturelle à penser en termes de solutions techniques.

Pour aboutir à une expression claire, il convient d'apporter un soin systématique à la formalisation de chaque fonction et de vérifier qu'elle correspond bien à un but à atteindre: la manière dont on énonce une fonction ne doit pas imposer de solution! La formalisation sera brève: un verbe, qui précise la nature de l'action nécessaire à la satisfaction du besoin, plus un complément, indiquant l'élément sur lequel s'exerce l'action. Exemple (pour un bâtiment): s'adapter à l'évolution de la demande de location. Le but visé est la description complète des finalités du produit. Il y a donc lieu d'être exhaustif et de lister toutes les fonctions sans en oublier, même au risque d'un foisonnement et d'une redondance dans le premier recensement des fonctions. En pratique on travaille souvent en deux temps:

- recherche intuitive des fonctions, aboutissant à une liste de fonctions,
- application de la méthode des interactions avec le milieu extérieur, pour compléter et retoucher cette liste.

Ordonner les fonctions

Pour peu que le sujet AV soit complexe, on s'aperçoit rapidement que toutes les fonctions ne sont pas d'un même niveau. Certaines sont en fait déjà des manières de réaliser d'autres fonctions, plus fondamentales. Le schéma représentant ces liaisons logiques s'appelle le diagramme FAST (Function Analysis System Technic). Le diagramme FAST permet d'ordonner les fonctions selon un enchaînement logique en répondant aux questions:

pourquoi, comment et quand ? Voici à titre d'exemple une partie du diagramme FAST relatif à un aspirateur.

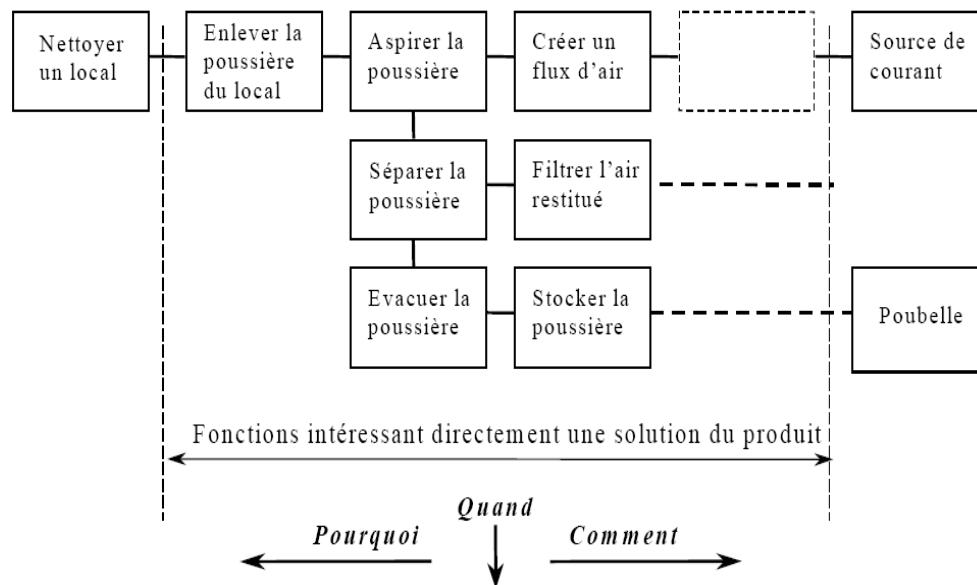


Figure A.1: Diagramme FAST

L'intérêt principal de la fonction est, tel qu'on l'a vu, de servir de «tremplin» pour la recherche de solutions. Le choix des fonctions à retenir pour cette recherche se fera selon l'objectif recherché:

- pour une remise en cause fondamentale: fonctions de gauche dans le diagramme,
- pour une remise en cause plus modeste: fonctions de droite.

Le diagramme FAST est parfois appelé «diagramme fonctionnel logique» ou encore «arbre des fonctions».

Caractériser les fonctions

C'est maintenant que l'on va quantifier les performances attendues des différentes fonctions.

Le point de départ consiste à déterminer le critère d'appréciation, c'est-à-dire comment on va mesurer le niveau de performance. Ensuite on déterminera le niveau de performance attendu par le client - utilisateur. Puis on établira si ce niveau est impératif ou s'il y a une certaine flexibilité autour de ce niveau. Enfin on cherchera à mesurer cette flexibilité. Plusieurs techniques existent.

La définition de limites d'acceptation est une méthode relativement simple mais efficace: on définit le niveau minimum en dessous duquel le client – utilisateur refuse car il trouve la

performance insuffisante, et le niveau maximum au delà duquel il s'agit aux yeux du client – utilisateur d'un luxe inutile. Il y a des techniques plus simples (classes de flexibilité) et des plus complexes (en plus des limites d'acceptation on définit un taux d'échange quantifiant le rapport avantage/coût). Il conviendra de juger, en fonction du sujet et de l'objectif visé, du degré de détail pertinent.

Hiérarchiser les fonctions

La liaison logique comment - pourquoi entre fonctions (voir diagramme FAST) n'est pas la seule. On peut aussi, pour des fonctions de même niveau dans le diagramme FAST, définir leur importance relative aux yeux du client - utilisateur. Les méthodes pour y arriver varient, depuis

- la plus simple: fonction principale ou fonction complémentaire (deux degrés d'importance),
- jusqu'à l'attribution à chaque fonction d'un degré d'importance chiffré, notamment par la méthode du tri croisé.

En cas d'avis divergents sur le degré d'importance d'une fonction, il est préférable, plutôt que d'attribuer comme notation la simple moyenne des avis de chacun, de se poser la question «pourquoi?» afin de déterminer la raison du désaccord et de pouvoir ensuite attribuer la notation adéquate.

Lister les contraintes et les limites

Nous avons vu que la fonction fait naître beaucoup de solutions («tremplin»).

Par contre, contraintes et limites vont ensuite restreindre le choix des solutions à retenir pour remplir une fonction. Elles agissent comme des «tamis»: à cause d'elles, certaines solutions seront à écarter d'office. Les contraintes sont des choses que l'on ne peut pas changer, même si on le souhaitait: règlement, loi, standard, propriété industrielle, délais, etc. Les limites sont des choses que l'on pourrait changer mais que dans les circonstances actuelles on ne veut absolument pas changer: selon le cas le budget, le délai, une limitation du niveau de remise en cause, une interdiction ou une imposition d'un principe de solution, etc. Deux pièges à éviter:

- les fausses contraintes et limites, reflet des habitudes et des traditions,
- il n'y a pas de contraintes ni de limites, allez-y !

En conséquence, il est prudent de se demander chaque fois: cette contrainte ou cette limite a-t-elle encore bien cours ?

Synthèse: CdCF

La synthèse constitue le CdCF qui est le document par lequel un demandeur formalise la définition de son besoin. Ce document:

- reprend les fonctions avec niveaux de satisfaction,
- n'impose que ce qui est réellement nécessaire,
- délimite ainsi clairement les responsabilités pour une recherche conjointe de compétitivité,
- et restitue au concepteur le droit à l'innovation par des exigences de résultat plutôt que de moyens.

Rappelons que plus le CdCF est fonctionnel, plus il sera ouvert à différentes solutions, plus il permettra le choix des techniques optimales et donc plus il permettra de réaliser des économies appréciables. Pour bien décrire le besoin il faut aller chercher les bonnes informations chez le client - utilisateur. On ne disposera pas toujours de toute l'information, il faudra alors prendre des options. Enfin, avant d'entreprendre la suite, il est souvent prudent de faire soigneusement valider le CdCF par les différentes parties prenantes concernées.

A.2.4 Recherche des solutions

L'objectif de cette phase est de trouver le plus grand nombre d'idées de solutions pour chaque fonction à satisfaire.

A.2.5 Elaboration et évaluation des solutions

Cette phase doit permettre d'identifier les solutions techniques qui répondent le mieux au Cahier des Charges Fonctionnel et de sélectionner les solutions viables qui seront proposées au décideur pour sélection. Ce travail est réalisé en groupe et consiste à:

- Rechercher des solutions qui répondent le mieux aux critères et objectifs de l'action
- Vérifier la faisabilité de chacune des solutions
- Evaluer la performance des solutions retenues

On aboutit ainsi à une hiérarchisation objective des solutions qui seront présentées au décideur pour sélection.

A.2.6 Bilan prévisionnel et proposition au décideur

Cette phase permet de regrouper les solutions retenues et d'élaborer un bilan prévisionnel intégrant:

- les critères de sélection retenus,
- les niveaux atteints ou estimés par chaque solution au regard des besoins exprimés par le décideur dans le cahier des charges fonctionnel,
- le chiffrage précis des coûts de chacune des solutions
- la liste détaillée des avantages et inconvénients de chaque solution,
- les conditions d'application.

A.2.7 La mise en application de la solution retenue

Il s'agit d'une mise en oeuvre et d'un ajustement de la solution retenue sous la responsabilité des services opérationnels avec des moyens de contrôle adaptés au suivi. On identifiera les écarts entre la réalisation et la prévision. Il restera à faire des ajustements si besoin il y a ou à reprendre éventuellement l'étude.

A.3 Conclusion

L'analyse de la valeur permet d'évaluer d'abord et d'améliorer ensuite la valeur d'une solution existante. Elle permet aussi de concevoir un nouveau produit. Elle constitue une approche transversale et fournit une aide efficace à l'entreprise pour:

- optimiser ses compétences et ses ressources,
- adapter sa stratégie industrielle et commerciale aux exigences concurrentielles de son marché,

- améliorer la qualité d'un "produit" sans en augmenter le coût ou d'en diminuer le coût sans réduire le niveau des services rendus.

Le seul inconvénient est que l'AV est une méthode très analytique, assez lourde à mettre en œuvre et qui nécessite une forte implication des acteurs et une parfaite maîtrise de la part de l'animateur.

Annexe B: Procédures standards de mesure pour certains critères de définition de la satisfaction du besoin de transport

B.1 Tests NCAP et équipements de sécurité

B.1.1 Sécurité interne

a) Sécurité passive:

Choc frontal

Les voitures sont projetées à 64 km/h (la directive européenne prévoit "uniquement" 56 km/h) contre une barrière métallique déformable. Quarante pour cent de la voiture uniquement (coté conducteur) heurte la barrière.

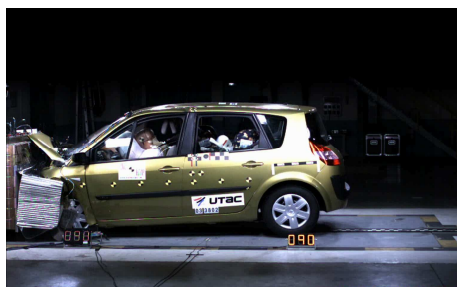


Figure B.1: Crash test de la Renault Mégane

Pour ce choc, on installe deux mannequins équipés de capteurs, mesurant les contraintes, déformations, et chocs sur les principaux organes du corps. Ensuite, on mesure et évalue l'efficacité des airbags, le déplacement du volant, les déchirures du plancher, et bien sur les

contraintes exercées sur les mannequins. De plus, on installe des mannequins enfants (représentant des enfants âgés de 18 mois et trois ans) dans des sièges autos préconisés par le constructeur et mesure aussi les contraintes exercées sur les enfants. Mais ces tests n'affectent pas la note obtenue par une voiture.

Choc latéral

Un chariot ou "béliet" (avec structure déformable) lancé à 50 km/h heurte l'automobile du côté du conducteur (même vitesse que la directive européenne). Pour ce choc, on installe uniquement un mannequin coté conducteur, munis de capteurs, mesurant les contraintes, déformations, et chocs des principaux organes du corps (du bassin à la tête).



Figure B.2: Choc latéral sur une smart

Test du poteau ou «pole test»

Le test du poteau a été nouvellement introduit par l'euro NCAP au début de l'année 2000. Il permet à une voiture de gagner 2 points en plus, et donc, si les autres tests sont satisfaisants d'obtenir la nouvelle note maximale de cinq étoiles. Ce test a été mis en place pour tester la protection apportée par les airbags de type "rideau" sur la tête du conducteur. Le véhicule est monté sur une plateforme avant d'être lancé à 29km/h contre un poteau fixe de 25,4cm de diamètre. Ce test est réalisé uniquement si la voiture a déjà réussi le test au choc latéral et que le constructeur le demande. Après mesure des pressions exercées sur la tête du conducteur, l'euro NCAP donne à la voiture, en cas de succès, 2 points supplémentaires.



Figure B.3: Test du poteau sur une audi A4

Notations

Pour chaque choc (frontal et latéral), on représente les résultats par une couleur sur chaque partie du corps, symbolisant le niveau de protection des passagers. La synthèse de ces deux résultats est représentée par des étoiles jaunes. Le maximum de cinq étoiles signifie que les chances d'avoir des blessures graves se limitent à 10%. Le minimum d'une seule étoile signifie que les chances pour avoir des blessures graves atteignent 45%. Les étoiles bleues, basés sur le même système de notation, sont destinées à noter le comportement de la voiture vis à vis des piétons. Il est à noter que la note du choc frontal n'est basée que sur les performances de protection du conducteur sauf si le passager est moins bien protégé.

Le renversement isolé

Les accidents par renversement constituent un sérieux problème pour les véhicules légers et surtout les camions légers. Selon FARS 2001, 10647 véhicules sont impliqués dans les accidents par renversement. FARS montre que 20% des accidents mortels ont lieu par des renversements isolés. Les proportions varient suivant le type de véhicule: 16% des accidents par renversements isolés, reviennent aux voitures, 25% aux camions de collectes (pickup trucks), 19% aux fourgons (vans) et 35% aux véhicules utilitaires et de sports (SUV).

- o Facteur de stabilité (ssf: static stability factor)

Le risque de renversement isolé est lié au facteur de stabilité (SSF) du véhicule. Il mesure la résistance d'un véhicule au renversement et a été ajouté aux crash-tests de NCAP. Le facteur de stabilité est la moitié du quotient de la distance entre les centres des pneus sur l'axe transversal (T: track width) et la hauteur du centre de gravité par rapport au sol (H: center of gravity height).

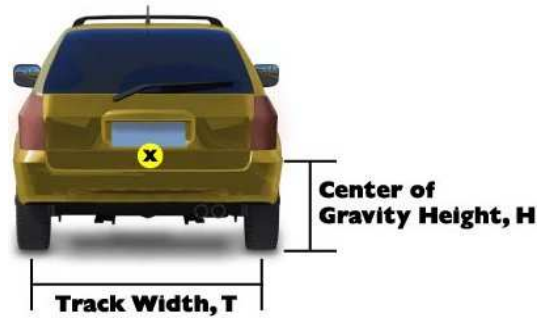


Figure B.4: Calcul du facteur de stabilité

$$SSF = \frac{T}{2H}$$

Plus le SSF est élevé, plus le véhicule est stable. Les camions légers ayant un tour élevé sans une augmentation de largeur sont susceptibles de renversement. Le SSF varie entre 1 et 1,5 pour toutes les catégories de véhicules. Il est compris entre 1 et 1,3 pour les camions légers et entre 1,3 et 1,5 pour les voitures. Le centre de gravité se mesure au laboratoire et sa hauteur est ainsi déterminée.

o Test de stabilité

La stabilité peut aussi être déduite d'un test de stabilité appelé «test par manœuvre dynamique» ou «manœuvre de Fishhook» (Figure B.5). Le test consiste en un changement brusque (environ une seconde) de direction à grande vitesse comme pour éviter une collision. Le modèle de Fishhook utilise un véhicule bien chargé et muni d'instruments de mesure qui détectent si les pneus internes (de gauche si on tourne à gauche ou de droite si on tourne à droite) ont décollé du sol pendant la manœuvre. On dira que le véhicule s'est incliné pendant la manœuvre si les deux pneus ont décollé simultanément d'au moins deux inches soit 5,08cm.

Cette inclinaison et le SSF constituent des données d'entrée d'un modèle statistique qui estime le risque global de renversement. Suivant le risque global de renversement estimé, chaque véhicule se verra attribué des étoiles (1 à 5). La Toyota Prius a par exemple 4 étoiles.

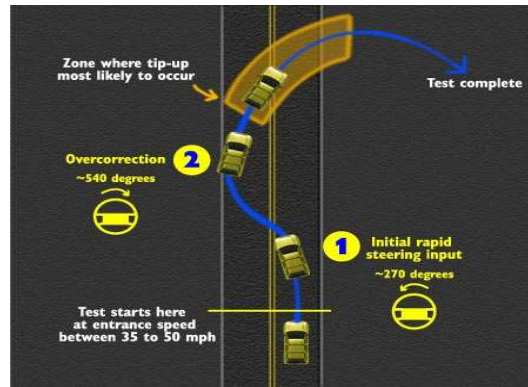


Figure B.5: Manœuvre de Fishhook

b) Sécurité active:

Il s'agit ici de décrire les différents équipements et systèmes de la voiture dont le rôle est d'aider à éviter l'accident en corrigeant ou en complétant les actions du conducteur:

ABS (anti blockier system)

C'est le système le plus connu et dont le rôle est d'empêcher le blocage des pneus lors d'un freinage violent. On peut ainsi continuer à manœuvrer pendant le freinage pour éviter des obstacles. L'inconvénient est que lors du freinage, la pression sur les freins augmente et les plaquettes s'usent très vite. Cet équipement est maintenant livré de série sur presque toutes les voitures neuves, excepté les bas de gammes des petits modèles. L'ABS est donc devenu un équipement indispensable.

BAS (brake assistant system)

Les systèmes d'aide au freinage d'urgence sont moins connus, mais ils constituent un véritable complément de l'ABS: ils augmentent la puissance de freinage quand le conducteur freine fort, mais pas au maximum (Cela arrive très souvent). Un capteur analyse la pression exercée sur la pédale de frein, et juge si on est en situation de freinage d'urgence, auquel cas il entraîne le déclenchement de la pression maximale dans le système de freinage. Il en résulte un freinage plus court, plus sécuritaire. Lors d'un freinage d'urgence il en résulte un gain compris entre 10% et 30%. L'aide au freinage d'urgence est disponible en série sur la plupart des BMW, Mercedes et Audi, il progresse de plus en plus. La Peugeot 607 en est équipée, l'Avantime, la Laguna 2, la Mégane, la Nissan Alméra, la Peugeot 307, etc.

ESP (electronic stability program), VDC (vehicle dynamic control)

Le principe des systèmes ESP ou VDC est de contrôler la dynamique latérale du véhicule, c'est-à-dire son comportement en virage ou lors de manœuvres non stationnaires. Il est

destiné à permettre au véhicule de conserver la trajectoire idéale imprimée par le conducteur. Dernier rempart lors d'un accident, il permet de manœuvrer sans se retrouver sur le toit ou en travers. L'ESP ramène la voiture dans la trajectoire désirée, en agissant indépendamment sur les 4 freins et la gestion du moteur quand la voiture dérape ou glisse légèrement. Pour cela, le véhicule est équipé d'une série de capteurs destinés à mesurer l'angle de lacet, les accélérations latérales et longitudinales et la vitesse des roues.

L'ESP assure une gestion automatique à la fois du freinage et de la motorisation. Toutefois, s'il est mal configuré, il peut provoquer effets nuisibles sur la neige (e.g. la Smart). Même si certaines personnes trouvent l'ESP moins utile que l'ABS et le BAS et se demandent si tous les conducteurs l'utiliseront vraiment, l'ESP apporte un supplément significatif dans l'assistance au pilotage. Il est aujourd'hui disponible de série sur la plupart des modèles de voitures de luxe (BMW, Mercedes et Audi). Il targe un peu à descendre dans les catégories inférieures, notamment par un coût élevé, mais les choses semblent changer assez vite avec l'arrivée de l'ESP sur la Peugeot 607 (V6), les Renault Avantime, Laguna 2, etc. Certaines compactes commencent à l'avoir en option (moins de 1000 €): Focus, VW Golf, Peugeot 307, etc.

Anti patinage: (ASR - ASC - EDS - TCS...)

Le but de l'anti patinage est de prévenir le patinage des roues motrices lors d'accélération. Le système tire profit des capteurs de l'ABS pour déterminer la roue à ralentir, puis transférer le surplus d'énergie sur l'autre roue motrice afin d'obtenir la meilleure motricité possible. Sur la neige ou sur le verglas, l'antipatinage permet un démarrage parfait. Pour les propulsions, il est utile même sur sol sec et évite le tête-à-queue. Cependant un problème de fond réside dans le fait que lorsque l'antipatinage fonctionne, l'ABS est également utilisé et qu'on ne possède plus de capacité de freinage. L'antipatinage est actuellement disponible sur la plupart des propulsions et il arrive en standard chez certains constructeurs (exemple: VW) et dans le futur sur de plus en plus de nouvelles voitures. L'antipatinage est utile, surtout quand il pleut et les propulsions, parfois sur les tractions avant. A noter que ce système est inclut d'office sur les voitures possédant l'ESP.

B.1.2 Sécurité externe

a) Choc contre piéton

Comme pour les tests de chocs (frontal, latéral, contre poteau), l'Euro NCAP effectue des tests de choc contre piétons. La voiture heurte à 40 km/h un mannequin représentant un adulte de face, ainsi qu'un enfant. Pour ce choc, on étudie les points d'impacts et la force de l'impact sur les mannequins et sur la voiture. On note de la même manière que pour les autres chocs, mais avec des étoiles bleues.

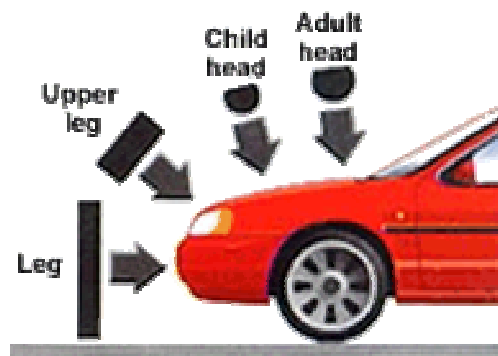


Figure B.6: Choc contre piéton

b) Aggressivité contre les autres véhicules: effet de la masse



Figure B.7: Crash-test entre une Laguna (à gauche) et une Twingo (à droite)

Le modèle le plus simple d'une collision entre deux véhicules est celle d'une collision non élastique: après le choc les deux véhicules se déplacent à une vitesse déterminée par la conservation du moment d'inertie (en réalité le résultat d'un choc est complexe: chacun des

véhicules emprunte sa propre trajectoire). Le cas le plus simple est quand les deux véhicules se déplacent suivant la même direction, leur centre de masse étant aligné avec le vecteur vitesse. Dans ce cas, leurs vitesses varient en cas de choc suivant les formules ci après:

$$\Delta v_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} (v_1 + v_2)$$

$$\Delta v_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} (v_1 + v_2)$$

Avec $m_{1,2}$, les masses des deux véhicules et $v_{1,2}$, leurs vitesses .

Il est bien connu que la variation de vitesse est le meilleur présage des risques de morts dans un crash. La relation empirique entre ces risques et la variation de vitesse est donnée par la formule 4:

$$fatality_risk = \left(\frac{\Delta v}{70} \right)^4$$

Δv est la variation de la vitesse. Lorsque Δv est inférieure à 70 mph, le risque est égal à un.

En combinant les 3 formules précédentes, on obtient la relation entre le rapport des risques dans les deux voitures et le rapport de masse:

$$\frac{R_2}{R_1} = \left(\frac{m_1}{m_2} \right)^4$$

Cette expression reste valable dans le cas où aucune des variations de vitesse n'excède pas 70 mph. En utilisant les logarithmes, la formule précédente devient:

$$\log \left(\frac{R_2}{R_1} \right) = 4 \times \log \left(\frac{m_1}{m_2} \right)$$

Cette relation est linéaire sur une échelle double logarithmique (Figure B.8)

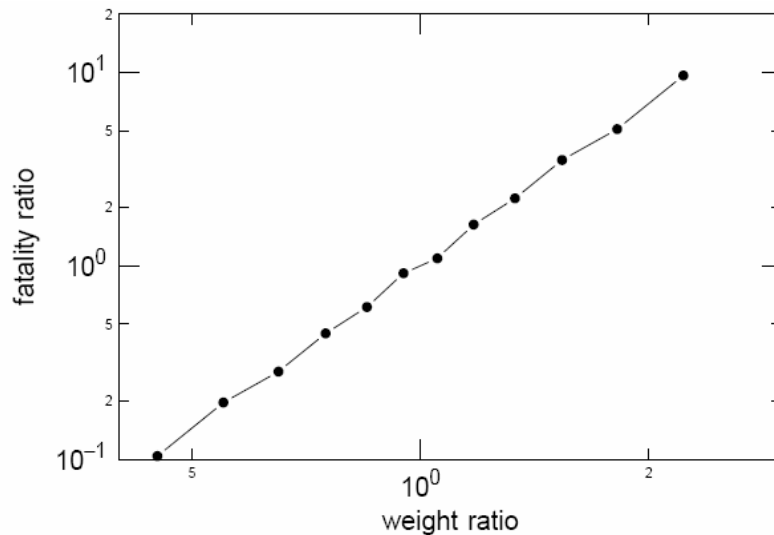


Figure B.8: Rapport entre le nombre de conducteurs tués dans deux voitures en collision en fonction de leur rapport de masse [9]

Les données fournies par FARS (Fatal Analysis Reporting System) ont été utilisées pour ce graphique. Pour éliminer l'influence d'autres facteurs (notamment l'âge), des conducteurs âgés entre 26 et 55 ans ont été considérés, et les voitures équipées d'airbags ont été exclues. Les collisions ont été regroupées en fonction du rapport de masse des deux voitures, et pour chaque groupe, on calcule le rapport des conducteurs tués pour estimer ensuite le rapport des risques de morts. Cette courbe nous montre que le rapport entre le nombre de tués dans les deux voitures est étroitement lié à leur rapport de masse: plus le rapport de masse est élevé, plus le nombre de tués dans la voiture légère augmente. Une autre étude visant la standardisation de la compatibilité en fonction de la masse, a été menée aux USA [5]. On a d'abord inventorié les différents types de voitures en fonction de leur masse dans certaines régions du globe. On a constaté que la masse de voiture varie énormément suivant les régions et suivant les pays. Ainsi la moyenne aux USA pour les voitures est de 1400kg, en Europe (UK), 1140kg et en Australie, 1240kg. Pour les LTVs (Light trucks and Vans) ou camions légers aux USA, la moyenne est de 1830kg. L'étude se base sur la formule de Joksch (formule 5) établi sur base des statistiques d'accidents. Cette formule montre qu'un rapport de masse de 2/1 entre deux véhicules en collision occasionne 16 victimes dans la voiture 2 contre une victime dans la voiture 1. De tels cas ont été appelés très catastrophiques. On a alors fixé la limite de la catastrophe à un rapport de victimes $R2/R1$ égal à 10/1 ce qui correspond à un rapport de masse de 1,78/1.

En fixant comme voiture de référence par région, la voiture ayant pour masse, la masse moyenne des voitures de la région, on a défini en pourcentage le nombre de voitures qui assureraient au mieux la protection de leurs occupants en cas de collision avec la voiture de référence. Ainsi par exemple, en UK, le minimum de masse qu'une voiture peut avoir pour résister à la voiture de référence (1140kg) est de 640kg ($1140 \text{ kg}/1,78$). Et le maximum qu'une autre voiture doit avoir pour épargner les occupants de la voiture de référence (1140kg) est de 2030kg ($1140\text{kg} *1,78$). Les tables B.1 et B.2 montrent les résultats.

Masse de référence par région	Masse minimale pour assurer la protection de ses occupants	Nombre de voitures (%) dont la masse est inférieure au minimum UK	Nombre de voitures (%) dont la masse est inférieure au minimum Australie	Nombre de voitures (%) dont la masse est inférieure au minimum USA
1140kg (UK)	640kg	0	0	0
1240kg (Australie)	700kg	0	0	0
1400kg (USA cars)	790kg	3	0	0
1830kg (USA LTVs)	1030kg	33	28	7

Table B.1: Nombre de voitures (en %) qui n'assureraient pas la sécurité de leurs occupants en cas de collision avec la voiture de référence par région

Masse de la voiture de référence par région	Masse maximale pour assurer la protection des occupants de la voiture de référence	Nombre de voitures (%) dont la masse est supérieure au maximum UK	Nombre de voitures (%) dont la masse est supérieure au maximum USA	Nombre de LTVs (%) dont la masse est supérieure au maximum USA
1140kg (UK)	2030kg	0	0	26
1240kg (Australie)	2200kg	0	0	13
1400kg (USA cars)	2490kg	0	0	1
1830kg (USA LTVs)	3250kg	0	0	0

Table B.2: Nombre de voitures (en %) qui n'assureraient pas la sécurité des occupants de la voiture de référence en cas de collision par région

Ainsi donc, comme le montre la Table 1, toutes les voitures en UK, Australie et aux USA, seront compatibles avec les voitures de référence de UK(1140kg) et de l'Australie (1240kg) pour la protection de leurs occupants. 3% des voitures en UK souffriraient d'une collision catastrophique avec la voiture de référence des USA (1400kg) alors qu'aucune de l'Australie et des USA n'en souffrirait. 33% des voitures en UK, 28% en Australie et 7% aux USA souffriraient d'une collision catastrophique en cas de collision avec la LTVs de référence des USA (1830kg). Concernant les dommages causés dans la voiture de référence, la Table B.2

montre qu'aucune voiture en UK et aux USA ne causerait une collision catastrophique aux voitures de référence des USA et de l'UK. Par contre 26% des LTVs des USA feraient des collisions catastrophiques avec la voiture de référence de l'UK ; 13% de LTVs avec la voiture de référence de l'Australie, 1% de LTVs avec la voiture de référence des USA et aucun LTVs ne pourrait endommager la LTVs de référence.

B.2 Evaluation des alternatives: Application de l'AV

Certaines caractéristiques de ces véhicules (aérodynamique, résistance au roulement, etc.) et des moteurs sont modifiées à l'exception de la prius et l'insight dont les caractéristiques sont gardées telle qu'elles sont. L'évaluation des véhicules sélectionnés en fonction des critères susmentionnés se base sur certaines caractéristiques (dimensions, poids, prix...) de chaque véhicule. Certaines de ces caractéristiques sont fournies par le constructeur pendant que d'autres peuvent être déduites par calcul. Cette évaluation se réfère également sur les résultats de la simulation des véhicules avec le logiciel ADVISOR. Les limites de satisfaction (ou échelle de cotation) sont fixées par référence aux réalités du terrain. C'est ainsi que les coûts considérés ici reflètent le marché local et les limites de performances sont référencées sur les performances actuelles des véhicules. L'évaluation des véhicules sur un critère composé sera donnée par la moyenne des évaluations par rapport à ses sous critères. La Table suivant illustre les caractéristiques physiques des véhicules considérés et les évaluations suivant chaque critère.

paramètresVEHICULE		RK_1.2 E	RK_1.6E	RK_1.5D	RK_MH_1.5_D	RK_FH_1,5D	Honda_insight	Toyota prius	RL_1.9D
longeur(m)		4,035	4,035	4,03	4,03	4,03	3,53	4,32	4,51
largeur(m)		1,672	1,672	1,67	1,67	1,67	1,64	1,7	1,75
hauteur(m)		1,89	1,89	1,83	1,83	1,83	1,44	1,48	1,43
empattement(m)		2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,4	2,55	2,75
hauteur cg(m)		0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5
masse(kg)		1065	1105	1095	1184	1238	1000	1368	1350
masse réf.(kg)		950	950	950	950	950	950	950	950
coût carburant(€/l)		1,4	1,4	1	1	1	1,4	1,4	1
Chevaux fiscaux		5,79	6,59	5,57	4,88	4,37	4,06	4,66	7
coût taxes(€/an)		130	165	130	90	70	70	90	165
coût parking(€/an)		600	600	600	600	600	600	600	600
coût achat (€)		14500	15300	15600	17000	17000	20000	25000	30700
entretien(€/an)		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
assurances(€/an)		1000	1100	1000	1000	1000	1000	1000	1100
nombre années		5	5	5	5	5	5	5	5
consommation(l/100km)		7	7,4	5,5	5	4,8	4,8	5,2	6,1
distance(km)		100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000
Coût au km	Coût	0,380	0,400	0,348	0,355	0,352	0,401	0,457	0,511
	note/5	3	3	4	3	3	3	2	2
Test NCAP	étoiles	4	4	4	4	4	4	5	5
	note/5	4	4	4	4	4	4	5	5
Test contre Piéton	étoiles	1	1	1	1	1	3	2	2
	note/5	1	1	1	1	1	3	2	2
Stabilité	facteur	1,1943	1,1943	1,1929	1,1929	1,1929	1,6400	1,7000	1,7500
	note/5	2	2	2	2	2	5	5	5
Agressivité	rapport de masse	1,12	1,16	1,15	1,25	1,30	1,05	1,44	1,42
	note/5	5	4	5	4	3	5	2	2
Equipements	Nb éqpmnts	3	3	3	3	3	3	4	4
	note/5	3	3	3	3	3	3	4	4
SECURITE	note moyenne	3	2,8	3	2,8	2,6	4	3,6	3,6
acc. 0-100	temps	13	11	11	13	14	13	15,3	10
	note/5	2	4	4	2	1	2	1	5
Acc.60-100	temps	7	5	6	6	7	6	7	4
	note/5	1	3	2	2	1	2	1	4
Pente	%	14	18	17	15	13	13	2	22
	note/5	2	3	3	3	2	2	1	4
Vitesse max.	Vitesse	158	178	151	151	150	180	163	178
	note/5	3	5	3	3	2	5	4	5
PERFORMANCES	note moyenne	2	3,75	3	2,5	1,5	2,75	1,75	4,5
Garantie	Nb années de garanti	2	2	2	3	3	3	5	2
FIABILITE	note/5	2	2	2	3	3	3	5	2
conduite		148	148	148	148	148	148	180	180
confort		124	124	124	124	124	124	180	180
fonctionnalité		132	132	132	132	132	132	170	170
CONFORT	total	404	404	404	404	404	404	530	530
	note/5	3	3	3	3	3	3	5	5
look	note/5	3	3	3	3	3	3	4	4
high-tech	note/5	2	2	2	3	3	3	4	2
verte	note/5	2	2	2	3	3	3	4	2
IMAGE	moyenne	2,33	2,33	2,33	3	3,00	3,00	4	2,67

Table B.3: Caractéristiques externes et résultats des tests et simulation des véhicules.

NB: hauteur cg: hauteur du centre de gravité

Le coût au Km est obtenu en divisant le coût global (coût d'achat+coût parking+coût des taxes + coût assurances + coût du carburant + entretien) par le nombre total de kilomètres (100000km). Le coût d'achat est fourni par le constructeur. Les coûts des taxes et des assurances sont fixés suivant le marché en fonction de la puissance (chevaux fiscaux) et du type de moteur (essence ou diesel). Le coût de parking est fixé à 600 € par an en raison de 50€ par mois pendant 5 ans. Le coût total du carburant s'obtient en multipliant le coût unitaire par la consommation et en divisant par le nombre de km.

L'échelle de cotation variera entre 0,2 et 0,6€/Km avec des paliers à chaque dixième d'euro. La note la plus élevée correspond à 0,2 € et la note la moins élevée à 0,6€. Le coût actuel de la

Prius est de 0,36€/km et non de 0,46€/km comme c'est écrit dans la table B.3. Car dans notre travail le modèle la Prius considéré est la Prius I.

Concernant la sécurité, le nombre d'étoiles décernées (1 à 5), par NCAP, correspond directement à l'échelle de cotation (1 à 5). Le facteur de stabilité SSF se calcule suivant la formule:

$$SSF = \frac{T}{2H}$$

avec, T = (T: track width): distance entre les centres des pneus sur l'axe transversal.

H = (H:center of gravity height): la hauteur du centre de gravité par rapport au sol

Le SSF varie généralement de 1 à 1,5 et plus il est élevé, plus le véhicule est stable et la cote sur une échelle de 1 à 5 est grande. L'agressivité est évaluée suivant le rapport de masse entre la masse du véhicule considéré et celle du véhicule de référence. La masse de la référence choisie est la moyenne des masses des véhicules de la même catégorie que la voiture considérée. Elle est ici de 950kg.

Quant aux performances, les temps d'accélération, la pente franchise à 80 Km/h et la vitesse maximale sont obtenus par simulation des performances avec le logiciel ADVISOR. La crédibilité des résultats Advisor peut se vérifier en les comparant avec les données du constructeur (temps d'accélération de 0 à 100 Km/h et vitesse maximale).

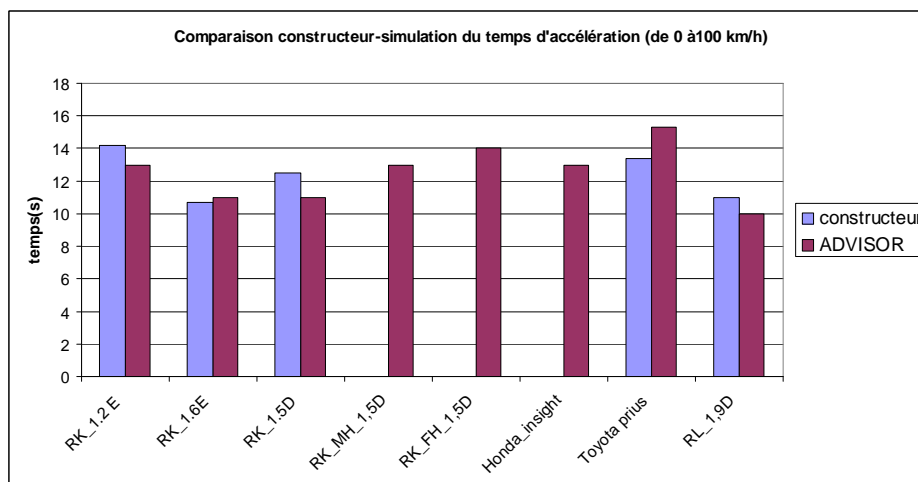


Figure B.9: Comparaison des temps d'accélération (de 0 à 100km/h) constructeur-advisor

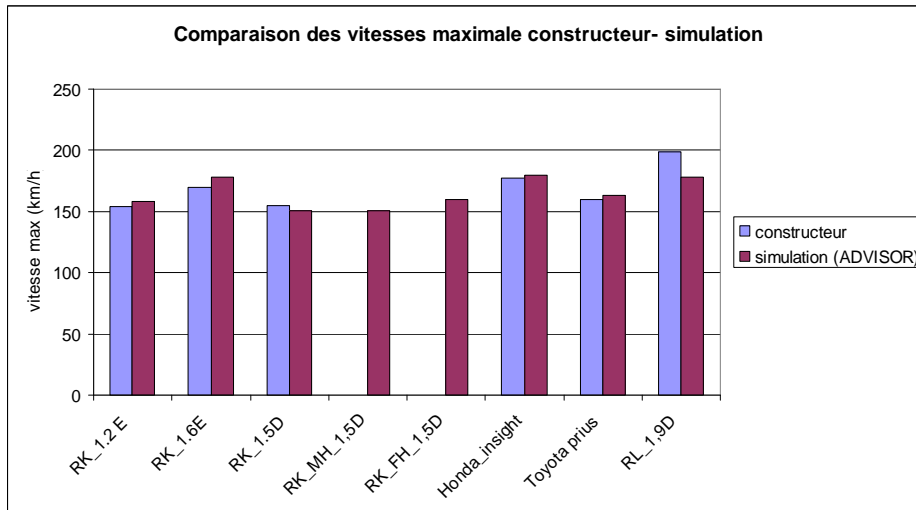


Figure B.10: Comparaison des vitesses maximales (Km/h) constructeur-advisor

Selon ces graphiques, les résultats Advisor sont proches des données du constructeur. Pour le temps d'accélération partant de zéro jusqu'à 100 kilomètres par heure, la référence pour une bonne performance est de 12 secondes. Pour une échelle de cotation de 1 à 5 points, la meilleure performance sera de moins de 10 secondes et la mauvaise sera de plus de 15 secondes. Pour le temps d'accélération pendant les dépassements et les reprises (de 60 à 100km/h), la référence est de 5,3 secondes. Comme précédemment, les performances croient de la mauvaise ($\geq 6,3$ secondes) à la meilleure ($\leq 3,3$ secondes). En gardant la même échelle (1 à 5 points), les points attribués seront entre 1 et 5.

Les limites pour la vitesse maximale sont de 140 à 170 Km/h.

Et enfin pour la pente maximale à franchir à 88,4km/h, les limites se situent entre 10% et 22%

Le résultat final sur les performances sera la moyenne des trois critères.

La note pour la fiabilité correspond au nombre d'années de garantie et les années de garantie sont fournies par le constructeur.

Le confort est évalué suivant les trois appréciations fournies par le "moniteur de l'automobile": total fonctionnalité, total confort et total conduite. La note attribuée se base sur la somme de ces trois évaluations. Les limites se situent entre 280 et 520.

Les préférences (niveaux de satisfaction ou cotes) de chaque alternative vis-à-vis de chaque critère sont ainsi établies. En supposant qu'une note de 4 sur 5 pour un critère donné est très satisfaisante, nous avons fixé la cible à 4 pour normaliser les évaluations.

L'approche utilisée pour octroyer des notes sur une échelle de 5, emploi des valeurs discrètes. Une approche linéaire pourrait être la meilleure.

B.3 Pondération

Pour tenir compte de l'importance relative de chaque critère, nous avons utilisé la méthode du tri croisé soit la méthode multicritère AHP (processus d'analyse hiérarchique) Cette méthode se distingue des autres par sa façon de déterminer les poids des critères: elle procède par combinaisons binaires de chaque niveau de la hiérarchie par rapport aux éléments du niveau supérieur. Cette méthode d'analyse multicritères permet de résoudre des problèmes plus complexes. La méthode repose sur le principe que le preneur de décision peut porter un jugement de valeur sur l'importance relative de chaque critère pour ensuite spécifier une préférence pour chaque alternative en regard de chaque critère.

B.3.1 Priorité des critères.

La méthode AHP suit cinq étapes:

- Décomposer le problème complexe en une structure hiérarchique:

Dans cette étape, il faut définir l'objectif cible (niveau 0) et les critères de décision ou d'analyse (niveau 1) ainsi que l'ensemble d'options sous étude (niveau 2).

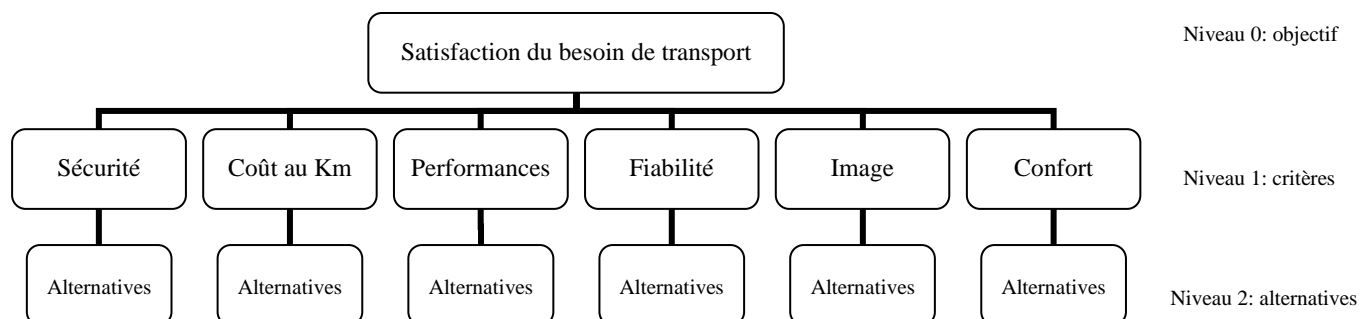


Figure B.11: Organigramme hiérarchique.

Avec la méthode AHP la prise de décision est faite en considérant les ratios mathématiques de l'importance de chaque critère en relation avec chaque alternative.

- Combinaisons binaires

On compare l'importance relative de tous les éléments appartenant à un même niveau de la hiérarchie pris deux par deux, par rapport à l'élément du niveau immédiatement supérieur.

Il faut configurer une matrice carrée réciproque formée par les évaluations des rapports des poids ($K \times K$), K étant le nombre d'éléments comparés. On obtient de cette façon:

$a = a_{ij}$ (a_{ij} = évaluation par comparaison entre l'élément i et l'élément j)

avec $a_{jj}=1$ et $a_{ji}=1/a_{ij}$ (valeur réciproque)

Toutes les paires de comparaison doivent être établies:

- Comparaison entre les 4 critères et l'objectif;
- Comparaison entre les alternatives et le critère «sécurité»;
- Comparaison entre les alternatives et le critère «coût»;
- Comparaison entre les alternatives et le critère «performances»;
- Comparaison entre les alternatives et le critère «fiabilité»;
- Comparaison entre les alternatives et le critère «image»;
- Comparaison entre les alternatives et le critère «confort».

Pour chaque comparaison on doit choisir le critère le plus important et exprimer son jugement quant à son importance. Par exemple, on pourrait dire que le prix est plus important que le niveau de fiabilité. La mesure pour déterminer l'importance relative pourrait être exprimée par échelle de 1 à 9.

Jugement verbal	Valeur numérique
Extrêmement plus important	9
Très fortement plus important	7
Fortement plus important	5
Modérément plus important	3
Importance égale	1

Table B.4: Echelle pour l'importance relative des critères

En relation avec cette échelle, on peut faire les comparaisons suivantes:

Comparaison		Critère plus important	Echelle	Evaluation
SECURITE	COÛT AU KM	sécurité	Egalement a modérément plus important	2
SÉCURITÉ	PERFORMANCES	sécurité	Egalement a modérément plus important	2
SÉCURITÉ	FIABILITE	sécurité	Egalement a modérément plus important	2
SÉCURITÉ	CONFORT	sécurité	importance égale	1
SÉCURITÉ	IMAGE	sécurité	Egalement a modérément plus important	2
COÛT AU KM	PERFORMANCES	coût au km	importance égale	1
COÛT AU KM	FIABILITE	coût au km	Egalement a modérément plus important	2
COÛT AU KM	CONFORT	coût au km	Egalement a modérément plus important	2
COÛT AU KM	IMAGE	coût au km	modérément plus important	3
PERFORMANCES	FIABILITE	Performances	modérément plus important	3
PERFORMANCES	CONFORT	performances	Egalement a modérément plus important	2
PERFORMANCES	IMAGE	Performances	Egalement a modérément plus important	2
FIABILITE	CONFORT	Confort	importance égale	1
FIABILITE	IMAGE	Image	Egalement a modérément plus important	2
CONFORT	IMAGE	image	importance égale	1

Table B.5: Comparaison des paires

➤ Matrice de comparaison des paires

La matrice de comparaison des paires devient:

	SECURITE	COÛT AU KM	PERFORMANCES	FIABILITE	CONFORT	IMAGE
SECURITE	1	2	2	2	1	2
COÛT AU KM	0,5	1	1	2	2	3
PERFORMANCES	0,5	1	1	3	2	2
FIABILITE	0,5	0,5	0,33	1	1	0,5
CONFORT	1	0,5	1	1	1	1
IMAGE	0,5	0,33	0,5	2	1	1

Table B.5: Matrice de comparaison des paires

C'est la matrice du premier niveau. Elle permet de calculer la priorité de chaque critère par rapport aux autres.

➤ Synthèse

Cette étape consiste à calculer la priorité de chaque critère en relation avec sa contribution vers l'atteinte de l'objectif.

La procédure mathématique est assez complexe et se résume en trois étapes:

- On fait la somme des valeurs de chaque colonne.
- On divise chaque élément de la matrice par le total de sa colonne (normalisation).

- On calcule la moyenne des éléments de chaque rangée de la matrice. Ces moyennes donnent un estimé des priorités du critère (vecteur propre).

	SECURITE	COUT AU KM	PERFORMANCES	FIABILITE	CONFORT	IMAGE	Priorités
SECURITE	0,25	0,38	0,34	0,18	0,13	0,21	0,25
COUT AU KM	0,13	0,19	0,17	0,18	0,25	0,32	0,21
PERFORMANCES	0,13	0,19	0,17	0,27	0,25	0,21	0,20
FIABILITE	0,13	0,09	0,06	0,09	0,13	0,05	0,09
CONFORT	0,25	0,09	0,17	0,09	0,13	0,11	0,14
IMAGE	0,13	0,06	0,09	0,18	0,13	0,11	0,11

Table B.6: Priorités des critères

Selon l'information donnée par la Table précédent, la sécurité, avec une priorité de 0,27, est le plus important des six critères.

➤ Cohérence

La méthode AHP nécessite que les préférences soient exprimées avec cohérence.

Par exemple si A, comparé à B, a une évaluation de 3, et si B, lorsque comparé à C, a une évaluation de 2, une cohérence parfaite donnerait une évaluation de $2 \times 3 = 6$ à la paire A versus C. Une évaluation de 4 ou 5 indiquerait un niveau d'incohérence. Pour vérifier le degré de cohérence, un ratio est calculé. La méthode est telle qu'un ratio plus grand que 0,10 indique un niveau trop élevé d'incohérence. Le ratio de cohérence trouvé pour les comparaisons précédentes est de 0,06, une valeur plus petite que 0,10. On peut donc conclure que le degré de cohérence dans les comparaisons est acceptable.

B.3.2 Matrices de deuxième niveau

Comme on l'a fait pour les critères de décision, on doit établir des matrices de comparaison des paires des alternatives. Il s'agit de comparer les alternatives ou de spécifier les préférences de chaque alternative en regard de chaque critère.

On peut exprimer les préférences de la façon suivante:

- En regard du coût, la Kangoo 1.2 essence est fortement préférée à la Prius.
- En regard du coût, la Peugeot 206_1.6 essence est de modérément à fortement préférée à la Prius
- Au niveau de la fiabilité la Prius est très fortement préférée à la Kangoo 1.2 essence.
- Etc.

Suivant l'échelle de jugement, on construit les matrices de comparaison des paires des alternatives en fonction de chaque critère. De même que pour les critères, on détermine les priorités des alternatives suivant chaque critère. Pour pouvoir dire qu'une alternative est préférable par rapport à une autre suivant un certain critère, on doit se référer aux évaluations des alternatives suivant ce critère. Ce qui peut se traduire, pour le cas qui nous concerne ici, par la note (cotation sur une échelle de 1 à 5) que l'on aura attribué à chaque alternative pour chaque critère. On peut donc considérer directement les notes attribuées à chaque alternative sans devoir exprimer les préférences qui dépendent par ailleurs de ces notes. Les notes obtenues seront pondérées par les priorités (poids) des critères. On construit ensuite une matrice combinée contenant les critères et les alternatives. Pour chaque alternative, on additionne les notes pondérées, et la meilleure solution est celle ayant la note maximale.

B.3.3 Satisfaction du besoin

Nous avons maintenant les priorités des critères et les évaluations des alternatives en regard de chaque critère. Il reste à construire une matrice combinée contenant les critères et les alternatives. La priorité des critères est combinée aux évaluations des alternatives pour obtenir la **préférence globale** du décideur.

		CRITÈRES				
		C1	C2	C3	...	CN
Poids relatifs	W1	W1	W2	W3	...	WN
	Alternatives					
A1	a11	a12	a13	...	a1N	
A2	a21	a22	a23	...	a2N	
A3	a31	a32	a33	...	a3N	
.	
.	
AM	aM1	aM2	aM3	...	aMN	

Figure B.12: Matrice de décision

$$A = \max_i \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot w_j \quad \text{pour } i = 1, 2, \dots, M$$

Ce qui se traduit par la Table suivant:

CRITERES	SÉCURITÉ	COÛT AU KM	PERFORMANCES	FIABILITE	CONFORT	IMAGE		
POIDS	0,25	0,21	0,20	0,09	0,14	0,11		
	EVALUATION DES ALTERNATIVES (/5)						SOMME PONDREEE	VALEUR NORMALISEE
référence	4	4	4	4	4	4	4	1
RK_1.2 E	3	3	2	2	3	2,33	2,63	0,65
RK_1.6E	2,8	3	3,75	2	3	2,33	2,93	0,73
RK_1.5D	3	4	3	2	3	2,33	3,03	0,76
RK_MH_1.5_D	2,8	4	2	3	3	3	2,95	0,74
RK_FH_1,5D	2,6	3	2	3	3	3	2,69	0,675
Honda_insight	4	3	2,75	3	3	3	3,19	0,79
Toyota prius I	3,6	2	1,75	5	5	4	3,26	0,81
RL_1.9D	3,6	2	4,5	2	5	2,67	3,39	0,85

Table B.7: Evaluation globale des Alternatives

Annexe C: Modélisation par approximation: surface de réponses

C.1 Introduction

Dans de nombreux problèmes, le modèle mathématique décrivant certains phénomènes physiques est parfois difficile voire impossible à obtenir. Cependant une étude paramétrique permet d'identifier et de recalibrer le modèle et de prédire le comportement du phénomène. En effet, lorsque ce phénomène est quantifiable (par calcul, expérience, simulation), on peut le représenter graphiquement dans un espace à $k+1$ dimensions où k représente le nombre de facteurs influençant le phénomène. Concrètement, un phénomène Y peut être représenté mathématiquement comme une fonction de X_k facteurs:

$$Y = f(X_k) \tag{C.1}$$

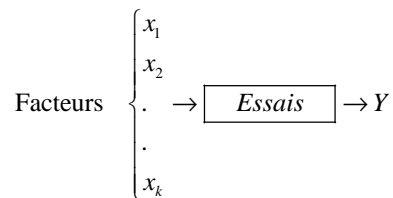
Ce sont des surfaces qu'on peut représenter empiriquement en calculant Y pour un certain nombre de facteurs X_k et en reliant les points contigus par des segments de droite. Pour modéliser le plus précisément possible les surfaces de réponse, il faut partir sur plusieurs points de conception (avec un domaine de variation constant), ce qui sera très coûteux en temps de calcul. La technique des Plans d'Expériences est utilisée pour construire des points de conception appropriés en explorant l'espace de conception. Il s'agit de déterminer un ensemble de valeurs pour les X_k et le type d'éléments joignant les combinaisons de points de cet ensemble. A partir de ces données est interpolée une surface de réponse que l'on veut être la plus proche possible de tous les points de l'ensemble définissant la surface réelle. Elle cherche ensuite à minimiser le nombre de points de conception tout en essayant d'obtenir le meilleur modèle de la surface de réponse.

L'ensemble des combinaisons de valeurs des X_k constitue un plan d'expériences. Le calcul de la réponse pour chaque combinaison de facteurs correspond à un essai. L'essai peut être une expérience (au sens physique du terme) ou simulation numérique (exécutée par un code de calcul). La fonction qui représente la surface de réponse constitue le modèle du phénomène

physique. C'est typiquement un polynôme en X_k . Le domaine d'étude correspond aux bornes des facteurs. D'autres fonctions non polynomiales existent, il s'agit du kriging, des splines, des réseaux de neurones, etc. Le choix de la méthode de représentations dépend du problème à traiter et donc de la corrélation entre les facteurs et les réponses. Nous n'allons pas développer toutes ces méthodes mais nous allons prendre l'exemple des modèles polynomiaux qui sont les plus simples mais parfois efficaces.

C.2 Surfaces de réponses

La modélisation expérimentale permet d'évaluer un phénomène physique déterminé en fonction des paramètres (facteurs) influençant le phénomène. Ce qui se schématise comme suit:



La régression linéaire multiple permet de représenter la surface de réponse du phénomène physique sous la forme d'un polynôme en X_k .

$$Y = a_0 + \sum a_i x_i + e \quad i = 1, \dots, k \quad (\text{C.2})$$

L'estimation des coefficients a_i se fait par minimisation de l'erreur $e = Y - Y_{app}$, Y_{app} étant la réponse estimée par le modèle. Le modèle linéaire est ajusté par la méthode de régression linéaire. On peut écrire sous forme matricielle:

$$Y = XA + E \quad (\text{C.3})$$

Si N est le nombre d'essais effectués:

- Y est le vecteur des réponses de dimensions N,
- X_{ij} est la matrice d'essais (dimensions $N \times k + 1$) et x_{ij} , la valeur de la variable x_{ij} à la i ème essai
- A est le vecteur des coefficients à estimer (dimensions $k + 1$)
- E est le vecteur des résidus (erreurs) de dimensions N

En supposant que la réponse Y suit une loi statistique normale de variance σ^2 , alors le vecteur des résidus aura une espérance nulle et une variance σ^2 . La réponse estimée vaut alors:

$$Y_{app} = XA_{app} \quad (C.4)$$

La minimisation du vecteur des résidus est obtenue par

$$\partial(E'E)/\partial A = 0 \quad (C.5)$$

Le vecteur des coefficients estimés sera donné par:

$$A_{app} = (X'X)^{-1} X'Y \quad (C.6)$$

Les modèles doivent être choisis avec soin parce que la qualité des approximations en dépend. Ils doivent pouvoir incorporer différents types de variables (discrètes ou continues). En outre, pour améliorer la qualité des surfaces, on peut encore recourir à certaines transformations des variables ou des modèles. Parmi les transformations que peuvent subir les variables on peut citer:

- La mise à l'échelle ou adimensionnement:

Elle permet la comparaison de l'influence des facteurs entre eux ou la prise en compte des facteurs qualitatifs. Soit un facteur quantitatif X prenant des valeurs dans l'intervalle $[X_{min}, X_{max}]$ on l'adimensionne en utilisant la formule:

$$x = \frac{\left(X - \frac{1}{2}(X_{max} + X_{min}) \right)}{\frac{1}{2}(X_{max} - X_{min})} \quad x \in [-1,1] \quad (C.7)$$

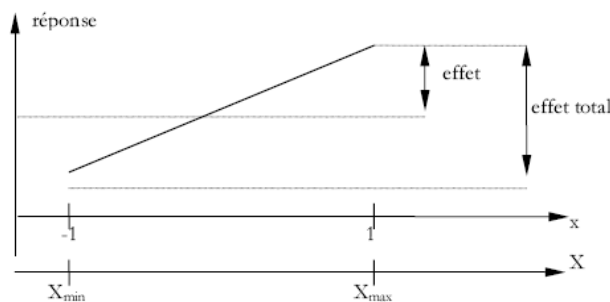


Figure C.1: Effet des facteurs sur la réponse

- Et le changement de variables:

Pour prendre en compte les influences non linéaires des facteurs ou améliorer la qualité du modèle, il peut être utile de changer les monômes de divers degrés en fonctions inverses ou logarithmiques ($\frac{1}{x}, \log(x)$). Cela signifie que si par exemple une réponse Y est proportionnelle

à $\log(x)$, un polynôme de premier degré $Y = \log(x)$ modélise mieux la réponse que tout polynôme en x .

Au lieu de se limiter à un certain degré de liberté, les modèles polynomiaux peuvent prendre en compte des facteurs plus complexes traduisant un rapprochement avec la réalité. Il s'agit par exemple de la prise en compte de l'interaction des facteurs. Cependant, plus on augmente les termes plus les essais à réaliser augmentent car on aura plus de coefficients à estimer. Il faut donc penser au degré de liberté du modèle.

Le nombre de variables indépendantes d'un modèle correspond à son nombre de degrés de liberté. Un modèle à k facteurs quantitatifs possède par exemple $k+1$ degrés de liberté (k degrés pour les variables et un pour la constante). Ainsi il faut au minimum effectuer $k+1$ essais pour pouvoir estimer les coefficients. Il faut donc, lors du choix d'un modèle, être vigilant et ne pas mettre des facteurs insignifiants.

C.3 Analyse de variance

L'analyse de variance permettra de déterminer la qualité du modèle c'est-à-dire son aptitude à décrire les variations de la réponse en comparant les variations expliquées par le modèle et les variations inexpliquées de la réponse.

Supposons que N essais sont réalisés pour déterminer un modèle à k facteurs représentant une surface de réponse. On peut écrire:

la somme des carrés totale:

$$Q_T = \sum (y_i - y_{moy})^2 \quad (C.8)$$

la somme des carrés du modèle:

$$Q_M = \sum (y_{iapp} - y_{moy})^2 \quad (C.9)$$

la somme des carrés des résidus:

$$Q_S = \sum (y_{iapp} - y_i)^2 \quad (C.10)$$

$$Q_T = Q_S + Q_M \quad (C.11)$$

La variation expliquée de la réponse est donnée par la variance induite par les facteurs.

$$V_M = Q_M / k \quad (C.12)$$

et celle inexpliquée par la variance résiduelle

$$V_S = Q_S / N - k - 1 \quad (C.13)$$

Suivant un test statistique, on juge si les facteurs du modèle ont une influence significative ou pas sur la réponse. Le rapport V_M / V_S suit la loi de Fisher à k et N-k-1 degrés de liberté.

$$F = V_M / V_S \rightarrow F_{k, N-k-1} \quad (C.14)$$

En supposant un certain niveau α , la probabilité d'accepter l'hypothèse d'égalité est:

$$prob\{F \leq f_{k, N-k-1, 1-\alpha}\} = 1 - \alpha \quad (C.15)$$

Ceci revient à comparer le degré d'influence entre l'ensemble des variables prise en compte dans le modèle et les facteurs non pris en compte qui sont une source de dispersion de la réponse. L'analyse se résume dans la Table C1:

Source de variation	\sum des carrés	Degré de liberté	Variance induite	Rapport F	Probabilité critique	Conclusion
Modèle	Q_M	k	V_M	V_M / V_S	α	Significatif ou non
Résidus	Q_S	N-k-1	V_S			
Total		N-1	V_T			

Table C.1: Analyse de variance

Pour que l'analyse précédente soit valable, il faut s'assurer que tous les facteurs influents sont pris en compte dans le modèle en testant l'adéquation de celui-ci. En supposant que tous les facteurs influents ont été effectivement pris en compte dans le modèle, les variations inexpliquées de la réponse sont dues uniquement au caractère aléatoire de celle-ci.

V_S estime alors σ^2 de la réponse.

Si $V_S \approx \sigma^2$, les écarts entre y et y_{app} sont dus au caractère perturbé de y .

Si $V_S \succ \sigma^2$, y_{app} n'est pas proche de y , ce qui signifie que les essais sont mal modélisés.

On réalise le même type de test de Fisher sur les facteurs pour vérifier s'ils influencent significativement ou pas la réponse.

Source de variation	\sum des carrés	Degré de liberté	Variance induite	Rapport F	Probabilité critique	Conclusion
A	S_A	ν_A	$V_A = S_A / \nu_A$	V_A / V_S	α	Significatif ou non
B	S_B	ν_B	$V_B = S_B / \nu_B$	V_B / V_S	α	Significatif ou non
AB	S_{AB}	ν_{AB}	$V_{AB} = S_{AB} / \nu_{AB}$	V_{AB} / V_S	α	Significatif ou non
Résidus	Q_S	N-k-1	V_S			
Total	Q_T	N-1	V_T			

Table C.2: Analyse statistique de l'influence des facteurs sur la réponse

C.4 Plans d'expériences

La méthode des plans d'expériences a été mise au point au début du 20^e siècle, dans les années 1920, par Ronald A. Fisher, dans le cadre d'études agronomiques. Elle a pris un essor considérable avec le développement de l'informatique et la puissance de calcul qui l'accompagne. Le succès des plans d'expériences dans la recherche et l'industrie est lié au besoin de compétitivité des entreprises: ils permettent une amélioration de la qualité et une réduction des coûts. La grande nouveauté de la méthode des plans d'expériences est qu'elle propose une **expérimentation factorielle**, c'est-à-dire que tous les facteurs varient simultanément. Le traitement des résultats se fait à l'aide de la régression linéaire multiple et l'analyse de variance.

Prenons le cas le plus simple d'un phénomène soumis à deux facteurs A et B. La pratique classique consiste en une étude de chaque facteur qu'on fait varier de sa valeur minimale à sa valeur maximale en gardant la moyenne pour l'autre facteur et vice versa. Le principal inconvénient de cette pratique est que la surface de réponse ne peut pas être représentée en entiereté (sur tout le domaine étudié). La meilleure façon de faire serait de mailler finement le domaine d'étude et d'effectuer un essai pour chaque nœud. Cette méthode est cependant très coûteuse en temps de calcul ou d'essai. En effet, pour analyser un système paramétré de 6 facteurs influençant non linéairement la réponse, il faudra effectuer, si chaque facteur prend trois valeurs, $3^6 = 729$ essais. Dans ces conditions, on est contraints de limiter le nombre de facteurs en négligeant certains au risque de compromettre la qualité des résultats. L'utilisation d'un plan d'expérience donne alors une stratégie dans le choix des méthodes

d'expérimentation. On cherche à obtenir la meilleure précision sur la surface de réponse en limitant au minimum le nombre d'expériences.

C.4.1 Différents types de plans

La démarche des plans d'expérience consiste à définir les combinaisons des facteurs qui donnent une meilleure modélisation. Nous avons vu que les coefficients estimés sont donnés par:

$$A_{app} = (X'X)^{-1} X'Y \quad (C.16)$$

On constate ici que l'estimation des coefficients dépend de la matrice d'essais X et de la réponse Y . En prenant les hypothèses de Gauss-Markov (facteurs indépendants et variance de la réponse constante sur le domaine d'étude), tout en sachant l'espérance des résidus $\text{esp}(\mathbf{E})=0$ et leur variance $\text{var}(E) = \sigma^2 I_n$, on peut montrer que:

$$\text{cov}(A_{app}) = E \left[(X'X)^{-1} X' E E' X (X'X)^{-1} \right] \quad (C.17)$$

La précision sur les coefficients est d'autant meilleure que $(X'X)^{-1}$ a des termes diagonaux faibles et des termes non diagonaux nuls. Les plans d'expériences visent donc les combinaisons des facteurs qui minimisent les termes de la matrice produit inverse. Ce qui permet d'exploiter un maximum de facteurs avec un maximum de précision et un minimum d'essais. Pour minimiser les termes $(X'X)^{-1}$, deux critères doivent être remplis: la matrice produit inverse doit être une matrice diagonale et les termes diagonaux doivent être des minima. Ce qui revient à dire que la matrice doit être une matrice orthogonale.

Un plan d'expérience est orthogonal vis-à-vis d'un modèle, si toutes les actions disjointes (ne comportant pas de facteurs en commun) du modèle, sont orthogonales deux à deux dans un plan. La condition nécessaire et suffisante d'orthogonalité de deux actions disjointes est qu'à chaque niveau de l'une, tous les niveaux de l'autre sont associés le même nombre de fois dans le plan. Parmi les plans orthogonaux, on peut citer les plans factoriels complets et les plans fractionnaires.

Un plan factoriel complet s'obtient en réalisant des essais correspondant à toute combinaison possible des facteurs. Si par exemple, chaque facteur F_i a n_i niveaux, le nombre d'essais à réaliser est donné par:

$$N = \prod_{i=1}^k n_i \quad (\text{C.18})$$

Les plans complets à deux niveaux sont notés 2^k et comprennent 2^k essais. Ils sont représentés par les matrices de Hadamard qui se construisent par un procédé récursif de la forme suivante:

$$H^k = \begin{bmatrix} H^{k-1} & H^{k-1} \\ H^{k-1} & -H^{k-1} \end{bmatrix} \text{ avec } H^0 = [1] \quad (\text{C.19})$$

Par exemple considérons un plan 2^3 avec trois facteurs A, B et C, la matrice de Hadamard devient:

$$H_2^3 = \begin{bmatrix} +1+1+1+1+1+1+1+1 \\ +1-1+1-1+1-1+1-1 \\ +1+1-1-1+1+1-1+1 \\ +1-1-1+1+1-1-1-1 \\ +1+1+1+1-1-1-1-1 \\ +1-1+1-1-1+1-1+1 \\ +1+1-1-1-1+1+1 \\ +1-1-1+1-1+1+1-1 \end{bmatrix}$$

La première colonne représente le terme constant. Les trois suivantes font état des niveaux des facteurs. Les colonnes restantes (4) donnent leurs interactions (AB, AC, BC et ABC).

Si on note les niveaux inférieur et supérieur des facteurs, par les indices 1 et 2 respectivement, le plan en huit essais à réaliser est donc:

Essais	1	2	3	4	5	6	7	8
A	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1
B	B2	B2	B1	B1	B2	B2	B1	B1
C	C2	C1	C1	C2	C2	C1	C1	C2

Table C.3: Combinaison des facteurs pour un plan 2^3

On se rend compte que les plans factoriels complets deviennent rapidement trop coûteux (en temps d'essais) quand le nombre de facteurs devient important. C'est pour cette raison que Box et Hunter ont développé une méthode permettant de réduire le nombre d'essais par fractionnement d'un plan complet factoriel (plans fractionnaires).

Les plans réduits ont pour objectif d'obtenir les effets de plusieurs facteurs en faisant un minimum d'essais. Les plans réduits sont notés 2^{n-p} . On va ainsi chercher l'effet de n facteurs en faisant n-p essais. Pour cela il existe deux démarches:

- A partir du plan complet on enlève des lignes (des essais). La stratégie généralement adoptée est de garder uniquement les essais qui donnent le même signe à l'interaction la plus élevée. Par exemple, dans le plan complet ci dessous, on choisirait de ne garder que les essais qui donnent un signe +1 à l'interaction I123. Les essais sélectionnés sont {1, 2, 3, 4}. La colonne I123 qui sert à fractionner est appelée générateur d'alias $G= +I123$. L'estimation de son effet n'est plus possible.

	Bandage	Angle armement	Accrochage	Distance en mm				
ESSAI	P1	P2	P3	Réponse	I12	I13	I23	I123
	-1	-1	-1	10	+1	+1	+1	-1
2	+1	-1	-1	20	-1	-1	+1	+1
3	-1	+1	-1	200	-1	+1	-1	+1
	+1	+1	-1	140	+1	-1	-1	-1
1	-1	-1	+1	60	+1	-1	-1	+1
	+1	-1	+1	100	-1	+1	-1	-1
	-1	+1	+1	205	-1	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1	172	+1	+1	+1	+1
	E1=-5.3	E2 =65.9	E2 =20.8	Moy=113.3	E12=-17.8	E13=7.1	E23=-11.7	E123=-0.375

Table C.4: Résultats du plan complet 2³ et essais sélectionnés avec $G= +I123$

- A partir du plan réduit, on rajoute des colonnes pour prendre en compte les nouveaux facteurs. Pour cela, il faut avoir une stratégie de rajout de colonnes. Box & Hunter proposent que les colonnes ajoutées soient des combinaisons linéaires des colonnes existantes. Par exemple pour passer d'un plan 2² à un plan 2³, la troisième colonne est obtenue en multipliant les coefficients des deux premières colonnes. Par conséquent, le signe de I123 reste constant. Les essais {1, 2, 3, 4} sont les mêmes que ceux sélectionnés à partir du plan complet précédent. En fait, avec la combinaison linéaire utilisée, on obtient le même générateur d'alias $G= +I123$.

	Bandage	Angle armement	Accrochage	Distance en mm				
ESSAI	P1	P2	P3	Réponse	I12	I13	I23	I123
1	-1	-1	+1	60	+1	-1	-1	+1
2	1	-1	-1	20	-1	-1	+1	+1
3	-1	1	-1	200	-1	-1	-1	+1
4	1	1	1	172	1	1	+1	+1
	C1=-17	C2 =73	C3=3	Moy=113	C12=3	C13=73	C23=-17	C123=113

Table C.5: Résultats du plan réduit 2³⁻¹ construit par la méthode de Box&Hunter

Remarque 1: Pour le plan réduit, l'effet est appelé contraste.

Remarque 2: La relation entre le contraste du plan réduit et l'effet correspondant du plan complet est donnée ci dessous.

- $C1 = E1 + E23$
- $C2 = E2 + E13$
- $C3 = E3 + E12$

Cette remarque peut se généraliser. Dans le cas où le générateur d'alias est l'interaction d'ordre le plus haut $G=+I_{klm}$ alors $C_k = E_k + E_{lm}$.

Ainsi, plus les interactions entre les facteurs sont faibles, plus les contrastes du plan réduit seront proches des effets du plan complet.

Exemple:

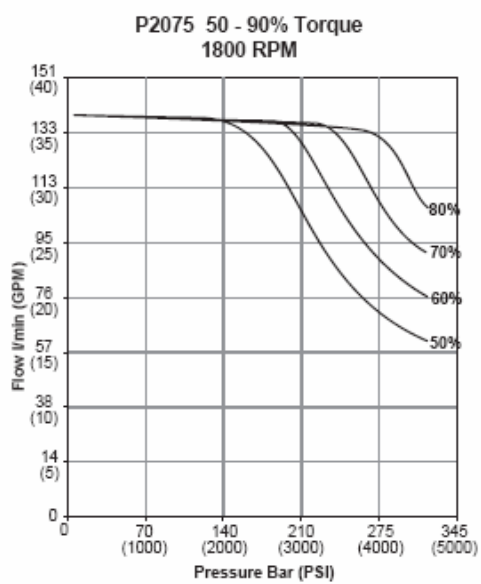
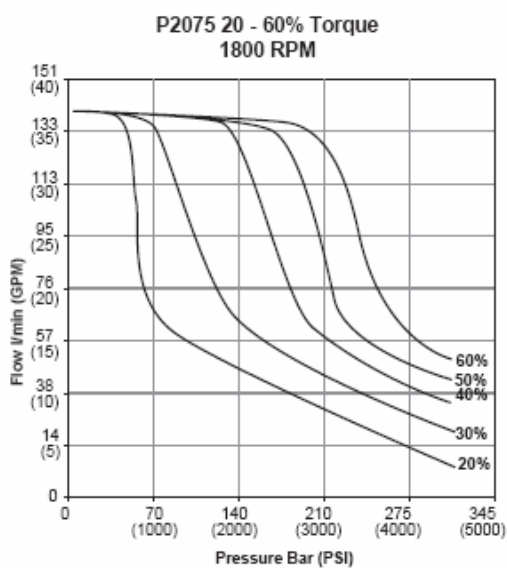
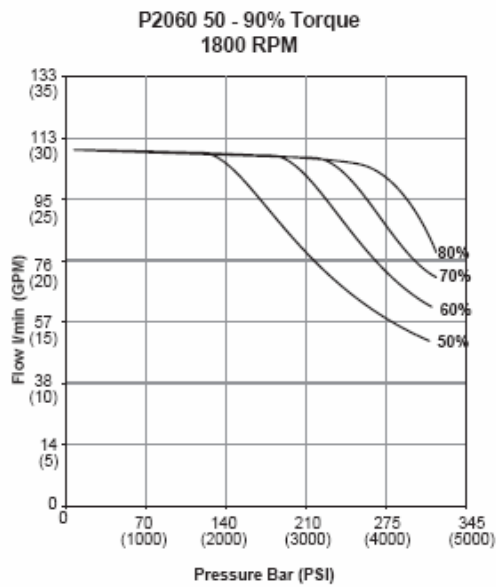
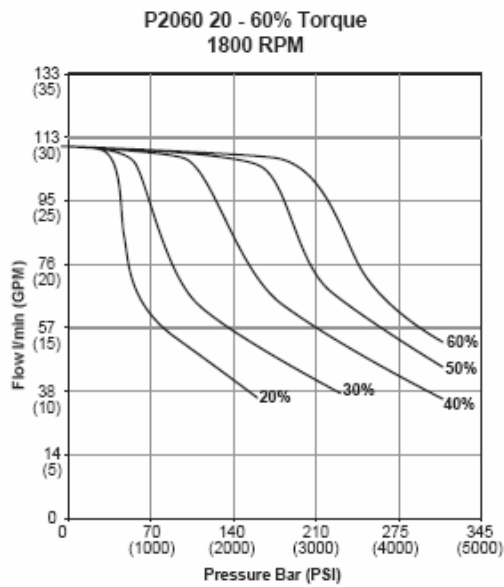
Si on reprend le plan 23 construit dans l'exemple plus haut et que l'on veut construire un plan fractionnaire 23-1 avec le niveau 1 de B comme colonne de coupure, on retiendra les essais 1, 2, 5, 6 pour élaborer le plan.

Annexe D: Courbes caractéristiques du moteur/pompe Parker

P2 Series Typical Torque Control Characteristics

Fluid: Mineral oil ISO VG 32 @ 40° C

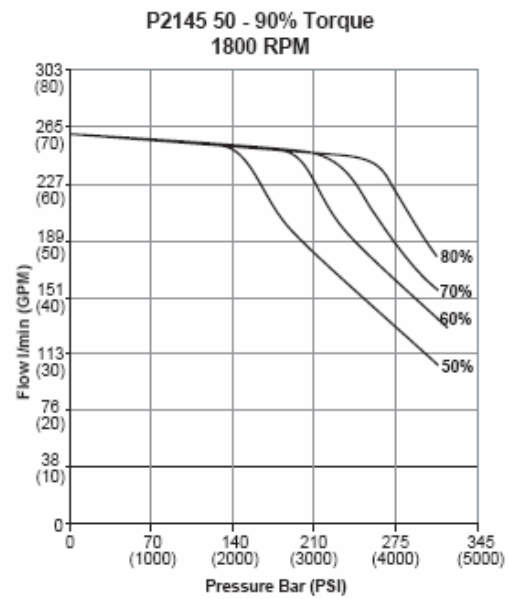
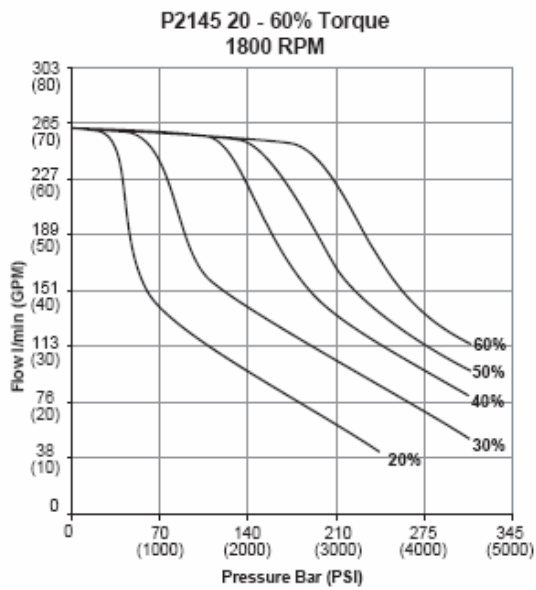
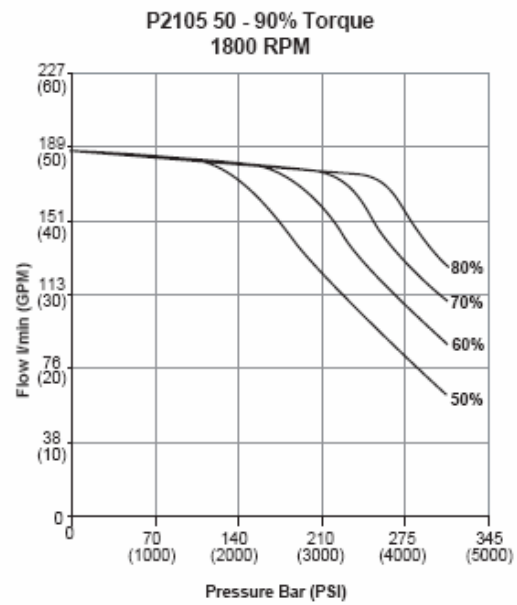
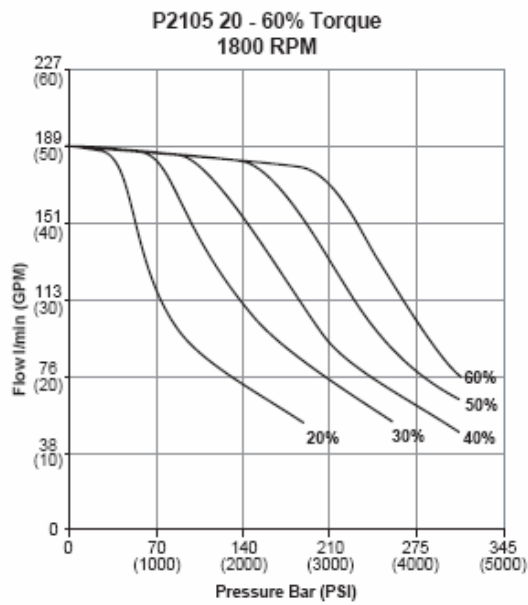
Inlet pressure: 1.0 Bar (14.5 PSI) (Absolute) measured at inlet port.



P2 Series Typical Torque Control Characteristics

Fluid: Mineral oil ISO VG 32 @ 40° C

Inlet pressure: 1.0 Bar (14.5 PSI) (Absolute) measured at inlet port.

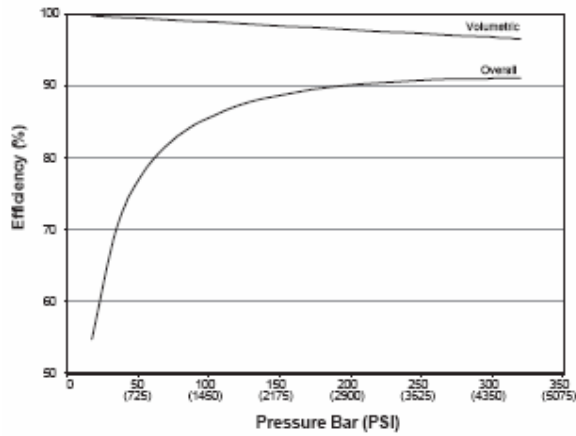


P2 Series Typical Efficiency at Full Displacement @ 1800 RPM

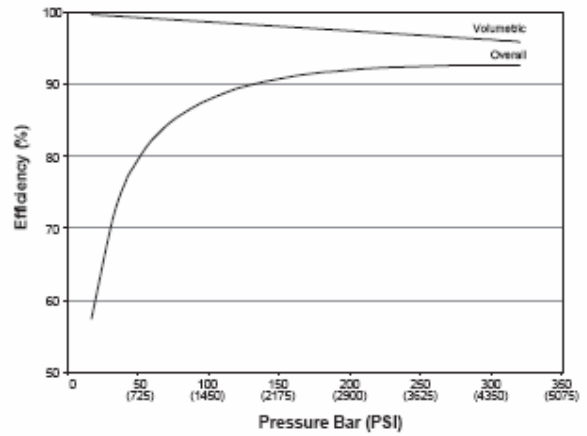
Fluid: Mineral oil ISO VG 32 @ 40° C

Inlet pressure: 1.0 Bar (14.5 PSI) (Absolute) measured at inlet port.

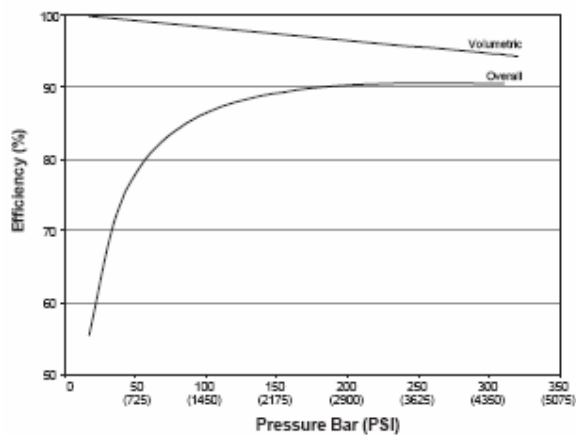
P2060 Efficiency at 1800 RPM



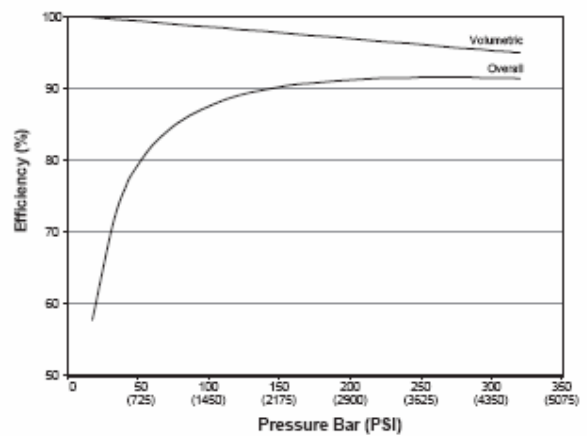
P2075 Efficiency at 1800 RPM



P2105 Efficiency at 1800 RPM



P2145 Efficiency at 1800 RPM

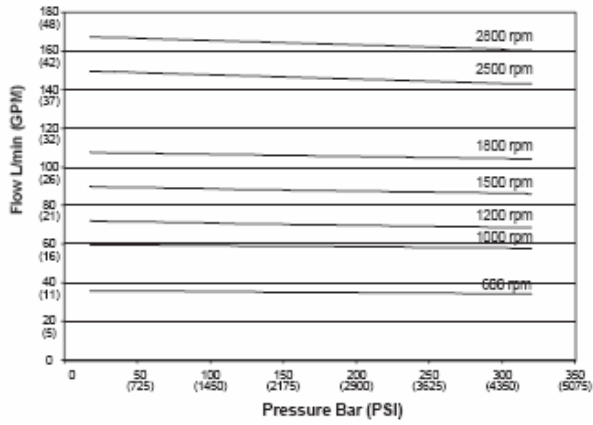


P2 Series Typical Flow vs. Pressure

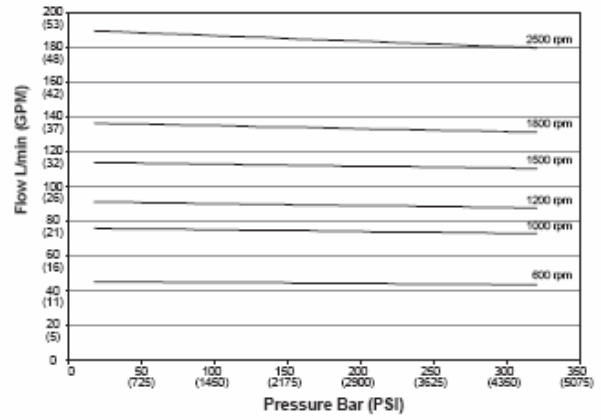
Fluid: Mineral oil ISO VG 32 @ 40° C

Inlet pressure: 1.0 Bar (14.5 PSI) (Absolute) measured at inlet port.

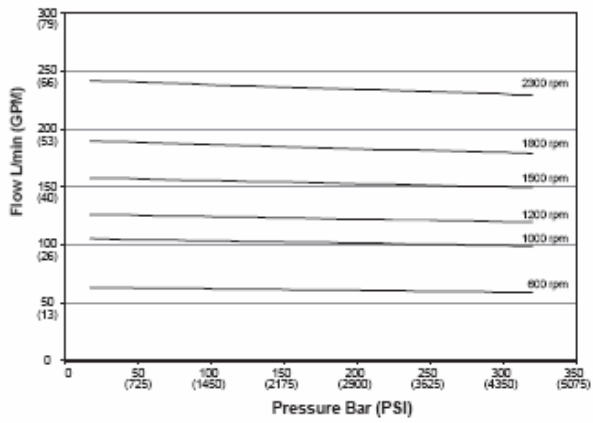
P2060 Outlet Flow - Full Stroke



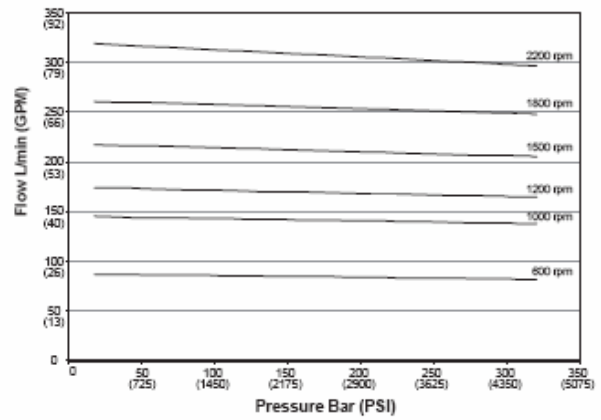
P2075 Outlet Flow - Full Stroke



P2105 Outlet Flow - Full Stroke



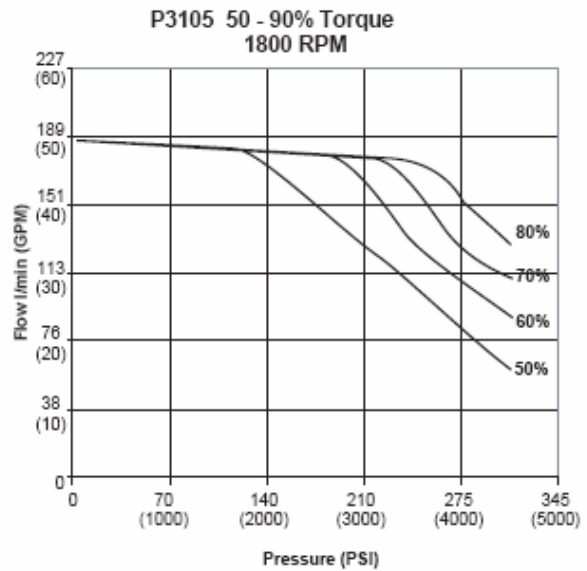
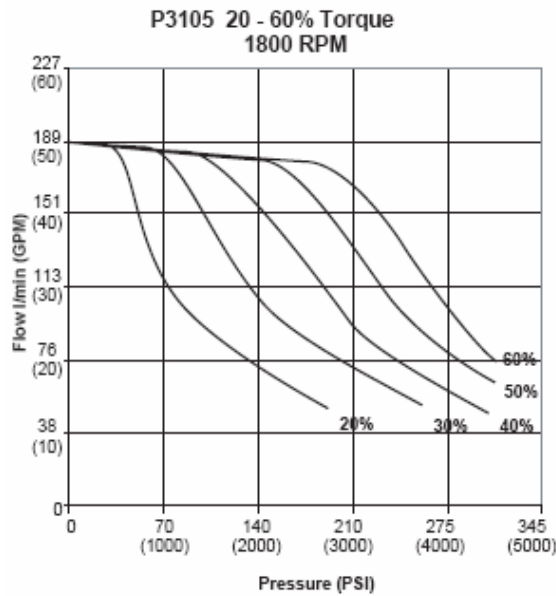
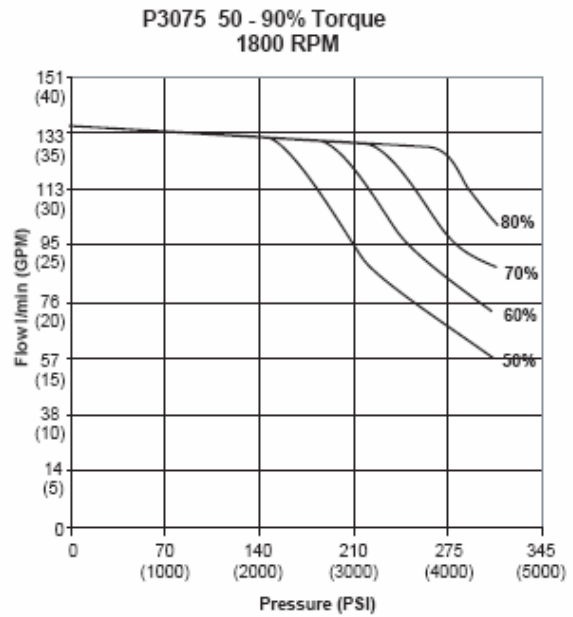
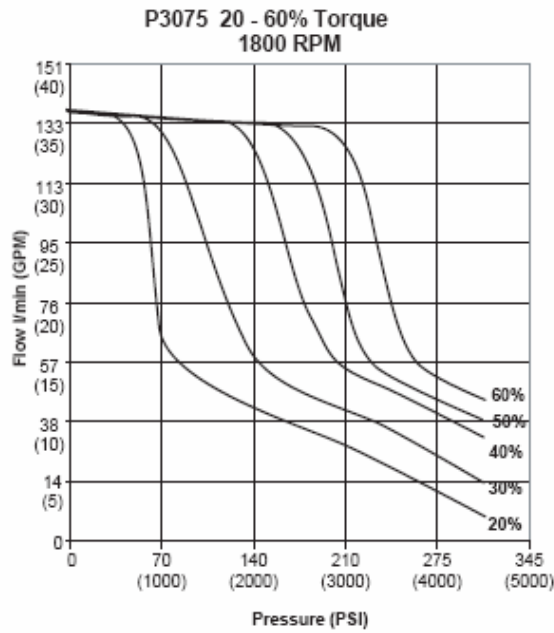
P2145 Outlet Flow - Full Stroke



P3 Series Typical Torque Control Characteristics

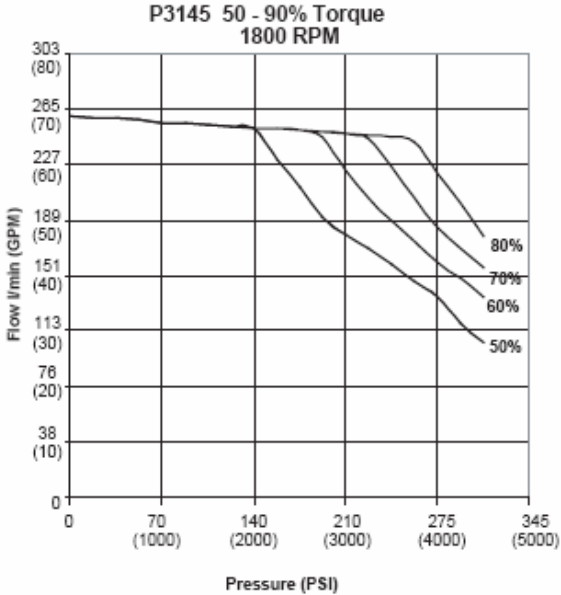
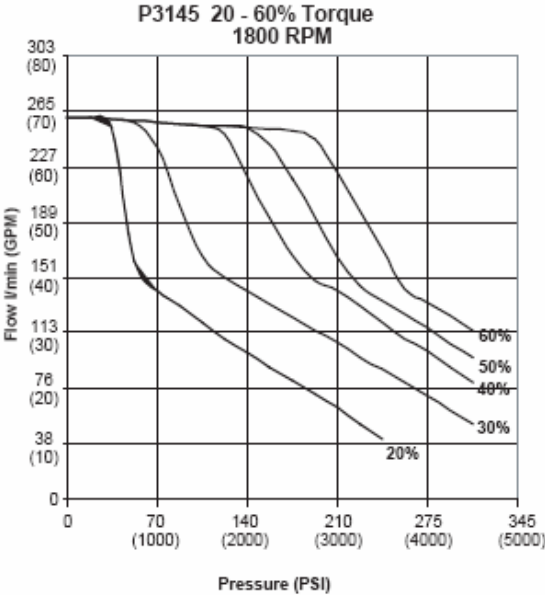
Fluid: Mineral oil ISO VG 32 @ 40° C

Inlet pressure: 1.0 Bar (14.5 PSI) (Absolute) measured at inlet port.



P3 Series Typical Torque Control Characteristics

Fluid: Mineral oil ISO VG 32 @ 40° C
 Inlet pressure: 1.0 Bar (14.5 PSI) (Absolute) measured at inlet port.



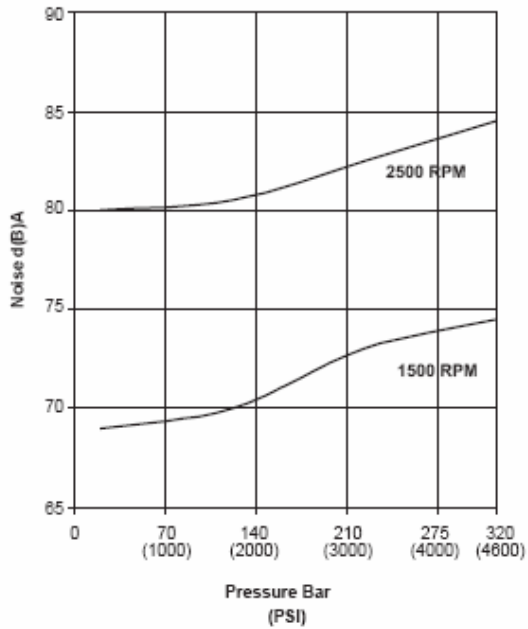
P3 Series Typical Noise Characteristics at Max Displacement

(These are anechoic sound pressure readings.)

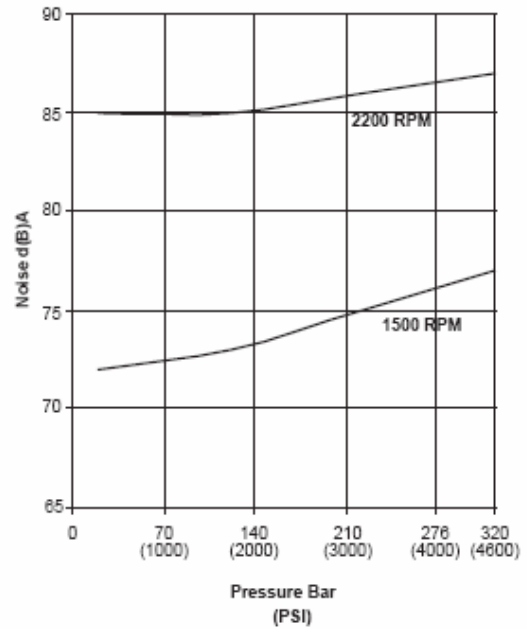
Fluid: Mineral oil ISO VG 32 @ 40° C

Inlet pressure: 1.0 Bar (14.5 PSI) (Absolute) measured at inlet port.

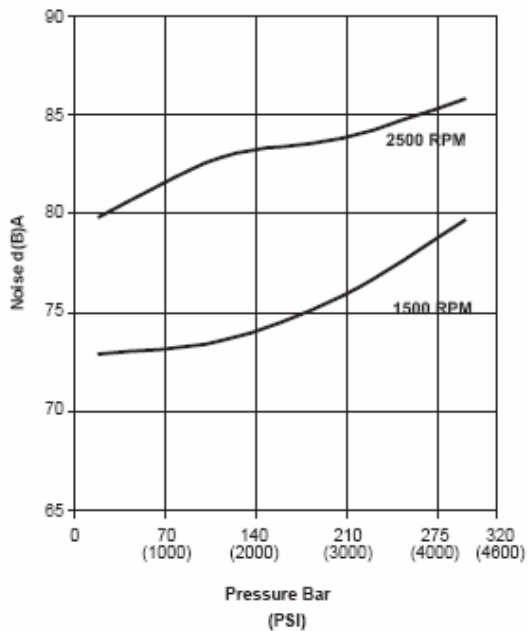
P3075 Noise Characteristics at Max Displacement



P3145 Noise Characteristics at Max Displacement



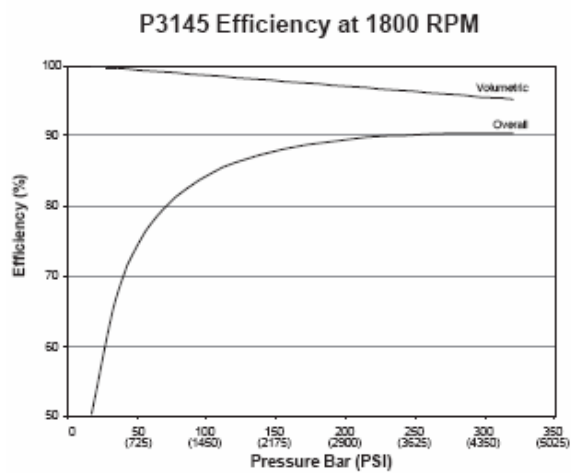
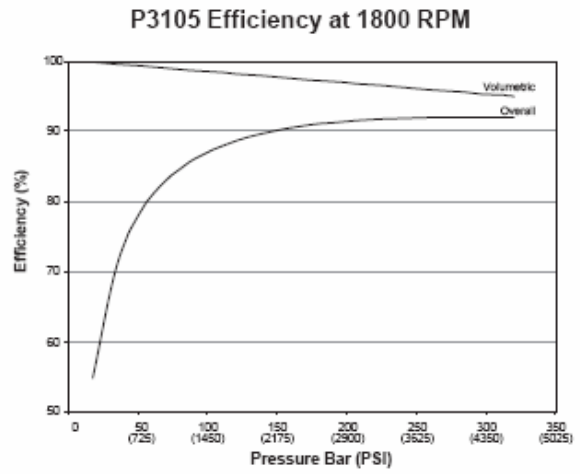
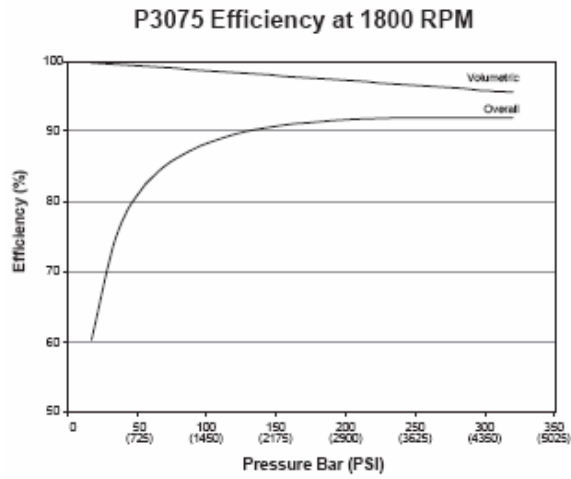
P3105 Noise Characteristics at Max Displacement



P3 Series Typical Efficiency at Full Displacement @ 1800 RPM

Fluid: Mineral oil ISO VG 32 @ 40° C

Inlet pressure: 1.0 Bar (14.5 PSI) (Absolute) measured at inlet port.

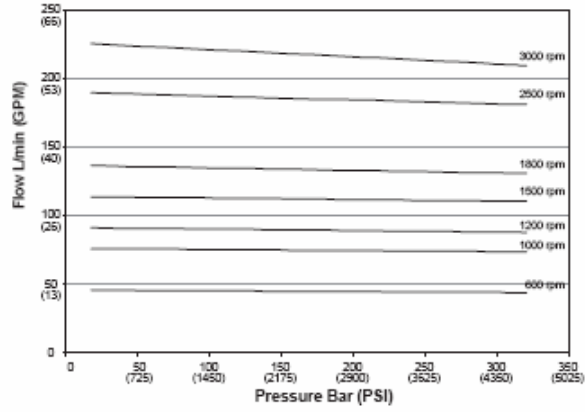


P3 Series Typical Flow vs. Pressure

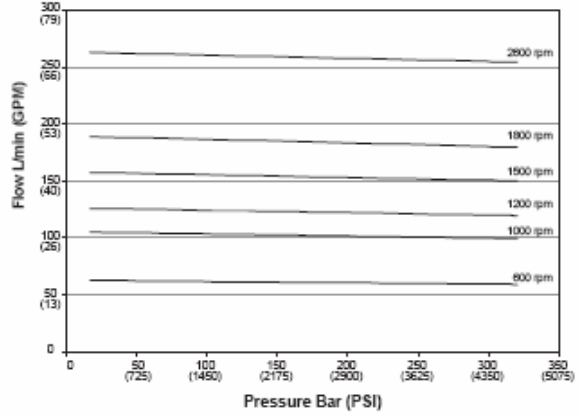
Fluid: Mineral oil ISO VG 32 @ 40° C

Inlet pressure: 1.0 Bar (14.5 PSI) (Absolute) measured at inlet port.

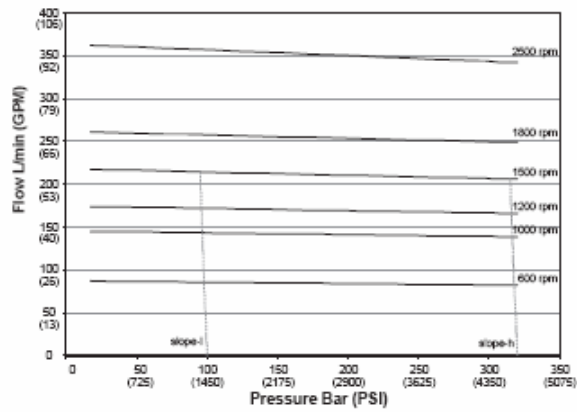
P3075 Outlet Flow - Full Stroke



P3105 Outlet Flow - Full Stroke



P3145 Outlet Flow - Full Stroke

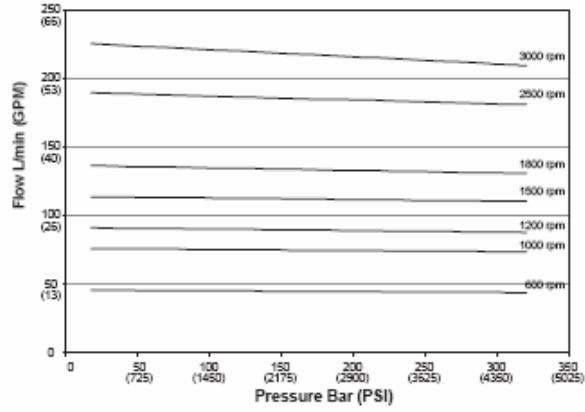


P3 Series Typical Flow vs. Pressure

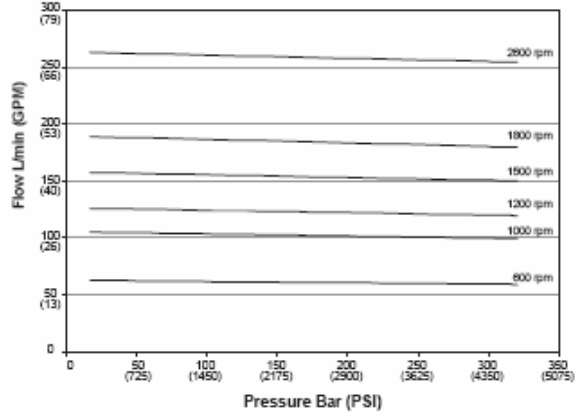
Fluid: Mineral oil ISO VG 32 @ 40° C

Inlet pressure: 1.0 Bar (14.5 PSI) (Absolute) measured at inlet port.

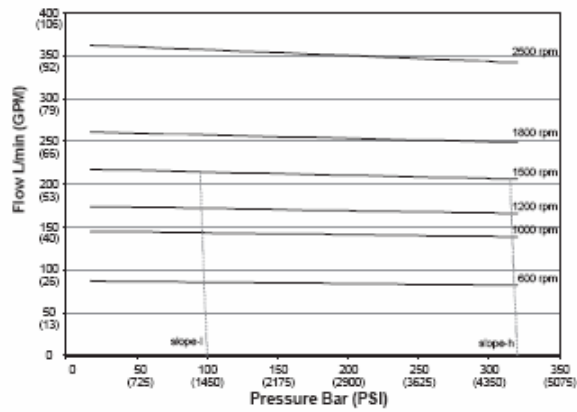
P3075 Outlet Flow - Full Stroke



P3105 Outlet Flow - Full Stroke



P3145 Outlet Flow - Full Stroke



Annexe E: Caractéristiques des Batteries et des supercapacités

Battery and Supercapacitor characteristics

J. Van Merle - VUB

		Lead based	Nickel based	Sodium based	Lithium based	EDLC capacitor	LIC capacitor
Cell voltage	V	2	1.2	2 - 2.5	3.5	2.5	3.8
Specific energy	Wh/kg	30 - 35	50 - 80	90 - 130	80 - 200	4.3	14
Specific power	W/Kg	70 - 130	175 - 700	100 - 160	140 - 1000	4300	
Energy efficiency	%	70 - 85	60 - 85	80 - 90	85 - 95	0.92	
Life cycle		600 - 1000	1500 - 2000	600 - 1000	>1000	500000	100000
Cost	Euro/kWh	100 - 150	300 - 500	150 - 400	100 - 200	6000 - 12000	
	Euro/kW	12 - 15	52 - 54	248 - 281	44 - 52	9 - 17	
Working temperature	°C	0 - 45 (-20 - 60)	0 - 50 (-40 - 60)	300 - 350 (250 - 370)	-40 - 60	-35 ~ +65	-20 - 70

234

Energie opslag karakteristieken

J. Van Merle - VUB

energy storage technology	characteristics							
	energy [Wh/kg]	energy [Wh/l]	power [W/kg]	number of cycles @ 80% DoD	efficiency [%]	temperature range [°C]	cost [€/kWh]	
PbAC	flooded	25 - 40	80 - 100	140 - 350	200 - 2000	70 - 75	20 - 40	100 - 190
	VRLA	30 - 40	80 - 100	140 - 300	300 - 1000	80 - 85	20 - 40	100 - 190
	compressed	40 - 50	100	140 - 250	1500 - 3000	70 - 85	20 - 40	35 - 50
alkaline	NiCd	25 - 40	130	500	1000 - 3000	70 - 75	-40 - 50	400 - 1000
	power energy	40 - 50	130	120 - 350	1000 - 3000	70 - 75	-40 - 50	400 - 1000
	NiZn	80 - 80	200 - 300	500 - 1000	200 - 1000	80 - 85	0 - 40	500 - 800
NiMH	power energy	40 - 55	80 - 200	500 - 1400	500 - 2000	70 - 80	0 - 45	700 - 1500
	energy	80 - 80	200 - 350	200 - 600	500 - 2000	70 - 80	0 - 45	700 - 1500
lithium based	LiIon	70 - 130	150 - 450	600 - 3000	1000 - 3000	85 - 90	-20 - 60	500 - 1500
	power energy	110 - 220	150 - 450	200 - 600	1000 - 3000	85 - 90	-20 - 60	500 - 1500
	LiPolymer	180 - 180	180	300 - 500	300 - 1000	90 - 95	-110	300 - 500
ultracap	power energy	3 - 5	3 - 10	2000 - 10000	100k - 10M	95 - 100	-20 - 90	1700 - 2300
	energy	12 - 20	3 - 6	2000 - 10000	5k - 50k	95 - 100	-20 - 90	1700 - 2300
flywheel	power life	1.8 - 3.7	7 - 17	100 - 1000	10k - 50k	90 - 95	-20 - 60	200 - 660 [€/kWh]
	life	1 - 10	3.7 - 5.7	100 - 1000	10k - 100k	90 - 95	-20 - 50	300 - 400 [€/kWh]

■ Bron IEA Annex VII

236

Annexe F: Performances des véhicules

Le calcul des performances d'un véhicule (accélération, reprise, distance parcourue...) est aujourd'hui une théorie classique basée sur l'équation du mouvement [Gillespie 1992 et Wagneta, 1997]. La force nette ou force utile est la différence entre les forces aux roues et les forces de résistance à l'avancement d'un véhicule.

$$F_{roues} - \sum F_{résist} = F_{net} \quad (F.1)$$

La force de résistance est composée généralement par la force de résistance aérodynamique, la force de résistance au roulement et la force due à la pente [Gillespie, 1992].

$$\begin{aligned} F_{résist} &= \sum (F_{aéro} + F_{roul} + F_{pente}) \\ F_{aéro} &= \frac{1}{2} C_x \rho S V^2 \\ F_{roul} &= f_{roul} m g \cos \alpha \\ F_{pente} &= m g \sin \alpha \end{aligned} \quad (F.2)$$

Où C_x est le coefficient de résistance aérodynamique, ρ , la masse spécifique de l'air, S , la surface frontale, V , la vitesse du véhicule, f_{roul} , le coefficient de résistance au roulement et m , la masse du véhicule.

Sous forme générique, la force de résistance est fonction du carré de la vitesse du véhicule [Duysinx, 2006]:

$$F_{résist} = A + B V^2 \quad (F.3)$$

avec $A, B > 0$

On doit tenir compte de la masse équivalente à l'énergie cinétique accumulée dans tous les organes en mouvement dans la ligne de transmission (roues, arbre, boîte, moteur...). Le calcul théorique de la masse équivalente aboutit à une formule très lourde et difficile à utiliser si l'on ne connaît pas les détails constructifs du véhicule. Il existe des formules empiriques plus simplifiées pour s'y substituer dans un calcul préliminaire. Wong [Wong, 2001] propose par exemple un facteur de correction de la masse pour les voitures:

$$\gamma_m = \frac{m_{eff}}{m} = 1.04 + 0.0025 i^2 \quad (F.4)$$

Le calcul de la vitesse en fonction du temps devient donc aisé.

F.1 Temps d'accélération pour passer d'une vitesse V1 à une vitesse V2

Pour déterminer le temps d'une reprise pour passer d'une vitesse V_1 à une vitesse V_2 , il suffit d'intégrer l'équation du mouvement:

$$m_{eff} \frac{dV}{dt} = F_{roues} - \sum F_{résist} = F_{net}(V) \quad (F.5)$$

soit

$$dt = \frac{m_{eff} dV}{F_{net}(V)} \quad (F.6)$$

et donc

$$\Delta t = m_{eff} \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{F_{net}(V)} \quad (F.7)$$

F.2 La plus grande vitesse maximale

Pour déterminer la vitesse maximale, on travaille avec les courbes de puissance (Figure F.1) en supposant un régime stationnaire (égalité des puissances motrices et des forces résistantes).

$$P_{roues} = P_{résist} \quad (F.8)$$

La plus grande vitesse maximale s'obtient à la puissance maximale. Il faut donc résoudre l'équation suivante:

$$Av + Bv^3 = \eta P_{max} \quad (F.9)$$

La résolution de cette équation suit le schéma itératif (itération de Picard).

$$v = 0$$

$$v_{n+1} = \left(\frac{\eta P_{max} - Av_n}{B} \right)^{1/3} \quad (F.10)$$

La puissance étant réalisée pour une vitesse de rotation nominale (ω_{nom}), on obtient la longueur de transmission optimale.

$$\left(\frac{R}{i}\right)_{opt} = \frac{v_{max}^{max}}{\omega_{nom}} \quad (F.11)$$

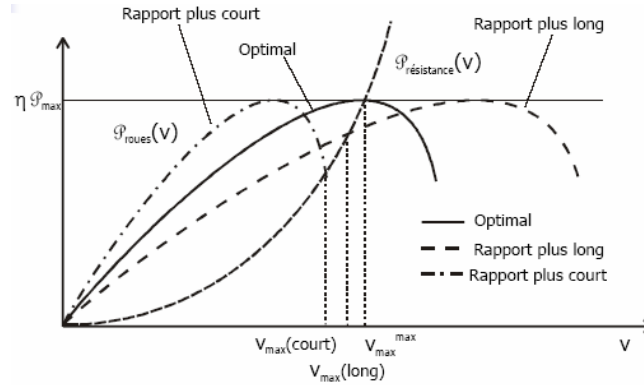


Figure F.1: Courbes de puissances à différents rapports

On sait également calculer la vitesse maximale pour un rapport donné. En supposant toujours l'égalité entre les puissances des forces motrices et des forces de résistance, la résolution de l'équation se fait suivant le schéma itératif de Picard [Duysinx, 2006].

$$P_{rés} = Av_{max} + Bv_{max}^3 = \eta P \left(\frac{i}{R} v_{max} \right) \quad (F.12)$$

$$\begin{aligned} v_0 &= 0 \\ P_0 &= \eta P_{max} \\ v_{n+1} &= \left(\frac{P_n - Av_n}{B} \right)^{1/3} \\ P_{n+1} &= \eta P \left(\frac{i}{R} v_{n+1} \right) \end{aligned} \quad (F.13)$$

F.3 La pente maximale franchissable

Le calcul de la pente maximale franchissable se base sur deux critères à savoir la puissance et la force disponibles pour la traction et la force maximale transmissible par les roues et qui est régi par la limite du coefficient de friction roue-sol. La force de résistance due à la pente est donnée par:

$$F_{pente} = mg \sin \alpha \quad (F.14)$$

Et la limitation due au coefficient de friction (avant et arrière) est:

$$F_{mot,f} \leq \mu W_f \quad \text{ou / et} \quad F_{mot,r} \leq \mu W_r \quad (F.15)$$

Les forces de poids sur les trains avant et arrière (w_f, w_r) se calculent comme suit:

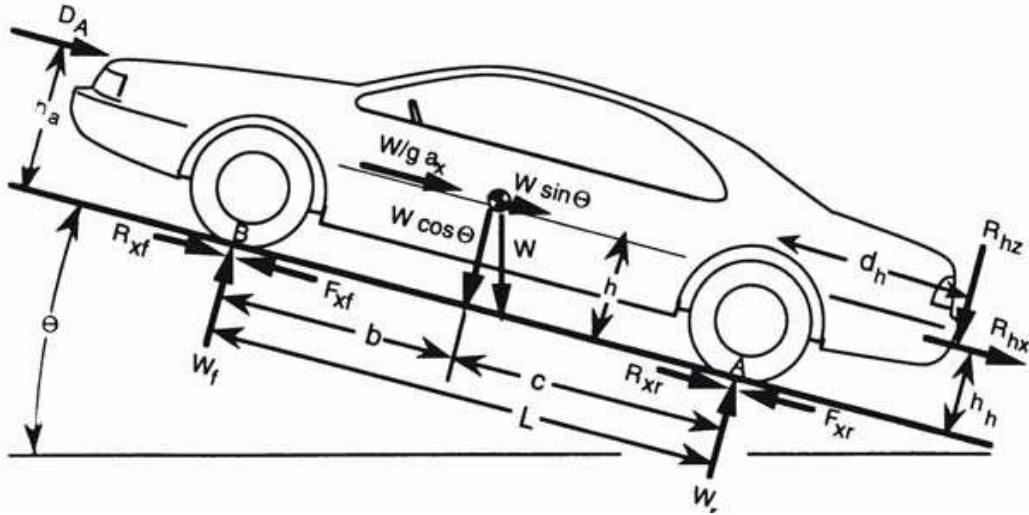


Figure F.2: Forces agissant sur le véhicule en mouvement longitudinal [Gillespie, 1992]

$$\begin{aligned}
 W_f &= mg \cos \alpha \frac{c}{L} - ma_z \frac{h}{L} - F_{aéro} \frac{h_A}{L} - mg \sin \alpha \frac{h}{L} \\
 W_r &= mg \cos \alpha \frac{b}{L} - ma_z \frac{h}{L} - F_{aéro} \frac{h_A}{L} - mg \sin \alpha \frac{h}{L}
 \end{aligned}
 \tag{F.16}$$

Avec

c: distance entre le centre du pneu arrière et la verticale passant par le centre de gravité

b: distance entre le centre du pneu avant et la verticale passant par le centre de gravité

h: hauteur du centre de gravité

L: empattement du véhicule ($L=c+b$)

A faible vitesse ($F_{aéro}=0$) et en régime permanent ($a_x=0$), les forces de poids deviennent:

$$\begin{aligned}
 W_f &= mg \cos \alpha \frac{c}{L} - mg \sin \alpha \frac{h}{L} \\
 W_r &= mg \cos \alpha \frac{b}{L} - mg \sin \alpha \frac{h}{L}
 \end{aligned}
 \tag{F.17}$$

En cas de traction intégrale avec un répartiteur de couple, on a:

$$\begin{aligned}
 F_{mot} &= F_{mot,f} + F_{mot,r} \leq \mu(W_f + W_r) \\
 mg \sin \alpha &\leq \mu mg \cos \alpha
 \end{aligned}
 \tag{F.18}$$

et la limite de pente est donnée par:

$$\tan \alpha \leq \mu
 \tag{F.19}$$

En cas de traction avant:

$$\begin{aligned}
 F_{mot,f} &\leq \mu W_f \\
 mg \sin \alpha &\leq mg \left(\cos \alpha \frac{c}{L} - \sin \alpha \frac{h}{L} \right)
 \end{aligned}
 \tag{F.20}$$

et la limite de pente est:

$$\tan \alpha \leq \frac{\mu c/L}{1 + \mu h/L} \quad (\text{F.21})$$

En cas de traction arrière:

$$\begin{aligned} F_{mot,r} &\leq \mu W_r \\ mg \sin \alpha &\leq mg \left(\cos \alpha \frac{b}{L} - \sin \alpha \frac{h}{L} \right) \end{aligned} \quad (\text{F.22})$$

et la limite de pente est:

$$\tan \alpha \leq \frac{\mu b/L}{1 - \mu h/L} \quad (\text{F.23})$$

Typiquement, on a $\mu = 0.8-1.2$ pour un sol sec; $0.4-0.6$ pour un sol mouillé et 0.25 sur neige.