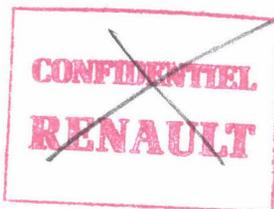


50376  
1996  
504



**THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE  
DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE**

**Spécialité : GENIE ELECTRIQUE**

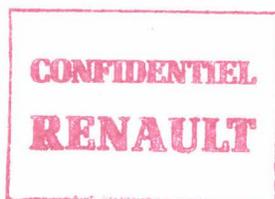
**Sujet de la thèse :**

**NOUVELLES ARCHITECTURES ELECTRIQUES  
POUR VEHICULE THERMIQUE**

**soutenue par Elsa LAMARTINIE le 9 juillet 1996**

**Membres du jury :**

- M. Guy SEGUIER, président du jury**
- M. Jean-Louis COCQUERELLE, rapporteur**
- M. Michel LAJOIE-MAZENC, rapporteur**
- M. Christian ROMBAUT**
- M. Jean-Pierre ROUMEGOUX**
- M. Alain LE DOUARON**



## REMERCIEMENTS

Je remercie M. SEGUIER, qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse, M. COCQUERELLE et M. LAJOIE-MAZENC, qui ont bien voulu examiner cette étude et me faire part de leurs critiques et conseils fructueux, ainsi que M. ROUMEGOUX, qui a accepté de s'intéresser à mon travail et participer au jury.

Je prie M. ROMBAUT, mon directeur de recherche, d'accepter l'expression de ma respectueuse gratitude, ainsi qu'à M. LE DOUARON, qui m'a soutenue de ses conseils et de ses encouragements et qui, en tant que responsable du groupe Mécanique et Physique de la Direction de la Recherche de Renault, m'a assuré d'excellentes conditions de travail.

J'adresse également mes remerciements à mes collègues — en particulier C. BRIENT et H. DUVAL, qui m'ont guidée tout au long de ma recherche, S. CARTIER, qui a contribué à la dernière partie de ce travail et P. HUGUET, pour ses idées et ses corrections avisés — ainsi qu'à l'équipe du Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de l'Ecole Centrale Lille — en particulier A. PENNEQUIN et X. CIMETIERE, pour leur soutien logistique — sans qui ce travail n'aurait pu être mené à bien.

Je tiens enfin à remercier R. BRESSON pour les heures qu'il a consacrées à la relecture minutieuse de ce mémoire.



## **AVANT-PROPOS**

Pour les lecteurs qui n'auraient le temps que de survoler ce document ou qui souhaiteraient juste savoir " de quoi ça parle", l'introduction générale, la conclusion de chaque chapitre et la conclusion générale sont imprimées sur des pages de couleurs.

Pour ceux qui tiendraient à lire l'ensemble du document et, en particulier, le chapitre 3, les architectures évoquées sont représentées en annexe sur une feuille A3 qui, dépliée, permet de se reporter facilement aux schémas cités.

A toutes et à tous, bonne lecture !

**TABLE DES MATIERES**

**1.PRODUIRE PLUS D'ENERGIE POUR UNE MOINDRE CONSOMMATION EN CARBURANT.....7**

1.1.Chiffrer la puissance requise.....7

1.1.1.Analyse bibliographique.....7

1.1.2.Evolution de la consommation.....9

1.1.3.Equipements futurs et consommation électrique associée ..... 10

1.1.3.1.Liste des équipements électriques potentiels ..... 10

1.1.3.2.Profil de mission ..... 15

1.1.3.3.Evaluation de la consommation électrique..... 19

1.2.Solutions envisageables pour produire la puissance requise sur les réseaux électriques futurs ..... 23

1.2.1.Solutions en 12 V..... 24

1.2.1.1.Augmentation du rendement de l'alternateur ..... 24

1.2.1.2.Optimisation du point de fonctionnement en tension de l'alternateur..... 25

1.2.1.3.Réseaux duaux..... 34

1.2.2.Intérêt d'une éventuelle élévation de la tension du réseau de bord..... 38

**2.ELEVATION DE LA TENSION DU RESEAU DE BORD ..... 43**

2.1.Tension admissible assurant la sécurité des personnes ..... 44

2.1.1.Calcul de la résistance du corps humain ..... 46

2.1.1.1.Modélisation du corps humain..... 46

2.1.1.2.Impédance du corps humain ..... 48

2.1.2.Cas des tensions continues..... 52

2.1.3.Etude des risques engendrés par des surtensions..... 55

2.1.3.1.Surtensions de "longue" durée..... 55

2.1.3.2.Surtensions transitoires..... 57

2.2.Influence de l'élévation de la tension sur les accessoires électriques..... 69

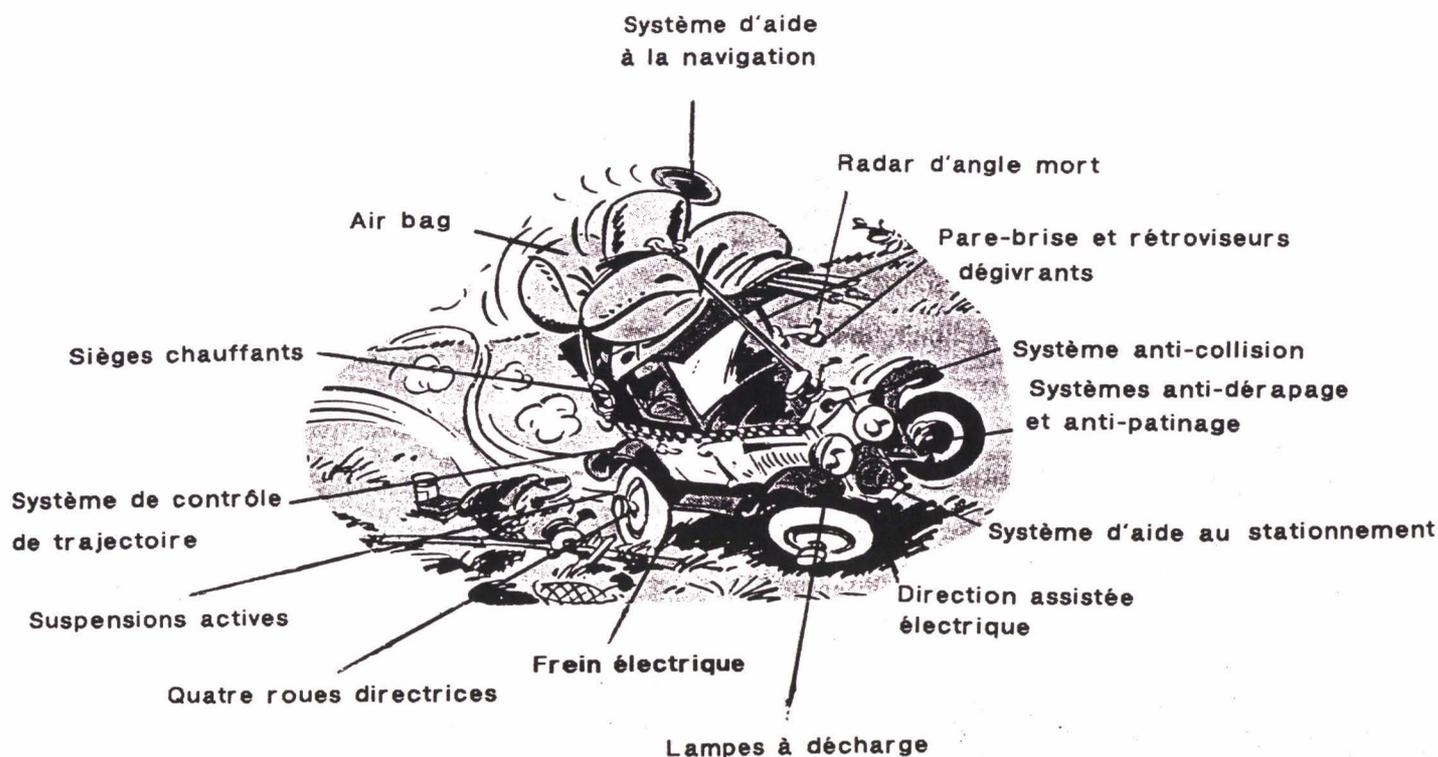
2.2.1.Batterie..... 70

2.2.2.Alternateur..... 73

2.2.3.Câbles et connexions .....	77
2.2.4.Interrupteurs.....	78
2.2.4.1.Relais.....	78
2.2.4.2.Interrupteurs électroniques de puissance.....	78
2.2.5.Moteurs électriques .....	79
2.2.6.Eclairage .....	80
2.2.7.Boîtiers électroniques.....	80
2.2.8.Tableau récapitulatif .....	81
3.ARCHITECTURE "BATTERIES DUALES" .....	87
3.1.Etude générale.....	89
3.1.1.Etat de l'art.....	89
3.1.1.1.Recherche bibliographique.....	90
3.1.1.2.Recherche des brevets.....	91
3.1.1.3.Présentation de l'appel d'offre P5 .....	92
3.1.1.4.Analyse de la concurrence .....	92
3.1.1.5.Etudes CEAC / DEEE .....	93
3.1.2.Etude systématique .....	93
3.1.2.1.Critères d'étude .....	94
3.1.2.2.Génération d'architectures .....	94
3.1.2.3.Etude des architectures selon les critères.....	96
3.1.2.4.Présentation des cinq architectures.....	97
3.1.2.5.Comparaison des résultats avec les architectures présentées dans l'état de l'art.....	102
3.1.3.Résultats d'essais et simulations .....	104
3.1.3.1.Etude DEEE / CEAC .....	104
3.1.3.2.Simulations .....	105
3.2.Système ARDUE.....	116
3.2.1.Analyse fonctionnelle.....	117
3.2.1.1.Définition du système .....	117
3.2.1.2.Définition du besoin.....	118
3.2.1.3.Phases de fonctionnement .....	118
3.2.2.Cadre de l'étude ARDUE .....	119
3.2.2.1.Application au programme P5.....	119
3.2.2.2.Conception sous contraintes.....	120

3.2.3.Sélection des architectures.....	120
3.2.3.1.Modification de critères.....	121
3.2.3.2.Architectures écartées .....	121
3.2.4.Structure des deux architectures ARDUE .....	122
3.2.4.1.Branchement des organes .....	122
3.2.4.2.Détail des architectures.....	124
3.2.4.3.Premières estimations de dimensionnement.....	126
3.2.4.4.Comparaison des deux architectures .....	127
3.3.Les supercondensateurs : une alternative à la batterie de démarrage ? .....	129
3.3.1.Principe de fonctionnement .....	129
3.3.2.Etat de l'art.....	130
3.3.3.Charge et décharge d'un montage série / parallèle.....	131
3.3.4.Etude de brevets .....	132
4.CONCLUSION GENERALE .....	137
BIBLIOGRAPHIE .....	141
ANNEXE.....	149

A en croire certains précurseurs insoupçonnés, "la belle mécanique" sera à l'avenir truffée d'électronique et d'actionneurs électriques en tout genre, qui n'auront de cesse d'améliorer tant votre sécurité que votre confort.



A tel point que, d'ici quelques années, l'alternateur et la batterie auront beau se relayer, s'essouffler et tousser, l'appétit des consommateurs électriques n'en sera pas plus rassasié, d'autant que les futures normes européennes en matière de lutte contre la pollution s'annoncent de plus en plus exigeantes. En particulier, des systèmes électriques consommant un très fort courant pourraient, dans un proche avenir, s'avérer nécessaires pour satisfaire ces contraintes sévères.

La réduction des émissions de polluants passe aussi par une diminution de la consommation en carburant des véhicules, action d'autant plus suivie que plébiscitée par les conducteurs. Comme les charges électriques puisent, via l'alternateur, la puissance nécessaire à leur fonctionnement sur l'arbre moteur et consomment par conséquent du carburant, le surcroît de consommation électrique annoncé est loin d'aller dans le bon sens.

Une seule solution donc : concevoir un réseau électrique qui tout en fournissant plus d'énergie en consomme moins.

Deux voies se présentent pour accroître la puissance électrique fournie sur le réseau de bord.

La première consiste à conserver la tension d'alimentation actuelle, soit environ 12V et à tout mettre en œuvre pour augmenter le courant débité par les générateurs, une action restant à mener en parallèle afin de réduire l'intensité requise par chaque organe électrique.

La première consiste à conserver la tension d'alimentation actuelle, soit environ 12V et à tout mettre en œuvre pour augmenter le courant débité par les générateurs, une action restant à mener en parallèle afin de réduire l'intensité requise par chaque organe électrique.

La seconde solution, plus radicale, consiste à franchir le pas de l'élévation de tension du réseau de bord à 24, 36 ou 48V.

Quoi qu'il en soit, la solution retenue devra satisfaire les contraintes générales automobiles que sont encombrement, masse et coût minimaux pour une fiabilité et une durée de vie maximales. Il est vrai qu'aujourd'hui la plupart des capots découvrent un ensemble dense et compact à tel point, que sur certains modèles européens, quelques organes, comme les batteries, sont relégués dans le coffre. La masse totale du véhicule représente, quant à elle, une part non négligeable dans la consommation en carburant. Enfin, à l'ère du "design to cost", le coût d'un nouveau système est directement ramené aux économies en masse ou en carburant qu'il engendre.

Pour résumer, face aux contraintes que sont l'augmentation de la demande électrique du réseau de bord automobile et la nécessité de réduire la consommation en carburant du véhicule, **l'objet de cette thèse est de proposer de nouvelles architectures électriques capables de produire une puissance électrique suffisante pour une consommation en carburant minimale, tout en respectant les contraintes automobiles que sont masse, encombrement et coût réduits pour une fiabilité et une durée de vie maximales.**

Deux solutions générales sont envisageables, consistant l'une à exploiter le 12V au maximum de ses capacités, l'autre à élever la tension du réseau de bord.

Nous nous intéresserons, au cours de cette étude, aux véhicules haut de gamme avec un fort niveau d'équipements car, leur consommation électrique étant déjà aujourd'hui importante, ils seront les premiers concernés si des modifications sur le réseau s'avéraient nécessaires. Nous préciserons la nature des contraintes associées tant sur l'aspect qualitatif que sur l'aspect quantitatif, avant d'analyser les avantages et inconvénients de deux solutions : l'élévation de la tension du réseau de bord à 24, 36 ou 48 V et un réseau 12 V équipé de deux batteries, la première étant dédiée au démarrage et la seconde à l'alimentation des autres charges.

## 1. PRODUIRE PLUS D'ENERGIE POUR UNE MOINDRE CONSOMMATION EN CARBURANT

"3 kW à ma droite, 4 kW à ma gauche... 5 kW au fond... 5 kW une fois, 5 kW deux fois..."

Il y a de cela peu de temps, les pronostics quant à la puissance électrique requise sur le réseau de bord automobile en l'an 2000 allaient bon train. Il faut dire que les choses ont bien changé depuis 1938, par exemple, où la dynamo de 150 W montée sur la Suprastella (le haut de gamme de l'époque) subvenait amplement aux besoins de l'allumage et des feux. Aujourd'hui, essuie-glaces, lunette arrière chauffante et soufflage d'air dans l'habitacle semblent indispensables à notre confort, tout comme, sur les véhicules haut de gamme, l'ABS et les suspensions pilotées améliorent la sécurité du conducteur et des passagers. Ces classiques du genre nous amènent tout naturellement, pour les années à venir, à des alternateurs dont le débit maximal est de l'ordre de 150 A sous 14 V, soit l'équivalent de 2000W. Quant au prochain millénaire, les prévisions s'envolent entre 3 et 5 kW selon les sources.

Or la nuance est subtile. Car s'il reste possible en optimisant le fonctionnement des organes électriques de gérer au mieux la puissance disponible aujourd'hui, l'alternateur est tout de même proche de son débit maximal sous 12 V. Par conséquent, 5 kW à fournir — même ramenés à 4 kW passée l'euphorie des enchères — nous pousseraient inexorablement vers des tensions d'alimentation plus élevées. Bien que vous ne soyez pas encore au fait du sujet, vous pouvez aisément deviner que cette solution a pour principal inconvénient son entière nouveauté et l'inévitable surcoût qui va de pair. Il est effectivement fort peu probable que toutes les modifications conséquentes sur les moyens de production industriels des équipementiers automobiles ne se répercutent sur le prix des pièces et donc sur celui du véhicule. Or la loi du marché est rude et toute augmentation de prix due à de nouvelles prestations qui ne peuvent être directement valorisées auprès du client est mal perçue.

C'est pourquoi, après avoir fait part des différentes prévisions sur les niveaux de puissance électrique, nous nous attacherons à redéfinir, avec plus de précision et de rigueur, la puissance susceptible d'être requise sur les réseaux de bord futurs, avant d'étudier les différents moyens de la produire.

### **1.1. Chiffrer la puissance requise**

#### **1.1.1. Analyse bibliographique**

Beaucoup d'articles semblent tenir pour acquis que le niveau de la puissance électrique sur le réseau de bord atteindra, voire dépassera les 2,5 kW en l'an 2000. D'après la S.A.E. (Society of Automotive Engineer) : "mêmes les prévisions prudentes annoncent une puissance installée de 3 kW en Europe pour la fin du siècle. Les prévisions de Ford sont de 2,5 kW en ce qui concerne les consommations électriques moyennes minimales en l'an 2000. [...] Diverses prévisions

annoncent des puissances de l'ordre de 6 à 7 kW" [44]. Effectivement, Valeo annonçait, lors d'une réunion du projet européen Prometheus des puissances d'environ 7,5 kW et Ford prévoyait, pour les véhicules américains, des besoins de l'ordre de 5 kW [1].

Il faut dire que, dans les années 1989, 1990, constructeurs et équipementiers misaient sur l'élévation de la tension du réseau de bord et les surestimations justifiaient d'autant l'intérêt des études en cours. Plus précisément, on envisageait alors l'avènement du tout électrique, de la climatisation aux quatre roues directrices en passant par le chauffage du bloc moteur. Et quand les bilans électriques n'étaient pas détaillés, un intitulé "applications électriques potentielles" permettait d'englober, avec des marges plus ou moins grandes, les futurs besoins éventuels.

Aujourd'hui, comme nous le verrons, le vent a quelque peu tourné et, ici comme ailleurs, nous avons revu nos premières estimations à la baisse.

Les calculs consistaient, en réalité, à additionner les puissances électriques consommées par chaque organe, sans tenir compte de leur temps de fonctionnement. La valeur obtenue représentait la puissance maximale qui pouvait être appelée sur le réseau électrique, si tous les organes étaient enclenchés en même temps. Or prendre en compte un tel cas amènerait à surdimensionner l'alternateur et la batterie. Une étude de dimensionnement correcte doit s'attacher à une consommation moyenne et vérifier le bon fonctionnement du réseau en cas de consommation électrique maximale, pendant un temps limité.

Par conséquent, afin d'estimer au mieux les besoins électriques futurs, nous avons cherché à évaluer la puissance moyenne requise sur le réseau électrique, soit encore l'intensité moyenne, si nous considérons la tension comme constante.

Nous avons abordé cette question de deux manières différentes. En premier lieu, nous avons étudié quelle était l'évolution de cette puissance de 1975 à nos jours, en vue d'extrapoler les résultats aux années 2000. Parallèlement, nous avons cherché à définir une liste d'équipements électriques susceptibles d'être montés sur les véhicules futurs auxquels nous avons associé un profil d'utilisation pour un trajet donné afin d'évaluer la puissance totale moyenne correspondante.

Comme nous l'avons précisé en introduction, cette étude porte sur les véhicules haut de gamme les mieux équipés, dont la consommation électrique est déjà aujourd'hui importante. Nous prendrons comme référence une Safrane V6i Baccara.

### **1.1.2. Evolution de la consommation**

En 1976, le haut de gamme Renault était représenté par la R30 TS. Quatre ans plus tard, cette version était améliorée par la TX, qui devait céder sa place en 1984 à la R25 V6i. Quelques neuf

années après, la Safrane V6i voyait le jour dans sa version RXE, bientôt suivie de la version Baccara.

Grâce au Livre Produit, qui consigne, chaque année, les principaux équipements du véhicule, nous avons pu détailler quels étaient les organes électriques de ces cinq versions et leur évolution à chaque millésime. Nous admettons que les listes proposées, à défaut d'être exhaustives, sont assez précises.

En ce qui concerne les intensités nominales de chacun de ces organes, nous avons, faute de données, effectué les calculs à partir des valeurs actuelles correspondant à notre véhicule de référence : la Safrane V6i Baccara (1994). De même, nous avons affecté à chacun de ces équipements les coefficients d'utilisation actuellement en vigueur. Ces coefficients permettent de calculer le courant moyen d'un composant, relatif à un parcours standard (ville ou route) et à un climat (été, hiver ...). Pour chacun des véhicules étudiés, nous avons calculé la consommation électrique résultante pour ces différents climats et types de roulage, puis effectué la moyenne de toutes les valeurs, de manière à obtenir une consommation moyenne sur l'année. Nous avons reporté les résultats sur le graphique ci-dessous (figure n°1), ainsi que l'intensité nominale des alternateurs correspondants.

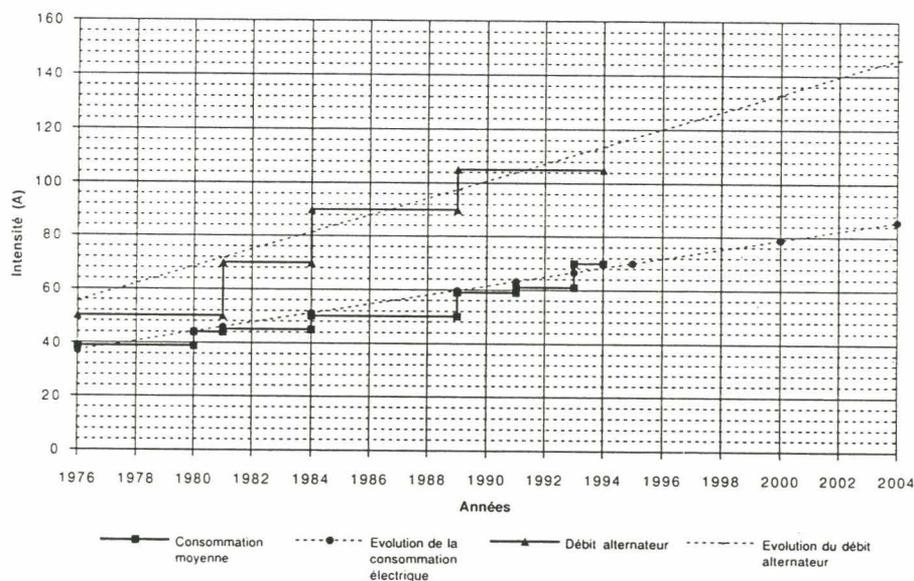


Figure n°1 : Evolution de la consommation électrique sur les véhicules haut de gamme

Cette courbe nous incite à considérer l'évolution de la consommation électrique sur véhicule comme linéaire, la pente de la régression associée étant d'environ 2 A/an. Nous obtenons ainsi un premier ordre de grandeur de la consommation en l'an 2000, qui atteindrait 80 A contre 70 A aujourd'hui. Parallèlement, le débit nominal de l'alternateur serait d'environ 130 A pour 105 A actuellement.

Il est à noter que de nombreuses études sont engagées pour réduire l'intensité nominale de chacun des organes électriques, ainsi que la marge entre le débit nominal de l'alternateur et la consommation électrique moyenne. Il se pourrait donc que, dans les années à venir, ces évolutions soient un peu plus lentes et que l'intensité requise comme le débit alternateur soient un peu plus faibles que les 80 A et les 130 A annoncés.

Cependant, ces résultats sont en accord avec les quelques références que nous avons trouvées. L'article [3] prévoit une augmentation de la consommation électrique de 2 A/an et une étude portant sur les véhicules haut de gamme de General Motors [4] annonce une pente de 2,5 A/an.

Ces premiers résultats nous amènent à des puissances inférieures à 2 kW ; donc bien en deçà des prévisions annoncées en introduction. Confrontons-les maintenant aux résultats obtenus par notre seconde méthode.

### **1.1.3. Equipements futurs et consommation électrique associée**

Nous avons cherché ici à calculer l'intensité moyenne requise par l'ensemble des organes électriques à partir d'une liste détaillée de ces organes et de leur profil d'utilisation.

#### 1.1.3.1. Liste des équipements électriques potentiels

La liste des équipements électriques futurs que nous proposons est issue d'une synthèse bibliographique et de l'analyse de données internes Renault. Nous nous attarderons un peu plus longuement sur son contenu afin de vous présenter quelques innovations automobiles.

L'analyse bibliographique porte sur quatre ouvrages généraux, consacrant quelques chapitres à l'avenir des diverses techniques automobiles et en particulier aux équipements électriques :

- "La dernière bataille de l'automobile européenne" de Thierry Gaudillot [6],
- "Des voitures et des hommes" de Daniel Goeudevert [7], PDG de Volkswagen,
- "L'automobile : les défis et les hommes", rapport du Commissariat Général du Plan [8],
- "CAR 2000", rapport de la MIRA, Motor Industry Research Association [9].

Nous ferons référence, par ailleurs, à deux articles portant sur l'électronique véhicule :

- "Le contrôle et l'enrichissement des fonctions véhicule par l'électronique", paru dans le journal *Culture Technique* [10],
- "Bienvenue dans un monde plus électronique", issu de L'Information du Véhicule, [11], présentant les conclusions de deux études britanniques sur le marché des composants électroniques d'ici l'an 2000.

Nous nous sommes, de plus, reportée à une étude engagée par l'équipementier Lucas, pour le compte du groupe de travail européen Prometheus, intitulée "2010 Vehicle Definition Key",

[12]. Ce document présente les réponses de constructeurs automobiles américains sur le thème "Quels sont les futurs équipements électriques automobiles et leur type d'utilisation ?"

Le projet européen Prometheus, qui a pris fin en décembre 1994, a donné lieu à plusieurs groupes de travail. Le groupe WG3, nommé "Electrical Architecture" était principalement composé d'ingénieurs des sociétés Lucas, CEAC, Ford, PSA et Renault. L'objectif était d'étudier les besoins futurs en puissance électrique et les moyens de les produire. Si les différentes réunions ont été l'occasion de présenter nos travaux sur ce sujet, nous nous sommes aussi fortement inspirée des résultats des études engagées auprès de laboratoires et d'organismes extérieurs ou encore menées par les participants, comme ce sondage réalisé par l'équipementier Lucas.

Résumons en quelques paragraphes les différentes perspectives.

En ce qui concerne le moteur, la priorité est à la réduction de la consommation en carburant et des émissions de polluants et à la diminution du bruit du moteur. Sont donc à envisager le pilotage :

- des caractéristiques de l'entrée d'air (papillon électronique, variation du temps d'ouverture des soupapes),
- de l'injection du carburant (injection directe, chauffage du carburant dans le collecteur d'admission),
- de fonctionnement du catalyseur ; réchauffage, injection d'air à l'échappement,
- de refroidissement moteur : pompe à eau à débit variable.

Par ailleurs, les auteurs évoquent pour la plupart le contrôle électronique de la suspension moteur afin de réduire le bruit.

En ce qui concerne les transmissions, l'électronique entrerait en jeu pour l'embrayage piloté ou les boîtes de vitesse robotisées (la transmission du levier à la boîte est remplacée par une connexion électrique). La transmission intégrale (quatre roues motrices), pénalisée par une dégradation du rendement et du poids de la transmission, serait réservée aux très fortes motorisations et aux parcours en régions montagneuses.

Les véhicules seront de plus en plus nombreux à être équipés de suspensions pilotées et de correcteurs d'assiette automatiques. La suspension active, capable d'analyser l'état de la route et de contrôler les amortisseurs en conséquence, est jugée trop coûteuse en énergie.

La direction assistée électrique s'annonce comme la prochaine étape dans le développement des directions assistées. La direction intégrale électronique (quatre roues directrices) est considérée comme un système trop encombrant et trop cher pour être monté sur tous les véhicules.

La généralisation de l'ABS devrait permettre, quant à elle, celle des systèmes anti-patinage, qui consistent à contrôler l'injection, l'allumage, la position du papillon et le freinage (dans ce cas électrique) pour accroître l'efficacité du freinage.

L'électronique et les systèmes électriques joueront, de plus, un grand rôle dans l'amélioration du confort et de la sécurité des conducteurs et passagers. Les systèmes qui équipent les hauts de gammes actuels, tels que l'ABS, le réglage des rétroviseurs électriques, les sièges chauffants... seront montés sur les autres véhicules. Des résistances supplémentaires permettront de chauffer plus rapidement l'habitacle. Les lampes à décharge (dont le fonctionnement est proche de celui des néons) et les diodes électroluminescentes amélioreront la signalisation du véhicule.

Tous les articles évoquent enfin la fonction la plus médiatique de l'électronique dans l'automobile : les systèmes d'aide à la conduite. La signalisation des conditions particulières de conduite, le radar anti-collision, l'aide au dépassement, les régulateurs de vitesse, le contrôle de la trajectoire et toutes les aides à la navigation assisteront le conducteur dans ses trajets quotidiens.

Si les auteurs des articles cités s'accordent sur de nombreux points, nous noterons tout de même quelques petites divergences, tant sur l'avenir de certains systèmes que sur les technologies employées. Par exemple, l'embrayage piloté comporte selon les dispositifs des actionneurs électriques ou hydrauliques.

De plus, ces choix technologiques ne sont pas dictés uniquement par les constructeurs. De nouvelles réglementations sur la sécurité ou la protection de l'environnement pourraient, par exemple, largement contribuer au développement de certaines solutions jugées aujourd'hui d'un mauvais rapport efficacité/coût.

Enfin, les attentes du client doivent à tout prix être prises en compte. Non seulement celui-ci pourrait éprouver quelques réticences devant des commandes complexes ; D. Goeudevert, [6], pense que "tant que l'électronique travaille dans l'ombre, elle ne devrait pas inspirer d'aversion. Mais la manie de truffier l'habitacle de commandes électriques sera sans lendemain. Une majorité d'automobilistes souhaite avoir un tableau de bord que l'on peut embrasser d'un coup d'oeil". Mais surtout, ces innovations se répercutent d'une manière ou d'une autre sur le prix de la voiture. Le cabinet britannique EIU [11] estime à 2200-2500 \$, la valeur du contenu des composants électroniques par véhicule en l'an 2000 contre 1200 \$ en 1990 et 300 \$ en 1980.

Ces deux derniers points sont parfaitement résumés dans la recommandation suivante du rapport du Commissariat au Plan, [8] : "la multiplicité des choix technologiques peut rendre la conception du produit plus complexe, mais c'est le marché qui arbitrera les diverses possibilités à partir des niveaux définis par les réglementations dans les domaines de la sécurité et de la protection de l'environnement".

Avancées technologiques, réglementation de plus en plus sévère et volonté du client sont autant de paramètres qui rendent délicate la maîtrise de l'évolution des systèmes électriques.

Notre étude portant sur les équipements des véhicules futurs, nous devions quand même établir une liste des systèmes électriques susceptibles d'être montés sur véhicule dans les années à venir. Cette liste, développée en collaboration avec R. Bastien de la Direction des Avant-Projets [13], n'est sans doute pas exhaustive mais c'est comme telle que nous l'emploierons pour développer nos calculs sur les réseaux électriques. Le véhicule référencé est une Safrane Baccara (niveau d'équipement le plus élevé).

Nous avons tenu à différencier tout de suite les équipements dont la consommation est significative — c'est-à-dire aussi bien des éléments qui requièrent un fort courant pendant peu de temps, que les éléments qui consomment peu de courant mais qui fonctionnent en permanence — des autres récepteurs, généralement non pris en compte dans les calculs de bilan électrique, comme la plupart des fonctions électroniques.

La liste présentée ci-dessous indiquera donc, en italique, les organes dont la consommation est négligeable et en caractères normaux, ceux que nous prendrons en compte pour la suite de cette étude. En grisé, apparaissent les éléments nouveaux que nous venons de décrire.

## Liste des équipements électriques futurs

### Démarrreur

#### Alimentation essence

Injection moteur  
Module de puissance allumage  
Pompe à essence  
Papillon motorisé

Réchauffage sondes Lambda  
*VVT (variable valve timing)*

#### Alimentation diesel

Pompe électroéquipée  
Post chauffage moteur diesel  
Pré chauffage moteur diesel  
Réchauffage gasoil  
*Stop électrique moteur diesel*

#### Dépollution

EGR électrique  
Pompe à air IAE (essence)

#### Ventilation

Anti-percolation par GMV moteur  
Ventilateur (refroidissement moteur et du condenseur)

### Tampons moteur actifs

### Embrayage

Embrayage piloté

### Direction

Colonne de direction réglable  
Direction assistée

### Suspension

Amortissement  
Correcteur d'assiette (COA)  
ARS (système anti-roulis actif)

### Frein

Anti-blocage des roues (ABS)  
EHB (freinage électrohydraulique)

### Ouvrants

Lève vitre avant  
Lève vitre arrière  
Assistance de hayon  
Condamnation des ouvrants (5 à 6)  
Toit ouvrant

### Glaces

Essuie lunette arrière (cadencé)  
Essuie vitre avant (deux vitesses)  
Lave projecteurs (2)  
Lunette arrière chauffante  
Pare-brise chauffant  
Pompes lave vitre (avant et arrière)  
Rétroviseurs chauffants (2)  
Rétroviseurs réglables (2)

### Ventilation

GMV habitacle  
Résistances de chauffage  
Embrayage compresseur de climatisation  
Air conditionné automatique

### Préconditionneurs (déchambrage)

### Sièges

Siège conducteur mémorisation réglable  
Siège passager AV réglable  
Sièges AV chauffants (2)

### Tableau de bord

Compte tours moteur  
Indication de niveau d'huile  
Indication de niveau de carburant  
Indication de pression d'huile  
Indication de température eau moteur  
Indication de température extérieure  
Montre digitale

### Témoins

### Confort - commodités

Air bag (2)  
Afficheurs tête haute  
Alarme anti-intrusion  
Allume cigare AR  
Allume cigare AV  
Avertisseur d'oubli d'éclairage  
Avertisseur sonore  
Prétensionneurs de ceintures (2)  
Rideaux pare-soleil arrière  
Communication - divertissements  
Autoradio, chaîne stéréophonique  
Téléphone

### Correcteur électrique des phares (2)

### Feux intérieurs

Eclairage compartiment moteur  
Eclairages coffre (1 ou 2)  
Eclairages intérieurs  
Feux de signalisation  
Feu de brouillard AR  
Feux de position + plaques + tableau de bord  
Feux de stop (2 à 3)  
Indicateurs de direction / détresse (2/4)  
Répétiteur d'aile (1)  
Feux de marche AR (2)  
Feux de route  
Feux de croisement (2)  
Feux de route (2)  
Feux de brouillard AV (2)

### Contrôle de la conduite

Antivol verrou logiciel (système antidémarrage)  
Aide à la conduite (ordinateur de bord)

### Navigation

Régulateur de vitesse  
Synthèse de la parole (SYP)  
Système antipatinage (ASR ou TCS)  
Avertisseur sonore de dépassement de vitesse  
Système anti collision  
Aide au stationnement  
Radar d'angle mort  
FDR (contrôle de trajectoire)

Remarque : cette liste a été établie fin 1994. Les modifications qui sont intervenues après cette date n'ont pas été prises en compte ici.

Apparaissent donc en fait deux grandes classes de nouveaux composants électriques :

- des fonctions électroniques, qui permettent de commander des actionneurs mécaniques ou hydrauliques ; ces fonctions ne consomment que très peu de courant,
- des charges électriques importantes comme le chauffage habitacle, qui appellent un fort courant.

Afin d'évaluer la consommation moyenne requise sur les réseaux de bord, nous devons maintenant pondérer l'intensité nominale de chaque organe par son temps de fonctionnement.

Comme nous l'avons vu lors de l'étude sur l'évolution de la consommation électrique, cette pondération s'effectue aujourd'hui avec des coefficients d'utilisation qui définissent, selon les conditions, si le composant fonctionne 10, 50 ou 100% du temps de trajet. Ils donnent ainsi accès au courant moyen sur le réseau électrique. Néanmoins, une approche plus fine passe par une analyse de l'évolution des différents paramètres (courant, tension, état de charge des batteries...) en fonction du temps. C'est pourquoi, nous nous sommes attachée à définir ce que nous appellerons les profils de mission des composants.

#### 1.1.3.2. Profil de mission

Le profil de mission d'un composant permet de répondre aux questions suivantes :

- quand le composant fonctionne-t-il ?
- combien de temps fonctionne-t-il ?
- quelle intensité est nécessaire à son fonctionnement ?

Ce profil de mission est donné dans des conditions précises : il dépend

- de la voiture considérée : caractéristiques moteur, options d'équipements... ; nous prendrons comme valeurs celles de la Safrane Baccara, équipée d'un moteur essence V6i ou d'un moteur diesel à injection directe,
- du cycle de la vitesse moteur : cycle normalisé 15-0A (lire "quinze zéro A"), embouteillage,.... ; nous nous baserons sur le cycle 15-0A que le Journal Officiel des Communautés Européennes présente comme suit (figure n°2):

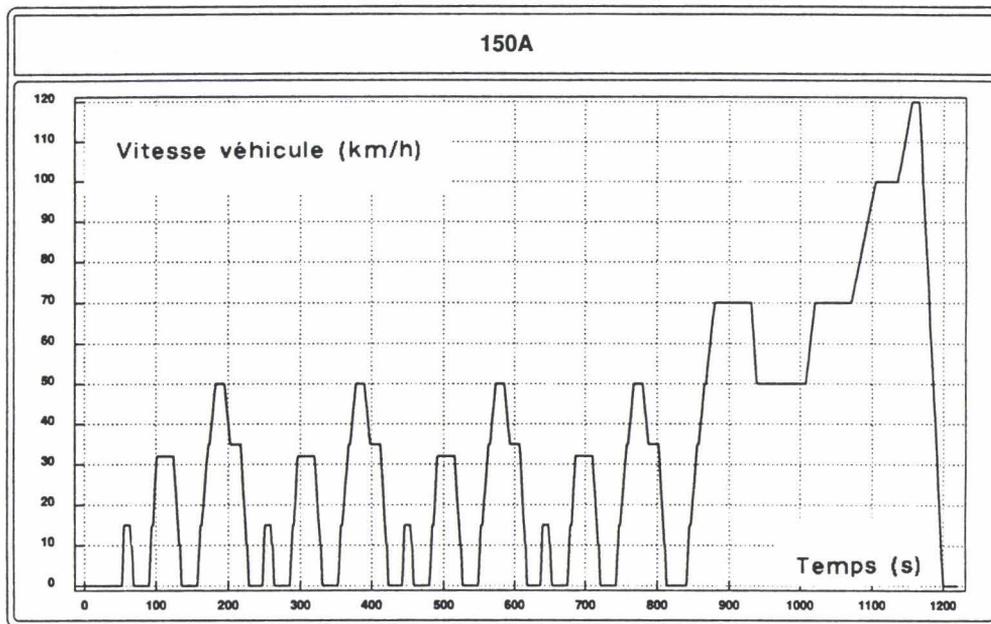


Figure n°2 : cycle 15-0A

Ce cycle est composé d'un parcours urbain, nommé 1504 ou UDC, qui dure 820s et d'un parcours haute vitesse, aussi appelé "extra urbain" ou EUDC, pendant 400s. Le démarrage du moteur a lieu au temps 0,

- des conditions climatiques : saison, température... ; nous établirons le profil de consommation du véhicule pour deux saisons : l'hiver (température extérieure égale à 10°C) et l'été (température extérieure égale à 20°C),
- du cycle de température de l'eau du circuit de refroidissement du moteur.

#### Profil de consommation électrique

Comme nous l'avons précisé dans la définition de la liste de composants, nous ne prendrons en compte dans nos calculs que les principaux consommateurs, c'est-à-dire ceux qui fonctionnent sous un faible courant tout du long du trajet ainsi que ceux qui fonctionnent sous un fort courant pendant peu de temps. Au contraire, nous considérerons, par exemple, que l'allume-cigare ou encore les lève-vitres électriques ont une consommation négligeable.

Le profil de consommation de chaque organe se décompose en deux entités :

- l'intensité nominale sous 14 V,
- le chronogramme ON/OFF de fonctionnement.

Remarque : plusieurs niveaux de tension continue existent aujourd'hui sur le réseau électrique. Lorsque le moteur ne tourne pas, la tension du réseau, imposée par la batterie, est d'environ 12 V. Lorsque le moteur tourne, la tension du réseau est imposée par le régulateur de l'alternateur. La tension de régulation décroît linéairement en fonction de la température afin de

---

faciliter la recharge de la batterie aux faibles températures et limiter les risques de surcharge aux fortes températures. Pour une température de 20°C, la tension aux bornes de l'alternateur est réglée entre 14,4 V et 14,55 V selon les équipementiers et la pente est égale à -0,01 V/°C. Les calculs de puissance électrique seront effectués avec une tension de 14 V (valeur à 60 °C pour une tension à 20 °C égale à 14,4 V).

Les intensités nominales des organes existants nous ont été fournies par la Direction des Etudes Electriques et Electroniques (DEEE) et nous nous sommes inspirée, pour définir les chronogrammes ON/OFF, d'une étude statistique interne sur l'utilisation en clientèle des différents composants électriques. Quant au fonctionnement spécifique de certains équipements encore à l'étude, nous nous sommes adressée aux services concernés. Le détail de ces informations fait l'objet de la note [5].

Le tableau suivant résume les valeurs à prendre en compte.

Equipements électriques	Courant (A)	Chronogramme	
		Eté	Hiver
<b>Equipements spécifiques essence</b>			
Injection moteur V6	$I_{inj} = 4,3 \cdot 10^{-4} * (\text{vitesse moteur en tr/mn})$		
Allumage V6	$I_{all} = 4,5 \cdot 10^{-4} * (\text{vitesse moteur en tr/mn})$		
Pompe à essence	4	permanent	
Papillon motorisé	1,5	permanent	
Pompe à air IAE	22	0s -> 50s	
Réchauffage sonde lambda	1,5	permanent	
<b>Equipements spécifiques diesel</b>			
Pompe électronique	6,5	permanent	
Post-chauffage	30	0s -> 60s	0s -> 180s
Préchauffage	30	-7s -> -1s	-11s -> -1s
Réchauffage gasoil	5		0s -> 900s
Résistance de chauffage	70		0s -> 900s
<b>Consommateurs communs aux motorisations essence et diesel</b>			
EGR électrique	1	permanent	
GMV moteur	§ ventilateur de refroidissement moteur		
Tampons moteur	2,5	permanent	
Embrayage piloté	1,5	permanent	
DAV	1	permanent	
Amortisseur	4	permanent	
ABS	0,5	permanent	
LARC	25		0s -> 900s
PBDEG	48		0s -> 480s
Rétroviseurs dégivrants	3		0s -> 900s
GMV habitacle	I1 = 2 I2 = 8	I permanent = I2	0s -> 425s : I2 425s -> 1220s : I1
Embrayage du compresseur	5	fonctionne avec le GMV moteur	
Sièges avant chauffants	14		0s -> 900s
Chaîne stéréophonique	5	permanent	
Feux de position Eclairage plaques et tableau de bord	7		permanent
Feux de croisement	7		0s -> 820s
Feux de route	14		820s -> 1220s
Navigation	3	permanent	
Anti-patinage	0,5	permanent	

#### Ventilateur de refroidissement moteur et de condenseur de climatisation :

Le chronogramme de fonctionnement du groupe moto-ventilateur de refroidissement moteur (GMV moteur) a été relevé lors d'essais sur banc, sur un cycle 15-0A. En été, sa fonction principale est le refroidissement du condenseur de climatisation, c'est-à-dire que la puissance dissipée pour refroidir le condenseur de climatisation suffit à refroidir en parallèle le radiateur. Il tourne alors à petite vitesse ( $I(\text{essence}) = 13A$  et  $I(\text{diesel}) = 27A$ ) et s'enclenche selon le chronogramme suivant (figure n°3).

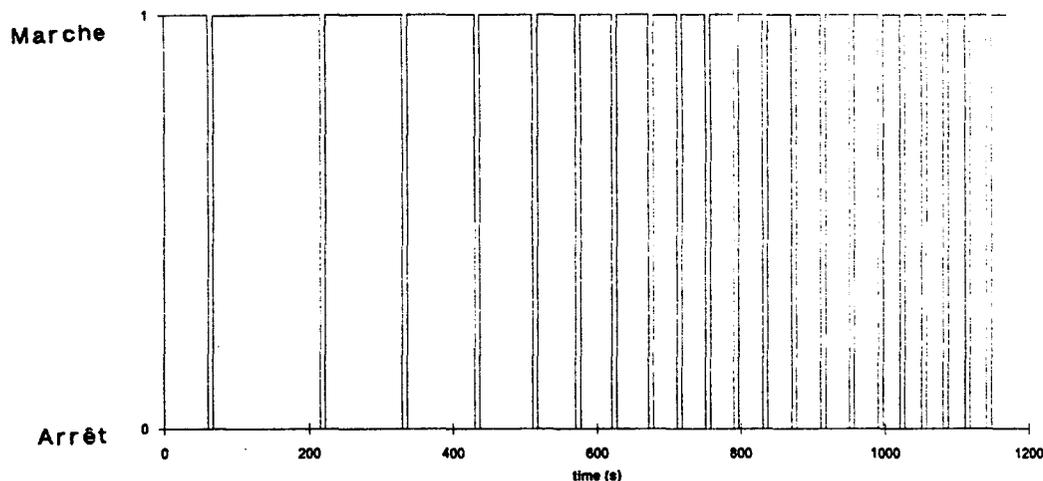


Figure n°3 : chronogramme de fonctionnement du ventilateur moteur

Le GMV fonctionne sur de plus longues périodes dans les premières minutes, le temps de mettre l'habitacle à température.

En hiver, la climatisation n'est pas mise en route. La fonction du ventilateur est le refroidissement de l'eau moteur. Il tourne alors à grande vitesse ( $I(\text{essence}) = 52 \text{ A}$  et  $I(\text{diesel}) = 44 \text{ A}$ ) de 1070s à 1100s et de 1145s à 1180s.

Les profils de mission ainsi déterminés vont nous permettre de tracer l'évolution temporelle de la consommation électrique.

### 1.1.3.3. Evaluation de la consommation électrique

Nous avons calculé la consommation électrique pour chacun des quatre cas définis :

- motorisation essence, 15-0A hiver,
- motorisation essence, 15-0A été,
- motorisation diesel, 15-0A hiver,
- motorisation diesel, 15-0A été.

Nous avons ensuite comparé les résultats obtenus aux calculs similaires sur un véhicule tel qu'il est équipé (électriquement) aujourd'hui, sur une motorisation essence et diesel (sans pare-brise chauffant). Nous avons, de plus, représenté le courant maximum que pouvait débiter l'alternateur équipant actuellement le véhicule de référence aux vitesses considérées, c'est-à-dire l'intensité fournie au réseau par la machine lorsque le courant d'excitation est maximum sous 13,5 V (fonctionnement plein champ). Le choix de l'alternateur, du rapport d'entraînement et de la vitesse du ralenti adaptée à l'équipement considéré ne faisant pas l'objet de cette étude, nous avons pris les caractéristiques correspondantes actuelles : rapport d'entraînement de 2,75, ralenti d'essence de 700 tr/mn et ralenti diesel de 850 tr/mn.

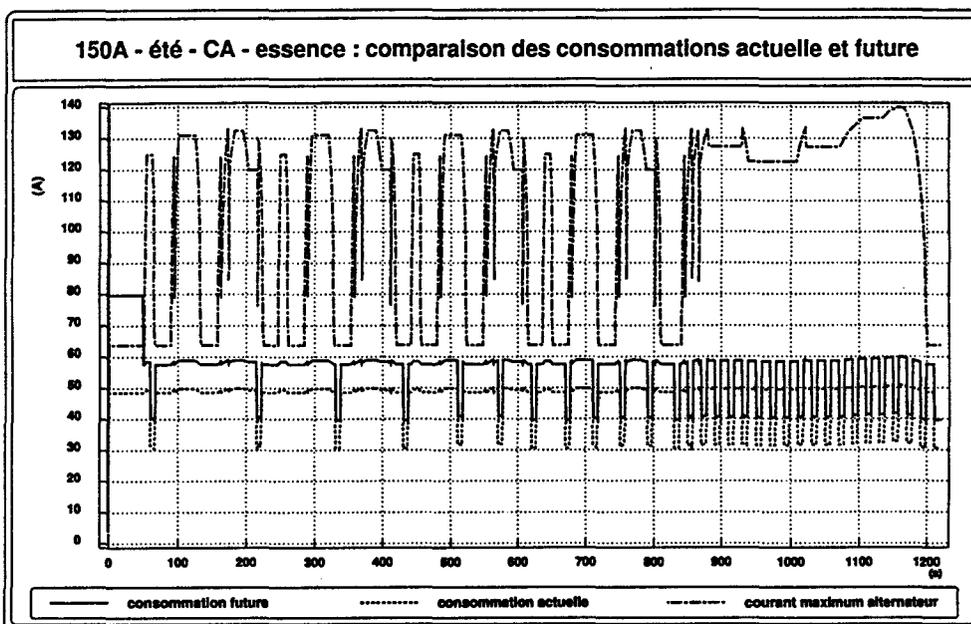
15-0A, été, essence

Figure n°4 : consommations électriques sur un cycle 15-0A été pour une motorisation essence

Ce profil de consommation futur (figure n°4) laisse clairement apparaître le chronogramme de l'embrayage du condenseur de la climatisation et du GMV moteur. La consommation moyenne "future" est, dans ce cas, de 56 A, à comparer, dans les mêmes conditions, à une consommation "actuelle" de 46 A, soit une différence de 10 A.

Excepté pendant la première minute, le bilan électrique est largement positif (relativement aux caractéristiques de l'alternateur, de son entraînement et du ralenti moteur).

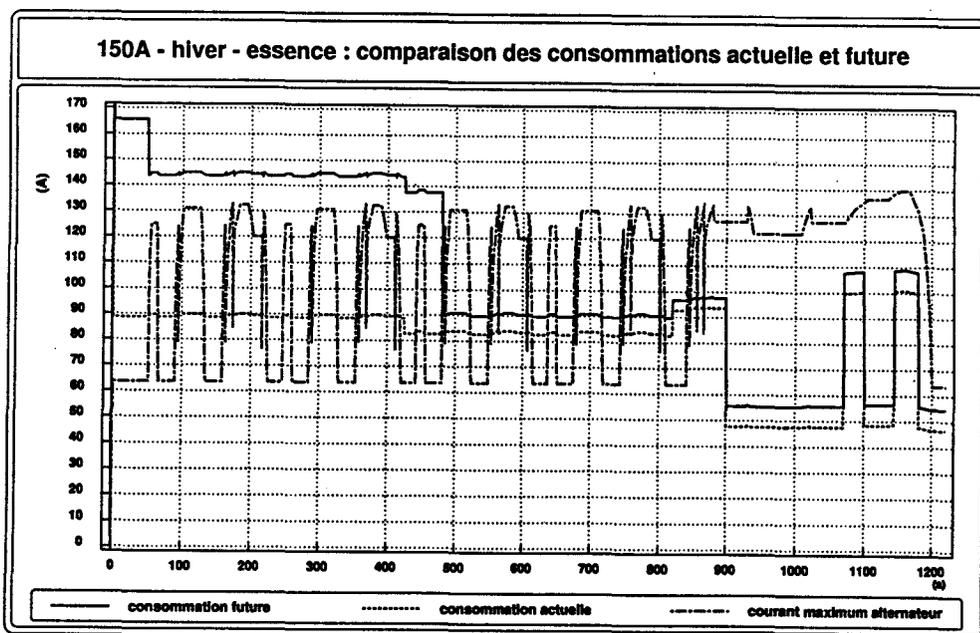
15-0A, essence, hiver

Figure n°5 : consommations électriques sur un cycle 15-0A hiver pour une motorisation essence

Sur le profil de consommation futur de la figure n°5, apparaissent plusieurs marches. La première marque le fonctionnement de la pompe à air IAE, la seconde, le fonctionnement du pare-brise chauffant (50 A). Les deux derniers créneaux correspondent à la mise en route du GMV moteur.

Les consommations moyennes sont les suivantes :

- consommation "future" : 106 A,
- consommation "actuelle" : 80 A,

soit un écart de 26 A.

Si l'on se réfère aux caractéristiques actuelles de l'alternateur, le bilan électrique est négatif pendant les huit premières minutes et les phases de ralenti en partie urbaine.

### 15-0A, diesel, été

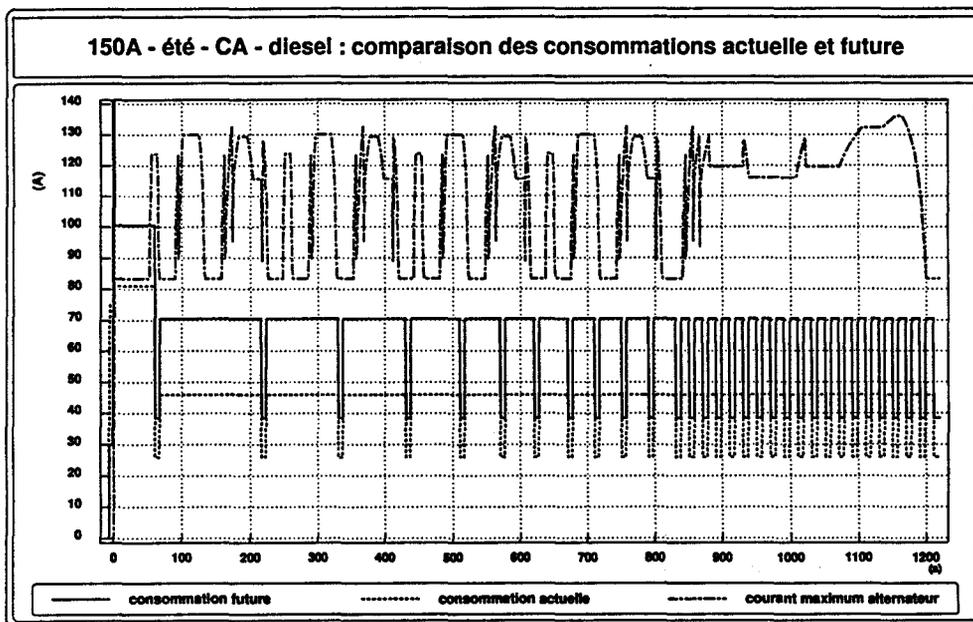


Figure n°6 : consommations électriques sur un cycle 15-0A été pour une motorisation diesel

Sur la figure n°6, le chronogramme des organes de la climatisation est très net.

Les consommations moyennes sont les suivantes :

- consommation "future" : 66 A,
- consommation "actuelle" : 44 A,

soit un écart de 22 A.

Le bilan électrique est, tout comme les motorisations essence, largement positif.

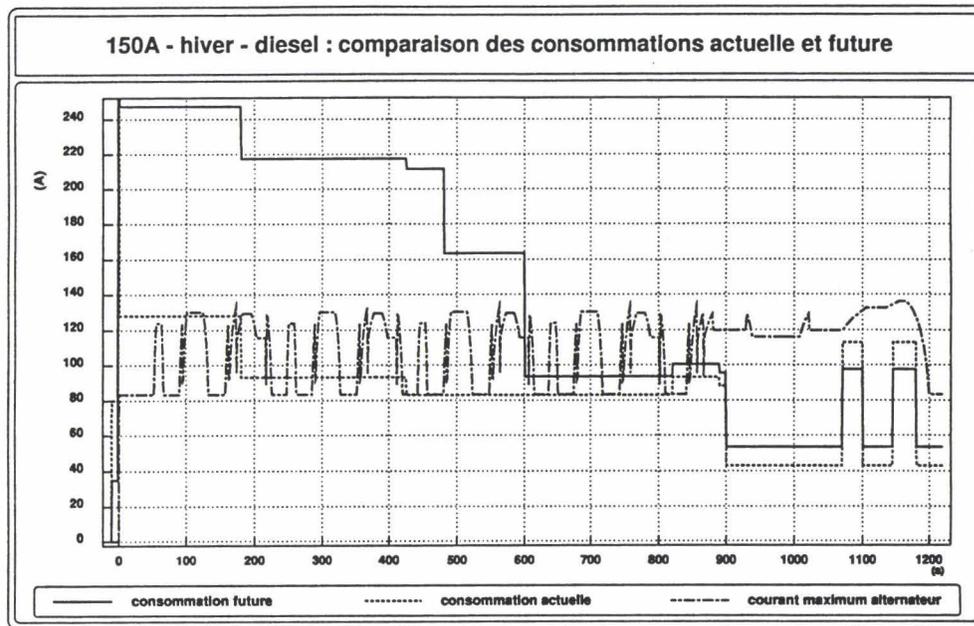
15-0A, diesel, hiver

Figure n°7 : consommations électriques sur un cycle 15-0A hiver pour une motorisation diesel

Le profil de consommation futur de la figure n°7 comporte aussi de nombreuses marches, la principale différence avec le profil actuel étant marquée par le fonctionnement du pare-brise chauffant et de la résistance de chauffage.

Les consommations moyennes sont les suivantes :

- consommation "future" : 145 A,
- consommation "actuelle" : 85 A,

soit un écart de 60 A. Sur les 145 A, 45 A sont dus à la consommation moyenne du pare-brise chauffant et de la résistance de chauffage.

Etant donné que la consommation moyenne est supérieure au courant maximal que peut débiter l'alternateur, il est clair que cette situation n'est pas acceptable en terme de bilan électrique.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous :

	Essence été	Essence hiver	Diesel été	Diesel hiver
Consommation "actuelle" (A)	46	80	44	85
Consommation "future" (A)	56	106	66	145

Sur les versions diesel, le profil hiver futur est très pénalisant, les alternateurs "haut de gamme" aujourd'hui pouvant difficilement satisfaire une telle demande de puissance. D'après les courbes, le passage délicat se situe dans les 600 premières secondes — soit la moitié du parcours! — durant lesquelles la batterie devrait délivrer entre 50 et 100 A. L'augmentation

probable du ralenti dans ces conditions difficiles ou encore, celle à étudier du rapport d'entraînement permettrait de diminuer le fort débit de la batterie. Il n'en reste pas moins que l'effet de telles actions est limité au courant maximum de l'alternateur. Or même si l'alternateur pouvait débiter son courant maximum en permanence, soit 130 A environ, le bilan électrique serait encore négatif pendant les 10 premières minutes.

Si nous faisons maintenant la moyenne des consommations futures relatives aux motorisations essence, nous obtenons une moyenne globale de 80 A. Nous retrouvons ainsi les résultats obtenus par l'extrapolation aux années 2000 de l'évolution de la consommation électrique sur une motorisation essence.

*L'extrapolation de l'évolution de la consommation électrique de 1972 à nos jours et le calcul de la puissance électrique future à partir d'une liste prospective d'équipements convergent donc vers les mêmes résultats. Il faut les analyser avec précaution, le but n'étant pas de prévoir à l'ampère près la consommation électrique en l'an 2000 mais de se fixer un ordre de grandeur quant à la puissance requise sur les réseaux de bord futurs afin de pouvoir choisir la solution la plus adaptée pour fournir la puissance correspondante. Si, dans l'état actuel des choses, les profils de consommation été sont, en terme de bilan électrique, peu contraignants, il n'en va pas de même pour les profils hiver, en particulier les profils diesel, dont la consommation moyenne de 145 A est supérieure au courant maximum que peut débiter l'alternateur. Si nous ramenons les intensités annoncées sous 14 V à des puissances électriques, nous obtenons 1,5 kW sur les profils hiver essence et 2 kW sur les profils hiver diesel.*

*En ce qui concerne ce type de profil sévère, d'autres moyens sont à prévoir pour produire la puissance nécessaire.*

## **1.2. Solutions envisageables pour produire la puissance requise sur les réseaux électriques futurs**

Deux solutions générales sont envisageables pour produire une puissance électrique de l'ordre de 2 kW :

- conserver une tension d'alimentation de 12 V et débiter plus de courant,
- élever la tension du réseau de bord et passer ainsi à 24, 36 ou 48 V.

Toutes les réponses que nous pouvons apporter sur le sujet ont un point commun. Elles se doivent d'exploiter au mieux les ressources électriques afin de minimiser la consommation en carburant du réseau électrique, sans pour autant, bien sûr, en dégrader la fiabilité. Comme nous l'avons expliqué en introduction, la réduction de la consommation en carburant est un axe d'étude majeur, non seulement dans une ambition commerciale, mais aussi afin de restreindre les émissions de polluants et satisfaire ainsi les futures normes européennes en la matière.

Sans perdre de vue cette contrainte importante, nous présentons ici les diverses solutions, avant de développer plus longuement deux points particulièrement intéressants.

### 1.2.1. Solutions en 12 V

Afin de résoudre les problèmes liés à une augmentation à terme de la puissance électrique sur le réseau de bord, deux axes d'étude peuvent être envisagés, l'un visant à freiner cette augmentation et à la maintenir à des niveaux que l'on maîtrise aujourd'hui et l'autre, à augmenter le courant débité par l'alternateur, en particulier aux faibles régimes moteur.

Pour ce faire, trois solutions sont à étudier :

- l'augmentation du régime du ralenti ; cette solution peut s'avérer intéressante pour recharger plus rapidement la batterie dans des cas spécifiques (par exemple l'hiver, après un démarrage difficile) ; néanmoins, elle induit une surconsommation en carburant ;
- l'augmentation du rapport d'entraînement peut être envisagée ; toutefois, les vitesses de 18000, voire 20000 tr/mn atteintes sur les rapports actuels sont proches des vitesses critiques ; cette solution ne doit donc être mise en œuvre qu'aux faibles régimes moteur et nécessite un système à plusieurs rapports d'entraînement ; elle fait l'objet du projet ALTAÏR, que nous présenterons ci-après ;
- l'augmentation du rendement de l'alternateur ; aujourd'hui, ces rendements sont de l'ordre de 50% et pourraient être améliorés par un dimensionnement optimisé.

Selon les équipementiers, un débit alternateur de 150 A (2 kW) correspond à une limite technique de faisabilité sous les contraintes automobiles de volume, masse et coût ; au delà, l'échauffement du redresseur entraîne, en particulier, une dégradation de sa fiabilité. Des études sont menées à ce sujet pour assurer un refroidissement efficace de l'alternateur.

Par conséquent, plus qu'une véritable augmentation de la puissance électrique disponible sur le réseau, nous chercherons surtout dans le 12 V à mieux gérer l'offre et la demande électrique d'une part et améliorer le rendement de l'alternateur, d'autre part.

#### 1.2.1.1. Augmentation du rendement de l'alternateur

Trois études sont actuellement menées dans le groupe Mécanique et Physique sur ce sujet.

Nous citerons en premier lieu GENTA / ALTAÏR. Grâce à un système annexe, l'alternateur est entraîné sur un rapport plus élevé aux faibles régimes moteur, ce qui augmente son débit. De plus, des améliorations dans la conception de la machine (tôle du stator, bobinages, diodes, refroidissement ...) conduisent à des baisses de la puissance mécanique prélevée sur l'arbre moteur comprises entre 100 et 200W soit l'équivalent de 0,1 ou 0,2 l/100 km.

ALTO est le nom d'une étude sur un alternateur refroidi par eau, dont les premiers objectifs sont d'augmenter le rendement et le débit électrique de l'alternateur, de diminuer les bruits en réduisant la ventilation, d'améliorer la thermique habitacle et moteur au travers des calories passées dans l'eau et de faciliter l'implantation sous capot, en améliorant la tenue aux ambiances chaudes. Le gain en rendement attendu est de l'ordre de 2 à 3% en absolu sur toute la plage de vitesse.

L'étude AIVI : Alternateur Intégré au Volant d'Inertie porte sur la conception d'une machine nouvelle, qui serait conduite à tourner beaucoup moins vite que l'alternateur actuel. Cette

machine à aimant permanent fait l'objet d'un redimensionnement complet et devrait avoir un rendement plus élevé.

Outre les études d'optimisation de l'alternateur, des efforts sont aussi portés sur l'amélioration du fonctionnement du réseau électrique.

#### 1.2.1.2. Optimisation du point de fonctionnement en tension de l'alternateur

Lors d'une étude de l'influence de la résistance de la tresse de masse (qui relie le groupe motopropulseur et la caisse du véhicule) sur le comportement du réseau, nous avons constaté que le pilotage d'une résistance variable placée entre l'alternateur et la batterie permettait de maintenir constante la tension aux bornes de l'alternateur et des charges qui y sont connectées.

Nous nous attarderons un peu sur le fonctionnement de ce dispositif, pour lequel nous avons déposé un brevet [16].

Dans un réseau électrique automobile classique, lorsque le courant requis par l'ensemble des charges électriques est supérieur à celui que peut fournir l'alternateur, la batterie débite le courant complémentaire et la tension aux bornes du réseau chute. Dans ce cas, l'état de charge de la batterie décroît, ce qui, à terme, diminue sa durée de vie. De plus, ces chutes de tensions nuisent au bon fonctionnement des organes électriques. Le dispositif proposé commande alors l'enclenchement d'une résistance située entre l'alternateur et la batterie. Il permet selon la stratégie adoptée, soit de maintenir constante la tension aux bornes de l'alternateur, soit d'assurer le débit maximal de l'alternateur selon sa vitesse de rotation.

Dans le premier cas, les charges connectées directement aux bornes de l'alternateur seront alimentées par une tension quasiment constante, ce qui est intéressant pour les organes sensibles aux fluctuations de tension.

Dans le second cas, l'alternateur débite plus de courant ; la batterie en fournit donc moins, son état de charge est ainsi préservé et, le cyclage étant restreint, sa durée de vie s'en trouve augmentée.

L'objet de l'invention est un système de commande d'une résistance variable pas à pas, située entre l'alternateur et la batterie.

Considérons le schéma du circuit électrique de la figure n°8 :

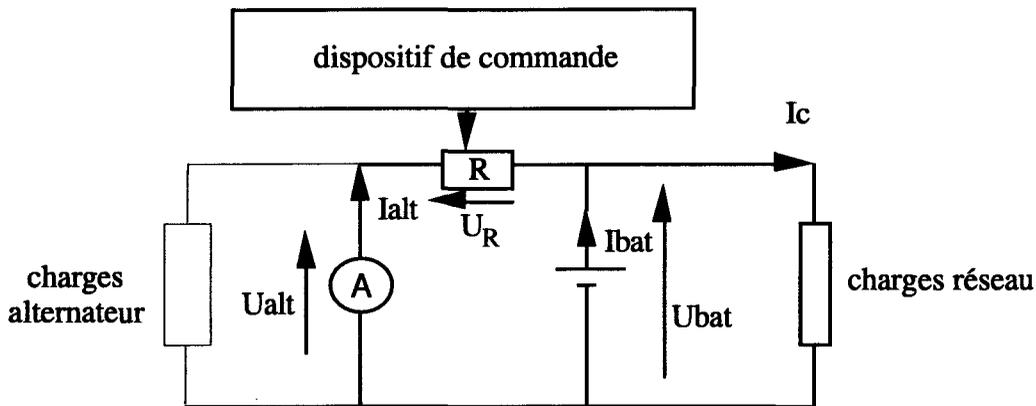


Figure n°8 : emplacement du dispositif à résistance variable

Ce réseau électrique est constitué par :

- un ensemble alternateur - régulateur : A,
- une batterie 12 V,
- un ensemble de charges électriques connectées à la batterie, intitulé "charges réseau",
- un ensemble de charges électriques connectées à l'alternateur, intitulé "charges alternateur", et supposé consommer un courant négligeable devant les "charges réseau",
- une résistance variable,
- le dispositif de commande de cette résistance, détaillé ci-après.

Le principe de fonctionnement est le suivant : sous l'hypothèse que la tension aux bornes de la batterie est constante, nous pouvons écrire :

$$U_{alt} = U_{bat} + U_R = U_{bat} + R I_{alt}$$

et tracer les caractéristiques  $U_{alt} = f(I_{alt})$  en fonction de deux valeurs  $R_1$  et  $R_2$  de la résistance  $R$ :

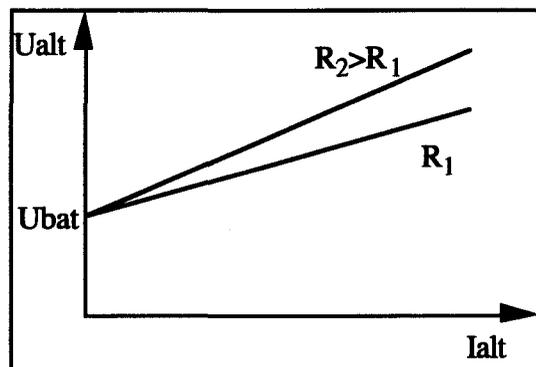


Figure n°9 : caractéristiques ( $U_{alt}$  ;  $I_{alt}$ ) vu du côté de la batterie en fonction de la résistance variable

A une température et une vitesse données, la caractéristique courant - tension de l'alternateur a l'allure suivante :

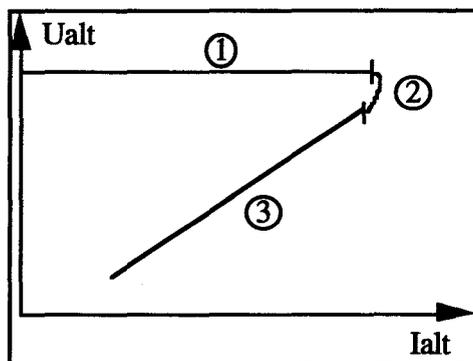


Figure n°10 : caractéristique ( $U_{alt}$  ;  $I_{alt}$ ) vu du côté de l'alternateur

Afin de justifier rapidement l'allure de cette courbe, nous allons la séparer en trois parties :

- partie 1 : le régulateur règle le courant d'excitation. La tension alternateur est constante.
- partie 2 : le courant d'excitation est maximal (le taux de hachage de la tension est égal à un) et l'alternateur est saturé. Lorsque la tension diminue, ce qui est le cas lorsque la batterie fournit du courant, le courant d'excitation, proportionnel à la tension alternateur diminue de même, tout comme la force électromotrice et donc le courant alternateur.
- partie 3 : la machine n'est plus saturée. La force électromotrice diminue proportionnellement avec le courant d'excitation et donc avec la tension du réseau, entraînant le courant alternateur.

Lorsque la vitesse augmente, le courant maximal débité augmente. La réaction magnétique d'induit est plus élevée pour ces forts courants et la saturation magnétique de la machine moindre. La partie 2 se trouve donc réduite, comme le montrent les relevés d'essais sur la figure n°11, effectués sur un alternateur A13VI 110A à 25°C auquel est associé un régulateur YV16.

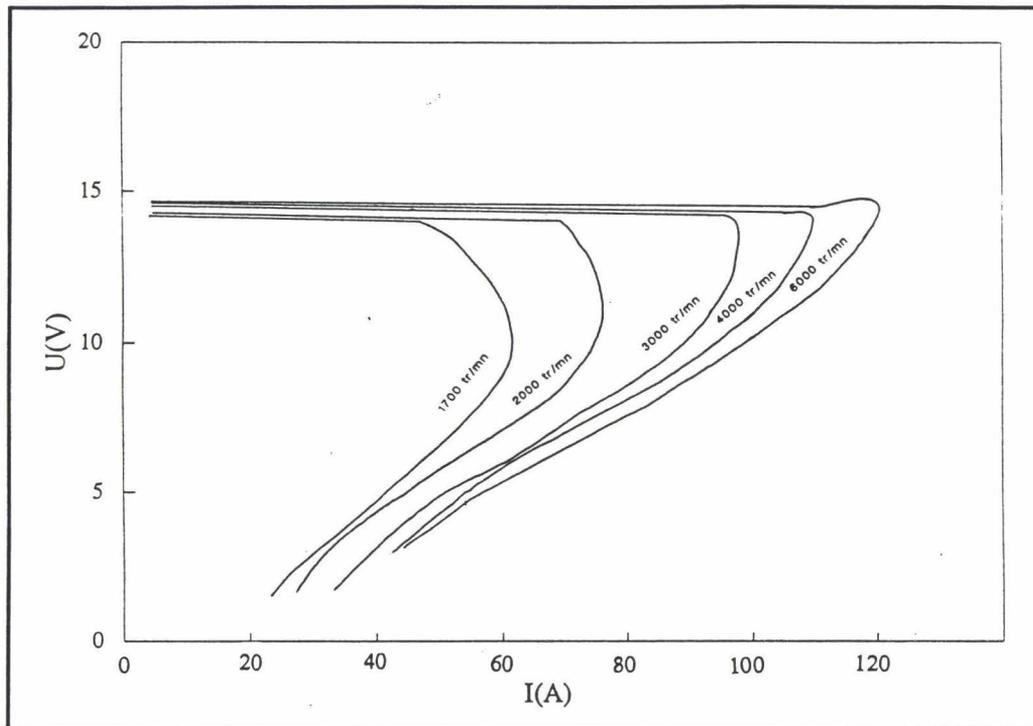


Figure n°11 : caractéristiques (tension ; courant) de l'alternateur en fonction de sa vitesse de rotation

Pour trouver les points de fonctionnement A et B de notre réseau, respectivement fonction de  $R_1$  et  $R_2$ , il suffit de superposer les caractéristiques précédentes (figure n°12):

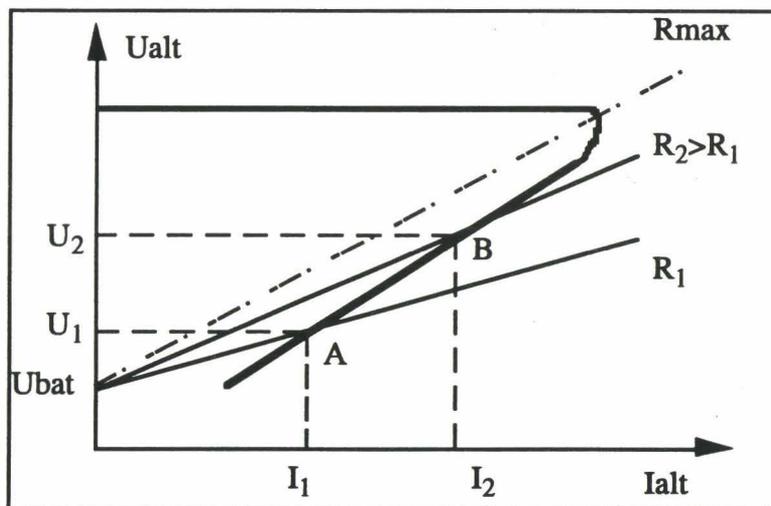


Figure n°12 : caractéristiques ( $U_{alt}$  ;  $I_{alt}$ ) du réseau électrique selon la résistance variable

Nous remarquons donc que l'ajout d'une résistance lorsque l'alternateur fonctionne en plein-champ permet de faire évoluer le point de fonctionnement du réseau et en particulier, d'augmenter la tension et le courant débité par l'alternateur.

Le rôle du dispositif de commande est donc le suivant : lorsque la tension aux bornes de l'alternateur devient plus faible qu'une valeur référence préalablement déterminée, ce système pilote la résistance variable pour optimiser le point de fonctionnement du réseau électrique.

Selon la valeur de la tension de référence choisie, deux stratégies de commande de la résistance sont possibles. Reportons-nous au schéma ci-dessous (figure 13):

- si pour une température donnée, la tension de référence est égale à  $U_{max}$ , le pilotage de la résistance permettra de maintenir constante la tension alternateur,
- si, pour une température et une vitesse données, la tension de référence est égale à la tension pour laquelle le courant débité par l'alternateur est maximum  $U(I_{max})$ , le pilotage de la résistance amènera l'alternateur à fournir ce courant maximum.

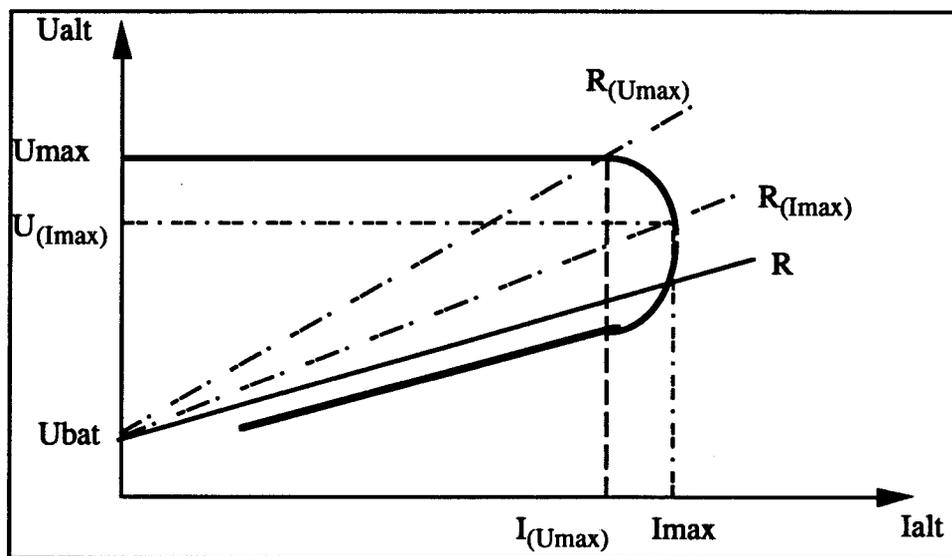


Figure n°13 : stratégie de commande du dispositif à résistance variable

Afin de valider notre raisonnement et de quantifier les gains espérés, nous avons effectué quelques simulations sur le logiciel Sirex (logiciel de Simulation de Réseau Electrique, développé par Renault). L'étude porte sur une Mégane, équipée d'un moteur diesel à injection directe. Les résistances de chauffage habitacle appelant un fort courant, le bilan électrique est négatif pendant les cinq premières minutes et ne devient tout à fait positif qu'après dix minutes de roulage sur cycle ECE 15-0A. Tant que la tension alternateur n'est pas régulée, la tension sur le réseau est imposée par la batterie. Il est, dans ce cas, intéressant d'enclencher le dispositif de résistance variable.

La stratégie choisie pour ces simulations est le maintien de la tension constante aux bornes de l'alternateur.

La comparaison du comportement du réseau avec et sans le dispositif montre dans un premier temps que la tension batterie varie peu d'un cas à l'autre (figure n°14), ce qui confirme notre hypothèse. Nous expliquerons un peu plus loin le faible écart entre ces courbes.

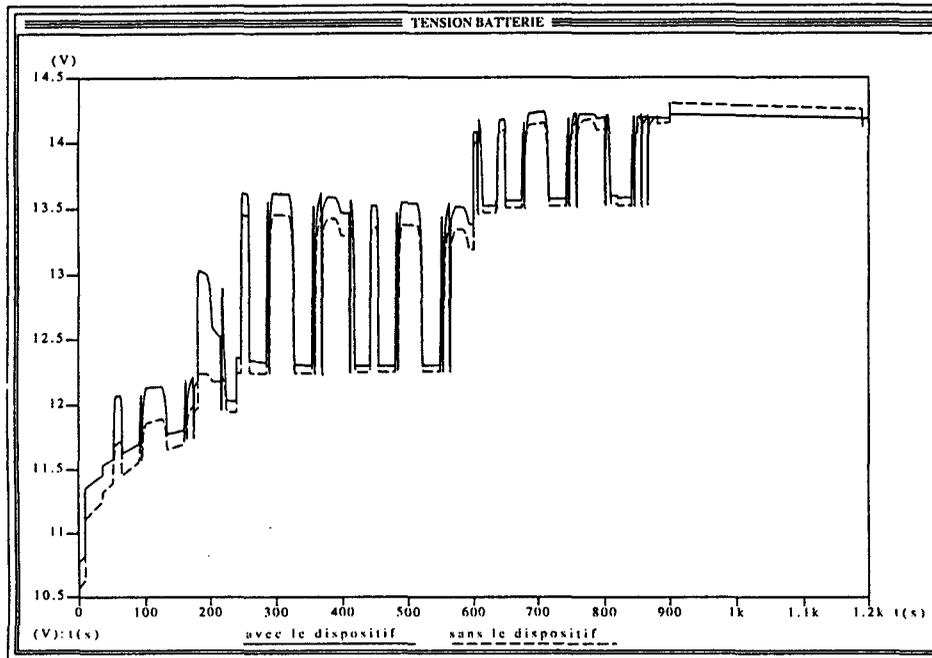


Figure n°14 : dispositif à résistance variable - tension de la batterie

Nous avons pris l'exemple d'une résistance pouvant varier de  $1\text{ m}\Omega$  (résistance de connexion du dispositif) à  $30\text{ m}\Omega$  ( $R_{\text{max}}$ ), sa valeur dépendant de l'écart entre la tension de l'alternateur et la tension de référence (ici, la tension de référence du régulateur de l'alternateur).

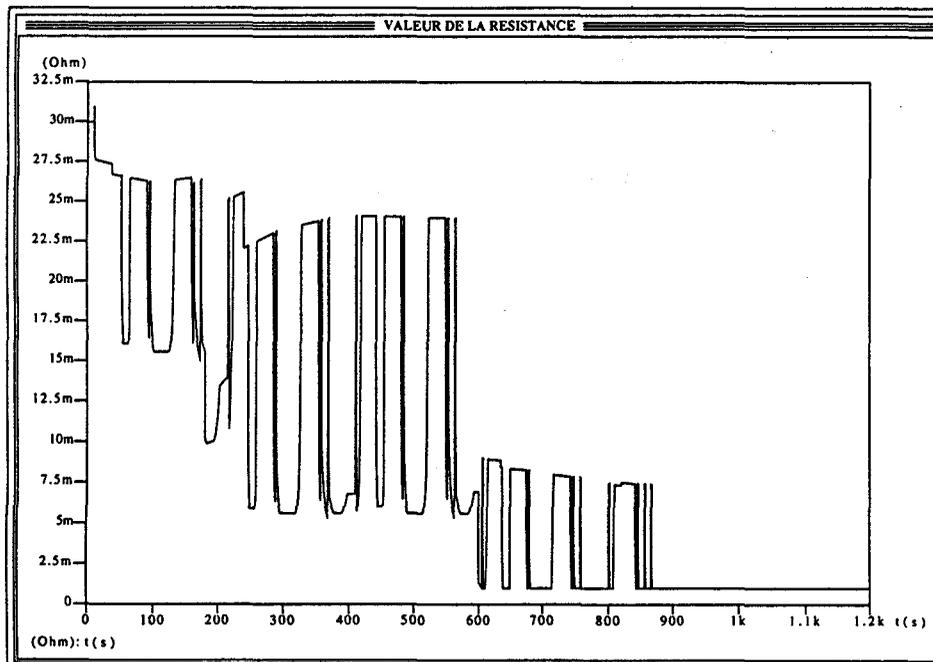


Figure n°15 : dispositif à résistance variable - valeur de la résistance

L'enclenchement de la résistance permet de maintenir constante la tension aux bornes de l'alternateur (et égale, dans cet exemple, à la tension de référence du régulateur), comme le montre la figure n°16.

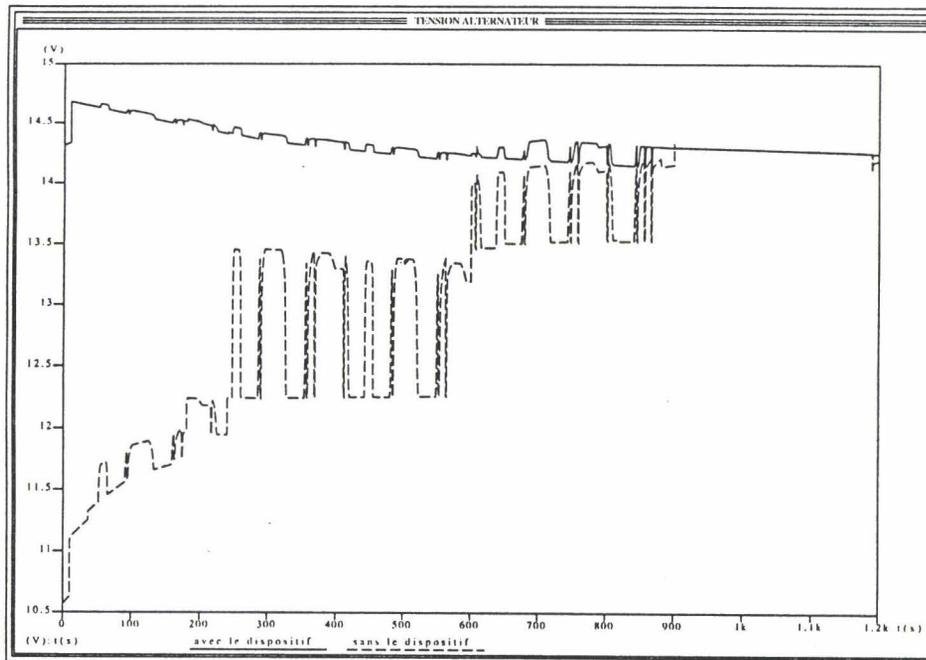


Figure n°16 : dispositif à résistance variable - tension de l'alternateur

Sous une tension plus élevée, l'alternateur débite plus de courant (décompté négativement dans la figure n°17). Le gain au démarrage équivaut à 25 A.

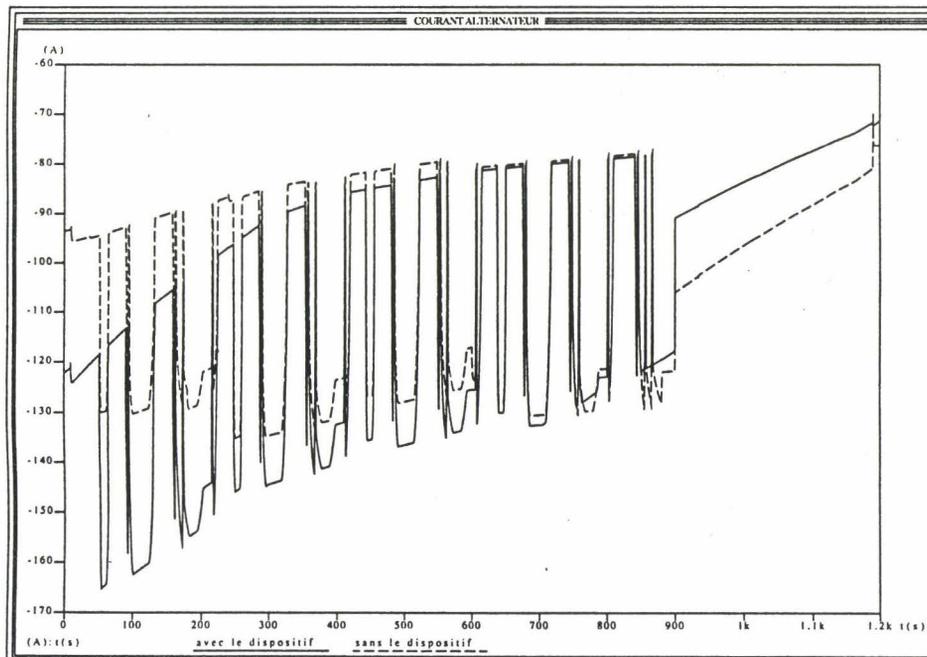


Figure n°17 : dispositif à résistance variable - courant de l'alternateur

La batterie débite donc 25 A de moins au démarrage lorsque le réseau est équipé du dispositif (le courant est, là encore, décompté négativement), comme nous pouvons le voir sur la figure n°18.

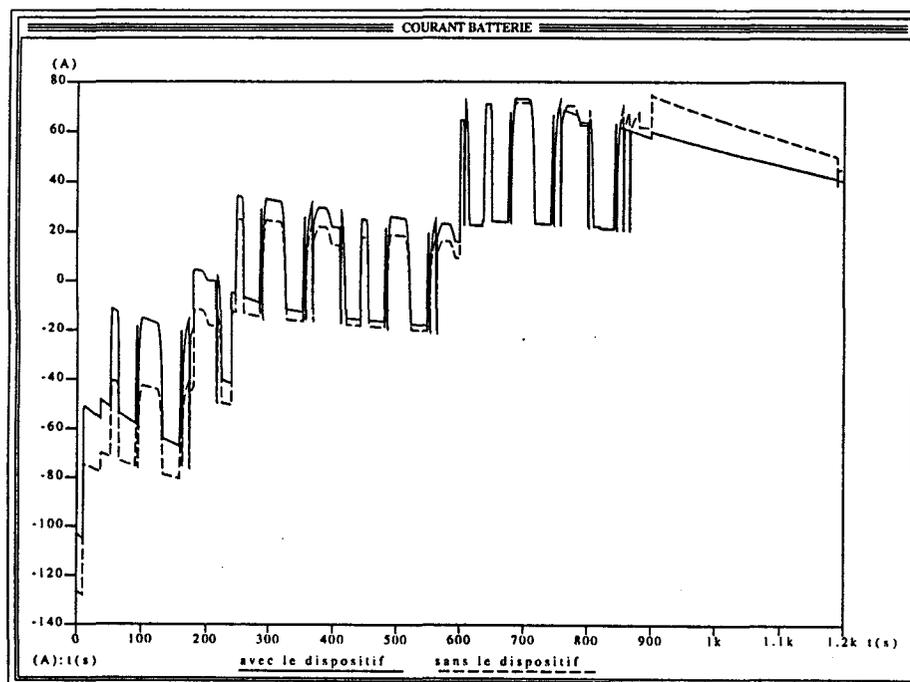


Figure n°18 : dispositif à résistance variable - courant de la batterie

L'état de charge de la batterie est par conséquent supérieur. Son minimum passe de 74% à 78% avec ce dispositif (figure n°19).

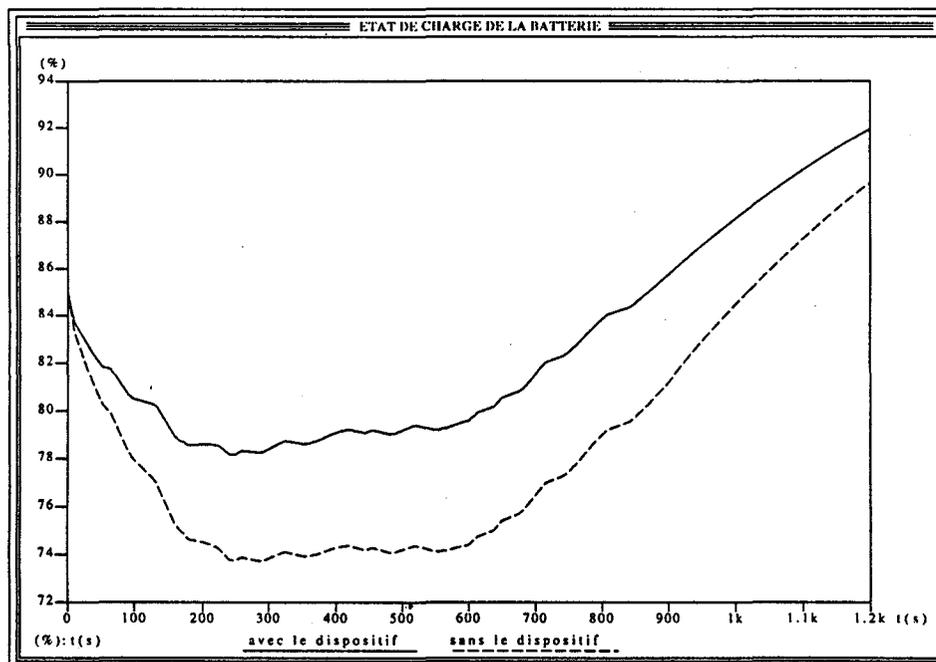


Figure n°19 : dispositif à résistance variable - état de charge de la batterie

Revers de la médaille, la puissance électrique sera plus élevée lorsque la résistance variable sera enclenchée (tension et courant importants) car elle dissipe en moyenne 115 W. En fin de trajet, lorsque le bilan devient entièrement positif, la batterie se charge en permanence. Du fait de son meilleur état de charge lorsque le réseau est équipé du dispositif, elle absorbe moins de courant. La puissance électrique devient alors inférieure à ce qu'elle était sans le dispositif, comme la montre la figure n°20.

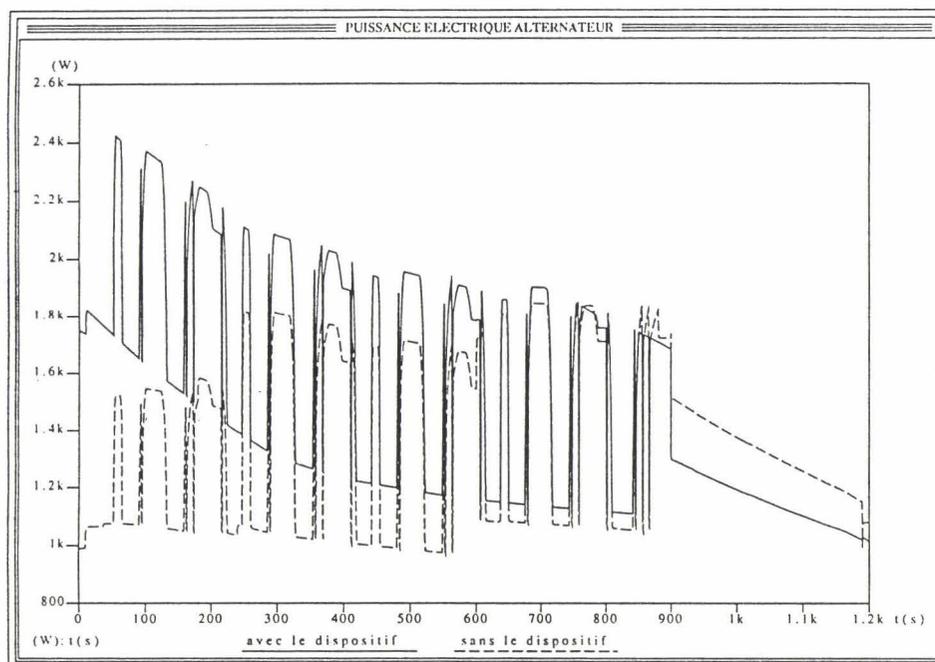


Figure n°20 : dispositif à résistance variable - puissance électrique fournie par l'alternateur

La part de consommation en carburant du dispositif est donc à prendre en compte. Dans cet exemple, elle vaut à peu près 0,4 l/100 km, ce qui est loin d'être négligeable.

Nous ferons plusieurs remarques quant à ces résultats.

La tension batterie n'est pas tout à fait la même avec et sans dispositif. Effectivement, lorsque la résistance variable est enclenchée, la batterie, nous l'avons vu, débite moins de courant et son état de charge est plus élevé. Sa tenue en tension est donc meilleure. Par contre, lorsque la tension de l'alternateur est régulée, la résistance de connexion du dispositif induit une chute de tension aux bornes de la batterie. L'écart entre les deux tensions reste cependant très faible, ce qui permet de valider notre hypothèse de départ.

La consommation supplémentaire, qui paraît à première vue excessive, serait en partie compensée si nous prenions en compte la gestion du ralenti : après le démarrage, le régime du ralenti est augmenté pour éviter que le moteur ne cale sous la charge mécanique et électrique. La consommation d'essence est donc supérieure à celle que nous avons prise comme référence. Nous n'avons cependant pas refait le calcul avec ce changement de régime.

Enfin, et ce dernier point n'est pas négligeable, la modélisation de l'alternateur sur Sirex ne prend pas en compte les pertes fer de la machine. Par conséquent, l'arrondi caractéristique de la partie 2 de la courbe  $U = f(I)$  de l'alternateur (figure n°10) n'apparaît pas lorsque nous traçons cette caractéristique sur Sirex (cf. figure n°21).

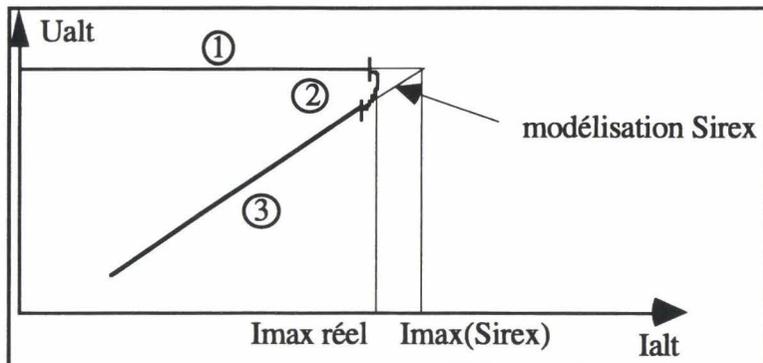


Figure n°21 : courbe (tension ; courant) de l'alternateur d'après le modèle utilisé sur Sirex

Par conséquent, les points de fonctionnement à tension maximale et courant maximal sont superposés, ce qui ne permet pas de distinguer les gains suivant la stratégie choisie (maintien de la tension constante ou optimisation du débit alternateur). Deuxièmement, le courant maximal est surestimé et les gains réels certainement moindres que ceux qui étaient annoncés.

Bien que nous ayons pris soin de breveter ce dispositif, nous n'avons pas poursuivi cette étude, ni conçu le système de pilotage de la résistance. Effectivement, vu les intensités à commuter et le pilotage de la résistance prévu, le dispositif proposé sera d'une conception complexe et par conséquent coûteuse. Or, si nous pouvons simuler le fonctionnement du réseau avec la première stratégie (maintien de la tension constante), les gains éventuels obtenus par la seconde stratégie (optimisation du débit alternateur) sont difficiles à évaluer. De plus, d'autres systèmes et architectures électriques permettent de conserver un bon niveau de tension et d'optimiser la charge des batteries tout en assurant des fonctions supplémentaires.

### 1.2.1.3. Réseaux duaux

Reprenons effectivement nos résultats sur l'intensité électrique requise sur les réseaux futurs. Un modèle simple du comportement de la batterie nous permet d'avoir une idée du courant qu'elle absorbe à la charge ou fournit à la décharge.

Pour chacun des cas étudiés (essence, diesel ; été, hiver), nous avons cherché à représenter l'énergie relative aux consommateurs, à l'alternateur et à la batterie en fonction de la puissance électrique de chacune de ces trois catégories. Dans la pratique, nous avons rapporté l'énergie à des ampères-heures et la puissance à une intensité, puisque nous considérons la tension comme constante.

Nous obtenons, pour les motorisations essence, les diagrammes suivants (figure n°22 et 23) :

- été :

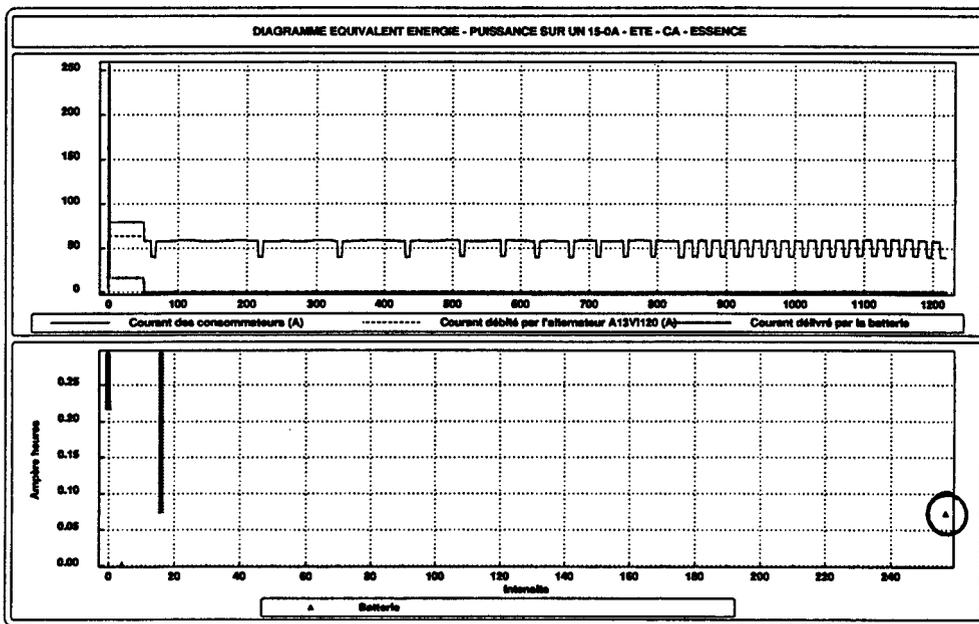


Figure n°22 : diagramme énergie - puissance batterie sur un 15-0A été, motorisation essence

L'alternateur suffit aux besoins des consommateurs. La batterie ne sert qu'au démarrage (300 A) puis se recharge sous un faible courant.

Il n'en va pas de même pour l'hiver (figure n°23) :

- hiver :

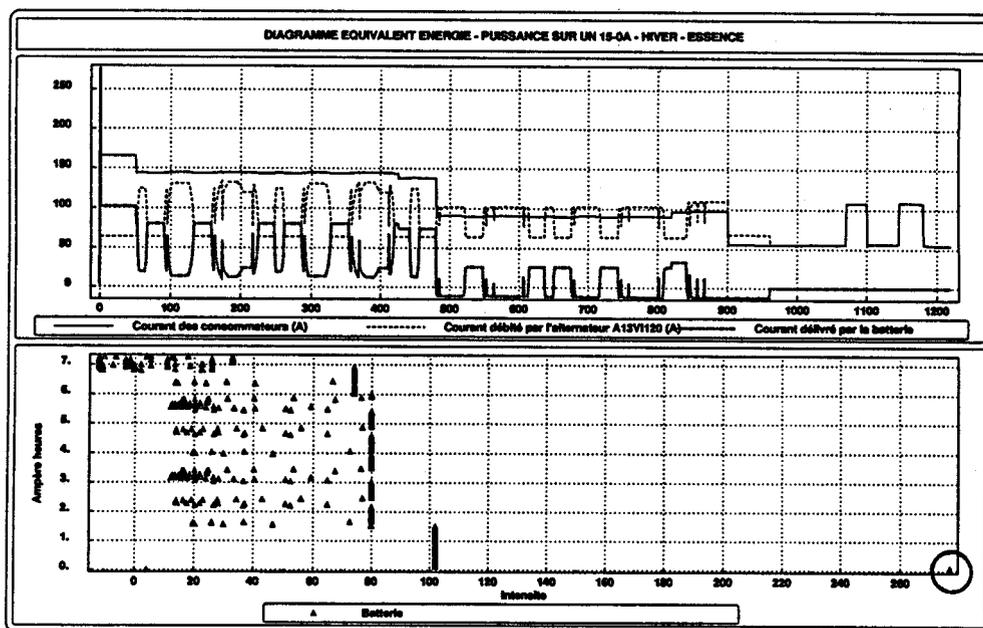


Figure n°23 : diagramme énergie - puissance batterie sur un 15-0A hiver, motorisation essence

L'alternateur ne fournit pas assez de courant pendant les huit premières minutes, puis en alternance jusque quinze minutes après le départ. La batterie débite pendant tout ce temps le courant complémentaire, ce qui explique le nuage de points de fonctionnement d'intensité positive. Puis lorsque le bilan électrique est satisfait (à partir de 900s), la batterie se recharge sous un courant d'autant plus fort qu'elle est déchargée, d'où la rangée de points de fonctionnement dans les courants négatifs.

Dans tous les cas, ces diagrammes mettent en évidence deux fonctions principales de la batterie que sont le démarrage, représenté par un point de fonctionnement isolé dans les intensités élevées et une fonction que nous intitulerons fonction de "service" où la batterie se charge ou se décharge selon les besoins.

Sur les diagrammes relatifs aux motorisations diesel, la distinction entre ces deux fonctions est encore plus marquée du fait que le courant de démarrage est très élevé — environ 600 A (figure n°24 et 25) :

- été :

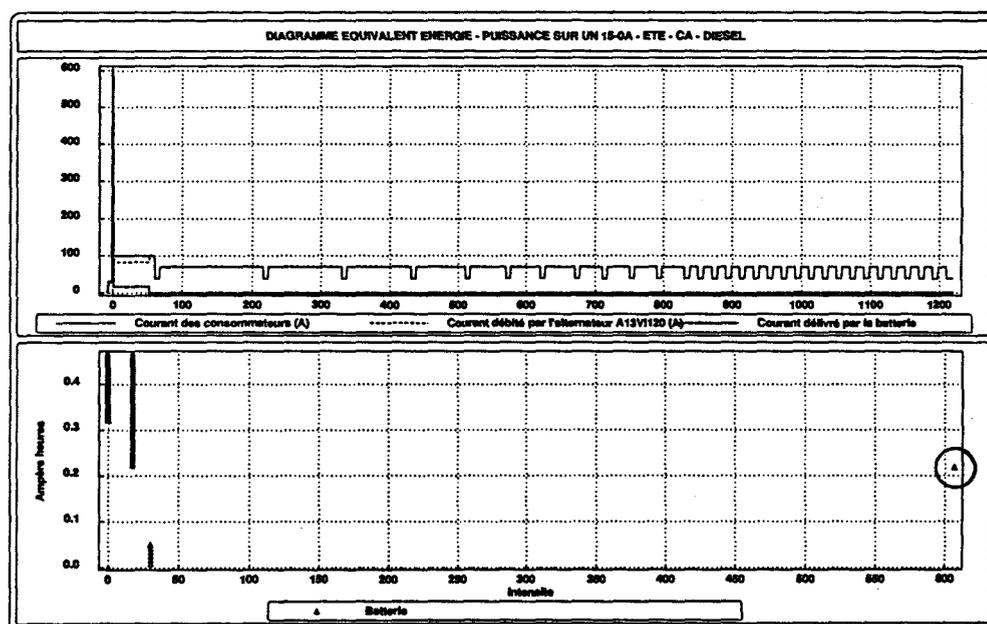


Figure n°24 : diagramme énergie - puissance batterie sur un 15-0A été, motorisation diesel

- hiver :

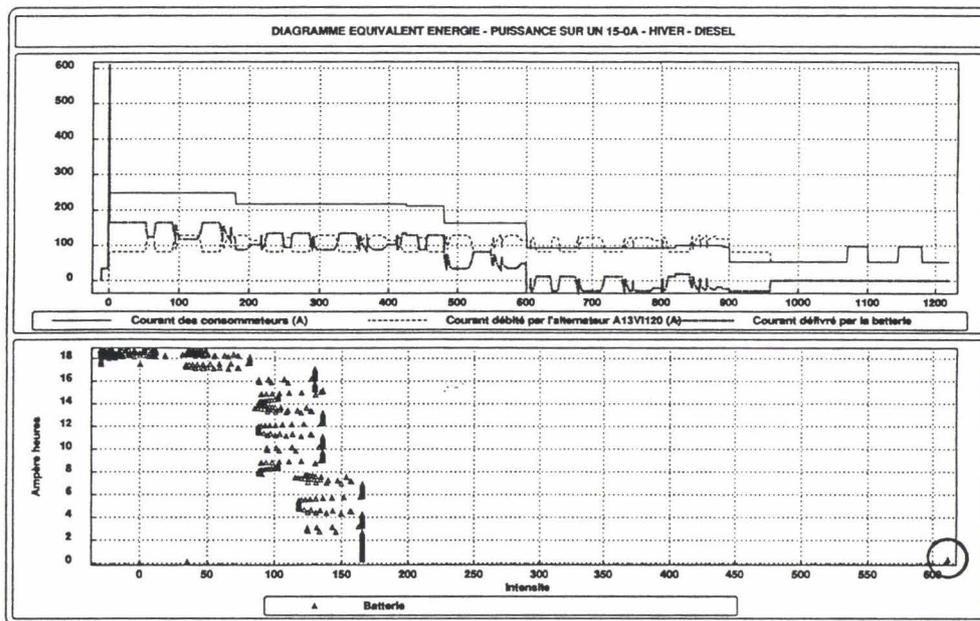


Figure n°25 : diagramme énergie - puissance batterie sur un 15-0A été, motorisation diesel

Etant donné que nous n'avons pas représenté les intensités consommées par les organes fonctionnant lorsque le véhicule est garé, moteur à l'arrêt, nous ne voyons pas apparaître ici la troisième fonction de la batterie, que nous appellerons "fonction veille" et qui correspond à l'alimentation d'organes comme la montre ou la radio, lorsque le moteur ne tourne pas.

La batterie assume donc trois fonctions principales, qui sont :

- une fonction "démarrage" : la batterie doit fournir le courant nécessaire au fonctionnement du démarreur, soit plusieurs centaines d'ampères durant quelques secondes ;
- une fonction de "service" : lorsque l'alternateur ne peut fournir le courant suffisant pour alimenter les charges électriques, la batterie débite le courant supplémentaire, qui représente quelques dizaines d'ampères durant de longues périodes (temps des trajets) ;
- une fonction "veille" : lorsque le moteur est arrêté, la batterie alimente les consommateurs en mode veille, soit quelques milliampères pendant plusieurs semaines.

Les énergies mises en jeu sont donc fort différentes et si chacune de ces fonctions conduit en théorie à une conception différente des batteries, la conception actuelle est, en pratique, le résultat d'un compromis visant à assurer conjointement ces trois fonctions.

L'idée est donc de remplacer l'actuelle batterie par deux batteries dédiées chacune à une fonction spécifique, la batterie de démarrage, dont l'état de charge doit être toujours d'un niveau suffisant pour assurer le démarrage, et la batterie de service, qui alimente la plupart des charges

électriques, que le moteur soit ou non arrêté. Les deux batteries sont reliées entre elles par un système de gestion de charge.

Le système général est dessiné figure n°26 :

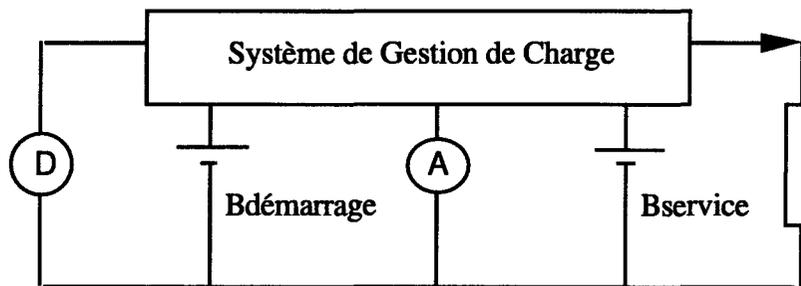


Figure n°26 : schéma de principe des réseaux à deux batteries

Le fonctionnement spécifique de ces deux batteries doit permettre d'en optimiser le dimensionnement et d'en accroître le rendement et la durée de vie. Le système de gestion de charge garantit, de plus, un bon état de charge de la batterie de démarrage, qui peut ainsi assurer le lancement du moteur, même lorsque le conducteur a, par exemple, oublié d'éteindre ses feux.

*Si nous en restons là en ce qui concerne le dispositif d'optimisation du point de fonctionnement de l'alternateur jugé aujourd'hui trop coûteux à développer, l'étude des réseaux duaux (deux batteries spécifiques et le dispositif de gestion de charge associé) mérite d'être approfondie. Ce type de système permettrait effectivement d'améliorer le fonctionnement du réseau électrique dans son ensemble et de remédier aux problèmes de place sous le capot. Par ailleurs, cette structure est tout à fait compatible avec les nouveaux alternateurs actuellement à l'étude, dont le rendement plus élevé permettrait de diminuer la part de la consommation en carburant du réseau électrique.*

*Face à l'augmentation de la puissance électrique prévue sur les réseaux de bord futurs, les réseaux duaux se présentent donc comme une alternative intéressante pour mieux gérer la puissance électrique disponible. Quant à produire plus de puissance sur le réseau de bord, les solutions semblent restreintes en 12 V, ce qui nous amène à étudier les avantages de l'élévation de la tension du réseau de bord.*

### 1.2.2. Intérêt d'une éventuelle élévation de la tension du réseau de bord

Commençons par décrire brièvement quels sont les bénéfices à tirer d'une augmentation de la tension du réseau de bord.

A priori, l'élévation de tension permet, en premier lieu, de réduire les courants, ce qui se répercute favorablement sur le dimensionnement et le rendement :

- du câblage : diminution du diamètre des fils et diminution des pertes Joule,
- des composants électroniques de puissance : diminution des pertes par conduction,
- des relais : moindre courant à commuter.

---

Des gains devraient donc apparaître sur la masse, la qualité de la distribution électrique, le coût et peut-être la fiabilité des systèmes. De plus une élévation de tension pourrait faciliter l'émergence de nouveaux consommateurs, nécessitant une "haute tension" pour des performances meilleures.

*Des solutions présentées en 12 V, les réseaux duaux apparaissent comme une architecture électrique particulièrement intéressante : elle permet d'assurer une bonne gestion de la puissance électrique pour un coût maîtrisé. Vu les niveaux de puissance prévus (de l'ordre de 2 kW), l'élévation de la tension ne se présente donc pas comme la seule réponse pour assouvir les besoins en puissance électrique futurs et perd, par là même, son intérêt premier. Cette solution peut, néanmoins, apporter des gains en rendement non négligeables et se présenter ainsi comme un moyen de réduire la part du réseau électrique dans la consommation en carburant.*

*Confrontée aux multiples prévisions quant à la puissance électrique nécessaire au bon fonctionnement des équipements électriques futurs, nous avons tenu à réévaluer précisément les besoins avant de chercher comment produire une telle puissance.*

*Nous avons, pour ce faire, employé deux méthodes. La première consiste en l'étude de l'évolution de la consommation électrique sur les véhicules essence de 1975 à nos jours, en vue d'extrapoler les résultats à l'an 2000. D'après nos estimations, l'intensité totale nécessaire au bon fonctionnement des organes électriques augmente d'environ deux ampères par an, ce qui nous amènerait, pour une motorisation essence, à une consommation moyenne de 80 A en l'an 2000 contre 70 A en 1995.*

*La seconde approche confirme ce résultat. Nous avons ici dressé la liste des organes électriques susceptibles d'équiper les véhicules futurs tant sur les motorisations essence que diesel puis évalué le profil de mission des principales charges. Nous avons ainsi pu tracer l'évolution du courant des consommateurs sur un cycle de roulage 15-0A en hiver et en été. Les moyennes des courants sont rappelées dans le tableau suivant :*

	<i>Essence été</i>	<i>Essence hiver</i>	<i>Diesel été</i>	<i>Diesel hiver</i>
<i>Consommation "actuelle" (A)</i>	46	80	44	85
<i>Consommation "future" (A)</i>	56	106	66	145

*Si le bilan électrique des profils été est tout à fait positif, les profils hiver sont très sévères, en particulier les profils diesel, dont la consommation moyenne est supérieure aux intensités maximales débitées par les plus gros alternateurs de la gamme actuelle.*

*De nouvelles solutions sont donc à prévoir pour produire la puissance nécessaire sur les réseaux de bord futurs, en particulier sur les motorisations diesel, dont les besoins s'élèvent à près de 2 kW.*

*Si l'on souhaite conserver une tension d'alimentation de 12 V, il nous faut chercher comment gérer au mieux la puissance disponible sur le réseau. Plusieurs études sont engagées à ce sujet, portant sur l'optimisation du fonctionnement de l'alternateur ou encore sur l'amélioration du comportement du réseau électrique. Nous avons à ce titre, déposé un brevet sur une résistance variable, placée entre l'alternateur et la batterie, qui permet, lorsque la batterie fournit du courant, de maintenir constante la tension aux bornes de l'alternateur ou d'augmenter son débit, selon la stratégie de commande utilisée. Le développement d'un tel dispositif est cependant compromis par un rapport fonction / coût plus faible que pour les réseaux duaux. Ces derniers sont équipés de deux batteries dédiées chacune à un fonctionnement spécifique ; la première assurant l'alimentation du démarreur, la seconde, celle des autres charges électriques, l'état de charge de ces batteries étant contrôlé par un système de gestion .*

*Ce type de réseaux suscite aujourd'hui l'engouement des constructeurs et équipementiers, qui, il y a peu, ne juraient que par l'élévation de la tension de bord pour faire face à l'augmentation de la puissance électrique. Cette solution permettrait, entre autres, de diminuer les courants circulant sur le réseau et par conséquent la section des câbles et les pertes Joule. Cependant, le coût certain d'une telle opération est un obstacle majeur à son développement, d'autant plus que les niveaux de puissance annoncés s'accordent avec des solutions moins radicales.*

*Il s'agit donc de peser avec soin les avantages et inconvénients d'une éventuelle élévation de la tension du réseau de bord et d'évaluer les gains potentiels, avant de se prononcer sur la pertinence de cette solution.*

## 2. ELEVATION DE LA TENSION DU RESEAU DE BORD

Au milieu des années 50 pour les Américains, un peu plus tard pour nous, l'élévation de la tension du réseau de bord était déjà un sujet d'actualité, avec le passage du 6 au 12 V.

Aujourd'hui, la question se pose à nouveau, bien que, comme nous pourrons le voir, les raisons ne soient pas les mêmes. Les niveaux de tension envisagés sont aussi supérieurs : 24, 36 ou 48 V..., la valeur limite, étant, dans un premier temps, fixée par la tension maximale admissible pour garantir une bonne protection des personnes en cas de contact avec une partie sous tension du circuit.

Après avoir estimé cette valeur, nous étudierons quelle est l'incidence d'une éventuelle élévation de la tension du réseau de bord sur les différents organes électriques : alternateur, batterie, moteur et récepteurs.

Mais avant de s'étendre sur les futurs réseaux électriques, revenons le temps de quelques paragraphes sur les automobiles du passé.

D'après un article paru à l'occasion du quatre-vingt-cinquième anniversaire de la SAE (Society of Automobile Engineers) [17], les premières automobiles n'étaient équipées d'aucun système électrique (l'allumage était alors assuré par un tube chaud).

C'est sur la Cadillac de 1912 qu'apparaît une première ébauche de circuit électrique : une batterie 6 V, chargée par une dynamo, alimente le dispositif d'allumage, les feux et le démarrage du moteur. Le système se développe avec l'arrivée en 1930 des premiers régulateurs. Les réseaux 12 V font leur apparition au milieu des années 50 car ils permettent de diminuer par deux la taille et le poids des câbles dans le véhicule. D'après des informations prises au service Patrimoine [18] et au Club des Amateurs des Anciennes Renault [19], le passage du 6 au 12 V sur les automobiles Renault s'est effectué au cas par cas du milieu des années 50 — sur les Frégate avec boîte électromagnétique ou encore les Dauphine sportives — à la fin des années 60, la R4 fermant la marche en 1967.

Excepté ces quelques informations, les comptes-rendus multiples et l'archivage n'étant pas de rigueur à l'époque, nous n'avons pas trouvé de document écrit résumant les difficultés techniques du passage du 6 au 12 V. Nous devons donc faire notre propre expérience.

Si la tension du réseau de bord n'a fait que doubler dans les années 60, les niveaux de tension envisagés pour les réseaux futurs montent bien au delà du 24 V. Mais il faut savoir que pour des tensions très élevées, le coût des dispositifs de protection contre les chocs électriques est à prendre en compte. Par conséquent, le mieux serait de s'en tenir à des tensions nominales pour lesquelles

lesquelles aucune protection particulière n'est obligatoire pour assurer une bonne sécurité des personnes en cas de contact.

## **2.1. Tension admissible assurant la sécurité des personnes**

Etant donné qu'aucune des normes ne traitant de la sécurité électrique ne s'applique spécifiquement au domaine automobile, nous avons cherché au travers des articles, publications et textes officiels des indications nous permettant de calculer la tension du réseau admissible garantissant un bon niveau de sécurité en cas de contact avec une partie active du circuit.

Commençons par définir les termes usuels dans le domaine de la protection contre les chocs électriques et déterminer quels peuvent être les effets de ces chocs. Nous reprendrons ici les descriptions données dans les Techniques de l'Ingénieur [32] :

"Il convient de rappeler d'abord la terminologie propre aux accidents d'origine électrique.

L'électrisation désigne tout accident électrique, mortel ou non. L'électrisation peut se traduire par une simple commotion, qui peut ne pas avoir de suite, ou, à l'opposé, par un état de fibrillation ventriculaire.

L'électrocution est un accident mortel d'origine électrique.

La fibrillation ventriculaire qui peut suivre l'électrisation est un état transitoire de l'organisme, dit état de mort apparente, qui correspond à un rythme anarchique du cœur sous l'effet du passage d'un courant électrique de faible intensité. Ce régime cardiaque perturbé est de courte durée et l'arrêt définitif du cœur se produit assez vite s'il n'y a pas d'intervention extérieure de réanimation."

La norme internationale CEI 479-I [27] précise les actions pathophysiologiques du courant électrique :

"La fibrillation ventriculaire est considérée comme la cause principale de mort par choc électrique. Il existe aussi des cas de mort par asphyxie ou arrêt du cœur.

Des effets pathophysiologiques tels que contractions musculaires, difficultés de respiration, augmentation de la pression sanguine, perturbations dans la formation et la propagation des impulsions dans le cœur y compris la fibrillation auriculaire et l'arrêt provisoire du cœur peuvent se produire sans fibrillation ventriculaire. De tels effets ne sont pas mortels et sont habituellement réversibles. Des marques de courant peuvent se produire.

Pour des courants de plusieurs ampères, des brûlures graves provoquant des dommages sérieux et même la mort peuvent se produire."

Nous voilà avertis. Et comme nous ne souhaitons pas faire de nos véhicules des instruments de torture, nous ferons en sorte qu'aucun choc électrique aux conséquences malheureuses ne puisse avoir lieu lors d'un contact avec des parties sous tension du circuit électrique. Pour ce faire, une solution très simple consiste à rester dans le domaine des Très Basses Tensions de Sécurité (TBTS).

La norme NF C 15100 [28], norme fondamentale de sécurité vis à vis de la protection contre les chocs électriques, donne les définitions préliminaires suivantes :

**"Tension nominale** : tension par laquelle une installation est désignée.

Les surtensions transitoires [...] ne sont pas prises en considération.

**Courant continu lisse** : courant dont le taux d'ondulation n'est pas supérieur à 10%."

Le décret n°1978.II [29] définit les installations relevant du domaine des Très Basses Tensions de Sécurité (TBTS) comme des installations :

- dont la tension nominale ne dépasse pas 50 V en courant alternatif et 120 V en courant continu lisse,
- isolées de toute autre installation ne relevant pas du domaine des TBTS,
- dont les parties actives ne sont pas en liaison électrique avec la terre.

Il est à noter que " les différentes tensions limites indiquées dans le présent article doivent être réduites à la moitié de leur valeur pour des installations situées dans des locaux ou emplacements mouillés".

En ce qui concerne la protection contre les chocs électriques, l'alimentation par des TBTS permet de classer les équipements électriques connectés en matériel de classe III, pour lequel aucun dispositif particulier de protection complémentaire, tel qu'une isolation double ou renforcée, n'est obligatoire. Par conséquent, l'alimentation d'un réseau électrique par une Très Basse Tension de Sécurité permet de s'affranchir des surcoûts dus aux protections supplémentaires.

Si le courant ne peut être qualifié de "continu lisse" — il peut même changer de signe aux bornes de la batterie —, le premier paragraphe de la norme CEI 479-I [27] montre que, pour déterminer l'intensité du courant passant dans le corps humain et en déduire la gravité des effets d'un choc électrique, il suffit de connaître la tension de contact et la résistance du corps humain au moment du contact. Or la tension du réseau peut être considérée, hors transitoires, comme "continue lisse".

Nous pourrions donc admettre que le réseau électrique relève du domaine des TBTS, qui fixe, pour des conditions extérieures mouillées et un trajet du courant main - pieds, les tensions maximum admissibles à :

- 25 V en alternatif (50 Hz),
- 60 V en continu.

**Remarque** : les normes ne précisent pas ce qu'il en est pour d'autres fréquences du courant.

Il est à noter cependant que :

- les surtensions transitoires sont nombreuses en automobile et peuvent être de forte amplitude,

- ramener les "courants continus lisses" aux "tensions continues lisses" dans le cas qui nous intéresse constitue tout de même une interprétation des normes qu'il reste à valider,
- une éventuelle élévation de la tension pourrait porter à 48 V la tension de la batterie et donc à 56 V celle de l'alternateur. Cette dernière valeur est très proche de la tension maximum admissible fixée,
- il n'est pas sûr que le trajet de courant main - pieds soit le plus dangereux dans le cas de l'automobile.

Tous ces points critiques nous ont poussée à valider cette valeur de 60 V, à partir de la norme CEI 479 [27], qui nous permet de déterminer la résistance du corps humain selon les conditions du contact, d'en déduire, pour différentes tensions de contact, l'intensité du courant traversant le corps humain et d'en prévoir les effets.

### **2.1.1. Calcul de la résistance du corps humain**

Une modélisation simple du corps humain va nous permettre de calculer son impédance pour un trajet main - pied. Nous étudierons ensuite quels sont les différents trajets possibles du courant, c'est-à-dire les différents points de contact envisageables avec des parties actives du réseau électrique de bord. Nous en déduirons l'impédance à prendre en compte pour simuler un cas de choc électrique sévère.

#### **2.1.1.1. Modélisation du corps humain**

"Les différentes parties du corps humain présentent pour le courant électrique une certaine impédance composée d'éléments résistifs et capacitifs" (CEI 479-I [27]).

L'impédance totale du corps humain est définie comme la somme vectorielle de l'impédance interne  $Z_i$  et des impédances de la peau  $Z_p$  :

- "l'impédance interne du corps humain peut être considérée comme principalement résistive. Sa valeur dépend principalement du trajet du courant et, dans une moindre mesure, de la surface de contact",
- "l'impédance de la peau peut être considérée comme un ensemble de résistances et de capacités.[...] (Sa valeur) dépend de la tension, de la fréquence, de la durée du passage du courant, de la surface de contact, de la pression de contact, de l'état d'humidité de la peau et de la température. Pour des tensions de contact jusqu'à 50 V environ, elle varie largement, même pour une personne". Elle devient négligeable lorsque la peau est perforée ou en cas de contact avec un hématome.

L'impédance totale du corps humain ( $Z_t$ ) varie donc dans de larges limites jusqu'à 50 V et est égale à l'impédance interne  $Z_i$  après perforation de la peau.

Nous pouvons de plus définir la résistance initiale du corps humain ( $R_i$ ): au moment du contact, la composante capacitive de l'impédance de la peau est négligeable et la résistance du corps humain est approximativement égale à l'impédance interne  $Z_i$ .

A partir de ces impédances, une étude du CNAM [35] nous donne la modélisation du corps humain suivante (figure n°27) :

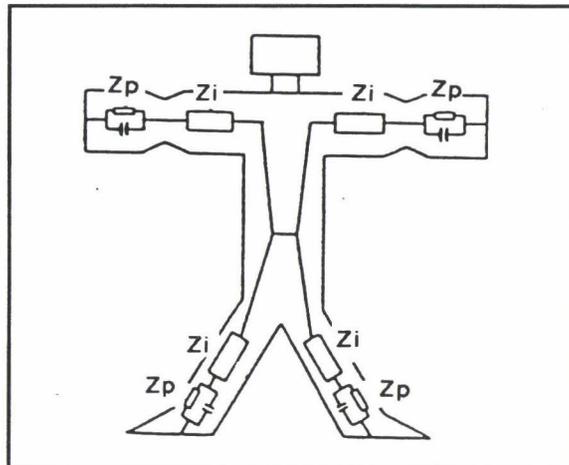


Figure n°27 : modélisation du corps humain

Sous l'hypothèse que la masse de la voiture est au même potentiel que la terre, nous pouvons donc calculer l'impédance totale du corps humain pour différents trajets du courant:

- trajet d'une main à l'autre ou d'une main à un pied:  $Z = 2 \times (Z_p + Z_i)$
- trajet d'une main aux deux pieds:  $Z = \frac{3 \times (Z_p + Z_i)}{2}$
- trajet des deux mains aux deux pieds:  $Z = Z_p + Z_i$
- trajet d'une main au ventre:  $Z = Z_p + Z_i$

Un autre paramètre à prendre en compte pour juger des effets du courant électrique est l'intensité du champ électrique dans le cœur, qui influe directement sur la fibrillation ventriculaire.

Le facteur de courant de cœur  $F$  est défini comme "le rapport de l'intensité du champ électrique dans le cœur pour un trajet donné du courant au champ électrique dans le cœur pour un courant de même intensité suivant le trajet de la main gauche aux pieds" CEI 479-I [27]. Par exemple, pour un trajet de main à main, le facteur de courant de cœur  $F$  est égal à 0,4. Un courant de 200 mA main à main représentera donc le même danger de fibrillation ventriculaire qu'un courant de 80 mA de la main gauche aux pieds.

Afin de prendre en compte ce facteur, nous définirons l'impédance équivalente pour un trajet du courant donné comme le rapport de l'impédance du corps humain sur le facteur  $F$  :

$$Z_{eq} = Z / F$$

Reprenons les exemples précédents et calculons pour chacun d'eux l'impédance équivalente. Les valeurs du facteur de courant de cœur sont indiquées dans la norme CEI 479-I [27]. Elles peuvent être interprétées de la manière suivante, à savoir qu'un courant dont le trajet passe par le cœur sera plus dangereux qu'un courant dont le trajet "évite" le cœur.

- trajet d'une main à l'autre :  $F = 0,4$

$$Z_{eq} = 5 \times (Z_p + Z_i)$$

- trajet de la main gauche aux deux pieds :  $F = 1$

$$Z_{eq} = \frac{3 \times (Z_p + Z_i)}{2}$$

- trajet de la main droite aux deux pieds :  $F = 0,8$

$$Z_{eq} = \frac{15 \times (Z_p + Z_i)}{8}$$

- trajet des deux mains aux deux pieds :  $F = 1$

$$Z_{eq} = Z_p + Z_i$$

- trajet de la main gauche au ventre :  $F = 1,5$

$$Z_{eq} = \frac{2 \times (Z_p + Z_i)}{3}$$

Ces formules nous permettent de calculer l'impédance du corps humain pour différents trajets du courant en fonction de l'impédance du corps pour un trajet main - pied ou main - main [ $2 (Z_p + Z_i)$ ]. Ces trajets représentent les mêmes risques de fibrillation ventriculaire qu'un courant traversant le corps de la main gauche aux deux pieds. Nous constatons, d'ailleurs, que selon les trajets, l'impédance équivalente peut varier entre deux tiers (cas le plus sévère examiné ici) et cinq fois la somme des impédances  $Z_p + Z_i$ .

#### 2.1.1.2. Impédance du corps humain

Pour un trajet de courant main - pied, les données de la norme CEI 479-I [27] nous permettent de tracer les valeurs de l'impédance totale du corps humain (non dépassée par 5% de la population) en fonction de la tension, pour des fréquences de 50, 60 Hz (figure n°28).

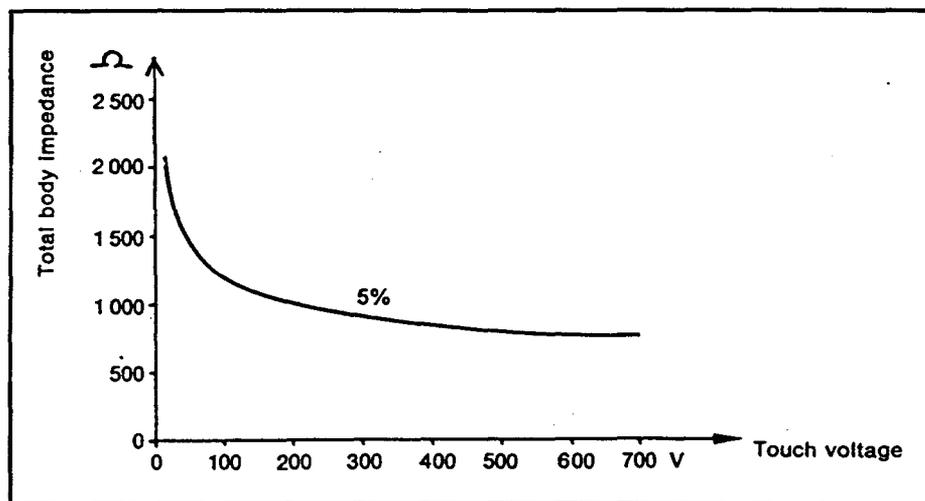


Figure n°28 : valeurs statistiques de l'impédance totale du corps humain valables pour des êtres vivants, un trajet du courant main à main ou main à pied et des tensions de contact jusqu'à 700 V, non dépassée par 5% de la population

Ces valeurs sont données pour des surfaces de contact de 50 à 100 cm<sup>2</sup> dans des conditions sèches. Il est par ailleurs précisé que, dans des conditions mouillées, ces valeurs sont plus faibles de 10 à 25% (car la résistance de la peau diminue). Or, si les réparations sur véhicule peuvent parfaitement s'effectuer dans des conditions mouillées, les surfaces de contact éventuel avec des parties actives du réseau électrique sont, cependant, très inférieures à 50 cm<sup>2</sup> — ce qui a pour effet d'augmenter la résistance du corps humain ([34]).

Nous admettons donc que l'effet des conditions mouillées sur la résistance du corps humain est compensé par les faibles surfaces de contact mises en jeu.

Voyons maintenant quels sont les trajets du courant possibles en cas de contact avec une partie active du circuit électrique sur le véhicule.

Deux types de trajets sont à envisager.

Pour des travaux effectués sous capot, différents trajets du courant électrique dans le corps humain sont à considérer, par exemple :

- d'une main aux deux pieds ou des deux mains aux deux pieds,
- d'une main à l'autre main,
- d'une main au ventre (en cas de contact avec la carrosserie).

Pour les travaux effectués dans l'habitacle, le trajet le plus probable va d'une main à l'autre. Cependant, toute autre partie du corps peut être en contact avec la caisse (genoux, poitrine...). Nous sommes donc amenée à prendre en compte les mêmes trajets du courant que dans le cas précédent.

Les calculs de l'impédance équivalente ont montré que le cas le plus sévère correspondait au parcours main - ventre. A partir des valeurs de l'impédance du corps humain pour un trajet main - pied (non dépassées par 5% de la population), nous calculons l'impédance équivalente pour un trajet main - ventre en fonction de la tension de contact.

Tension de contact (V)	Impédance pour un trajet main - pied ( $\Omega$ )	Impédance équivalente pour un trajet main - ventre ( $\Omega$ )
12	2000	670
25	1750	580
50	1450	480
75	1250	420

**Remarque :** les tensions de sécurité préconisées par certaines normes sont calculées à partir d'une résistance de l'ordre de 1500  $\Omega$ , pour des trajets main - pied dans des conditions sèches. Cette valeur correspond à l'impédance non dépassée par 5% de la population pour une tension de contact de 50 V, selon la norme CEI 479-I [27]. D'autres projets de norme s'appuient sur les valeurs présentées dans le rapport [35] proposant pour des trajets main - pied une impédance de 2000  $\Omega$  dans des conditions sèches ou humides sous 50 V et 875  $\Omega$  dans des conditions mouillées.

Ces valeurs de l'impédance du corps humain se rapportent aux courants alternatifs de 50 à 60 Hz. Si la norme CEI 479-I [27] nous informe que "les valeurs pour des fréquences supérieures et le courant continu sont à l'étude", l'article [34] nous permet de tirer quelques hypothèses sur les valeurs des impédances pour des courants continus. La courbe suivante donne la variation de l'impédance avec la fréquence pour un trajet main - main (égale à un trajet main - pied) sous une tension de 25 V. Ces valeurs correspondent à l'impédance non dépassée par 50% de la population (figure n°29) :

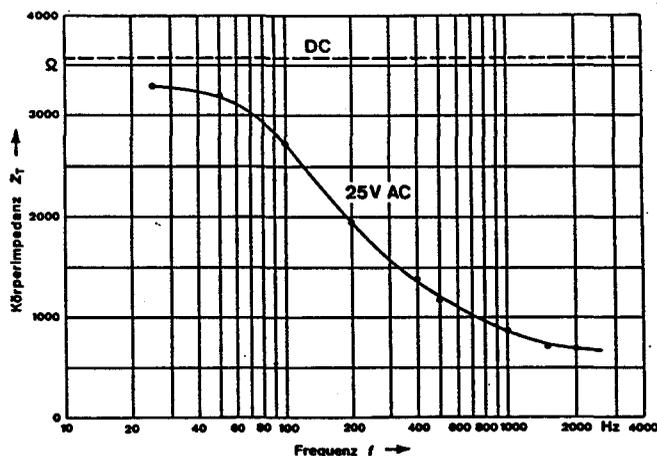


Figure n°29 : variation de l'impédance du corps humain avec la fréquence pour un trajet main-main sous une tension de contact de 25V, non dépassée par 50% de la population

L'impédance est égale à  $3300 \Omega$  à 50 Hz et à  $3600 \Omega$  en continu. Faute de données complémentaires, nous considérerons que la différence entre les valeurs relatives au continu et à l'alternatif 50 Hz sont négligeables (surtout au regard des variations à des fréquences plus élevées).

Pour l'étude du continu, nous nous référerons donc aux impédances équivalentes pour un trajet main - ventre annoncées précédemment.

Pour calculer les courants provoqués par des contacts de courte durée, nous utiliserons la résistance initiale du corps humain. Elle est fixée à  $500 \Omega$  pour un trajet main - main ou main - pied et pour une surface de contact importante ([27]). La résistance de la peau étant dans ce cas négligeable, nous n'avons pas à nous préoccuper des conditions extérieures (sèche ou humide) et nous ferons l'hypothèse que le trajet main - pied pour une surface de contact importante conduit aux mêmes effets qu'un trajet main - ventre pour une petite surface de contact.

**Remarque :** la norme CEI 479-I [27] précise que "Ri dépend principalement du trajet du courant et, dans une moindre mesure, de la surface de contact". Cependant, les calculs précédents nous mèneraient à une résistance équivalente de  $170 \Omega$ . Cette valeur apparaît très faible en comparaison des chiffres donnés dans les normes. C'est pourquoi nous préférons faire l'hypothèse énoncée.

*Nous calculerons donc l'intensité du courant passant dans le corps humain en prenant comme valeur de l'impédance du corps :*

- $500 \Omega$  pour des contacts de courte durée,
- pour l'étude du continu , les valeurs suivantes:

<i>Tension de contact (V)</i>	<i>Impédance équivalente (<math>\Omega</math>)</i>
12	670
25	580
50	480
75	420

*les valeurs des impédances aux tensions intermédiaires étant obtenues par interpolation linéaire.*

L'impédance équivalente va nous permettre de calculer pour différentes tensions de contact les intensités susceptibles de traverser le corps.

Pour notre étude, deux cas sont à considérer : le continu et le transitoire. Nous évoquerons de plus l'influence de la fréquence du courant sur les seuils déterminés.

**Remarque :** vu les niveaux d'impédance considérés, nous pouvons admettre qu'un contact avec une partie sous tension du réseau ne modifie pas les caractéristiques du réseau électrique et en particulier la tension et le débit de l'alternateur et de la batterie.

**2.1.2. Cas des tensions continues**

La publication CEI 479-I [27] définit quatre zones temps/courant selon la gravité des effets physiologiques engendrés pour le passage d'un courant d'une intensité donnée pendant un temps donné, circulant des pieds à la main gauche — courant montant — (figure n°30).

Zones	Effets physiologiques
Zone 1	Habituellement aucune réaction.
Zone 2	Habituellement aucun effet physiologique dangereux.
Zone 3	Habituellement aucun dommage organique. Perturbations réversibles dans la formation et la propagation des impulsions dans le cœur, augmentant avec l'intensité du courant et le temps.
Zone 4	Fibrillation ventriculaire probable. D'autres effets pathophysiologiques, tels que des brûlures graves, sont à prévoir en plus des effets de la zone 3, augmentant avec l'intensité du courant et le temps.

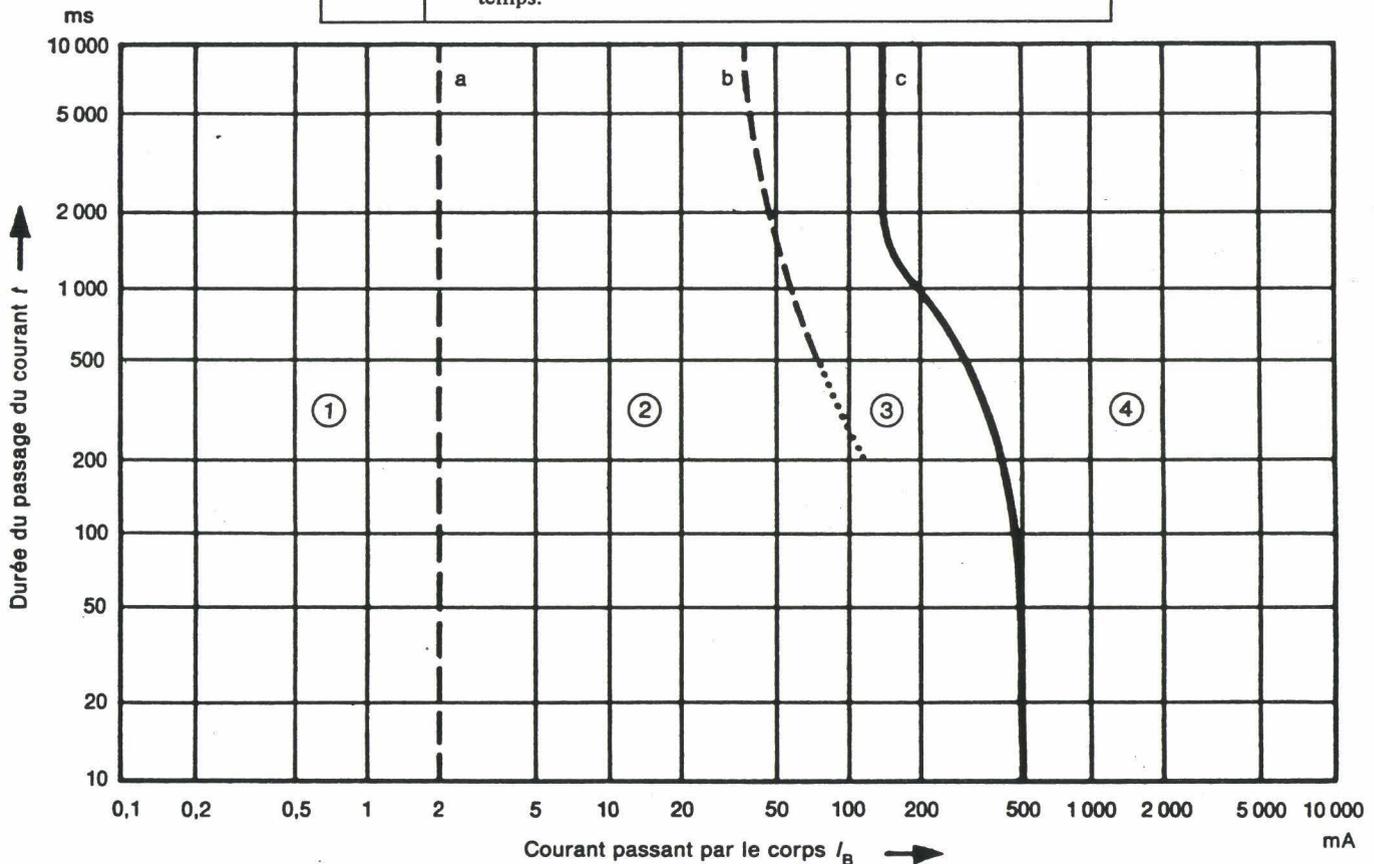


Figure n°30 : zones temps - courant des effets du passage d'un courant continu dans le corps humain circulant des pieds à la main gauche

Un courant de 130 mA délimite les zones 3 et 4 pour des temps de contact supérieurs à la seconde. Si nous interpolons la valeur de la résistance en fonction de la tension de contact, ce courant de 130 mA représente une tension de 60 V (pour une impédance de l'ordre de 460  $\Omega$ ).

Il est clair que la zone 3 ne correspond pas à une zone de grande sécurité. L'article des Techniques de l'Ingénieur [32] la définit comme une zone "dans laquelle un choc est ressenti et ne produit habituellement aucun risque de fibrillation ventriculaire, mais peut produire des effets habituellement réversibles sur le comportement du cœur". Cette zone est donc à considérer comme dangereuse mais non mortelle.

Cependant, nous devons prendre en compte la remarque suivante. La norme CEI 479-1 [27] précise que " le seuil de fibrillation ventriculaire pour un courant descendant est environ deux fois plus grand que pour un courant montant", ce qui nous amène à penser que, d'une manière plus générale, les courants descendants sont deux fois moins dangereux que les courants montants, peu probables sur véhicule. Nous pouvons donc admettre que ces 60 V — préconisés comme tension seuil des domaines des Très Basses Tensions de Sécurité et proches de la tension maximum admissible par la SAE (65 V) [33] — représentent une tension de contact garantissant un niveau de sécurité convenable en cas de contact avec une partie active du réseau de bord.

Néanmoins, le bon sens nous pousse à prendre la courbe *b* comme référence, étant donné que pour des points situés à gauche de cette courbe, aucun effet physiologique dangereux n'est à prévoir. La frontière délimitée par cette courbe est donnée, dans les temps de contact infinis, pour un courant de 35 mA. L'interpolation de l'impédance du corps humain en fonction de la tension de contact permet de calculer une tension correspondante de 21 V (pour une résistance de 600  $\Omega$ ).

Ce niveau de tension peut sembler très bas, d'autant plus que, dans la pratique, le circuit électrique de la plupart des véhicules industriels fonctionne sous 24 / 28 V et qu'aucun texte ne fait état d'accident dû à un choc électrique sur ce type de réseau. Nous avons vu, par ailleurs, que les valeurs de l'impédance du corps humain étaient loin d'être universelles et que l'influence du continu (par rapport à l'alternatif 50Hz) restait à valider. De plus, la remarque précédente sur les courants montants et descendants est encore valable.

Par conséquent, bien que nos calculs aboutissent à une tension seuil de 21 V garantissant un excellent niveau de sécurité, les derniers points évoqués nous incitent à nous joindre aux préconisations proposées dans le projet de norme 301N66E portant sur les niveaux de tension des véhicules électriques [31]. Trois classes de tensions sont ainsi définies :

Classe	Système continu (V)	Système alternatif (15 à 100Hz) Tension efficace (V)
A	$0 < U \leq 30$	$0 < U \leq 12$
B	$30 < U \leq 60$	$12 < U \leq 25$
C	$60 < U \leq 1500$	$25 < U \leq 1000$

Les mesures de protections contre les chocs électriques associées à ces classes sont les suivantes.

En ce qui concerne la protection contre les contacts directs avec des parties actives du circuit, aucune protection particulière n'est nécessaire pour les réseaux de classe A. La protection repose alors sur l'alimentation à Très Basse Tension.

Pour les classes B et C, la protection contre les contacts directs est assurée :

- soit par l'isolation des parties actives, isolation ne pouvant être enlevée que par destruction,
- soit au moyen de barrières ou d'enveloppes, possédant au moins le degré de protection IPxxB (protection contre l'accès avec un doigt) pour la classe B et IPxxD (protection contre l'accès avec un fil) pour la classe C. Des préconisations complémentaires évitent tout risque lors de la suppression de ces barrières ou l'ouverture des enveloppes.

Remarque : nous n'avons pas traité ici le cas des contacts indirects pouvant avoir lieu lors d'un défaut d'isolement du système. Le projet de norme 301N66E [31] mentionne les protections nécessaires pour limiter ce type de contact. Pour les classes A et B, aucune protection particulière n'est requise et pour la classe C, cette protection peut être obtenue par une liaison équipotentielle, si les équipements électriques sont de classe 1 (la protection contre les chocs électriques est assurée par l'isolation principale) ou par l'utilisation d'équipements électriques de classe 2 (la protection ne repose pas seulement sur l'isolation principale mais sur une double isolation ou une isolation renforcée).

Nous retiendrons donc que, pour la classe C, une isolation renforcée ou une double isolation du matériel électrique peut être à prévoir.

Etant donné que nos hypothèses et calculs nous amènent à des résultats plus proches de la norme européenne que des conclusions de la SAE, nous nous en tiendrons aux classes de tension définies dans ce projet de norme.

Nous aboutissons donc au tableau suivant :

Tension nominale	12 V	24 V	36 V	48 V
Classe	A	A	B	B

*Pour des tensions d'alimentation inférieures à 30 V, la protection contre les chocs électriques repose sur l'alimentation à très basse tension de sécurité. Pour des tensions supérieures à 30 V, la*

---

*protection contre les chocs électriques doit être assurée par l'isolation des parties actives au moyen de barrières ou d'enveloppes limitant les risques de contact.*

Cette première conclusion, relative à l'étude des tensions continues et quasiment constantes doit être confirmée par l'analyse des effets des surtensions transitoires. Effectivement, l'augmentation de la tension du réseau de bord peut conduire à des amplitudes transitoires élevées sur des durées non négligeables ou encore à des modes de fonctionnement par défaut avec des tensions continues supérieures à la tension nominale.

### **2.1.3. Etude des risques engendrés par des surtensions**

Une analyse bibliographique préliminaire nous a permis de classer les principales surtensions existant sur le réseau de bord électrique en quatre catégories :

- les surtensions de forte énergie, type "load-dump" (déconnexion accidentelle de la batterie alors qu'elle absorbait un courant important),
- les surtensions d'énergie moyenne, comme les coupures de charge inductive,
- les surtensions de faible énergie (couplage dans le câblage),
- les surtensions de longue durée, provoquées par la panne du régulateur ou le "jump start", démarrage avec une batterie "extérieure" de tension plus élevée.

Nous commencerons par ce dernier phénomène, étant donné qu'il relève, en ce qui concerne la protection contre les chocs électriques, du cas du continu, contrairement aux autres surtensions.

#### 2.1.3.1. Surtensions de "longue" durée

##### *Panne du régulateur*

Lorsque le régulateur ne fonctionne plus, le courant d'excitation est maximal et la tension a tendance à croître en conséquence. Selon le Cahier Technique Batterie de Bosch, "la quantité d'électricité qu'un élément au plomb peut absorber à la charge est limitée ; en conséquence, après un temps de charge déterminé, la limite de saturation est atteinte", ce qui se produit aux alentours de 18 V. La tension maximale est donc dans ce cas fixée par la tension de saturation de la batterie, aux environs de 18 V.

Si on prend comme référence une tension de saturation de 3 V pour chaque élément batterie et si l'on considère qu'une batterie de 24 V est constituée de 12 éléments et qu'une batterie de 48 V est constituée de 24 éléments, nous obtenons les résultats suivants :

Tension batterie (V)	12	24	36	48
Amplitude (V)	18	36	54	72
Durée	continue			

#### *Démarrage avec une batterie annexe de tension supérieure*

Lors du démarrage avec une batterie "extérieure", l'amplitude de la surtension dépend de la tension de la ou des batteries annexes. Une des possibilités pour recharger la batterie consiste effectivement à la connecter en parallèle à deux batteries 12 V en série. La durée de la surtension, fonction du temps du dépannage, est fixée par le cahier des charges [22] à une minute.

Tension batterie (V)	12	24	36	48
Amplitude (V)	24	48	72	96
Durée	1'			

**Remarque :** une erreur de manipulation provoquant une inversion de polarité n'est pas à exclure. Prémunir le matériel électrique des conséquences préjudiciables d'une telle erreur pourrait coûter fort cher alors que ce type de surtensions est rare. Il peut donc s'avérer nécessaire de différencier les bornes positives et négatives des batteries et faire en sorte qu'il soit impossible de connecter deux pôles opposés de deux batteries.

Par leur durée, ces surtensions sont à ramener aux cas des tensions continues en ce qui concerne la protection contre les chocs électriques. Les classes de protection définies dans le projet de norme CEN N66E [31] sont donc applicables. Nous avons vu lors de l'étude du continu que la tension maximum qui garantissait un bon niveau de sécurité était d'environ 30V. Au delà, tout contact avec une partie active du circuit n'est pas sans risque.

Pour résumer, notons dans un tableau les classes de tension auxquelles doivent appartenir les réseaux selon que nous considérons ou non les surtensions.

Réseaux	12V	24V	36V	48V
Niveau de tension batterie	A	A	B	B
Prise en compte d'une panne de régulateur	A	B	B	C
Prise en compte du jump-start	A	B	C	C

Il nous faut garder à l'esprit que tout changement de classe engendre des coûts supplémentaires.

En ce qui concerne les risques liés au jump-start, ils peuvent être facilement évités en interdisant une telle manipulation (câbles inadaptés par exemple).

Les surtensions engendrées par une panne du régulateur pourraient être limitées en ajoutant un dispositif de sécurité réduisant ou coupant le courant d'excitation lorsque la tension sur le réseau dépasse une valeur seuil ; ou encore un dispositif du même genre ne s'enclenchant qu'à l'ouverture du capot.

Ces systèmes permettraient de considérer les réseaux 24V comme des réseaux de classe A et donc de s'affranchir de protections particulières certainement plus coûteuses. Les réseaux 36 V et 48V relèveraient alors de la classe B.

*Comme il semble, a priori, possible de concevoir des systèmes ou des pièces interdisant le jump-start et limitant l'amplitude des surtensions engendrées par une panne du régulateur, nous pouvons considérer que les surtensions de "longue" durée ne modifient pas la classe des réseaux.*

Remarque : aujourd'hui, la tension sur le réseau de bord des véhicules industriels peut atteindre 32V en continu en cas de panne du régulateur (technologie des batteries différentes). Or jusqu'à ce jour, aucun accident dû à un contact électrique malheureux n'a été mentionné.

Il nous reste maintenant à voir l'influence des surtensions transitoires.

#### 2.1.3.2. Surtensions transitoires

Nous nous attacherons à l'étude de trois types de surtensions définies dans la norme [21] :

- les surtensions de type "load-dump" correspondant à une déconnexion accidentelle de la batterie,
- les surtensions provoquées par les coupures de charge inductive,
- les perturbations dans le câblage, engendrées par les coupures de charge inductive ou par la commutation répétée d'un interrupteur (rebonds à la fermeture des contacts).

#### *Coupures de charge inductive*

Prenons l'exemple d'un contact aux bornes d'une bobine connectée au réseau par un relais et cherchons à quantifier l'amplitude et la durée de la surtension.

Lorsque le relais s'ouvre, un arc peut se former dans certaines conditions. Les pièces de contact s'écartent progressivement l'une de l'autre, la résistance de contact augmente et l'échauffement qui en résulte provoque l'amorçage de l'arc. Le rapport du LCIE (Laboratoire Central des Industries Electriques) [26] détaille le mécanisme de la formation de l'arc.

" La configuration initiale est celle d'un contact en position fermée sous l'effet d'une force de contact développée par le dispositif de commande ; ce contact est traversé par le courant nominal. A partir de l'ordre d'ouverture de ce contact, les pièces de contact vont progressivement se séparer jusqu'à atteindre la distance d'ouverture prédéterminée. Avant la séparation effective des pièces de contact, il y a diminution de la force qui les maintenait appliquées ; en conséquence, l'aire de contact réelle se réduit, peu à peu, engendrant une augmentation de la densité de courant. Il en

résulte une augmentation de la température des zones de jonction des deux pièces de contact. Le volume de ces zones diminue corrélativement avec la réduction de la force de contact."

Envisageons le schéma simplifié suivant :

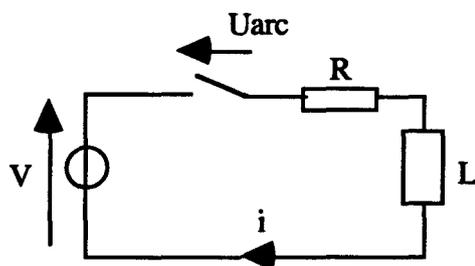


Figure n°31 : phénomène d'arc - schéma simplifié

Nous pouvons écrire :

$$L \frac{di}{dt} + R i = V - U_{arc}$$

L'équation précédente fait clairement apparaître la condition d'extinction de l'arc :

$$U_{arc} > V$$

Sous l'hypothèse que la tension d'arc atteint une valeur constante  $U_a$  quand le contact est ouvert et que le temps d'ouverture des contacts est négligeable devant la constante de temps  $\tau$  du circuit, nous pouvons écrire :

$$L \frac{di}{dt} + R i = V - U_a$$

soit

$$i = \frac{V}{R} - \frac{U_a}{R} [1 - \exp(-\frac{t}{\tau})] \quad \tau = \frac{L}{R}$$

Si nous admettons que l'influence du courant minimum d'entretien de l'arc (dépendant des matériaux et de l'ordre de l'ampère) est négligeable devant  $V/R$ , l'arc s'éteint lorsque  $i$  devient quasiment nul. La durée d'arc est donnée par :

$$t_a = \tau \ln \left( \frac{U_a}{U_a - V} \right)$$

L'amplitude  $U_a$  de l'arc dépend entre autres des matériaux employés, de la forme des contacts et de leur espacement. La durée de la surtension dépend des caractéristiques résistives ou inductives du circuit.

Les surtensions aux bornes de la bobine seront donc fonction des caractéristiques de l'arc — en particulier des matériaux employés et de la forme des contacts — et du temps d'ouverture des contacts ( $\frac{di}{dt}$ ).

D'après l'expérience des véhicules industriels, qui confirme l'étude du LCIE [26], le compromis "qualité de la coupure / coût" n'est pas optimum pour les mêmes matériaux en 12, 24, 36 ou 48V. De même, pour des contacts de nature identique, la distance inter-électrode doit être plus élevée pour de fortes tensions. Par conséquent, il semble délicat d'établir un parallèle entre l'amplitude et la durée de cette surtension en 12, 24, 36 ou 48V.

Revenons aux conclusions du paragraphe précédent. Les classes des réseaux étaient les suivantes :

	12V	24V	36V	48V
Classe	A	A	B	B

L'objet du présent paragraphe était d'étudier si la prise en compte des surtensions transitoires modifiait ou non la répartition de ces classes.

D'après ce que nous venons de voir, il ne nous sera pas facile d'aller plus loin pour les réseaux 36V et 48V. Cependant, la classe B, à laquelle appartiennent ces réseaux, protège contre les contacts directs. En ce qui concerne le 24V, nous pouvons nous appuyer sur les caractéristiques des surtensions se produisant sur les véhicules industriels. Vous me direz qu'il serait fort étonnant que les calculs prouvent que certains contacts directs sur ce réseau soient mortels, aucun antécédent n'étant connu à ce jour. L'exercice nous permettra néanmoins de proposer une méthode pour estimer la sécurité contre les chocs électriques pour des surtensions transitoires et d'apprécier les marges de sécurité que laisse le 24V.

Le cahier des charges [23] donne, pour une déconnexion de l'alimentation des charges inductives, les caractéristiques suivantes (figure n°32) :

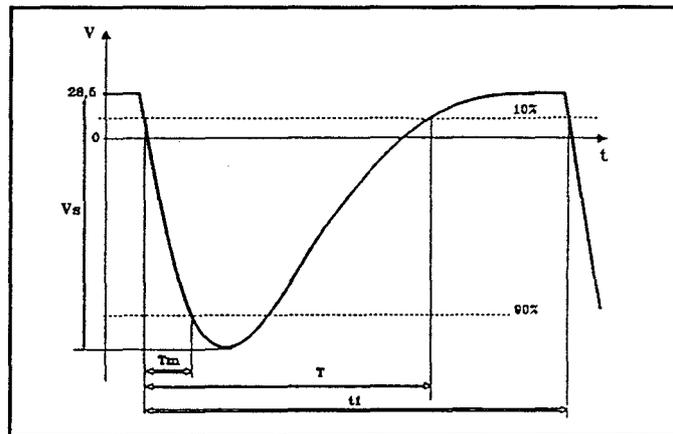


Figure n°32 : signal reproduisant l'évolution de la tension lors d'une déconnexion de l'alimentation d'une charge inductive

$$V_s = -1100 \text{ V} ; T_m = 3 \mu\text{s} ; T = 1 \text{ ms} ; t_1 = 5 \text{ s}$$

L'allure de cette surtension est à rapprocher de celle des décharges de type condensateur définie dans la norme CEI 479-II [27]. Cette norme indique les probabilités de risques de fibrillation ventriculaire due au courant traversant le corps humain et, comme pour la courbe relative au courant continu, définit les différentes zones "durée d'impulsion / courant efficace".

Pour déterminer le courant efficace, nous procéderons de la manière suivante. La norme définit l'énergie spécifique de fibrillation  $F_e$  (en  $A^2s$  ou  $J/\Omega$ ) comme " la valeur minimale  $I^2t$  de l'impulsion de courte durée qui, dans des conditions données (trajet du courant, phase cardiaque) provoque avec une certaine probabilité de fibrillation ventriculaire".

$$F_e = \int_0^{t_1} i^2 dt$$

Soit  $I_c$ , la valeur crête du courant engendré par l'impulsion,  $R_i$ , la résistance initiale du corps humain et  $U_c$ , la tension de contact, nous pouvons écrire :

$$I_c = \frac{U_c}{R_i}$$

Si nous assimilons l'impulsion à une exponentielle décroissante de constante de temps  $\tau$ , nous obtenons :

$$F_e = \int_0^{\infty} (I_c \exp(-\frac{t}{\tau}))^2 dt = I_c^2 \frac{\tau}{2}$$

L'impulsion rectangulaire équivalente ayant la même énergie spécifique de fibrillation et la même durée de choc ( $3\tau$ ) aura un courant  $I_{eff}$  déterminé par :

$$Fe = I_{eff}^2 \times 3\tau = I_c^2 \times \frac{\tau}{2}$$

soit

$$I_{eff} = \frac{I_c}{\sqrt{6}} = \frac{U_c}{R_i \sqrt{6}}$$

Cette équation nous permet donc de convertir les tensions de contact en courants traversant le corps humain.

**Remarque :** la tension caractérisée ici est négative. Pour les surtensions de durée inférieure à 10 ms, le chapitre 6 de la norme CEI 479-II [27] — traitant des effets des courants d'impulsion unique de courte durée — ne fait pas mention de l'influence du sens de passage du courant.

Nous pouvons donc définir, à partir des courbes de la norme CEI 479-II [27] les zones de sécurité suivantes (figure n°33) :

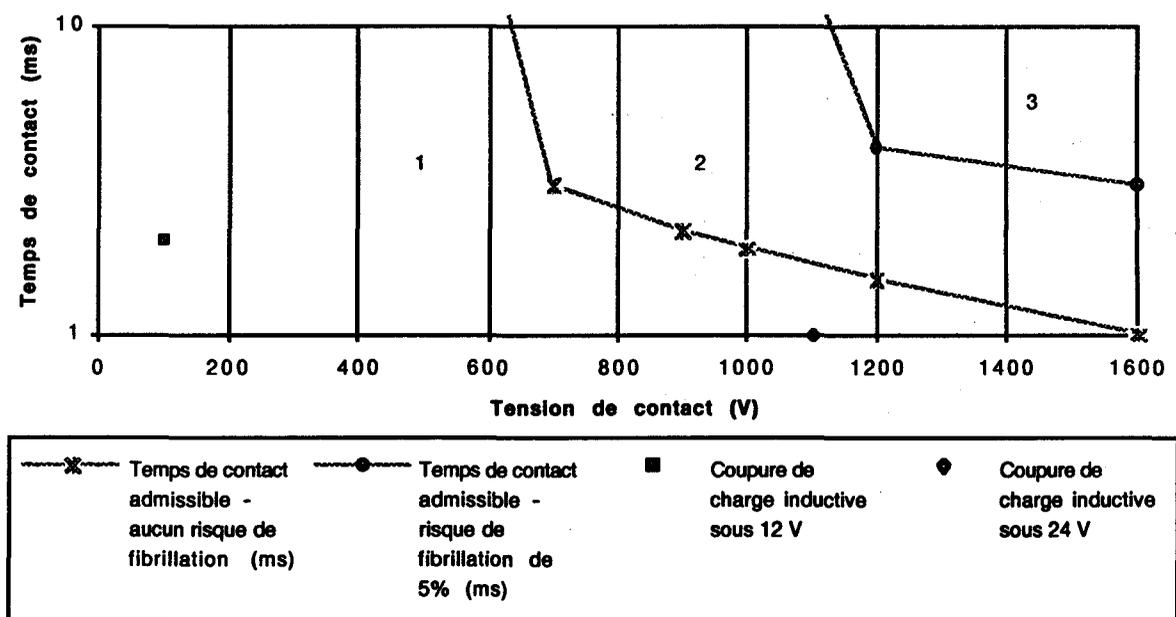


Figure n°33 : zones temps - tension des effets du passage d'un courant de courte durée dans le corps humain circulant entre la main gauche et les pieds

- zone 1 : habituellement aucun dommage organique,
- zone 2 : probabilité de fibrillation ventriculaire augmentant jusqu'à 5%,
- zone 3 : probabilité de fibrillation ventriculaire supérieure à 5%.

Nous pouvons y reporter les caractéristiques de la surtension étudiée (durée : 1 ms et amplitude : 1100V).

Ce point appartenant à la première zone, cette surtension ne représente pas de risques en cas de contact avec la partie active du circuit concernée, ce dont nous ne doutions pas. Cependant, la marge de sécurité est moins grande qu'en 12V où la norme [21] donne pour caractéristique une durée de 2 ms et une amplitude de 100V. Ce qui signifie, non pas que quelques surtensions en 24V pourraient s'avérer dangereuses, puisque le cahier des charges est censé définir les cas les plus sévères ; mais que pour des réseaux 36 ou 48V, certaines caractéristiques présentent de fort risques de passer outre les frontières de la zone de sécurité.

*Si l'étude des risques engendrés par des surtensions liées à une coupure de charge inductive sur un réseau 24V est tout à fait rassurante, elle montre tout de même que la marge de sécurité est moindre qu'en 12V. Elle confirme ainsi la nécessité d'équiper les réseaux 36 et 48V de protections particulières, de telle manière qu'ils relèvent de la classe B.*

#### *Perturbations dans le câblage*

Nous mènerons un raisonnement analogue pour le cas des perturbations dans le câblage.

Effectivement, nous pouvons ici distinguer trois catégories :

- les perturbations liées à la coupure d'une charge inductive,
- les perturbations liées à la commutation répétée d'un interrupteur,
- les perturbations résultant des couplages dans le câblage.

Les deux premières dépendent, comme précédemment, des caractéristiques des arcs engendrés lors de la commutation des interrupteurs.

Les phénomènes de couplage sont fonction des caractéristiques des câbles, de leur distance avec la masse et de leur proximité avec d'autres câbles. Le rapport de stage [25] montre que les inductances et les résistances du câblage augmentent avec la tension d'alimentation du réseau alors que les capacités diminuent. Toutefois, excepté celle de la résistance, ces variations ne sont pas proportionnelles au facteur d'élévation de tension. De plus, il est à noter que les effets du niveau de tension sur la corrosion de la connectique, aujourd'hui peu connus, pourraient modifier les caractéristiques des câbles (résistance et inductance) et donc l'amplitude et la durée de ces perturbations.

Enfin, ces perturbations sont de fréquence élevée. La norme ISO 7637 [21] fixe la fréquence d'une onde simulant les transitoires résultants d'un processus de commutation à 10 kHz. Or les zones temps/courant des effets du courant alternatif sont valables pour des fréquences variant de 15 à 100 Hz. Un des chapitres de la norme CEI 479-II traite spécifiquement des fréquences supérieures à 100 Hz. Il définit le facteur de fréquence  $F_e$  comme le "rapport du seuil (de fibrillation ventriculaire) à la fréquence  $f$  au seuil à la fréquence de 50/60 Hz".

En ce qui concerne le seuil de fibrillation ventriculaire pour une durée de choc supérieure à celle du cycle cardiaque (800 ms), des fréquences inférieures à 1000 Hz et des courants longitudinaux, le facteur de fréquence est indiqué sur la figure n°34 :

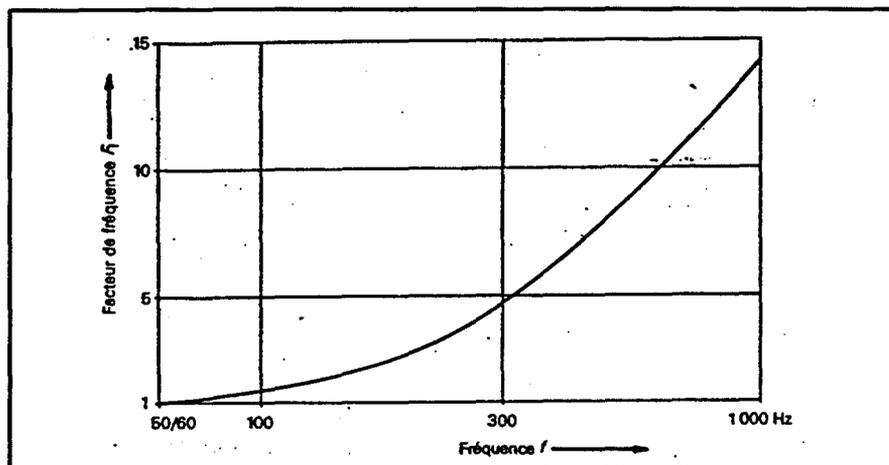


Figure n°34 : variation du seuil de fibrillation ventriculaire pour les fréquences comprises entre 50/60 Hz et 100 Hz, des durées de chocs supérieures à celle d'un cycle cardiaque et des trajets du courant longitudinaux à travers le tronc du corps

Par exemple, le seuil de fibrillation pour un courant de 300 Hz sera cinq fois plus élevé que pour un courant de 50 Hz.

Il est à noter que " pour des durées de choc inférieures à celle du cycle cardiaque (800 ms), aucune valeur expérimentale n'est disponible". De même, pour des fréquences supérieures à 1000 Hz, le seuil de fibrillation est à l'étude. Nous ne pouvons donc pas conclure sur ce type de transitoire.

*L'influence des très fortes fréquences sur la gravité des effets n'étant pas déterminée à ce jour, il nous est difficile de nous prononcer quant aux perturbations liées aux problèmes de couplage dans le câblage.*

**Remarque :** il est connu que toute installation électrique génère un champ électrique et un champ magnétique induisant des courants de circulation dans un corps humain proche de l'installation. Le débat est aujourd'hui ouvert sur les éventuels effets biologiques que pourraient entraîner ces champs internes. Nous n'avons pas cherché à étudier quels étaient les champs internes mis en jeu dans le cas de l'automobile et l'incidence d'une éventuelle élévation de tension sur leurs caractéristiques. Cependant, pour plus d'informations, on pourra se reporter à l'article paru dans IEEE Spectrum [38] et aux études EDF [36] et [37].

### *Load-dump*

Comme nous l'avons expliqué en introduction, le load-dump correspond à une déconnexion accidentelle de la batterie, lorsque le moteur tourne. Ce transitoire peut s'avérer particulièrement sévère lorsque la batterie absorbait, avant la rupture, un courant important. Son déroulement est décrit dans la note [24]. A la rupture du contact, le courant alternateur tend à devenir soudainement très faible. La tension alternateur augmente donc vers la force électromotrice  $E$ , qui dépend de la vitesse et du courant d'excitation alternateur. La valeur de la force électromotrice est fonction de la vitesse de rotation de l'alternateur et du courant d'excitation. Lorsque le régulateur se bloque, le courant d'excitation décroît exponentiellement, induisant la diminution de la force électromotrice et de la tension alternateur.

Aujourd'hui, pour protéger les composants électriques contre ce type de surtensions, le pont redresseur est équipé de diodes Zener. Ces diodes permettent de limiter l'amplitude du transitoire à 40V (au lieu d'une centaine de volts avec un pont redresseur classique). L'efficacité de ces diodes Zener n'étant plus à prouver en 12V, nous ferons l'hypothèse que leur utilisation sera de mise en 24, 36 ou 48V. D'ailleurs, si les ponts redresseurs des véhicules industriels n'en sont pas encore équipés, la future gamme d'alternateurs le sera certainement.

En ce qui concerne la protection contre les chocs électriques, nous ne traiterons pas le cas des réseaux 36 et 48V, puisque la classe B dont ils relèvent interdit tout contact dangereux. Nous étudierons en revanche celui des réseaux 24V.

L'amplitude de la surtension dépend de la tension d'avalanche des diodes écrêteuses, tandis que sa durée est fonction des caractéristiques de l'alternateur. La constante de temps de la décroissance du courant d'excitation dépend principalement de l'inductance et de la résistance de la bobine d'excitation, le circuit d'excitation étant fermé sur une diode de roue libre. Nous verrons par la suite que ces données ne sont pas modifiées par l'élévation de la tension et nous admettons que la durée du transitoire évolue peu avec le niveau de tension considéré.

Une présentation de SGS Thomson - Microelectronics à une réunion Prometheus propose une tension d'avalanche des diodes de 60V pour un réseau 24V.

Nous retiendrons donc les valeurs suivantes pour les load-dump en 24V à comparer aux valeurs 12V préconisées dans le cahier des charges [22].

	Ecrêtage	Durée
12 V	40 V	400 ms
24 V	60 V	400 ms

Revenons à la forme d'onde engendrée par cette surtension. Le rapport [24] permet d'en définir les principales caractéristiques, présentées figure n°35.

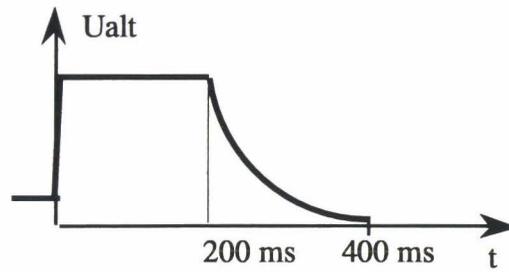


Figure n°35 : forme d'onde engendrée sur le réseau électrique par une surtension de type load-dump

Nous pouvons donc, en procédant de la même manière que précédemment, calculer le courant efficace correspondant :

$$I_{\text{eff}} = \frac{V_{\text{max}}}{R_i} \sqrt{\frac{7}{12}}$$

sous l'hypothèse que la durée où la tension est constante est égale à celle de la décroissance exponentielle ([24]). Nous obtenons ainsi les résultats suivants :

	Ecrêtage	Durée	Courant efficace
12 V	40 V	400 ms	60 mA
24 V	60 V	400 ms	90 mA

La durée de la surtension étant supérieure à 10 ms, la norme CEI 479-II [27] nous invite à nous référer aux zones temps / courant des effets du courant alternatif de 1 à 100 Hz, représentées sur la figure n°36.

Zones	Effets physiologiques
Zone 1	Habituellement aucune réaction.
Zone 2	Habituellement aucun effet physiologique dangereux.
Zone 3	Habituellement aucun dommage organique. Probabilité de contractions musculaires et de difficultés de respiration, de perturbations réversibles dans la formation et la propagation des impulsions dans le cœur, y compris la fibrillation auriculaire et des arrêts temporaires du cœur sans fibrillation ventriculaire, augmentant avec l'intensité du courant et le temps.
Zone 4	En plus des effets de la zone 3, probabilité de la fibrillation ventriculaire augmentant jusqu'à environ 5% (courbe $c_2$ ), jusqu'à environ 50% (courbe $c_3$ ) et plus de 50% au-delà de la courbe $c_3$ . Augmentant avec l'intensité et le temps, des effets pathophysiologiques tels qu'arrêt du cœur, arrêt de la respiration, brûlures graves peuvent se produire.

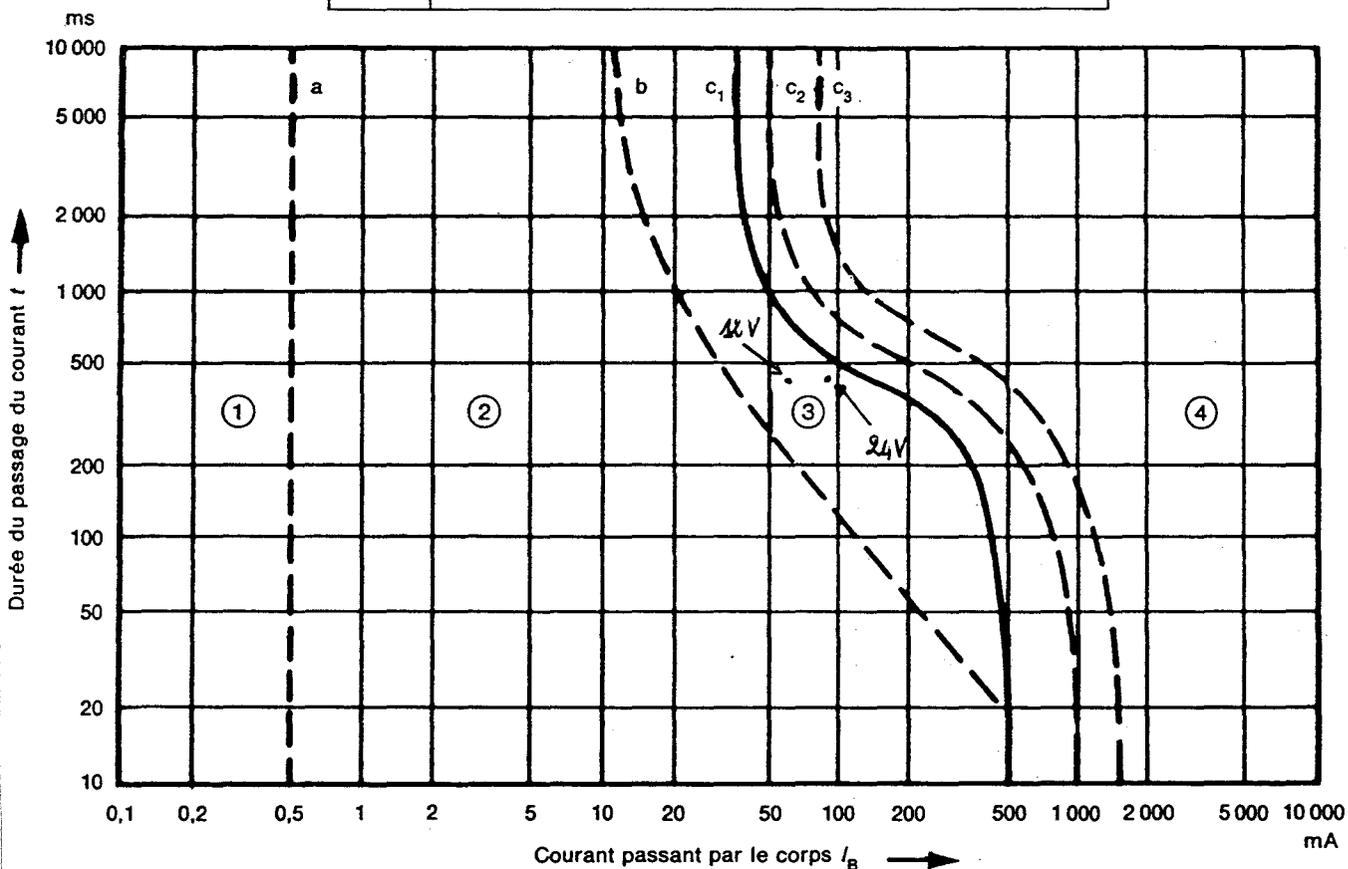


Figure n°36 : zones temps - courant des effets d'un courant alternatif de 15 à 100 Hz circulant de la main gauche aux pieds

Les points représentatifs de ces surtensions sont placés en zone 3, que nous avons qualifiée de dangereuse mais non mortelle. Ce qui signifie qu'en 24V, comme en 12V, ce type de surtension n'est pas sans risque en cas de contact avec une partie active du circuit électrique. Cependant aujourd'hui aucune protection n'est envisagée pour parer à ce danger et aucun incident n'a été signalé. Les deux points en 12 V et en 24 V étant très proches l'un de l'autre sur la figure ci-dessus, nous pouvons penser qu'il en serait de même en 24V. D'autant plus, qu'actuellement, aucune diode Zener ne limite ce type de surtension sur les véhicules industriels ; or, là non plus, aucun incident particulier n'est mentionné.

---

*Si l'étude théorique des risques encourus lors d'une surtension de type load-dump montre qu'une telle surtension n'est pas sans danger lors d'un contact avec une partie active d'un réseau 12V ou 24V, l'expérience automobile, tant en 12V qu'en 24V tend à prouver le contraire.*

Cette dernière analyse fait apparaître clairement les limites de cette étude théorique sur la sécurité électrique. L'étude du continu semblait déjà porter aux mêmes conclusions quant à la "fragilité" de nos résultats, étant donné que nos calculs aboutissent à une valeur seuil de 21 V alors que l'expérience des véhicules industriels incite à repousser cette valeur au delà de 28 V. Si la complexité du calcul de l'impédance du corps humain est pour une grande part à l'origine de ces divergences, le rapport [27] nous invite, dès l'introduction, à prendre en compte des paramètres tout aussi délicats à établir, "tels que la probabilité de défauts, la probabilité de contact avec des parties actives ou avec des parties en défaut, le rapport entre la tension de contact et la tension de défaut, l'expérience acquise, les possibilités techniques et économiques. Ces paramètres doivent être soigneusement pris en considération en établissant des prescriptions de sécurité, par exemple les caractéristiques de fonctionnement des dispositifs de protection dans les installations électriques."

*La première étape de l'étude de l'élévation de la tension du réseau de bord électrique consiste à définir le niveau de tension maximal qui pourrait être envisagé.*

*Qui dit "réseau électrique", dit risques de chocs électriques en cas de contact avec une partie active du circuit. Il est donc essentiel que le seuil de tension choisi garantisse un excellent niveau de sécurité à tous ceux qui effectuent des réparations sur véhicule. Notre intérêt est d'assurer cette sécurité à moindre coût, c'est-à-dire de limiter le nombre et la complexité des éventuelles protections à ajouter sur le réseau de bord, le mieux restant de s'en affranchir en totalité.*

*Les normes concernant les installations électriques industrielles définissent un domaine de tensions inférieures à 60 V pour lequel aucune protection contre les contacts directs n'est obligatoire. Toutefois, ces normes sont difficilement applicables au cas de l'automobile et nous avons donc approfondi cette analyse par l'étude de la gravité des effets engendrés par le passage du courant dans le corps humain après contact avec des parties sous tension du véhicule.*

*Nous avons commencé par estimer les impédances du corps humain pour des cas de contacts sévères. Les zones temps/courant des effets du courant, définies dans la norme CEI 479-I [27], nous permettent alors de déterminer la tension maximale garantissant un bon niveau de sécurité sans aucun dispositif de protection particulier.*

*L'étude des tensions continues montre que pour des niveaux supérieurs à 30 V, il est nécessaire de protéger l'accès des parties sous tension du réseau. L'étude des surtensions, reposant sur une confrontation des raisonnements théoriques et de l'expérience automobile en 12 et 24 V confirme ces résultats.*

*Sur les réseaux électriques de bord en 12 ou 24 V, aucune protection particulière contre les contacts avec des parties sous tension du circuit n'est obligatoire. En revanche, des isolations ou des obstacles sont nécessaires en 36 V et 48 V.*

*Par conséquent, pour justifier l'intérêt des niveaux de tension 36 et 48 V, le surcoût engendré par ces dispositifs de protections supplémentaires devra être compensé par des gains au moins équivalents par ailleurs. Ces gains peuvent concerner aussi bien le rendement des générateurs d'énergie et des récepteurs que leur masse, leur encombrement ou encore leur durée de vie et leur coût...*

*Nous allons donc étudier l'incidence de l'élévation de la tension du réseau de bord sur les différents organes et tenter d'évaluer pour chaque niveau de tension le rapport gains/coût qui nous permettra de juger de la pertinence d'un tel changement de tension.*

## **2.2. Influence de l'élévation de la tension sur les accessoires électriques**

Comme nous l'expliquions en introduction, l'élévation de la tension du réseau de bord est une réponse radicale à l'augmentation de la puissance électrique.

Effectivement, un courant de 150 A, soit l'équivalent de 2 kW, est proche de l'intensité maximum que peut débiter l'alternateur dans sa technologie actuelle. L'élévation de la tension, en ce qu'elle permet de diminuer le courant et donc de s'affranchir des problèmes de ventilation, autoriserait l'alternateur à produire plus d'énergie : la puissance critique passerait de 2 kW en 12 V à 4 kW en 24 V et 6 kW en 36 V.

Cependant, l'entreprise d'un changement de tension est de taille, la technologie de la plupart des organes électriques étant à revoir. Effectivement, supposons que la tension soit multipliée par  $k$ . La puissance de fonctionnement de la plupart des systèmes électriques restant constante, nous pouvons déjà prévoir que, d'une manière générale :

- les courants seront divisés par  $k$ ,
- les résistances des récepteurs devront être multipliées par  $k^2$  ( $P = R \cdot I^2$ ),
- la section des fils des bobinages des moteurs sera divisée par  $k$ , étant donné qu'un plus faible courant  $y$  circule et le nombre de spires multiplié par  $k$ .

Par conséquent, chaque charge électrique devra être redimensionnée, ce qui ne sera pas sans conséquence sur le coût total du système.

Une des difficultés majeures de l'élévation de tension réside surtout dans la rigidité de l'outil industriel. Nous verrons que le passage à un niveau de tension supérieur nécessiterait effectivement des changements dans les méthodes de fabrication, se répercutant inévitablement sur le coût des pièces et sur le prix du véhicule. Or le client ne se laissera sûrement pas facilement convaincre de l'utilité d'un système qui ne lui apporte aucune prestation supplémentaire.

Par conséquent, le défi se pose en ces termes : étant donné que l'élévation de la tension du réseau de bord n'est pas la seule alternative pour satisfaire les besoins en puissance électrique, cette solution ne présentera d'intérêt que si le passage à une tension supérieure s'effectue à coût constant, à moins qu'elle n'induisse des gains compensateurs.

Il s'agit donc maintenant de mesurer les intérêts auxiliaires que pourrait amener un passage à une tension supérieure, en particulier d'éventuels gains en rendement, permettant de diminuer la part du réseau dans la consommation en carburant ou encore des gains sur la masse et l'encombrement des systèmes électriques, le  $\text{cm}^2$  sous le capot valant très cher et le poids entrant

aussi en jeu dans la consommation. Or, quelques exemples prouvent combien les incidences de la tension sur les organes électriques sont contrastées :

- la diminution du courant entraîne celle du poids et du volume des câbles ; néanmoins, la résistance mécanique des fils impose une section minimale,
- les pertes par conduction dans les interrupteurs électroniques, comme les diodes du pont redresseur seraient limitées et le rendement de l'alternateur accru. Cependant, comme nous l'avons vu, l'amplitude plus élevée des surtensions nécessiterait des dispositifs de protection supplémentaires sur certains niveaux de tension,
- des produits nouveaux pourraient être développés, comme le dégivrage de la lunette arrière par une mince couche résistive déposée sur le vitrage. Une tension très élevée (de l'ordre de 50 V) serait nécessaire au bon fonctionnement de ce dispositif. Toutefois, des récepteurs classiques, comme les feux, verraient leur durée de vie restreinte sous une telle tension.

L'étude de l'influence d'une élévation de la tension doit donc être menée au cas par cas, tous les avantages et les inconvénients étant résumés dans un bilan final qui permettra de conclure sur l'intérêt du passage à une tension supérieure.

### 2.2.1. Batterie

La batterie est l'un des deux éléments générateurs d'énergie sur le réseau électrique de bord et à ce titre un organe essentiel du circuit. Autrement dit, le développement d'un réseau de tension supérieure passe nécessairement par celui de la batterie correspondante. Si, à première vue, le moyen le plus simple pour réaliser une batterie de 24, 36 ou 48 V consiste à mettre en série des blocs traditionnels de 12 V, des batteries de nouvelle technologie, dont la fiabilité reste encore à éprouver, pourraient s'avérer plus adaptées.

Revenons sur la conception actuelle des batteries.

La batterie 12 V est constituée de six cellules de 2 V montées en série, chaque cellule comportant un certain nombre de plaques. La capacité nominale de la batterie (en ampère x heure) est fonction, entre autres, du nombre et de la taille des plaques. Si nous raisonnons à énergie constante, nous pouvons écrire :

$$E = C \cdot V = C_0 \cdot V_0$$

La capacité est donc inversement proportionnelle au niveau de tension.

**Remarque :** raisonner à énergie ou puissance constante permet de simplifier les calculs. Cependant, il faut garder à l'esprit que l'objectif de l'élévation de la tension du réseau est de satisfaire une demande électrique croissante. Par conséquent, la réserve énergétique de la batterie sera certainement supérieure à sa valeur actuelle en cas de changement de tension et sa capacité plus élevée.

Deux solutions peuvent être envisagées pour réduire la capacité de la batterie : réduire la taille des plaques en conservant leur nombre ou, inversement, réduire le nombre des plaques en conservant leur taille. La première solution est, d'après les constructeurs de batteries, la plus intéressante, bien que les contraintes de montage et de robustesse conduisent à une capacité minimale d'une dizaine d'ampères heures, quelle que soit la tension [53].

Le poids de la batterie sera, dans tous les cas, plus élevé ainsi que son volume. L'augmentation du nombre de plaques et de connexions, des dimensions du bac et de la complexité du montage ne jouent pas en faveur d'une réduction des coûts. L'équipementier CEAC donne les évaluations suivantes pour une batterie classique (plomb, calcium, antimoine) de 60 Ah, 400 A [53]:

Tension (V)	Capacité (Ah)	Masse relative	Volume relatif	Coût relatif
12	60	1 (17,1 kg)	1 (8,05l)	1
24	30	1,05	1,08	1,21
48	15	1,12	1,34	1,54

La batterie, dans sa technologie actuelle, est donc peu favorable à l'élévation de la tension du réseau de bord, d'autant plus que l'accroissement du nombre de connexions pourrait poser des problèmes de fiabilité.

Les batteries de nouvelles technologies pourraient permettre de franchir plus aisément le cap de l'élévation de tension, à l'exemple des batteries Pulsar.

De même composition chimique, ces batteries sont constituées de plaques sur lesquelles sont assemblés consécutivement des panneaux positifs et négatifs, séparés selon les cas par une barrette en plastique ou conductrice.

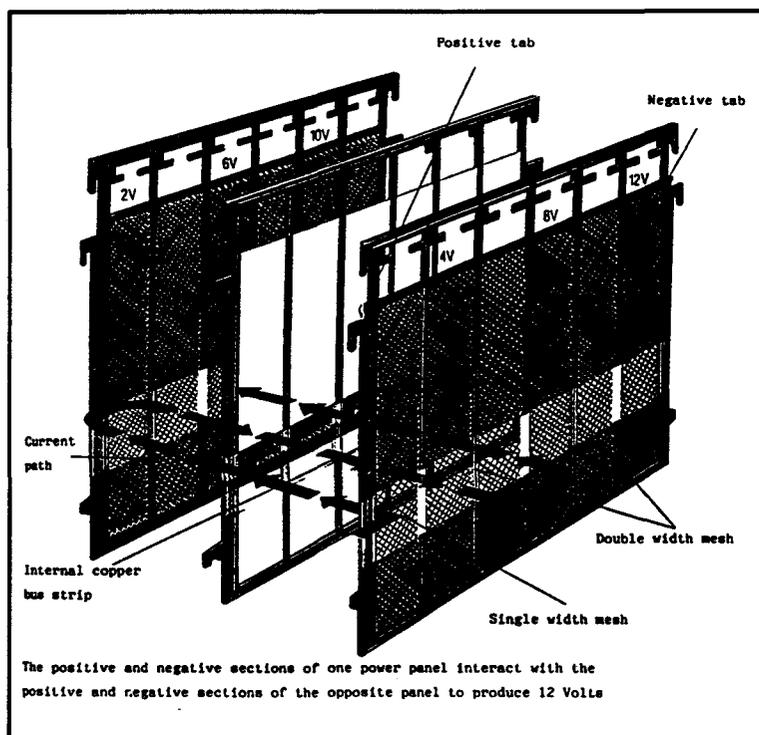


Figure n°37 : schéma de principe des batteries Pulsar

La tension de la batterie dépend du nombre de panneaux montés en série et la capacité, du nombre de plaques en parallèle.

Le nombre de connexions et la dimension des panneaux actifs diminuant, la résistance interne de la batterie est très faible, ce qui améliore considérablement sa tenue en tension à la décharge ( $U = E - rI$ ) et lui confère un excellent rapport puissance / masse.

Ces batteries étaient, il y a peu, encore fabriquées par l'entreprise Pacific Dunlop (USA). Le coût de production, plus élevé que celui des batteries classiques, ainsi que des problèmes de fiabilité (mauvaise étanchéité à l'électrolyte) ont conduit à l'abandon de la production.

Une étude engagée dans le cadre de Prometheus par l'équipementier CEAC démontre que ce concept présente un intérêt certain pour la réalisation des batteries en 24, 36 ou 48 V car les performances, la puissance massique et la faisabilité technique des batteries Pulsar sont supérieures à partir de 24 V, pour un coût de fabrication comparable à celui des batteries classiques.

Tension (V)	Capacité (Ah)	Masse relative	Volume relatif
12 V technologie actuelle	60	1	1
12 V Pulsar	62	0,94	1,14
24 V Pulsar	31	0,95	1,14
48 V Pulsar	15,5	1,07	1,26

Coût relatif	12 V	24 V	48 V
Technologie actuelle	1	1,21	1,54
Pulsar	1,46	1,5	1,58

Si les batteries de technologie classique sont peu favorables à l'élévation de la tension du réseau de bord, les batteries de nouvelles technologies, comme les batteries Pulsar semblent mieux adaptées. Une amélioration du fonctionnement en décharge est à attendre pour un coût qui, selon les premières estimations, serait supérieur de 18% en 48 V à ce qu'il est en 12 V.

Nous retiendrons que, quelle que soit la technologie batterie envisagée, les caractéristiques de la batterie (masse, volume, coût) se dégradent avec l'élévation de la tension.

### 2.2.2. Alternateur

Démontrons, en étudiant le dimensionnement de l'alternateur en fonction des différents niveaux de tension, qu'il n'est pas si facile de produire une puissance électrique supérieure, étant donné les contraintes à satisfaire sur les véhicules de tourisme, à moins d'équiper ce générateur de dispositifs permettant de piloter cette puissance.

La majorité des alternateurs montés sur les véhicules sont des alternateurs auto-excités à rotor à griffe, équipé d'un pont redresseur à diodes. Un régulateur électronique contrôle la tension aux bornes de l'alternateur en modulant l'intensité du courant d'excitation. Les courbes caractéristiques sont en général données pour un alternateur fonctionnant à pleine charge, c'est-à-dire lorsque le courant d'excitation est maximal.

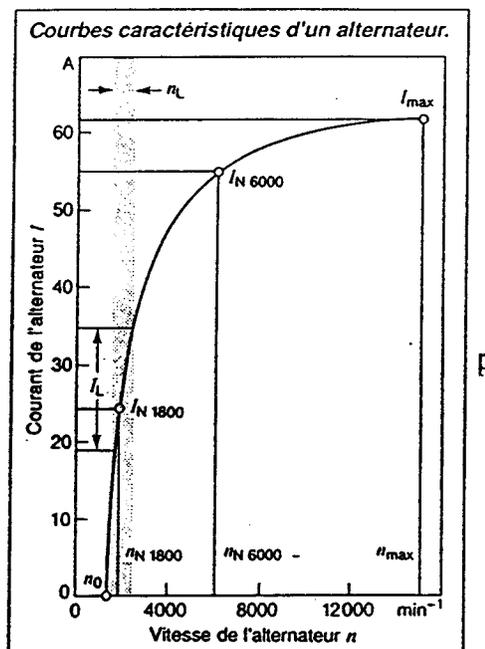


Figure n°38 : courbe (vitesse ; courant) d'un alternateur

Les profils de consommation électrique, tracés précédemment, font clairement apparaître un fort besoin en énergie dans la phase qui suit le démarrage. Or les ralenti sont nombreux pendant les premières minutes du cycle de roulage 15-0A. Par conséquent, l'alternateur doit être capable de fournir une puissance importante dès le ralenti (soit environ 2000 tr/mn sur l'alternateur).

L'adaptation de l'alternateur à une tension supérieure devra donc respecter une première contrainte, à savoir :

- débit un courant important dès le ralenti,

à laquelle nous ajouterons les contraintes habituelles qui sont :

- masse et encombrement réduits,
- rendement élevé pour diminuer la consommation en carburant,
- coût limité.

Or le rapport [55] montre de manière simple que si nous souhaitons conserver

- l'encombrement de la machine (volume et taille des bobines),
- la fiabilité des roulements à billes,
- la vitesse d'amorçage de l'alternateur,

alors,

- les ampères-tours et donc le flux inducteur restent constants,
- le nombre de spires au stator est proportionnel à la tension du réseau,
- la section des fils au stator est inversement proportionnelle à la tension du réseau,
- la résistance de l'enroulement est proportionnelle au carré de la tension du réseau,
- le courant de l'alternateur est inversement proportionnel à la tension du réseau,
- la puissance de sortie est indépendante de la tension du réseau.

Or il semble délicat de modifier les dimensions de la machine :

- augmenter le volume de la bobine d'excitation accroît la force centrifuge sur les griffes de l'alternateur, à moins de diminuer la vitesse de la machine en abaissant le rapport d'entraînement ; mais dans ce cas, la vitesse d'amorçage sera pénalisée ;
- augmenter la section des spires au stator conduit, soit à l'augmentation de la longueur de l'alternateur et donc à celle des griffes, ce qui les fragilise, soit à l'augmentation du diamètre du stator ; or l'augmentation du volume de l'alternateur va à l'encontre des contraintes de montage sur véhicule.

Des améliorations pourraient être apportées à la tenue des roulements à billes à haute température mais le coût de la machine s'en ressentirait sans aucun doute.

Par conséquent, à moins d'augmenter la vitesse d'amorçage de l'alternateur, élever la tension du réseau ne permet pas d'accroître la puissance électrique maximale délivrée par la machine, sous les contraintes d'encombrement, de fiabilité et de coût fixées.

Voyons si des gains en rendement sont à attendre.

Comme nous l'avions expliqué dans notre rapport de DEA [40], les pertes totales de l'alternateur se décomposent de la manière suivante :

- les pertes mécaniques et les pertes par ventilation sont proportionnelles à la vitesse de l'alternateur et donc indépendantes de la tension du réseau ;
- les pertes Joule au rotor et au stator sont elles aussi indépendantes de la tension, le courant étant inversement proportionnel à la tension et la résistance variant comme l'inverse du carré de la tension ;
- les pertes aux balais et dans les diodes d'excitation sont proportionnelles au courant d'excitation ; étant donné que celui-ci est très faible, nous les négligerons dans nos calculs, d'autant plus qu'elles diminuent avec une élévation de tension ;
- les pertes fer sont constantes en première approximation.

Quant aux pertes dans le pont de diodes, elles sont proportionnelles au courant.

Soit  $V_c$ , la tension de conduction des diodes :

$$\Delta \text{ pertes pont} = \text{pertes pont } (U_2) - \text{pertes pont } (U_1) = V_c \cdot (I_1 - I_2) = V_c \cdot I_1 \left( \frac{U_1}{U_2} - 1 \right)$$

Les pertes totales s'écrivent :

$$\text{Pertes totales } (U_2) = \text{Pertes totales } (U_1) + \Delta \text{ pertes pont}$$

et le rendement s'obtient par la formule suivante :

$$\eta(U_2) = \frac{U_2 I_2}{U_2 I_2 + \text{Pertes totales } (U_2)} = \frac{U_1 I_1}{U_1 I_1 + \text{Pertes totales } (U_1) + \Delta \text{ pertes pont}}$$

soit

$$\frac{1}{\eta(U_2)} = \frac{1}{\eta(U_1)} + \frac{V_c}{U_1} \cdot \left( \frac{U_1}{U_2} - 1 \right)$$

Sachant que le rendement maximal d'un alternateur est de l'ordre de 0,6, que son rendement moyen est de 0,5 et que  $V_c = 2$  V (deux diodes), une petite application numérique nous donne les résultats suivants :

Tension du réseau	12 V	24 V	36 V	48 V
Rendement moyen de l'alternateur	50%	52%	53%	53,3%
Rendement élevé de l'alternateur	60%	63%	64%	65%

Le rendement évolue donc peu avec l'élévation de la tension.

Nous retiendrons donc que si la vitesse d'amorçage de l'alternateur doit être conservée, non seulement, l'élévation de la tension ne permet pas d'augmenter la puissance électrique de la machine mais les gains en rendement éventuels sont faibles.

Il est à noter cependant que l'élévation de la tension du réseau de bord permet de s'affranchir des difficultés techniques liées à l'augmentation du débit alternateur, puisque l'échauffement dans les diodes serait moindre.

Remarque : si nous pouvions accepter une vitesse d'amorçage élevée et en particulier proportionnelle à la tension d'alimentation, la puissance électrique délivrée serait de même proportionnelle au niveau de tension pour des vitesses élevées. Les pertes de l'alternateur étant inférieures à ce qu'elles sont sous 12 V, les gains en rendement seraient plus importants. Pour une tension de 48 V, si nous faisons abstraction des pertes moindres dans le pont de diodes pour les tensions élevées :

$$\eta(U_2) = \frac{U_2 I_2}{U_2 I_2 + \text{Pertes totales } (U_2)} = \frac{4 U_1 I_1}{4 U_1 I_1 + \text{Pertes totales } (U_1)}$$

$$\text{Pertes totales } (U_1) = U_1 I_1 \left( \frac{1}{\eta(U_1)} - 1 \right)$$

$$\eta(U_2) = \frac{4}{3 \eta(U_1) + 1} \cdot \eta(U_1)$$

soit pour un rendement de 0,6 sous 12 V, un rendement correspondant sous 48 V de 0,85.

Malheureusement, nous avons vu que nous n'avons pas beaucoup de marge sur la vitesse d'amorçage, l'alternateur devant débiter un fort courant aux basses vitesses.

Pour concilier ces considérations, le rapport [55] présente plusieurs dispositifs permettant de contrôler le débit de l'alternateur avec des vitesses d'amorçage plus faibles. Le principe consiste à diminuer le nombre de spires au stator de l'alternateur, de manière à augmenter son débit. Pour compenser l'augmentation conséquente de la vitesse d'amorçage, il est possible, aux faibles vitesses moteur, soit d'augmenter le rapport d'entraînement (alternateur multi-rapports), soit de modifier l'agencement des spires (alternateur à modification de bobinage).

Toutefois, le coût de ces systèmes complémentaires est à ajouter à celui du redimensionnement de l'alternateur pour des tensions plus élevées. Nos raisonnements nous conduisent à un plus grand nombre de spires de section plus faible. Le poids de cuivre est constant mais la fabrication des bobines devient plus longue, plus délicate et par conséquent plus coûteuse.

*A moins d'augmenter le volume de la machine ou sa vitesse d'amorçage, l'élévation de la tension du réseau ne permet pas à l'alternateur de délivrer une puissance électrique supérieure. Or les contraintes mécaniques réduisent considérablement le champ de manœuvre en ce qui concerne les dimensions de la machine et la vitesse d'amorçage doit être conservée pour assurer un bon fonctionnement du réseau électrique à bas régime.*

*Des équipements complémentaires permettant de diminuer la vitesse d'amorçage sans pour autant dégrader le débit alternateur peuvent être proposés mais leur coût est à ajouter à celui de l'adaptation de l'alternateur à des tensions plus élevées.*

### **2.2.3. Câbles et connexions**

Etant donné qu'une élévation de la tension conduit à une réduction du courant dans les mêmes proportions, le dimensionnement des câbles devrait a priori être favorisé sous une tension plus élevée, quoique les contraintes mécaniques limitent cet effet. D'après l'article [44], 65% des câbles sont traversés aujourd'hui par moins de 3 A, 25% par des courants entre 3 et 15 A et seulement 10% par des courants de plus de 15 A. Or la résistance mécanique d'un câble nécessite une section de 0,35 mm<sup>2</sup>, voire 0,6 mm<sup>2</sup> sous le capot moteur à cause des vibrations. Par conséquent, l'élévation de tension ne profitera qu'aux câbles de plus gros diamètre. Selon l'article [45], en 24 V, 75% des câbles sont d'une section minimale. Les gains en volume et en poids ne sont donc pas proportionnels à l'élévation de tension et sont moindres pour des tensions plus élevées.

La variation des pertes le long des câbles varie en fonction de leur diamètre. Si ce diamètre est minimal sous 12 V, il sera conservé par l'élévation de la tension. Ses caractéristiques électriques n'étant pas modifiées, les pertes Joule, proportionnelles au carré du courant, seront divisées par quatre en 24 V et par seize en 48 V, les chutes de tensions respectives étant divisées par deux et quatre. Si, par contre, la section diminue avec l'élévation de la tension, la résistance du câble augmentera d'autant. Les pertes Joule seront donc proportionnelles au courant, la chute de tension restant constante.

En ce qui concerne les connecteurs, une aggravation des phénomènes de corrosion est à craindre avec l'élévation de la tension. Le LCIE [26] a engagé pour Prometheus une étude à ce sujet, portant sur des essais de vieillissement accéléré représentatifs des dégradations obtenues sur véhicule. Ces essais confirment une amplification des phénomènes d'électromigration "qui peuvent conduire, à terme, à la mise en court-circuit des bornes et, en toute hypothèse, au non respect des valeurs admises comme limites dans les spécifications de connecteurs".

D'après l'article [44], l'expérience de l'emploi de tensions de 96 V dans les trains a montré que l'utilisation de connecteurs de meilleure qualité, recouverts d'une couche d'or, était nécessaire.

Pour ce qui est des fusibles, les études de dimensionnement restent à mener. D'après une présentation lors d'une réunion Prometheus [56], la diminution du courant devrait permettre de choisir des fusibles plus petits et de réduire les contraintes de dimensionnement de la boîte à fusibles.

*L'influence de l'élévation de la tension du réseau sur les câbles, les connecteurs et les fusibles est mitigée. Si elle est relativement positive pour les câbles avec une diminution prévisible de leur taille, leur masse ainsi que des chutes de tension et pertes Joule associées, les connecteurs devront*

*être d'excellente qualité pour éviter une usure prématurée. Leur coût en sera par conséquent plus élevé. Quant aux fusibles, l'élévation de la tension permettrait, a priori, d'en réduire la taille.*

#### **2.2.4. Interrupteurs**

Etudions maintenant l'incidence d'une élévation de la tension du réseau de bord aussi bien sur les relais que sur les interrupteurs électroniques de puissance qui équipent aujourd'hui les régulateurs de tension et dont l'utilisation est appelée à se développer.

##### 2.2.4.1. Relais

Dans un premier temps, nous pourrions penser que les relais sont favorables à l'élévation de la tension vu les faibles courants à commuter. Néanmoins, il ne faut pas oublier de prendre en compte les phénomènes d'arc à l'ouverture et à la fermeture des relais.

Le LCIE a engagé à ce sujet une campagne d'essais d'endurance comparatifs avec différents matériaux de contact, à puissance électrique constante et sous des tensions variant entre 12 et 48 V, [26]. "L'analyse de ces essais met en évidence une dégradation quasi-générale des qualités fonctionnelles des contacts, quand ils sont amenés à fonctionner à tension plus élevée". D'un point de vue thermique, la diminution du courant ne compense pas toujours l'augmentation de la résistance et la mesure de l'énergie de l'arc à l'ouverture du contact aboutit à des valeurs plus élevées sous 48 V.

##### 2.2.4.2. Interrupteurs électroniques de puissance

Les interrupteurs électroniques de puissance équipent actuellement les régulateurs de tension, qu'il s'agisse du régulateur de l'alternateur ou de l'alimentation des calculateurs.

Les plus couramment utilisés sont les transistors MOSFET en technologie 60 V en cas de protection centralisée (tension d'avalanche des diodes écrêteuses à 40 V). L'article [48] définit la "résistance spécifique" des transistors comme le produit  $R.A$  de la résistance passante de l'interrupteur et de la surface de la puce et précise que, pour les transistors de la nouvelle génération, cette résistance spécifique sera proportionnelle au carré de la tension d'avalanche. Si nous faisons l'hypothèse que la tension d'avalanche est proportionnelle à la tension d'alimentation du réseau, la puissance dissipée dans les transistors futurs sera, à surface de silicium constante, indépendante de la tension ( $P = R.I^2$ ). Cependant, la résistance des MOS de nouvelle génération devrait être deux fois plus faible qu'aujourd'hui, ce qui diminuerait d'autant la puissance dissipée.

Par ailleurs, si la marge de sécurité prise en compte pour définir ces tensions d'avalanche passait de cinq (valeur actuelle) à trois, la puissance dissipée pourrait encore diminuer selon le carré de la tension d'alimentation. Les deux effets couplés (réduction de la résistance et de la marge de sécurité) permettraient pour une alimentation en 36 V par exemple, de réduire la puissance dissipée de 80% !, ce qui autoriserait à des dispositifs de refroidissement plus restreints ou à des puces plus petites.

Néanmoins, d'après l'article [49], l'élévation de tension pourrait altérer la fiabilité et la durée de vie des interrupteurs, d'autant plus qu'une éventuelle réduction de la marge de sécurité doit

s'accompagner de protections importantes contre les surtensions en amont. Si nous reprenons l'exemple précédent, une marge de sécurité de trois sous 36 V doit s'accompagner d'une limitation de l'amplitude des load-dump à 100 V au maximum.

*Nous retiendrons que les caractéristiques annoncées pour la prochaine génération de transistor MOS s'annoncent prometteuses, en ce qu'elles permettent de diminuer la puissance dissipée dans ces interrupteurs donc de réduire les dispositifs de refroidissement ou la surface de silicium et par conséquent leur coût. Cependant, afin d'assurer les gains optimaux, la protection centralisée devra être dimensionnée en conséquence et des essais sont à entreprendre pour valider la fiabilité de ces interrupteurs sous des tensions plus élevées.*

*Ces interrupteurs, dont le développement serait ainsi favorisé, pourraient se substituer aux relais, dont la fiabilité et la durée de vie sont remises en cause avec l'élévation de la tension.*

### 2.2.5. Moteurs électriques

Nous passerons rapidement sur l'influence de l'élévation de la tension du réseau sur les moteurs, étant donné que les raisonnements et équations sont tout à fait similaires au cas de l'alternateur.

A puissance constante, le nombre de spires est proportionnel à la tension et la section des spires inversement proportionnelle. La taille du moteur est donc similaire. De la même manière que pour l'alternateur, les pertes principales sont conservées. Cependant, les pertes aux balais ne sont plus négligeables car, pour les moteurs à excitation série, les courants qui les traversent sont importants. Etant donné qu'elles diminuent comme le courant, un meilleur rendement est à attendre. Il s'écrit, comme pour l'alternateur :

$$\frac{1}{\eta(U_2)} = \frac{1}{\eta(U_1)} + \frac{V_b}{U_1} \cdot \left( \frac{U_1}{U_2} - 1 \right)$$

Pour une chute de tension totale de 1 V, le rendement correspondant à 70% sous 12 V sera égal à 72% sous 24 V et 74% sous 48 V. Enfin, l'augmentation du nombre de spires aura un impact sur le coût des moteurs.

Il est à noter que, pour les petits moteurs, se pose un problème technique de bobinage. Les fils sont déjà très fins aujourd'hui et la diminution de leur diamètre ne sera pas sans conséquence sur leur résistance mécanique et donc sur la fiabilité des moteurs. Ces petits moteurs sont donc assez peu favorables à une élévation de la tension. De nouvelles familles d'actionneurs, actuellement à l'étude, comme les piézo-électriques par exemple, pourraient permettre de pallier ces difficultés.

Pour les plus gros moteurs, l'élévation de tension, propice au développement des interrupteurs électroniques de puissance, pourrait favoriser l'émergence des moteurs sans balais, plus compacts, d'un meilleur rendement, d'une fiabilité et d'une longévité accrue, dont le développement est aujourd'hui freiné par leur coût sensiblement plus élevé.

Excepté les modifications du nombre de spires, l'élévation de la tension ne devrait pas avoir grande influence sur les caractéristiques des moteurs. Elle pourrait par ailleurs favoriser le développement de nouvelles technologies tant pour les petits moteurs (actionneurs piézo-électriques) que pour les gros (moteurs sans balais à pilotage électronique).

### 2.2.6. Eclairage

L'éclairage est, si l'on peut dire, un des points noirs des effets de l'élévation de la tension du réseau de bord. Effectivement, la durée de vie des lampes serait considérablement réduite pour un coût accru étant donné la finesse des filaments, comme le montre la figure n°39 issue d'un document SAE.

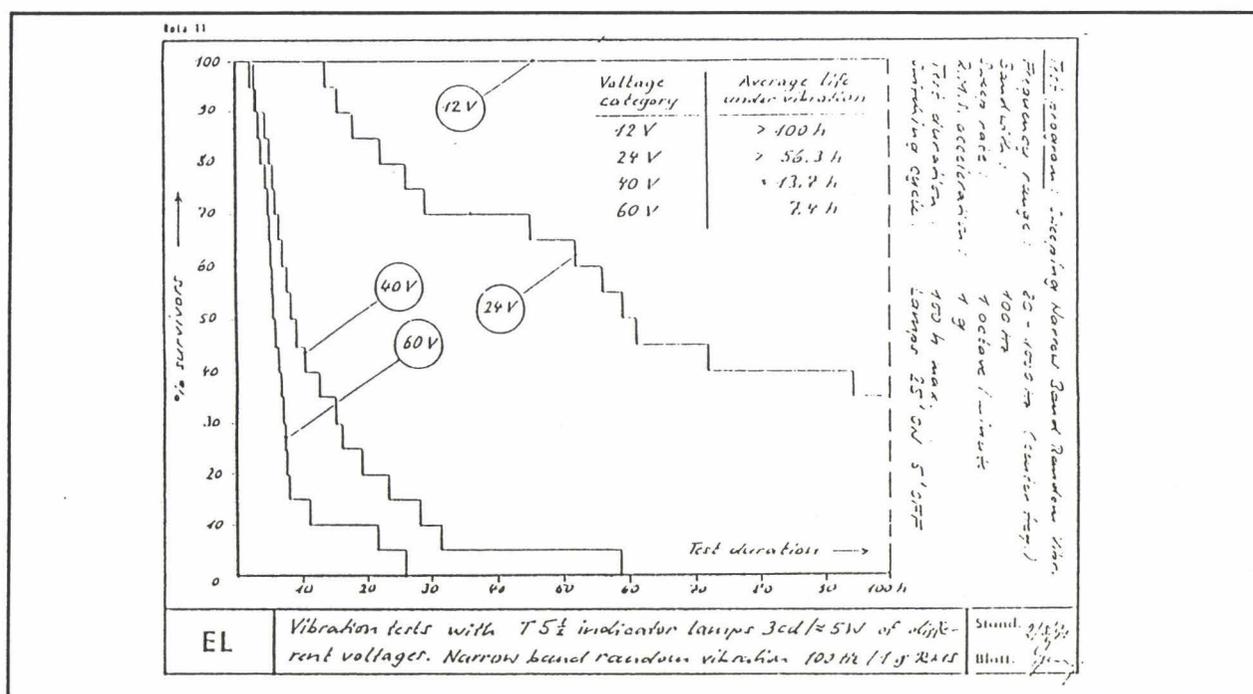


Figure n°39 : influence des vibrations sur la durée de vie des lampes

L'alimentation de ces lampes pour des tensions supérieures à 24 V est donc difficilement envisageable.

Là encore, des nouvelles technologies permettent de remédier à ce problème, comme les diodes électroluminescentes et les lampes à décharge, aujourd'hui en développement chez les équipementiers. D'une durée de vie égale à celle du véhicule et d'un spectre lumineux proche de celui de la lumière du jour, ces lampes à décharge doivent être alimentées par de fortes tensions.

### 2.2.7. Boîtiers électroniques

Tout comme les lampes, les boîtiers électroniques sont peu favorables à l'élévation de la tension du réseau de bord. Le rendement de la conversion 12 V/5 V (assurée aujourd'hui par un régulateur linéaire) pâtirait d'une élévation de la tension et les échauffements engendrés nécessiteraient d'importants dispositifs de refroidissement. Au delà de 24 V, il serait donc

nécessaire de passer à des hacheurs ou des alimentations à découpage, convertisseurs plus coûteux que ceux qu'on utilise aujourd'hui.

### 2.2.8. Tableau récapitulatif

Nous pouvons récapituler les effets de l'influence de l'élévation de la tension du réseau de bord sur les différents organes :

Tension d'alimentation	12 V	24 V	36 V	48 V
Batterie : technologie classique	0	-	--	---
Batterie : technologie Pulsar	0	0	-	--
Alternateur et dispositif d'augmentation de puissance	0	0	-	-
Câblage et connecteurs	0	0	-	-
Relais	0	-	--	---
Interrupteurs électroniques	+	+	++	+++
Moteurs	0	0	-	--
Lampes à décharge et LED	-	0	+	++
Boîtiers électroniques	0	0	-	-
<b>Bilan</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-</b>	<b>--</b>

Le signe "-" indique une dégradation de la caractéristique étudiée, le signe "+" une amélioration et "0" signifie qu'aucune modification importante n'est à envisager.

Ce bilan montre qu'il n'y a pas d'intérêts particuliers à passer à des tensions d'alimentation supérieures. Au contraire, l'élévation à des tensions de 36 V ou 48 V pourrait même être néfaste.

Evidemment, ce ne sont pas des plus ou des moins qui vont décider de l'avenir de l'élévation de la tension du réseau de bord. Vous aimeriez certainement avoir accès à des valeurs plus précises et à des rapports gains / coût dûment quantifiés. Malheureusement, il est très difficile de chiffrer les effets d'un passage à une tension supérieure. Excepté les études engagées par le groupe de travail européen Prometheus — financées en partie par la Communauté Européenne — très peu de mesures ont été effectuées en 36 V ou 48 V. L'expérience des véhicules industriels en 24 V ne peut se reporter directement au cas des véhicules de tourisme, étant donné que les contraintes de dimensionnement ne sont pas les mêmes. Par exemple, la vitesse d'amorçage de l'alternateur peut être plus élevée sur les camions car les plages de fonctionnement du moteur sont différentes.

Pour aller plus loin que les multiplications et divisions élémentaires par deux, trois ou quatre, il faudrait soit se lancer dans la conception de prototypes spécifiques soit s'adonner aux joies de la simulation. En ce qui concerne ce dernier exercice, nous manquons de données précises pour

aboutir à des résultats viables. Effectivement, il est difficile d'étudier le comportement du réseau sans connaître le rendement de l'alternateur ou encore ses caractéristiques magnétiques. Or, si nous n'avons évoqué que le changement du nombre de spires, il semble sûr que le passage à une tension supérieure sera l'occasion d'un redimensionnement de la machine. Les caractéristiques de l'alternateur en seront donc modifiées.

Les résultats les plus probants seraient donc des résultats d'essais sur prototypes en 24 V, 36 V ou 48 V, dimensionnés pour des véhicules de tourisme. Or les bilans négatifs auxquels nous sommes arrivés n'engagent pas à débloquer les crédits nécessaires à leur fabrication.

D'autant plus que nous n'avons pas cherché à calculer le "ticket d'entrée" d'un passage à une tension plus élevée, c'est-à-dire à évaluer le prix des modifications de l'outil industriel. Comme nous l'annonçons en introduction, il est certainement loin d'être négligeable. D'après les informations obtenues auprès d'Alain Le Douaron [42], "l'usine d'alternateurs de Valeo située près de Lyon a moins de quatre ans et Bosch a investi massivement pour reconditionner ses installations, il y a deux ans".

Ce ticket d'entrée, sans aucun doute important, se reportera sur le prix des pièces, ce qui rend encore moins attrayante la perspective d'un changement de tension.

Cette même conclusion s'est imposée aux membres du groupe SAE qui travaillent sur le sujet. Preuve en est, le changement de nom du comité "Dual / High Voltage Electrical Systems" qui s'intitule depuis mi - 95 "Power Supply System Standard". Sous son ancien nom, ce comité étudiait non seulement l'incidence d'une éventuelle élévation de la tension sur les différents composants électriques mais aussi les différentes architectures électriques correspondantes, comme les réseaux bi-tension +12 V/36 V par exemple ou encore -12 V/+12 V (étude que nous avons menée dans le cadre du DEA [40]). Si les conclusions de ce comité étaient, comme les nôtres, peu optimistes quant aux éventuels bienfaits d'une élévation de la tension, l'étude des architectures bi-tension pourrait cependant être transférée au cas du 12 V. Effectivement, l'analyse préliminaire de la consommation électrique des véhicules futurs a montré la très forte progression des systèmes électroniques. Or ces systèmes fonctionnent sous 5 V. Leur développement pourrait donc justifier l'étude de réseaux bi-tensions 12 V/5 V, dont l'intérêt premier serait de diminuer le nombre de convertisseurs et le coût des protections locales contre les surtensions. Les réseaux multiplexés, actuellement à l'étude, pourraient présenter des intérêts similaires.

Le défi que nous posons en introduction est donc loin d'être gagné car non seulement l'élévation de la tension n'est pas la seule alternative pour satisfaire les besoins en puissance électrique mais elle ne présente guère d'autres avantages, bien au contraire. L'engouement généralisé de la fin des années 80 s'est donc quelque peu tari, que ce soit au cours des réunions du projet européen Prometheus, que dans les articles de la SAE sur le sujet. D'ailleurs, des intitulés "Bonté et bienfaits de l'élévation de la tension du réseau de bord", nous sommes passés à

---

"Comment tirer meilleur parti du 12 V", soit dans la langue de Shakespeare : "Getting the best out of 12 volts". Comme le précise cet article [50], "toute introduction de tensions supérieures devra attendre qu'on ait entièrement exploité les réseaux en 12V ou qu'on ait vu clairement qu'une tension supérieure est nécessaire au développement de nouvelles technologies pour certains systèmes critiques".

Il est fort possible qu'à terme, en l'an 2020, 2050 ou 2100, l'élévation de la tension du réseau s'avère incontournable, comme dans les années 50, le passage du 6 V au 12 V. Cependant, les contraintes actuelles placent aujourd'hui cette solution en second plan par rapport à des systèmes plus simples à mettre en œuvre en 12 V.

*Si la tension du réseau électrique de bord des véhicules est passée de 6 à 12 V dans les années 50, les futurs niveaux de tension envisagés sont beaucoup plus élevés : 24 V, 36 V ou 48 V.*

*Avant de nous plonger dans l'étude au cas par cas de l'influence de l'élévation de la tension sur les différents accessoires électriques, nous avons tenu à déterminer quel est le niveau de tension maximum qui permet d'assurer une bonne sécurité des utilisateurs en cas de contact avec une partie sous tension du réseau ; et ce à moindre frais, c'est-à-dire avec des protections contre les éventuels contacts réduites au minimum.*

*Nous avons ainsi étudié quels étaient les effets du passage du courant dans le corps humain, afin d'éliminer les tensions d'alimentation dangereuses. Nous avons commencé par déterminer la résistance du corps humain à prendre en compte, selon les conditions du contact et le trajet du courant. Pour un trajet main - ventre dans des conditions humides, elle varie entre 400 et 700  $\Omega$  selon la tension de contact envisagée (entre 12 et 75 V). Nous pouvons alors calculer le courant correspondant et, en nous reportant aux zones temps / courant des effets du courant définies dans la norme CEI 429-1 [27], prévoir les dangers potentiels.*

*Tant l'étude des tensions continues que celle des transitoires nous conduisent à la conclusion suivante : sur les réseaux électriques de bord en 12 ou 24 V, aucune protection particulière contre les contacts avec des parties sous tension du circuit n'est obligatoire. Par contre, des isolations ou des obstacles sont nécessaires en 36 V et 48 V, pour éviter tout contact dangereux.*

*Bien que cette étude sur la sécurité électrique pénalise le 36 V et le 48 V, ces niveaux de tensions pourraient cependant présenter un intérêt à condition que les gains obtenus lors du passage à une tension supérieure compensent le coût des protections supplémentaires.*

*Nous avons donc évalué quels seraient les gains potentiels susceptibles d'être engendrés par l'élévation de la tension du réseau de bord. Les conclusions quant à son influence sur les différents accessoires électriques sont les suivantes :*

- batterie : la technologie actuelle semble peu favorable à l'élévation de tension, qui, par contre, conviendrait mieux à des batteries du type Pulsar (sur lesquelles la matière active est répartie de manière différente). Les masse, volume et coût seraient dans tous les cas supérieurs à ce qu'ils sont aujourd'hui,*
- alternateur : les contraintes de débit minimum de l'alternateur au ralenti font que l'élévation de la tension du réseau de bord ne permet pas à elle seule d'augmenter la puissance électrique délivrée par la machine. Il est nécessaire d'y associer des dispositifs permettant d'augmenter le débit à faible vitesse. Le coût de ces systèmes est à prendre en compte et tout comme la batterie, le bilan final est négatif pour des tensions de 36 V et 48 V,*
- câbles et connecteurs : la réduction du courant circulant dans les câbles joue en faveur d'une élévation de la tension. Cependant, les problèmes de corrosion sont à prévoir sur les connecteurs,*

- *relais et interrupteurs électroniques de puissance : si la fiabilité et la durée de vie des relais sont remises en cause avec l'élévation de tension (phénomènes d'arc dégradants), les interrupteurs électroniques en technologie MOS y sont favorables car leur rendement augmenterait,*
- *moteurs : la faible section des fils de cuivre du bobinage rendrait plus délicate la fabrication des petits moteurs sous des tensions plus élevées. Aucune influence notable n'est à prévoir pour les gros moteurs, excepté un coût de fabrication accru (temps de fabrication plus important),*
- *éclairage : les lampes actuelles, dont la durée de vie serait restreinte sous une tension supérieure, seraient remplacées par des lampes à décharge (fonctionnement proche de celui du néon) et par des diodes électroluminescentes,*
- *boîtiers électroniques : ce type de boîtier coûte d'autant plus cher que la tension d'entrée augmente.*

*Par conséquent, le bilan général de l'incidence de l'élévation de la tension sur les différents organes électriques montre que le 36 V et le 48 V sont loin d'être les niveaux les plus appréciés par les différents organes électriques. Le 24 V se présente comme une tension intermédiaire sous laquelle le rendement global serait un peu plus élevé pour une moindre incidence sur les organes. Toutefois, il ne faut pas oublier de prendre en compte le ticket d'entrée d'un changement de tension, qui, dans tous les cas, ne sera pas négligeable, la rigidité de l'outil industriel constituant un obstacle majeur au passage à une tension supérieure.*

*Etant donné que nous n'avons pas mis en évidence les gains potentiels liés à l'élévation de la tension du réseau électrique alors que le surcoût associé apparaît clairement, le passage à une tension supérieure ne peut se justifier par d'autres arguments que l'augmentation de la puissance électrique. Or nous avons vu, en première partie, qu'il était possible, tout en restant en 12 V, de mieux gérer la puissance électrique de manière à satisfaire la future demande sur les réseaux de bord.*

*Nous n'approfondirons donc pas plus nos études sur l'élévation de la tension et nous consacrerons la seconde partie de cette thèse à l'analyse des solutions en 12 V. Parmi l'ensemble des systèmes et dispositifs que nous avons présentés à ce sujet, nous allons nous attarder plus particulièrement sur les réseaux duaux, équipés de deux batteries spécifiques.*

### 3. ARCHITECTURE "BATTERIES DUALES"

Dans le premier chapitre de notre exposé, nous avons vu que le tracé dans un plan énergie / puissance des points de fonctionnement d'une batterie mettait en évidence ses trois fonctions que sont la fonction de démarrage, la fonction de service et la fonction "veille". La conception actuelle de la batterie résulte d'un compromis visant à assurer au mieux chacune d'entre elles :

- fonction démarrage : le démarrage du moteur requiert une forte puissance pendant un temps très court ; la décharge de la batterie est dans ce cas rapide ; la surface de matière active, partie constitutive des plaques de la batterie qui est soumise à des transformations chimiques lors du passage du courant, doit être très importante car, pour un appel de puissance, ces réactions sont superficielles ; la taille et le nombre de plaque sont donc élevés ;
- fonctions service et veille : l'aptitude à la décharge profonde et au cyclage dépend de l'épaisseur de matière active : lorsque le courant de décharge est faible, les transformations chimiques s'effectuent lentement en profondeur dans les pores des plaques.

Or le compromis nombre, taille des plaques, épaisseur de matière active est de plus en plus difficile à satisfaire car :

- sur les moteurs de forte cylindrée, sont montés des démarreurs de puissance élevée ;
- le courant de veille augmentant avec le nombre de calculateurs et les temps de dévers s'accroissant, la capacité batterie doit être de plus en plus élevée sur les véhicules fortement équipés.

Aujourd'hui, pour les motorisations diesel, la batterie est définie par rapport à la puissance de démarrage : le nombre et la taille des plaques nécessaires pour fournir cet appel représentent une capacité suffisante pour assurer la fonction de service. Inversement, pour les motorisations essence avec de forts niveaux d'équipements, la batterie est définie par rapport à sa fonction de service : le nombre des plaques et l'épaisseur de matière active permettent de fournir un courant suffisant au démarrage.

L'idée est donc de concevoir un réseau électrique équipé de deux batteries, l'une dédiée au démarrage du véhicule et l'autre assumant les fonctions de veille et de service. Le schéma général correspondant est représenté figure n°40 :

**CONFIDENTIEL  
RENAULT**



Figure n°40 : schéma de principe des réseaux à deux batteries

Le système de gestion de charge (SGC) permet de piloter les connexions entre les deux batteries, de manière à respecter ainsi leur fonctionnement spécifique. Le compromis précédent n'étant plus de mise, leur masse et leur volume seraient donc revus à la baisse.

Prenons effectivement le cas d'une batterie traditionnelle L3 de 65 Ah. Le cahier des charges demande qu'elle puisse démarrer le moteur avec 70% de son état de charge, voire même 50% lorsqu'il fait froid. Par conséquent, en cyclage ou en décharge, seule 30 à 50% de sa capacité est utilisable, ce qui représente moins de 30 Ah, les 35 Ah restants servant à assurer les démarrages difficiles.

Le concept dual permet de s'affranchir de cette exigence. La batterie de démarrage prend à son compte le démarrage du moteur et la batterie de service peut donc cycliser plus de 80% de sa capacité (une décharge complète n'est jamais souhaitable pour la durée de vie de la batterie). Une même capacité utile de 30 Ah, lors d'une décharge à 80% nous conduit à une capacité nominale de la batterie de service de 40 Ah.

La capacité de la batterie de démarrage est aussi à revoir à la baisse puisque seule la puissance importe. L'article [58] donne le tableau de comparaison suivant :

	Equipement traditionnel	Batterie de démarrage
Classe batterie	L3	L0
Volume (l)	9,2	5,8
Capacité nominale (Ah)	65	36
Intensité pour $U_{10s} = 7,5 V$	560	560
Poids (kg)	18,8	11,1
Puissance spécifique (A/kg)	30	50
Puissance volumique (A/l)	58	96

Les puissances massique et volumique de la batterie de démarrage sont donc augmentées de 60%.

Or le manque de place sous capot est, nous l'avons déjà dit, une réalité douloureuse à laquelle sont confrontés quotidiennement les concepteurs. Nous pouvons ici facilement imaginer de laisser la batterie de démarrage sous le capot (près du démarreur) et de déporter la batterie de service dans

l'habitacle ou le coffre du véhicule. Vous objecterez qu'il serait tout aussi facile de déplacer l'unique batterie actuelle, comme le font d'autres constructeurs automobiles. Cependant, d'une part, il n'est pas toujours évident de dégager un volume important dans le coffre, le client souhaitant encore pouvoir y déposer quelques valises. D'autre part, la chute de tension alors produite dans les câbles pourrait rendre certains démarrages plus difficiles. A contrario, justement, ces réseaux à deux batteries permettent de diminuer les cas de non-démarrage dus aux batteries déchargées. Effectivement, le système de gestion peut garantir un bon niveau d'état de charge sur la batterie de démarrage, en l'empêchant de se décharger dans le reste du réseau électrique. Si vous laissez vos feux allumés, seule l'énergie de la batterie de service se consume. De plus, l'adaptation des batteries aux véhicules est simplifiée : à un moteur correspond une batterie de démarrage et à un niveau d'équipement, une batterie de service.

Concepteurs et clients y trouvent ainsi leur compte...à condition de ne pas y laisser trop d'argent. Afin d'apporter quelques éléments de réponse sur ce dernier point, nous avons mené notre étude de la manière suivante.

La synthèse de l'état de l'art (bibliographie, brevet, analyse de la concurrence et des études précédentes) nous a permis de préciser le schéma présenté plus haut et de dégager les critères importants que devait satisfaire au mieux toute architecture. Nous sommes ensuite partie d'une configuration générale capable d'engendrer plus de deux cents architectures, que nous avons passées en revue selon les critères établis précédemment. Seules quelques unes se sont avérées particulièrement intéressantes. Nous avons alors analysé et simulé leur fonctionnement, ce qui nous a permis de tirer les premières conclusions quant à la structure du système de gestion de charge.

Afin de préciser l'influence des stratégies de pilotage de ce système sur la conception des batteries, nous nous sommes associés à un équipementier batterie avec lequel nous avons rédigé l'analyse fonctionnelle du système dual, en nous attachant à dégager les fonctions que le client pouvait attendre d'un tel système. Parallèlement, nous avons travaillé à la construction du réseau, l'expertise de l'équipementier nous permettant d'éliminer encore quelques solutions. La Direction des Etudes Electriques et Electroniques (DEEE), intéressée par l'application de ce type de réseau sur certains véhicules, nous a fixé des contraintes supplémentaires, auxquelles n'ont résisté au final que deux architectures.

C'est sur ces dernières que reposeront les prochaines simulations et les essais sur véhicule.

### **3.1. Etude générale**

#### **3.1.1. Etat de l'art**

Nous avons cherché, au travers de l'état de l'art, quelles étaient les architectures "batteries duales" a priori intéressantes et la stratégie de charge et de décharge des batteries associée. Cet état de l'art porte sur cinq volets :

- une recherche bibliographique,
- une recherche des brevets existants,
- les présentations des équipementiers batterie en réponse à l'appel d'offre pour la remplaçante de la Safrane (projet P5),
- une analyse des éventuels systèmes similaires chez les autres constructeurs automobiles,
- les résultats d'une étude menée par la DEEE sur ce type de réseau, qui avait donné lieu à des essais sur véhicule.

**CONFIDENTIEL**

**RENAULT**

### 3.1.1.1. Recherche bibliographique

Cette recherche a abouti à un nombre d'articles très restreint.

Le premier, "Getting the best out of 12 V" [51], évoqué au chapitre précédent, présente un schéma général avec un système de gestion intitulé "Power Management System" qui permettrait de :

- démarrer avec la batterie de démarrage, voire avec les deux batteries en cas de besoin,
  - d'alimenter certaines charges (comme l'injection, l'allumage, l'ABS et les warnings) à partir des deux batteries, afin d'assurer la sécurité des utilisateurs,
  - de délester certaines charges en cas de dévers, c'est-à-dire de couper leur alimentation,
- et qui de plus assurerait d'autres fonctions comme le pilotage de l'excitation de l'alternateur, la variation du régime du ralenti et la reconnaissance de panne.

Le second article, "Intelligent automotive battery systems", [57], nous vient de Nouvelle-Zélande. Il présente un réseau à deux batteries (figure n°41), reliées par un relais électromagnétique, dont est décrite la stratégie de commande.

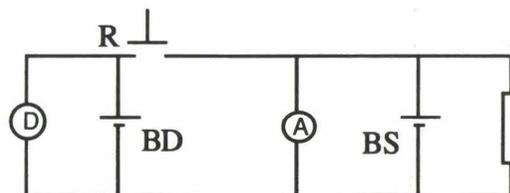


Figure n°41 : brevet [57] - architecture à relais

Sans rentrer dans le détail, l'idée est la suivante :

- à l'arrêt, le relais est ouvert ; si le conducteur oublie d'éteindre ses feux, la batterie de service (BS) se décharge mais la batterie de démarrage (BD) reste chargée,
- au démarrage, le relais reste ouvert ; la batterie de démarrage alimente le démarreur et la batterie de service, les autres charges électriques ; cependant, si l'état de charge de la batterie de service est trop faible, le relais est fermé pour que la batterie de démarrage puisse alimenter les charges électriques nécessaires au démarrage,
- en roulage, lorsque le courant débité par l'alternateur est suffisant pour charger les deux batteries, le relais est fermé ; dans le cas contraire, le relais est ouvert et seule la batterie de service fournit le courant complémentaire.

**CONFIDENTIEL**

**RENAULT**

Cette stratégie est la plus classique et, a priori, une des mieux adaptées aux réseaux duaux.

Un troisième article, "Optimized batteries for cars with dual electrical architecture", [58], reprend le texte d'une conférence présentée par l'équipementier CEAC au salon de Genève 1993. Cet équipementier a également fait des propositions dans le cadre de l'appel d'offre batterie pour la remplaçante Safrane (programme P5). Ces propositions étant plus complètes que les solutions présentées dans l'article, nous les développerons dans quelques chapitres.

Bien que cette recherche bibliographique ait donné lieu à peu d'articles, elle nous permet déjà d'aborder les grands principes des réseaux duaux, ainsi qu'une stratégie très adaptée sur laquelle nous aurons l'occasion de revenir.

### 3.1.1.2. Recherche des brevets

Cette recherche a été fructueuse. Parmi la moisson de brevets sur les réseaux à plusieurs batteries, trois nous concernent plus particulièrement.

Le premier "Device for supplying electric power in a motor vehicle", [59], a été déposé par l'équipementier Bosch en 1991 et présente une architecture équipée de deux interrupteurs : une diode et un transistor. Il décrit plus particulièrement l'électronique de commande du transistor qui peut s'adapter à plusieurs stratégies de pilotage.

Le second, "3 poles battery switches", [60], vient à nouveau de Nouvelle-Zélande (sans qu'il soit évident d'établir un rapport avec l'article du même pays) et porte sur un réseau électrique équipé d'une batterie "trois pôles" (figure n°42).

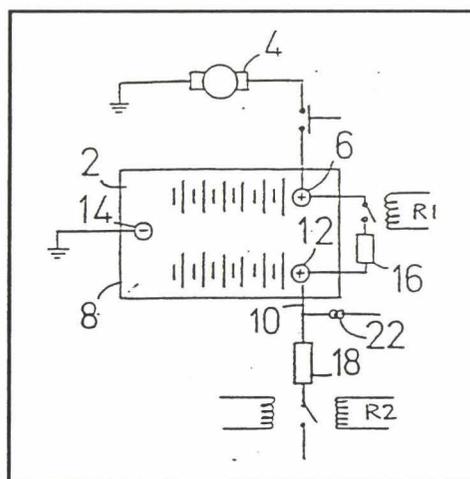


Figure n°42 : batteries trois pôles

Les deux pôles positifs sont reliés par un interrupteur R1, dont la stratégie de pilotage est à retenir car elle offre une prestation supplémentaire, comparée à celle présentée dans l'article néo-zélandais : lorsque le réseau est en dévers, l'interrupteur, au lieu d'être ouvert, reste fermé tant que

l'état de charge de la batterie est suffisant pour assurer le prochain démarrage. Les deux batteries, alors en parallèle, contribuent à maintenir une tension plus élevée sur le réseau de bord.

Le dernier, "Zwei batteriensystem", [61] déposé par le constructeur BMW en 1990, reprend cette architecture désormais classique à un interrupteur dont l'ouverture et la fermeture sont pilotées de manière analogue à ce que nous avons déjà décrit, excepté au démarrage, pendant lequel l'interrupteur reste ouvert quel que soit l'état de charge de la batterie de service. Si celle-ci est déchargée, le démarrage est alors impossible.

Nous comparerons par la suite les solutions présentées ici à celles que nous envisageons.

### 3.1.1.3. Présentation de l'appel d'offre P5

Dans l'objectif d'une diminution du temps de conception d'un véhicule, les constructeurs automobiles cherchent à intégrer les équipementiers dès les études exploratoires du véhicule. C'est dans ce cadre que les bureaux d'étude électrique ont lancé un appel d'offre sur les batteries de la remplaçante Safrane (projet W73 ou plate-forme P5). Sur la base d'un cahier des charges ouvert, les équipementiers ont précisé les orientations techniques qui leur semblaient les plus adaptées. En ce qui concerne les systèmes à deux batteries, leurs avis convergent vers une batterie de service de type étanche, à recombinaison de gaz, apte aux cyclages et aux décharges profondes. Pour la batterie de démarrage, de forte puissance massique et conçue pour fonctionner à un état de charge élevé, ils envisagent une batterie de technologie proche de la batterie actuelle.

CEAC annonce les ordres de grandeur suivants, concernant la comparaison de la masse, du volume et du coût des batteries duales par rapport à la batterie actuelle pour un véhicule haut de gamme avec un fort niveau d'équipement :

	Masse standard (kg)	Volume standard (l)	$\Delta$ masse (%)	$\Delta$ volume (%)	$\Delta$ coût (%)
Essence	18,2	9,2 (L3)	+2	+20	+24
Diesel	26	11,7 (L5)	-2,3	+13	+13

Il est à noter que ces chiffres ne concernent que les batteries ; le bilan final devra aussi prendre en compte le système de gestion de charge et le câblage supplémentaire.

### 3.1.1.4. Analyse de la concurrence

Les constructeurs concurrents sont malheureusement toujours aussi peu bavards sur l'avancée de leurs études dans certains domaines, ce qui explique la brièveté de ce paragraphe.

La visite des salons et la lecture des journaux nous ont appris que BMW équipait certains de ses véhicules haut de gamme de deux batteries, à première vue, simplement connectées en parallèle.

Il est intéressant d'aller faire un tour chez nos amis du camping-car, depuis longtemps confrontés aux problèmes de gestion de charge des batteries "de roulage" et de "vie à bord". Nous avons ainsi pris connaissance d'un "séparateur électronique de batterie", fabriqué par la société Scheiber, dont la fonction consiste à protéger la batterie principale (batterie de roulage) contre les risques de décharges incontrôlées. Lorsque l'alternateur tourne, cette batterie est chargée en priorité. Lorsque sa tension atteint 13,6 V, la batterie auxiliaire se connecte en parallèle et la charge simultanée des deux batteries dure tant que l'alternateur est en fonctionnement. Les consommateurs de bord (moteur coupé) sont alimentés à partir des deux batteries en parallèle. Lorsque la tension commune de celles-ci atteint 12,4 V, la batterie principale se désaccouple et la consommation des diverses utilisations se fait alors uniquement sur la batterie auxiliaire. La séparation est effectuée à l'aide d'un relais.

Si la stratégie décrite ne s'adapte pas tout à fait à nos besoins, cet exemple nous permet d'avoir une première indication sur le volume et le coût du boîtier. Pour un relais de 40 A, le boîtier, d'un volume égal à 87 x 60 x 35 mm, est vendu au prix de 200F.

#### 3.1.1.5. Etudes CEAC / DEEE

Une première étude, menée en 1992 par la DEEE en collaboration avec l'équipementier batterie CEAC, porte sur une architecture où les deux batteries sont séparées par une diode.

Une seconde étude s'est déroulée à la suite de celle-ci, sur l'utilisation de deux batteries reliées entre elles par un relais, l'une étant dédiée au chauffage du pot catalytique et l'autre remplissant les mêmes fonctions que la batterie actuelle.

Nous reprendrons par la suite les conclusions de cette étude pour illustrer les avantages et inconvénients de ce type d'architecture.

*Nous aurons l'occasion d'analyser plus précisément les architectures et stratégies de commande du système de gestion de charge présentées ici. Mais déjà, cet état de l'art nous permet de nous familiariser avec les réseaux "batteries duales", d'en appréhender les schémas généraux et les grands principes de fonctionnement. Nous retrouverons en particulier l'architecture à diode, simple et a priori peu coûteuse, ainsi que l'architecture à relais qui peut isoler la batterie de démarrage du reste du réseau non seulement au démarrage mais aussi pendant les phases de dévers.*

#### **3.1.2. Etude systématique**

Nous n'avons vu jusqu'ici que quelques architectures duales mais il est facile d'en dessiner d'autres qui pourraient avoir un sens. Il est tout aussi facile de trouver des défauts aux architectures ou aux stratégies de pilotage présentées : si nous souhaitons, par exemple, que la batterie de service ne participe pas au démarrage, afin de garder un bon niveau de tension aux bornes des charges de service, l'architecture à diode ne convient plus. La prise en compte de telle ou telle contrainte nous conduit donc à des configurations différentes. Comment alors être sûrs,

qu'aveuglés par des impératifs de second ordre, nous n'allons pas passer à côté d'une solution qui satisferait entièrement les contraintes de premier ordre ?

C'est pourquoi, avant de nous pencher sur le fonctionnement détaillé des architectures présentées au paragraphe précédent, nous établirons une première liste des principales fonctions que nous souhaitons voir remplies. Parallèlement, nous chercherons à dessiner un grand nombre d'architectures de manière automatique ; c'est-à-dire sans laisser une quelconque contrainte influencer cet exercice de conception. Nous passerons ensuite les différentes configurations en revue et sélectionnerons les architectures les plus adaptées.

#### 3.1.2.1. Critères d'étude

Deux articles de la SAE déjà cités, [50] et [51], ainsi que la publication de CEAC [58] font état des améliorations recherchées au travers des réseaux duaux.

Nous en retiendrons les voies de progrès suivantes :

- 1) amélioration du fonctionnement en mode dégradé ; plus précisément, il s'agit d'assurer le démarrage du véhicule lorsqu'une des deux batteries est déchargée, en particulier la batterie de service, sur laquelle seraient connectés les feux ;
- 2) amélioration de la qualité de l'environnement électrique ; le système doit limiter les chutes de tension aux bornes des charges électriques, aussi bien pendant le démarrage qu'en cas de dévers ;
- 3) bonne adéquation de l'offre et de la demande en courant ; il s'agit de permettre une bonne recharge des batteries après le démarrage et d'éviter les risques de surcharge ;
- 4) bon rendement général, afin de limiter la part du réseau dans la consommation d'essence. Il s'agit en particulier d'éviter les dissipations de puissance inutiles ;
- 5) faible coût du système, afin que l'architecture ait une chance d'être montée sur véhicule ; le système de gestion devra être simple et les interrupteurs au plus proche des standards automobiles.

Il est, de plus, évidemment implicite que toute nouvelle architecture ne doit pas dégrader les qualités du réseau électrique actuel.

Cette liste de critères n'a pas la prétention d'être exhaustive ; nous verrons d'ailleurs plus loin comment l'étoffer en utilisant les techniques de l'analyse fonctionnelle. La pertinence de ces critères n'est pas non plus indiscutable ; certains seront remis en cause ultérieurement. Cependant, cette sélection nous permet d'effectuer un premier tri et de dégager les architectures les plus prometteuses.

#### 3.1.2.2. Génération d'architectures

Comme nous l'avons expliqué en introduction, il s'agit maintenant de dessiner un grand nombre d'architectures sans être influencé par la liste de critères établie. Pour ce faire, nous sommes partie d'une architecture générale qui rassemble toutes les architectures présentées dans l'état de l'art, représentée figure n°43.

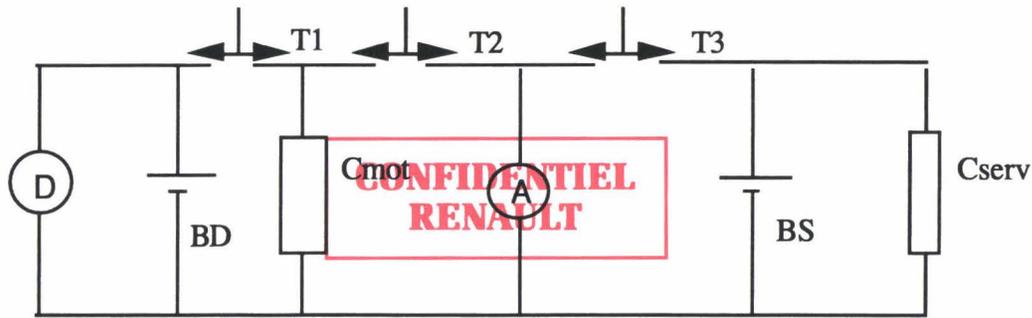


Figure n°43 : schéma général du système de gestion de charge

Nous sommes amenée à distinguer trois types de charges électriques :

- les "charges moteur" représentent les charges nécessaires au bon fonctionnement du moteur et celles qui permettent de limiter les émissions de polluants ; il s'agit, entre autres, pour un moteur essence, de l'injection et de l'allumage et, pour un moteur diesel, des bougies de chauffage ;
- les "charges de sécurité" correspondent aux charges dont l'alimentation doit être particulièrement fiable ; on peut citer en exemple les calculateurs, les actionneurs de l'ABS...;
- les "charges de service" représentent toutes les autres charges qui sont connectées à la batterie de service.

Le démarreur, D, est connecté à la batterie de démarrage, BD. Cette batterie peut alimenter les charges moteur et les charges de sécurité, Cmot, via l'interrupteur T1. Ces charges peuvent aussi être connectées à l'alternateur, A, par l'interrupteur T2. L'interrupteur T3 relie l'alternateur et la batterie de service, BS, à laquelle sont branchées les charges de service, Cserv.

Du fait du fort courant appelé par le démarreur, la batterie de démarrage sera placée de préférence près du démarreur pour limiter la chute de tension dans les câbles. La batterie de service pourra être placée sous le capot, dans l'habitacle ou dans le coffre, en fonction des besoins.

Chacun des trois interrupteurs peut prendre l'une des formes énoncées ci-dessous :

- interrupteur fermé en permanence, représenté par le symbole :  $\text{—}$
- interrupteur de type "diode", représenté par le symbole :  $\leftarrow$  ou  $\rightarrow$
- interrupteur commandable et bidirectionnel de type "relais", représenté par :  $\perp$
- interrupteur commandable et unidirectionnel de type "transistor" représenté par :  $\perp >$  ou  $< \perp$

La combinaison de ces différents types d'interrupteur permet de construire 216 architectures.

Une première analyse du fonctionnement de ces réseaux, aussi bien dans la phase de démarrage que lorsque l'alternateur tourne, permet d'éliminer les 160 combinaisons suivantes :

**CONFIDENTIEL  
RENAULT**

T1	T2	T3	
->	?	?	la batterie de démarrage ne peut pas se recharger
?	->	?	idem
⊥>	?	?	idem
?	⊥>	?	idem
?	?	<-	la batterie de service ne peut pas se recharger
?	?	<⊥	idem
<-	?	->	aucune des batteries ne vient alimenter les charges moteur au démarrage
<-	⊥	?	si T2 est ouvert, les charges moteur ne sont plus alimentées. T2 ne peut être fermé qu'à l'arrêt alors que ce n'est pas nécessaire

**CONFIDENTIEL  
RENAULT**

### 3.1.2.3. Etude des architectures selon les critères

Etudions maintenant comment les 56 architectures restantes répondent aux critères que nous nous sommes fixés.

Nous avons utilisé les notations suivantes :

C1 : fonctionnement en mode dégradé

C2 : adéquation de l'offre et de la demande

C3 : qualité de l'environnement électrique

C4 : rendement

C5 : complexité

Etant donné qu'un des principaux attraits de ce type de réseau électrique est de permettre au conducteur de démarrer même lorsque sa batterie de service est déchargée, nous avons éliminé d'entrée de jeu les architectures qui ne remplissaient pas le critère n°1. Les combinaisons suivantes ne sont donc pas retenues :

T1	T2	T3	
<-	?	?	lorsque la batterie de service est déchargée, les charges moteur ne sont pas alimentées
<⊥	?	?	
-	-	-	lorsque la batterie de service est déchargée, la batterie de démarrage se décharge en lui fournissant du courant

De la même manière, comme nous sommes tenue de proposer un système d'une complexité et d'un coût raisonnables, les architectures obtenues par les combinaisons de trois interrupteurs ne sont pas retenues.

Ces raisonnements éliminent 25 architectures supplémentaires.

**CONFIDENTIEL  
RENAULT**

La méthode que nous avons utilisée pour départager les 31 architectures restantes peut être illustrée par l'exemple suivant. Considérons un réseau équipé d'une diode en T2.

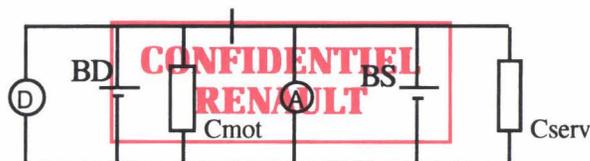


Figure n°44 : architecture à diode

A l'arrêt, si la batterie de démarrage est déchargée, la batterie de service se décharge à son tour en lui fournissant du courant. Le prochain démarrage n'est donc pas assuré. Au démarrage, la batterie de service fournit du courant. Les charges électriques subissent donc une chute de tension sensible. En roulage, en cas de dévers, la chute de tension aux bornes des charges de service est pratiquement la même qu'aujourd'hui.

Sur les points évoqués, cette architecture n'apporte donc pas d'améliorations particulières. Cependant, la diode est a priori un des interrupteurs les moins chers.

Nous récapitulerons ces remarques dans le tableau suivant :

T1	T2	T3	C1	C2	C3	C4	C5
-	<-	-	-	0	0	0	+

La généralisation de ce système de notation à chacune des configurations restantes permet de dégager cinq architectures particulièrement intéressantes.

Remarque : avant de passer à la description de ces architectures, nous noterons un des avantages de la méthode d'étude proposée, dont nous aurons l'occasion de profiter par la suite. Si la pertinence de certains critères venait à être remise en cause, il serait alors facile de pointer les seules architectures concernées et de réajuster leur notation en conséquence.

#### 3.1.2.4. Présentation des cinq architectures

Nota : ces architectures sont reproduites sur feuille A3 en annexe.

**CONFIDENTIEL  
RENAULT**

### 3.1.2.4.1. Architecture n°1



Figure n°45 : architecture à une diode

Cette architecture est composée d'un démarreur connecté à la batterie de démarrage, tout comme les charges moteur et les charges de sécurité. Une diode conduit le courant de l'alternateur à ce premier ensemble. Sont connectées à l'alternateur la batterie de service et ses charges.

#### Fonctionnement

**Démarrage** : la batterie de démarrage fournit du courant au démarreur et aux charges moteur et de sécurité. La batterie de service participe au démarrage, en ce sens qu'elle alimente aussi les charges moteur et le démarreur via la diode.

**En charge** : l'alternateur recharge les deux batteries. La tension aux bornes de la batterie de démarrage est, à première vue, plus faible qu'aux bornes de la batterie de service du fait de la chute de tension aux bornes de la diode. La charge de la batterie de démarrage est donc limitée. Selon l'emplacement des batteries, cette différence d'acceptance de charge pourrait être compensée par la chute de tension dans les câbles de la batterie de service et par l'influence de la température ambiante sur la charge des batteries.

**En cas de dévers** : la batterie de démarrage contribue à l'alimentation des charges moteur. La diode empêche cette batterie de se décharger dans le reste du réseau.

**Moteur arrêté** : si la batterie de service est déchargée, un bon niveau de tension est maintenu aux bornes de la batterie de démarrage.

#### Avantage

Le point fort de cette architecture réside dans la grande simplicité du système de gestion de charge, composé uniquement d'une diode pour éviter que la batterie de démarrage ne puisse se décharger dans le réseau de service.

#### Inconvénient

Etant donné que la batterie de service participe au démarrage, les différentes charges électriques subissent une chute de tension. Celle-ci est cependant limitée par rapport à l'architecture classique, puisque la batterie de service fournit un courant moindre. Enfin, en mode veille, si à la suite d'une panne la batterie de démarrage est déchargée, la batterie de service va se décharger dans la batterie de démarrage, rendant vain tout espoir de démarrage.

**CONFIDENTIEL  
RENAULT**

### 3.1.2.4.2. Architecture n°2

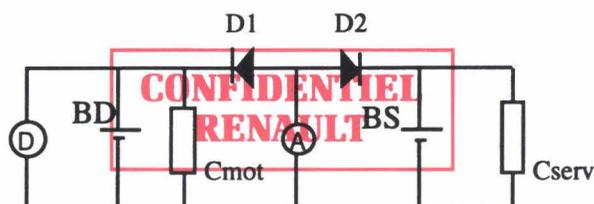


Figure n°46 : architecture à deux diodes

Par rapport à l'architecture précédente, l'architecture présentée ici comporte une diode supplémentaire passant de l'alternateur vers la batterie de service et les charges de service.

#### Fonctionnement

**Démarrage** : le fonctionnement est le même que précédemment, excepté que la batterie de service ne fournit plus de courant au démarreur et aux charges connectées à la batterie de démarrage.

**En charge** : l'alternateur recharge les deux batteries. La chute de tension aux bornes des diodes peut être compensée par une élévation du seuil de régulation de l'alternateur.

**En cas de dévers** : le fonctionnement est le même que précédemment.

**Moteur arrêté** : la diode supplémentaire évite qu'en cas de batterie de démarrage déchargée à la suite d'une panne du système, la batterie de service ne vienne s'y décharger à son tour.

#### Avantage

Cette seconde diode permet de pallier au premier inconvénient cité précédemment : vu que la batterie de service ne participe plus au démarrage, la tension aux bornes des charges du réseau reste stable.

#### Inconvénient

Tout démarrage à partir de la batterie de service reste impossible.

### 3.1.2.4.3. Architecture n°3

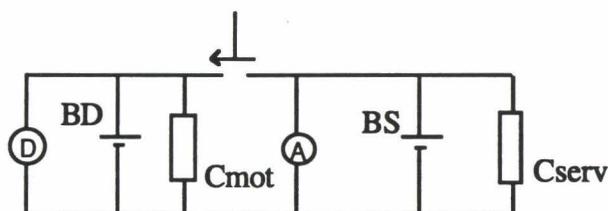


Figure n°47 : architecture à interrupteur commandable et unidirectionnel

Le démarreur, monté en parallèle avec la batterie de démarrage et les charges moteur et de sécurité est séparé de l'ensemble alternateur, batterie de service et charges de service par un interrupteur commandable et unidirectionnel.

*Fonctionnement :*

*Démarrage* : d'une manière générale, l'interrupteur est ouvert. Cependant si la batterie de démarrage venait à être déchargée à la suite d'une panne du système, l'interrupteur serait fermé pour permettre éventuellement d'alimenter le démarreur à partir de la batterie de service.

*Charge et décharge* : l'interrupteur est fermé en permanence.

*Moteur arrêté* : l'interrupteur est ouvert.

*Avantage*

De même que pour la solution précédente, la tension aux bornes des charges de service est plus stable lors du démarrage que dans la solution n°1. De plus, en mode veille, si la batterie de démarrage venait à la suite d'une panne à être déchargée, la fermeture de l'interrupteur permettrait de connecter le démarreur à la batterie de service et de tenter ainsi un démarrage.

*Inconvénient*

Le coût de l'interrupteur, type transistor, nécessaire ici est, a priori, plus élevé que les diodes proposées précédemment.

D'une manière générale, ces trois architectures sont extrêmement simples. Elles permettent d'aborder les réseaux duaux à moindre coût. Cependant, en cas de dévers, la batterie de démarrage est sollicitée pour fournir du courant aux charges moteur et de sécurité, ce qui peut l'amener à se décharger et mettre ainsi en péril le démarrage suivant. Par ailleurs, les risques de surcharge des batteries et, en particulier de la batterie de démarrage ne sont pas traités.

Le pilotage des systèmes de gestion de charge équipant les architectures suivantes nécessite de connaître l'état de charge de la batterie de démarrage, qui pourra se ramener à une mesure de la tension aux bornes des batteries.

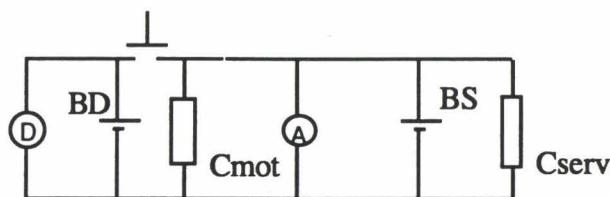
3.1.2.4.4. Architecture n°4

Figure n°48 : architecture à un interrupteur de type relais

Le démarreur est connecté à la batterie de démarrage. Ce premier ensemble est relié au reste du réseau via un interrupteur de type relais, c'est-à-dire commandable et bidirectionnel.

Plusieurs stratégies de pilotage sont envisageables.

### Fonctionnement

**Démarrage** : d'une manière générale, l'interrupteur est ouvert pendant la phase de démarrage. Si l'une des deux batteries est déchargée, l'interrupteur est fermé pour permettre à la batterie de démarrage d'alimenter les charges moteur.

**En charge** : l'interrupteur est fermé pour charger la batterie de démarrage. Une fois que l'état de charge de cette batterie a atteint un niveau largement suffisant pour assurer le démarrage suivant, l'interrupteur peut être ouvert.

**En cas de dévers**, deux solutions :

- 1) lorsque la batterie de service débite du courant, l'interrupteur se ferme, de telle sorte que, tant que son état de charge ne descend pas sous une valeur prédéterminée, la batterie de démarrage vienne soutenir la batterie de service. Cette valeur est calculée au plus juste de manière à ce que le démarrage suivant soit assuré,
- 2) l'interrupteur est ouvert, garantissant un état de charge maximal aux bornes de la batterie de démarrage.

**Moteur arrêté** : l'interrupteur est ouvert pour préserver l'état de charge de la batterie.

### Avantage

Les chutes de tension sont minimisées dans toutes les phases de fonctionnement. En particulier, en phase de démarrage, lorsque les batteries sont correctement chargées, les charges moteur sont séparées de la batterie de démarrage et ne subissent donc pas les variations de tension. En cas de dévers, avec la solution 1, comme la batterie de démarrage est autorisée à soutenir la batterie de service tant que son état de charge reste d'un niveau suffisant, la tension est plus élevée. Enfin, lorsque la batterie de démarrage est chargée, l'interrupteur s'ouvre permettant ainsi de limiter les risques de surcharge et de minimiser les dissipations de puissance inutiles.

### Inconvénient

Au démarrage, lorsque l'état de charge de la batterie de service est faible, l'interrupteur est fermé et la batterie de démarrage alimente toutes les charges électriques branchées, y compris celles qui ne sont pas forcément nécessaires au démarrage.

#### 3.1.2.4.5. Architecture n°5

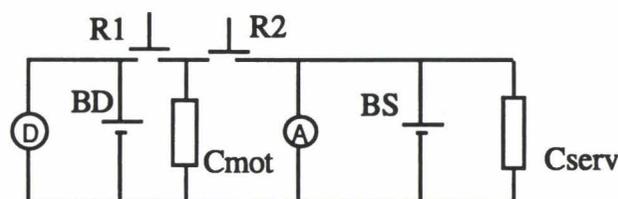


Figure n°49 : architecture à deux interrupteurs de type relais

La batterie de démarrage, montée en parallèle avec le démarreur, est connectée aux charges moteur via un interrupteur R1. Ces charges sont aussi connectées au reste du réseau par un second interrupteur R2.

### *Fonctionnement*

**Démarrage** : en règle générale, l'interrupteur R1 est ouvert et R2 fermé. Lorsque la batterie de service est déchargée, cette combinaison est inversée.

**Charge** : les deux interrupteurs sont fermés. Lorsque la batterie de démarrage atteint un niveau d'état de charge largement suffisant pour assurer le prochain démarrage, l'interrupteur R1 peut être ouvert.

*En cas de dévers*, deux solutions :

- 1) lorsque la batterie de service fournit du courant, l'interrupteur R1 se ferme et l'interrupteur R2 s'ouvre, tant que l'état de charge de la batterie de démarrage ne descend pas sous un seuil prédéterminé assurant le prochain démarrage. Une fois ce seuil atteint, l'état des interrupteurs s'inverse.

- 2) l'interrupteur R1 est ouvert pour isoler la batterie de démarrage et lui garantir un état de charge maximal. L'interrupteur R2 est fermé.

**Moteur arrêté** : l'interrupteur R1 est ouvert pour préserver l'état de charge de la batterie et R2 est fermé pour assurer l'alimentation des charges moteur.

### *Avantage*

Cette architecture apporte une solution à l'inconvénient du cas précédent. Quand le réseau est en dévers, la batterie de démarrage n'alimente que les charges moteur et de sécurité — tant qu'elle reste suffisamment chargée pour assurer un prochain démarrage. Elle fournit donc un courant limité et la tension à ses bornes est plus élevée. La qualité de l'environnement électrique des charges moteur et de sécurité est donc meilleure. De même, en cas de démarrage avec la batterie de service déchargée, la batterie n'alimente que les charges moteur et de sécurité et ne fournit pas de courant au reste du réseau.

### *Inconvénient*

Un interrupteur supplémentaire et une stratégie de pilotage complexe sont nécessaires.

Remarque: dans tous les cas, une élévation du seuil de tension du régulateur peut être envisagée selon l'emplacement des batteries. Elle servirait à compenser :

- la chute de tension aux bornes des interrupteurs,
- la chute de tension dans les câbles (non négligeable si la batterie est placée dans le coffre),
- la différence d'acceptance de charge des batteries due aux différences de température ambiante, entre le coffre, l'habitacle et le compartiment moteur.

#### 3.1.2.5. Comparaison des résultats avec les architectures présentées dans l'état de l'art

Nous retrouvons certaines architectures et stratégies proposées dans l'état de l'art.

Les architectures 1 et 2 sont décrites dans la publication de CEAC et l'architecture 3 a été proposée par cet équipementier lors de la réunion "batterie P5" avec un relais comme interrupteur.

Or tant qu'à placer un relais, l'architecture 4 présente plus d'intérêts et fait l'objet de deux brevets :

- brevet "3 poles battery switches" : la commande de l'interrupteur pendant le roulage s'effectue selon un hystérésis ; lorsque la tension du réseau est supérieure à une valeur seuil, le relais se ferme puis s'ouvre lorsque la tension passe sous un seuil inférieur au précédent ; selon cette dernière valeur, la batterie de démarrage assiste ou non la batterie de service lorsque le réseau est en dévers ; les deux types de stratégie sont donc décrits ici ;
- brevet "Zwei batteriensystem" : ce brevet propose une stratégie différente au démarrage pendant lequel l'interrupteur reste ouvert, même si la batterie de service est déchargée ; en cas de dévers, l'interrupteur est ouvert.

CEAC, dans sa présentation à la réunion batterie P5, reprend aussi cette architecture et cette stratégie. Il est proposé, par ailleurs, de fermer en permanence l'interrupteur pendant le démarrage, de telle manière que la batterie de service participe au démarrage. Ce pilotage permet, selon l'équipementier, de concevoir une batterie de démarrage de plus petite taille sans augmenter celle de la batterie de service. Nous n'avons pas, dans un premier temps, retenu ce mode de fonctionnement puisqu'il induit une chute de tension sur les charges électriques pendant le démarrage, contraire au critère C2.

Nous avons de la même manière étudié les autres architectures décrites dans l'état de l'art et en particulier, présentées par CEAC à la réunion batterie P5. Elles se ramènent aux architectures et stratégies déjà décrites, qui ont d'ailleurs fait l'objet d'un brevet [62].

*Cinq architectures ont retenu notre attention. Les deux premières, équipées de diodes, présentent l'avantage de ne pas nécessiter d'électronique de commande. La troisième est constituée d'un interrupteur de type transistor dont le pilotage reste simple. Les deux dernières architectures comprennent des interrupteurs de type relais et offrent, si ce n'est leur coût, de meilleures prestations par rapport aux critères définis.*

*De plus, nous retiendrons que deux types de stratégie sont à envisager pour piloter les interrupteurs commandables des dernières architectures. Lorsque le réseau est en dévers, si la priorité est donnée à la conservation d'un état de charge maximal des batteries, l'interrupteur permettant d'isoler la batterie de démarrage est ouvert. Si la priorité est à la stabilité de la tension sur le réseau de bord, cet interrupteur est fermé tant que l'état de charge de la batterie de démarrage ne passe pas en deçà d'un seuil garantissant le prochain démarrage. Nous nommerons ces deux stratégies "priorité état de charge" et "priorité stabilité de la tension".*

*Plusieurs de ces architectures ont été présentées dans l'état de l'art, où était de plus proposée une troisième stratégie consistant à faire participer la batterie de service au démarrage. Cette solution pourrait conduire à diminuer la taille de la batterie de démarrage mais dégrade la stabilité de la tension durant le démarrage.*

*Des résultats de simulations et d'essais sur véhicule vont nous permettre de préciser le fonctionnement de ces architectures.*

### 3.1.3. Résultats d'essais et simulations

#### 3.1.3.1. Etude DEEE / CEAC

##### 3.1.3.1.1. *Projet dual phase 1*

**CONFIDENTIEL  
RENAULT**

En 1992, la DEEE lançait une étude sur un réseau électrique équipé de deux batteries séparées par une diode, conjointement avec l'équipementier batterie CEAC.

Le schéma de principe retenu était le suivant :

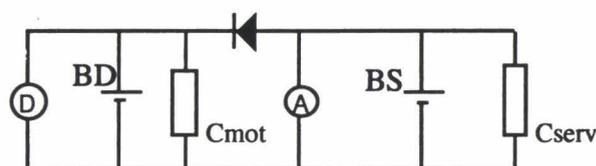


Figure n°50 : architecture à une diode

Le véhicule d'essai était équipé d'une motorisation essence. Les charges moteur comprenaient l'injection, l'allumage et la pompe à essence.

La batterie de démarrage, de type Pulsar (§ 2.2.1), était placée sous le capot.

La batterie de service était une batterie étanche à recombinaison de gaz. Cette batterie était située, selon les configurations, sous le capot ou dans le coffre.

#### *Essais de roulage*

Les essais en roulage ont montré que la batterie de démarrage se rechargeait difficilement. Lorsque la température de l'alternateur est élevée, la tension du régulateur est faible. La chute de tension aux bornes de la diode (0,6 V) conduit alors à une tension aux bornes de la batterie de démarrage insuffisante (13 V pour une température alternateur de 100 °C).

La batterie de service se recharge correctement. Néanmoins, il apparaît que l'état de charge de la batterie de service placée dans le coffre est inférieur de cinq points en fin de parcours à celui d'une batterie de service placée sous capot.

#### *Essais de démarrage*

La participation de la batterie de service au démarrage varie, selon l'état de charge des batteries, entre 5 et 50% du courant total (charges électriques + démarreur).

La tension moyenne aux bornes de la batterie de service chute jusqu'à 9,39 V pour des états de charge de la batterie de démarrage et de service égaux à 50% et 0% respectivement. La tension minimum (rotor du démarreur bloqué) est, dans ce cas, égale à 7,75 V.

La tension moyenne aux bornes de la batterie de démarrage et donc des charges moteur atteint, dans les mêmes conditions, 8,32 V et la tension minimum chute à 5,91 V, soit en dessous du seuil de tension fixé par le cahier des charges [23] à 7 V.

Lorsque la batterie est placée sous capot, sa contribution au démarrage est similaire. La tension aux bornes des charges est cependant plus élevée.

### *Essais d'acceptance de charge*

L'acceptance de charge de la batterie de démarrage est mauvaise, du fait de la faible tension à ses bornes lorsque la température sous capot est élevée. La batterie de démarrage, initialement chargée à 50% remonte à 70-75% après une heure de charge à 25°C et à seulement 56% à 0°C.

### *Analyse des résultats*

La batterie de service a de fortes chances d'être placée dans le coffre ou l'habitacle. La tension de consigne du régulateur pourrait dans ce cas être augmentée pour compenser, d'un côté la chute de tension aux bornes de la diode et de l'autre la longueur de câble et la différence de température (significative après une heure de roulage).

*Outre les qualités et les défauts intrinsèques de l'architecture à diode, ces essais nous permettent d'identifier des difficultés d'acceptance de charge des batteries qui pourraient être résolues par une élévation de la tension de consigne du régulateur.*

#### 3.1.3.1.2. *Projet de chauffage électrique du catalyseur*

Cette étude ne concerne pas directement notre application, étant donné que dans l'architecture à deux batteries étudiée, l'une est dédiée à l'alimentation du chauffage catalytique (EHC pour Electrically Heated Catalyst) et l'autre au fonctionnement du reste du réseau, comme la batterie actuelle. La batterie EHC est placée dans le coffre et séparée de la seconde batterie par un relais.

L'analyse des résultats de cette étude met en évidence les points suivants :

- lorsque le relais est fermé, la tension aux bornes de la batterie EHC est inférieure de 0,1 à 0,3 V à la tension aux bornes de la batterie placée sous capot. Cet écart est dû à la chute de tension dans le câble de la batterie EHC, l'intensité de recharge de cette batterie étant élevée (50 A environ). De plus, la tension de régulation de l'alternateur étant faible à haute température, la tension aux bornes de la batterie EHC n'est pas toujours suffisante pour assurer une bonne recharge. Notamment, une batterie faiblement chargée (donc de résistance interne supérieure) n'a pas le temps sur un parcours urbain de 2h30 de retrouver un état de charge élevé,
- lors de la fermeture du relais, l'appel de courant se situe entre 50 et 70 A. La chute de tension induite sur le réseau de bord varie de 0,8 V à 1,2 V pendant 1 à 2 secondes correspondant au temps de réponse de l'alternateur.

*Les conclusions de cette seconde étude confirment donc les difficultés d'acceptance de charge pour la batterie placée dans le coffre et préviennent d'une perturbation sur le réseau électrique à la fermeture du relais.*

#### 3.1.3.2. *Simulations*

Si les études menées par la DEEE sur les architectures duales nous apportent un bon nombre de renseignements en ce qui concerne les architectures à diodes, nous manquons d'informations quant aux architectures à "relais", les essais réalisés à ce sujet portant sur une batterie dédiée au

chauffage du pot catalytique. Pour pallier nos lacunes, nous nous sommes intéressée un peu plus en détail à ce type d'architecture et nous avons cherché à comparer le fonctionnement des architectures 4 et 5 selon les stratégies proposées.

Nous sommes partie des schémas généraux suivants

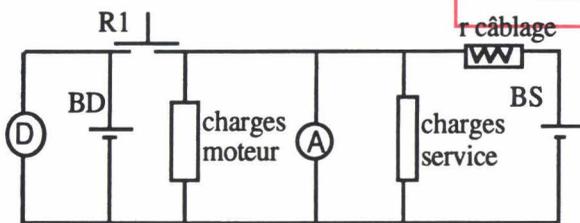


Figure n°51 : architecture 4

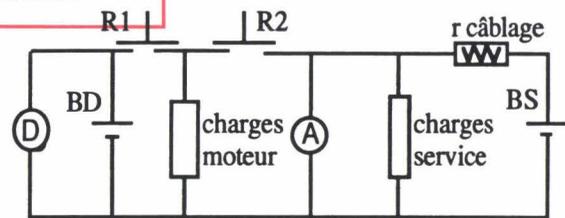


Figure n°52 : architecture 5

Nota : ces schémas sont représentés sur feuille A3 en annexe.

La batterie de démarrage est séparée des charges moteur par un relais R1. De plus, dans l'architecture 5, un relais R2 sépare les charges moteur du reste du réseau électrique.

Cette étude porte sur une X54 (Safrane), équipée d'un six cylindres essence (Z7X). Les charges moteur comprennent l'injection, le module de puissance de l'allumage, la pompe à essence et la sonde  $\lambda$ , soit une dizaine d'ampères en permanence. Le démarreur consomme 250 A pendant 10 s. Nous partons du principe que les charges de service représentent un courant de 50 A.

La batterie de service est placée dans le coffre et la résistance de câblage représente un câble de section  $16 \text{ mm}^2$  sur une longueur de 5 m (soit  $5 \text{ m}\Omega$ ). Cette valeur est en pratique un peu faible car nous ne prenons pas en compte ici les connexions et raccordements. D'après le bureau d'étude câblage, une valeur plus réaliste, de l'ordre de  $10 \text{ m}\Omega$ , sera à considérer pour la simulation d'un cas concret.

### 3.1.3.2.1. Démarrage

#### *Architecture 4*

Lorsque les deux batteries sont correctement chargées, le relais R1 est ouvert. Nous avons alors :

$$IBD = I_{\text{démarreur}} = 250 \text{ A}$$

$$IBS = I_{\text{charges moteur}} + I_{\text{charges service}} = 60 \text{ A}$$

$$IR1 = 0 \text{ A}$$

Si la batterie de service est suffisamment déchargée pour ne plus pouvoir assurer l'alimentation des charges moteur, R1 est fermé. Nous avons alors :

$$IBD = I_{\text{démarreur}} + I_{\text{charges moteur}} + I_{\text{charges service}} = 310 \text{ A}$$

$$IR1 = I_{\text{charges moteur}} + I_{\text{charges service}} = 60 \text{ A}$$

La résistance de la batterie de service étant d'autant plus élevée que la batterie est déchargée, celle-ci n'absorbe qu'un très faible courant (1 A selon CEAC).

$$IBS = 1 \text{ A}$$

La batterie de démarrage fournit donc du courant aux charges de service enclenchées (feux, ventilation...).

**CONFIDENTIEL**  
**RENAULT**

#### *Architecture 5*

Le deuxième relais R2 de l'architecture 5 permet d'éviter le dernier cas envisagé.

Lorsque les deux batteries sont chargées, le relais R1 est ouvert et le relais R2 est fermé. Nous retrouvons la configuration précédente :

$$IBD = 250 \text{ A}$$

$$IBS = 60 \text{ A}$$

$$IR1 = 0 \text{ A}$$

$$IR2 = I_{\text{charges moteur}} = 10 \text{ A}$$

Si la batterie de service est déchargée, le relais R1 est fermé et le relais R2 ouvert, de telle manière que la batterie de démarrage ne vienne pas alimenter que les charges moteur. Nous aurons donc :

$$IBD = 260 \text{ A}$$

$$IBS = 0 \text{ A}$$

$$IR1 = 10 \text{ A}$$

$$IR2 = 0 \text{ A}$$

Les charges de service enclenchées ne sont, dans ce cas, pratiquement pas alimentées pendant le démarrage.

Prenons maintenant le cas où la batterie de démarrage est déchargée à la suite d'un défaut de fonctionnement. La stratégie de pilotage peut consister à autoriser la fermeture des relais pour permettre à la batterie de service de fournir du courant au démarreur (bien qu'elle ne soit pas dimensionnée pour ce cas). Sous l'hypothèse que cette batterie soit capable de fournir les 310 A nécessaires (à la résistance de câblage près), nous aurons :

$$IBS = 310 \text{ A}$$

$$IBD = 1 \text{ A}$$

$$IR1 = 250 \text{ A}$$

$$IR2 = 260 \text{ A}$$

La prise en compte de ce cas est donc a priori contraignante pour le relais qui devrait pouvoir passer 250 à 300 A au lieu d'une centaine d'ampères (courant de charge).

#### 3.1.3.2.2. Roulage

**CONFIDENTIEL**  
**RENAULT**

Deux cas sont à considérer selon que l'alternateur peut ou non fournir suffisamment de courant pour recharger les deux batteries. Dans un cas comme dans l'autre, le courant absorbé ou

éventuellement fourni par les batteries dépend, entre autres, de l'acceptance de charge des batteries. Nous traiterons donc ces cas par simulation.

La première difficulté réside dans le modèle batterie utilisé. Aujourd'hui n'est disponible qu'un modèle de comportement des batteries hybrides (plomb - calcium - antimoine) de conception classique alors que nos batteries sont des batteries étanches ou des batteries de démarrage optimisées. Etant donné que nous cherchons à dégager des principes de fonctionnement généraux, nous nous appuyerons sur les modèles existants, consciente que l'acceptance de charge des batteries, ainsi que leur caractéristique de décharge seront certainement inexacts. L'article [58] nous engage à remplacer la batterie aujourd'hui montée sur le véhicule (bac L3) par deux petites batteries (bac L1).

Nous nous basons sur le cycle de vitesse véhicule ECE 15-0A et afin de bien mettre en évidence les fonctionnements en charge et en dévers, nous prendrons les profils de consommation électriques représentés figure n°53 :

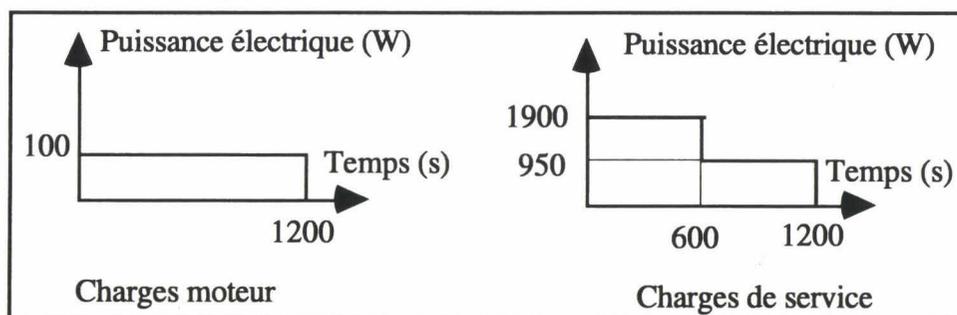


Figure n°53 : profils de consommation des charges moteur et des charges de service

Les relevés sur véhicule réalisés dans le cadre de l'étude sur le chauffage du pot catalytique par la DEEE nous amènent à faire l'hypothèse que la température des batteries n'évolue quasiment pas sur les vingt minutes du cycle ECE.

#### Architecture 4

Nous avons vu que deux stratégies sont envisageables en cas de dévers :

- S1 : le relais R1 est ouvert pour garantir un état de charge maximal sur la batterie de démarrage,
- S2 : le relais R1 est fermé tant que l'état de charge de la batterie de démarrage ne descend pas sous un seuil établi (pour l'exemple, 85 %).

#### Comparaison des stratégies

L'état de charge des batteries après le démarrage est fixé à 90%. Comparons l'évolution des différents paramètres pour les deux stratégies (figure n°54).

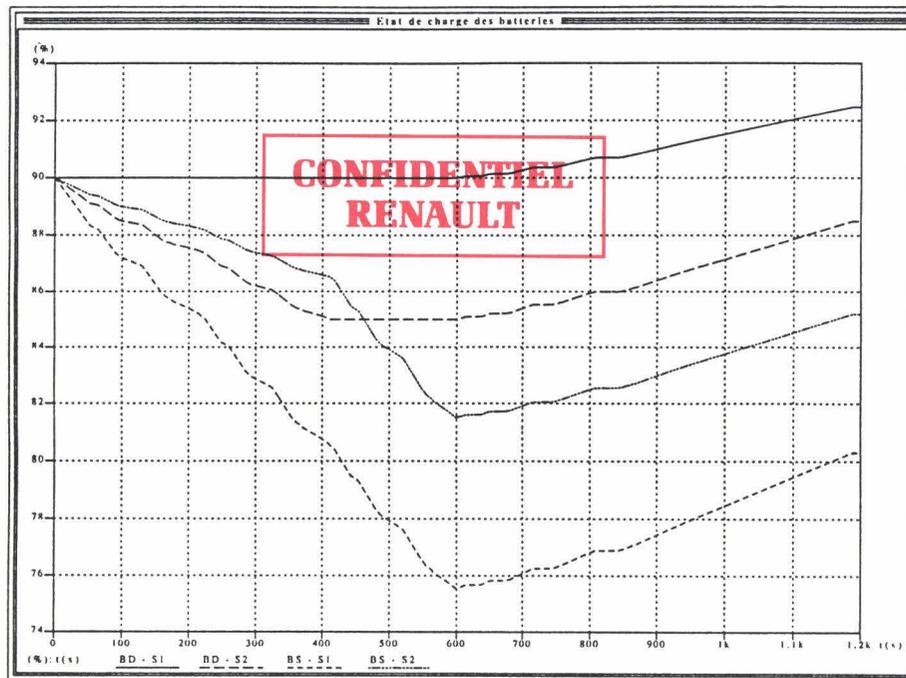


Figure n°54 : état de charge des batteries de démarrage et de service selon les stratégies 1 et 2, les batteries étant initialement chargées à 90%

Stratégie 1 : pendant les 600 premières secondes, le réseau est en dévers. La batterie de service se décharge en fournissant du courant. L'interrupteur est ouvert, l'état de charge de la batterie de démarrage reste constant. Lorsque cette phase de dévers cesse, l'interrupteur se ferme et les deux batteries se rechargent.

Stratégie 2 : pendant le dévers, l'interrupteur est fermé jusqu'à ce que l'état de charge de la batterie de démarrage atteigne 85 %. La batterie de service, placée dans le coffre, fournit moins de courant et se décharge donc moins vite. Lorsque l'interrupteur se ferme (aux environs de 400 s), la batterie de service fournit seule le courant nécessaire et se décharge alors plus rapidement. A  $t = 600$  s, le dévers prend fin et l'interrupteur est fermé de manière à recharger les deux batteries.

**CONFIDENTIEL  
RENAULT**

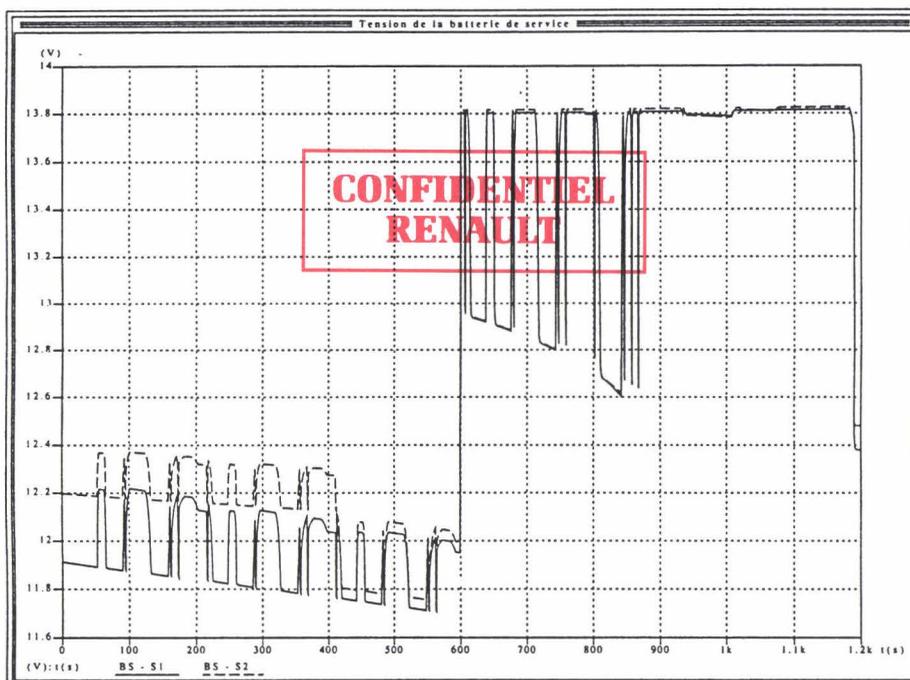


Figure n°55 : tension de la batterie de service selon les stratégies 1 et 2, les batteries étant initialement chargées à 90%

La tension aux bornes des charges du réseau électrique en stratégie 2 (figure n°55) est supérieure à ce qu'elle est en stratégie 1 (12,2 V au lieu de 11,9 V) tant que l'interrupteur est fermé.

L'exemple choisi n'est pas représentatif du cas réel, en ce sens que le bilan électrique sur le cycle 15-0A n'est pas équilibré ; l'état de charge des batteries en fin de trajet devrait être au moins égal à l'état de charge initial. Cependant il met en évidence l'intérêt de la stratégie 2 par rapport à la stratégie 1: si nous acceptons que l'état de charge de la batterie de démarrage puisse descendre jusqu'à 85 %, la tension du réseau est plus élevée tant que la batterie de démarrage soutient la batterie de service, c'est-à-dire dans cet exemple pendant les 400 premières secondes. Ceci pourrait être tout à fait avantageux pour des organes fonctionnant après le démarrage sur une courte durée (comme les charges électriques de dépollution) et dont l'efficacité serait proportionnelle à la tension d'alimentation.

#### *Influence de l'état de charge de la batterie de démarrage*

Considérons que les états de charge des batteries après le démarrage sont les suivants :

- batterie de démarrage : 60%
- batterie de service : 90%

Lorsque l'état de charge de la batterie de démarrage est initialement inférieur au seuil d'ouverture de l'interrupteur, les stratégies 1 et 2 se confondent, puisque l'interrupteur reste ouvert pendant le dévers (figure n°56).

**CONFIDENTIEL  
RENAULT**

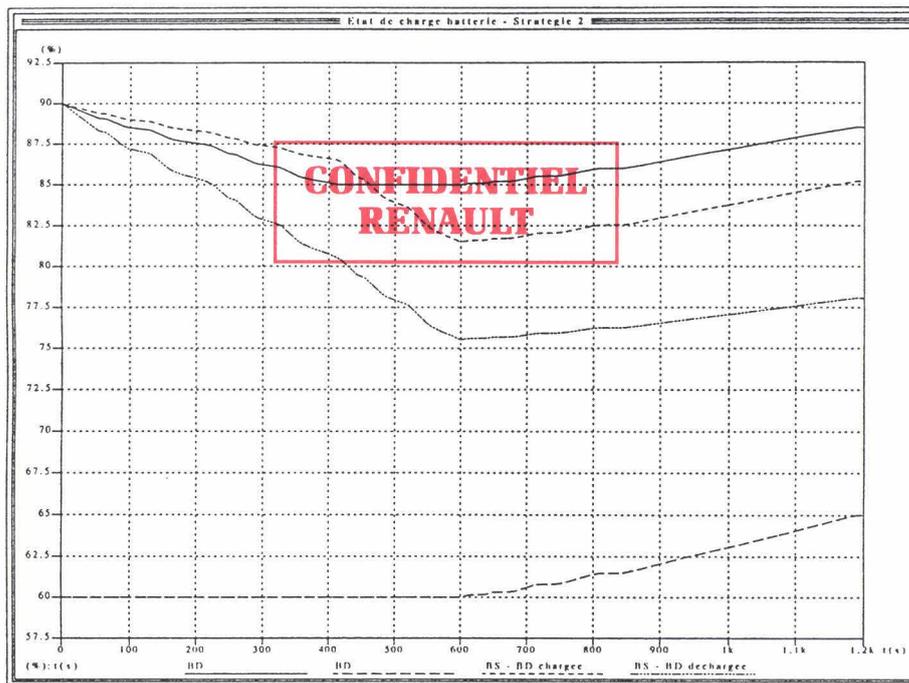


Figure n°56 : état de charge des batteries de démarrage et de service selon que la batterie de démarrage est initialement chargée à 90% ou à 60%

La batterie de service fournit plus de courant que lorsque les batteries sont initialement chargées et se décharge plus vite.

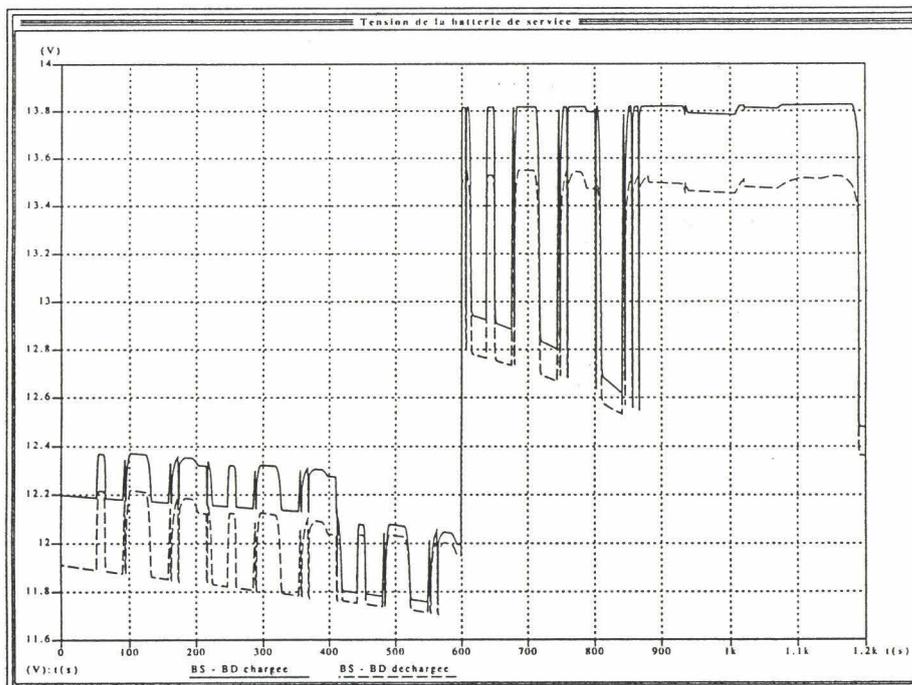


Figure n°57 : tension de la batterie de service selon que la batterie de démarrage est initialement chargée à 90% ou à 60%

La tension du réseau est plus faible en dévers et en charge (figure n°57). La batterie de démarrage comme la batterie de service partent d'un état de charge bas après la phase de dévers.

Elles appellent donc en charge un courant élevé que l'alternateur ne peut fournir entièrement, ce qui explique que la tension du réseau n'atteigne pas la tension du régulateur.

*Influence de l'état de charge de la batterie de service*

Considérons que les états de charge des batteries après le démarrage sont les suivants :

- batterie de démarrage : 90%
- batterie de service : 60%

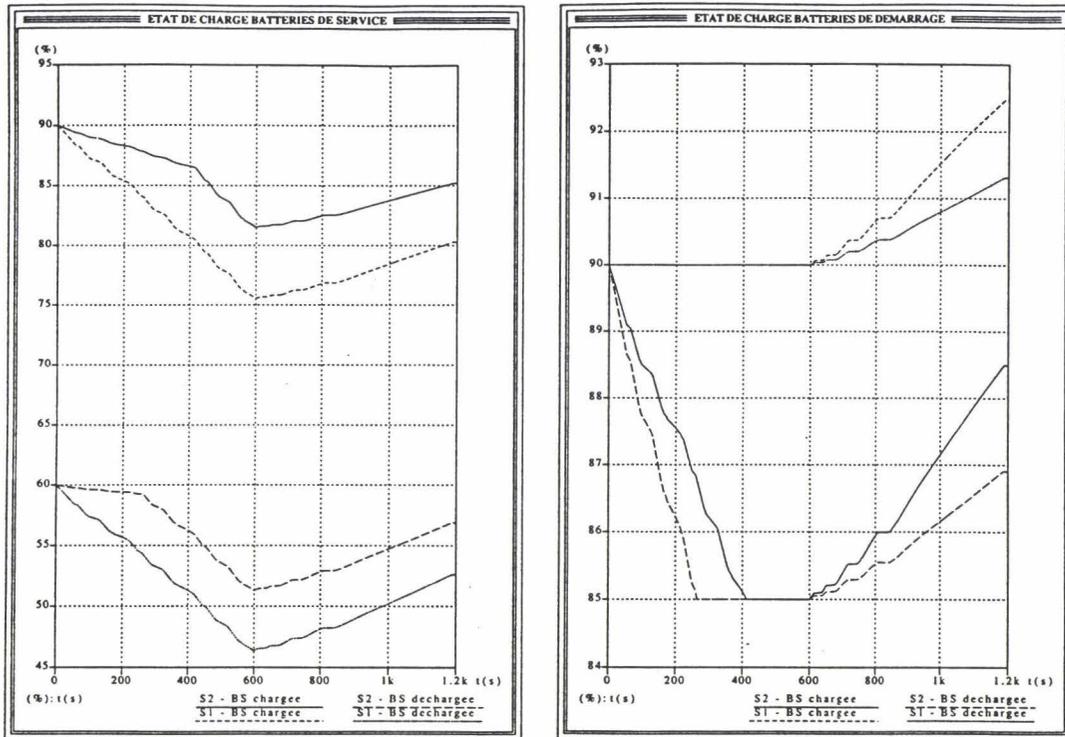


Figure n°58 : état de charge des batteries de service et de démarrage selon que la batterie de service est initialement chargée à 90% ou à 60%

D'après la figure n°58, en stratégie 1, lorsque l'état de charge initial de la batterie de service est à 60 %, la phase de dévers l'amène à 46 %. La stratégie 2 permet de limiter cette chute à 51 % car la batterie de démarrage fournit du courant sur les 250 premières secondes.

**CONFIDENTIEL  
RENAULT**

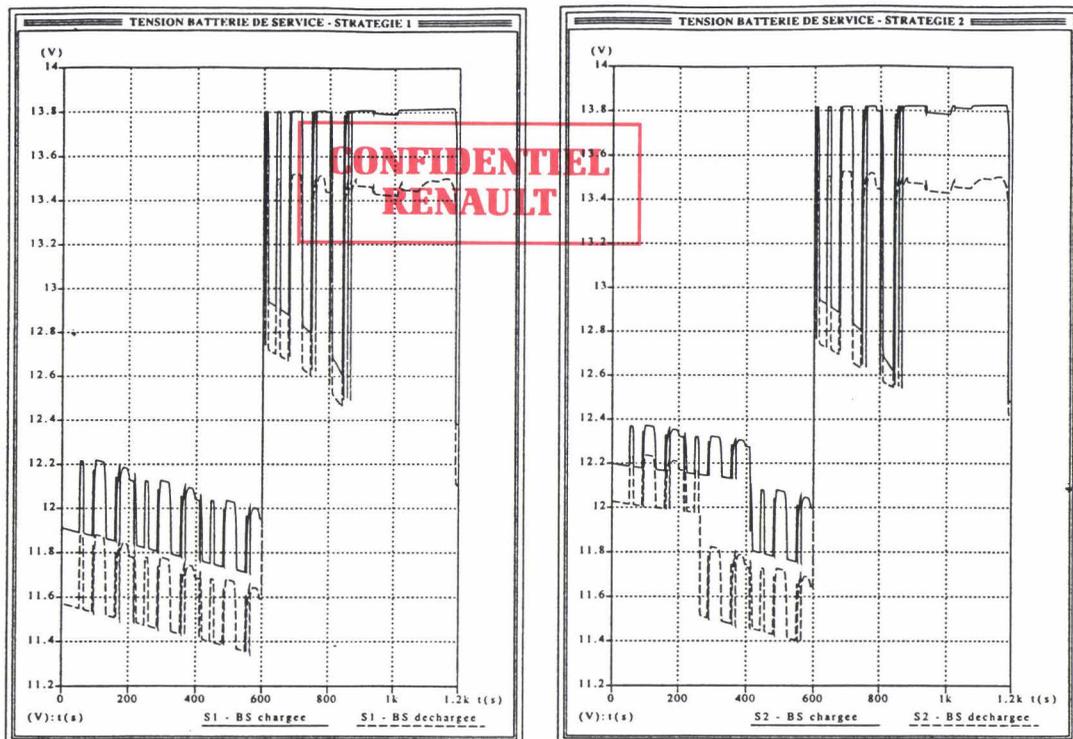


Figure n°59 : tension de la batterie de service en stratégie 1 et 2 selon que la batterie de service est initialement chargée à 90% ou à 60%

La figure n°59 montre que la tension aux bornes des batteries est plus faible que lorsque la batterie de service est chargée. Cependant la stratégie 2 permet de maintenir la tension du réseau à 12 V tant que l'interrupteur est fermé, contre 11,6 V en stratégie 1. Cette action est de plus courte durée (250 s) que lorsque la batterie de service est chargée car la batterie de démarrage est amenée à fournir plus de courant.

#### Architecture 5

En roulage, cette architecture a pour intérêt que le courant fourni par la batterie de démarrage en cas de dévers est limité au courant des charges moteur. Son état de charge diminue donc moins rapidement.

Plaçons nous dans les premières conditions (batteries chargées à 90%) et comparons l'évolution des paramètres pendant la période de dévers.

**CONFIDENTIEL  
RENAULT**

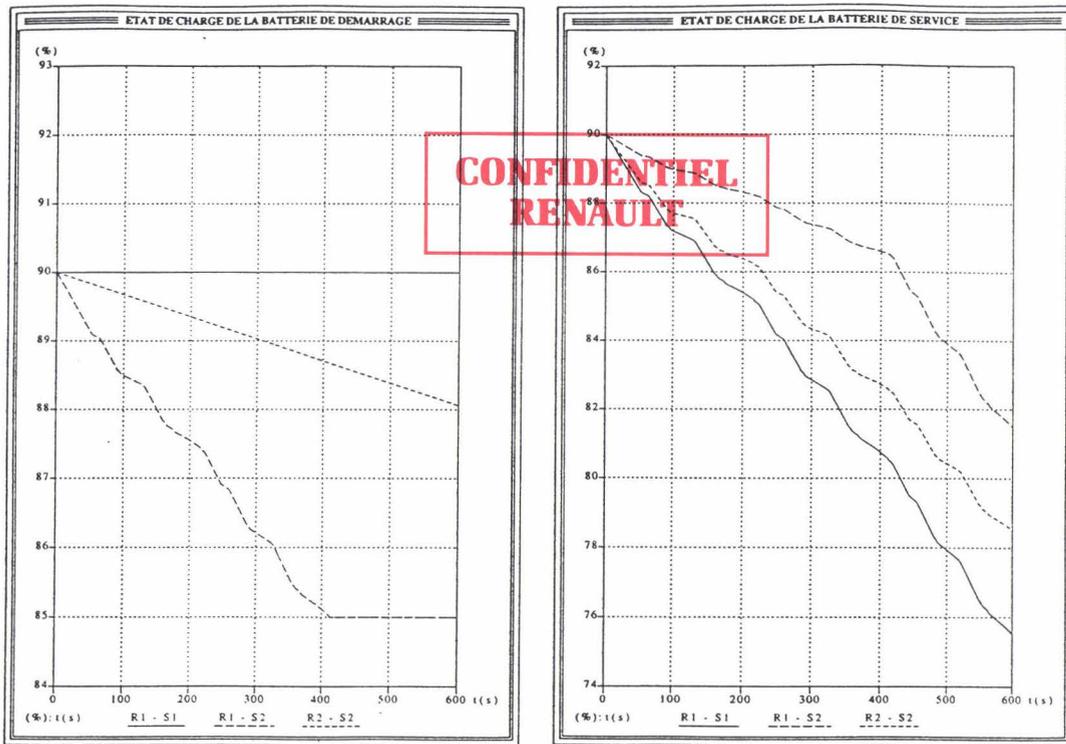


Figure n°60 : comparaison des états de charge des batteries de démarrage et de service en architecture 1, stratégies 1 et 2 et architecture 2, stratégie 2

L'état de charge de la batterie de démarrage (figure n°60) décroît moins vite que pour une architecture à un seul relais piloté selon la stratégie 2, à tel point que le seuil des 85% n'est pas atteint. Inversement, la batterie de service est amenée à fournir plus de courant et se décharge donc plus rapidement.

**CONFIDENTIEL  
RENAULT**

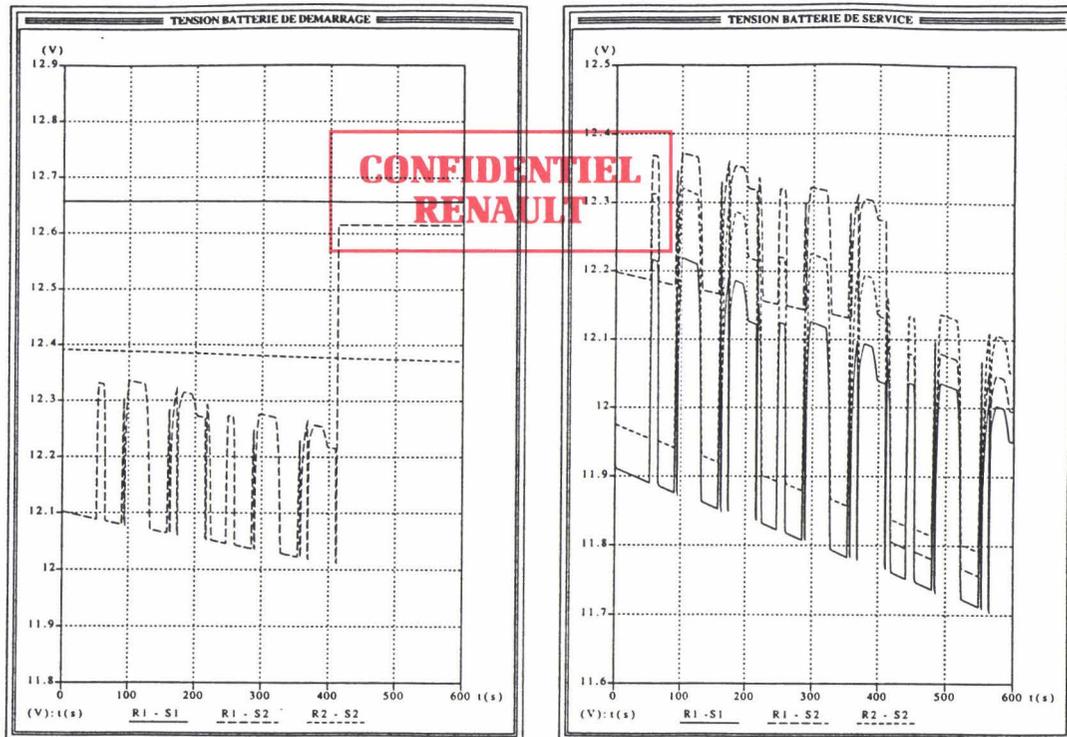


Figure n°61 : comparaison des tensions des batteries de démarrage et de service en architecture 1, stratégies 1 et 2 et architecture 2, stratégie 2

La tension aux bornes de la batterie de service (figure n°61) se rapproche donc de ce qu'elle est en stratégie 1 avec un seul relais. Cependant, la tension aux bornes de la batterie de démarrage est quasiment constante et d'un niveau intermédiaire aux niveaux obtenus avec un seul relais.

Cette seconde architecture permet d'éviter qu'au démarrage, la batterie de démarrage ne se décharge dans les charges de service lorsque la batterie de service est déchargée. En roulage, elle présente des caractéristiques intermédiaires entre les deux stratégies du relais unique envisagées car elle permet de garder un bon niveau de tension après le démarrage sur les charges moteur et ce, durant toute la phase de dévers, la tension seuil d'ouverture du relais n'étant ici pas atteinte. Ainsi pour un cas d'étude où les charges moteur représentent une consommation électrique plus importante (comme c'est le cas pour les moteur diesel), cette dernière solution restreint la décharge de la batterie de service et donc la chute de tension aux bornes des charges de service sans pour autant décharger trop rapidement la batterie de démarrage. Elle permet de plus d'épargner aux charges moteur une trop forte chute de tension. Pourraient donc être placés ici des organes ne fonctionnant qu'après le démarrage et sensibles à un niveau de tension trop faible ou à de fortes variations de tension.

Remarque : le fonctionnement de l'architecture 3 est illustré par la configuration particulière de l'architecture 5, lorsque R1 est ouvert et R2 fermé.

*Cet exercice de simulation nous permet de compléter ce premier tour d'horizon concernant les réseaux duaux. L'état de l'art et une étude consciencieuse d'un ensemble d'architectures n'aboutissent qu'à un petit nombre de configurations.*

*Nous citerons pour commencer les architectures où les batteries sont séparées par une ou deux diodes, sélectionnées pour leur simplicité et leur faible coût. Des essais antérieurs effectués sur véhicule mettent en évidence leur principal défaut : la chute de tension aux bornes de la diode dégrade l'acceptance de charge des batteries. Une élévation de la tension de consigne du régulateur pourrait néanmoins pallier à cette difficulté.*

*Dans une troisième architecture, les deux batteries sont séparées par un interrupteur de type "transistor" qui isole les branches démarrage et service lorsque le moteur est à l'arrêt ou lorsque le réseau est en dévers.*

*Les deux dernières architectures sont constituées d'un ou deux relais qui permettent d'améliorer le fonctionnement du réseau non seulement au démarrage mais aussi en phase de dévers, la batterie de démarrage pouvant être autorisée à soutenir sous certaines conditions la batterie de service. Les simulations de leur comportement montrent que des améliorations sensibles sont à attendre quant au niveau et à la stabilité de la tension aux bornes des charges électriques. Ces stratégies requièrent cependant des capteurs d'état de charge qui ne sont pas encore sur le marché.*

*Enfin, cette pré-étude met en évidence le fait que la préférence pour une de ces architectures se fera non seulement selon les contraintes à respecter (qualité de la tension, taille et masse des batteries, coût, délais de réalisation,...) mais aussi selon le niveau d'équipement électrique des véhicules cibles.*

*Une analyse approfondie de ces réseaux passe donc d'abord par une définition précise de nos besoins et des contraintes générales à satisfaire puis par l'application à un cas particulier afin d'aborder concrètement les difficultés de conception et de fabrication.*

### **3.2. Système ARDUE**

Dans toute cette première partie de l'étude, nous ne nous sommes intéressée que de très loin aux incidences que pouvaient avoir les architectures et stratégies choisies sur la conception des batteries, cherchant simplement à optimiser leur fonctionnement.

Afin de déterminer le meilleur compromis entre un bon fonctionnement du réseau électrique et un dimensionnement minimum des batteries, nous avons décidé de nous associer avec un équipementier batterie, en l'occurrence la CEAC.

Nous avons ensemble entrepris une analyse fonctionnelle des réseaux électriques duaux et rédigé un cahier des charges fonctionnel (CdCF). Nous avons parallèlement travaillé sur quelques architectures et stratégies en vue d'une éventuelle application sur la remplaçante de Safrane (projet P5). Si certaines contraintes nous ont été directement fixées par les bureaux d'étude, en particulier des exigences de coût et de délais, le cahier des charges fonctionnel appliqué au véhicule cible nous a aidé à rédiger les cahiers des charges des différents composants du système et à ne retenir que quelques architectures qui répondaient au mieux aux fonctions établies.

### 3.2.1. Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle s'inscrit dans le cadre plus général de l'analyse de la valeur, dont la démarche, au coeur de la stratégie de Qualité Totale, est guidée par quatre questions se rapportant au produit (ou processus) étudié :

- à quoi ça sert ?
- comment ça marche ?
- à quel prix ?
- comment faire mieux autrement ?

**CONFIDENTIEL  
RENAULT**

L'analyse fonctionnelle répond aux deux premières questions à travers l'analyse fonctionnelle du besoin suivie de l'analyse fonctionnelle technique. Son objectif est donc double. Il s'agit :

- d'identifier et définir précisément les attentes et exigences des clients et utilisateurs d'un produit (ou d'un processus),
- d'analyser la manière dont une solution répond à ces besoins et exigences.

Nous n'aborderons ici que le premier de ces points.

La première étape de cette démarche consiste à exprimer les besoins des utilisateurs, c'est-à-dire à définir les attentes des clients. Dans une seconde étape, toutes les phases de l'existence du produit sont énumérées, aussi bien pour les situations en utilisation qu'hors utilisation (fabrication, maintenance,...), en vue d'établir le cycle de vie du produit. La troisième étape a pour but de déterminer pour chaque phase d'utilisation quelles sont les fonctions que doit remplir le produit et de fixer pour chacune d'entre elles les critères de valeur qui permettront d'apprécier comment une solution satisfait la fonction exprimée. Les situations hors utilisation sont à étudier avec les intervenants concernés. Enfin, cette analyse fonctionnelle du besoin fait l'objet d'un cahier des charges fonctionnel (CdCF) qui rassemble les informations des étapes précédentes.

Pour mener cette analyse et rédiger le CdCF, nous avons monté un groupe de travail auquel se sont jointes la CEAC et la DEEE.

Nous ne rentrerons pas dans le détail de ce document, porté en annexe. Nous en reprendrons simplement la définition du système, l'énoncé du besoin et la liste des différentes phases de fonctionnement d'utilisation par le client.

#### 3.2.1.1. Définition du système

Nous avons défini le système ARDUE comme composé de :

- deux éléments accumulateurs d'énergie électrique,
- le régulateur de l'alternateur,
- un groupe d'interrupteurs permettant de connecter les éléments précités entre eux,
- un groupe de capteurs associés aux éléments générateurs d'énergie, aux charges électriques et au groupe d'interrupteurs, inhérents à la fonction,
- les liaisons (électriques, mécaniques) entre les différents composants, avec d'autres organes du véhicule et avec la structure du véhicule (en particulier, les fixations des batteries).

**CONFIDENTIEL  
RENAULT**

Nous n'avons pas ici cité l'alternateur, bien que nous ayons pris en compte son régulateur car les pré-études n'ont pas mis en évidence l'incidence des réseaux à deux batteries sur la conception même de l'alternateur. De plus, nous évitons par là même de dériver sur une analyse plus générale de l'ensemble du réseau électrique.

CONFIDENTIEL  
RENAULT

### 3.2.1.2. Définition du besoin

La démarche est ici guidée par quelques questions très simples.

A qui ou à quoi le produit rend-t-il service ?

Le système ARDUE rend service au conducteur.

Sur qui ou sur quoi le produit agit-il ?

Le système ARDUE agit sur le circuit électrique en particulier et sur l'architecture du véhicule en général.

Quel est le but du produit ?

- permettre au conducteur d'utiliser les équipements électriques de son véhicule sans contrainte,
- augmenter la fiabilité au démarrage.

Pourquoi le besoin existe-t-il ?

- plaintes clients sur le non-démarrage,

Qu'est-ce qui pourrait faire évoluer, voire disparaître le besoin ?

- changement de l'architecture sous capot,
- modification de la puissance électrique nécessaire,
- nouvelles technologies d'accumulateur d'énergie électrique,
- coût prohibitif
- adaptation aux véhicules hybrides, électriques et industriels.

### 3.2.1.3. Phases de fonctionnement

La seconde étape consiste à recenser les phases de l'existence du système en situation d'utilisation et hors utilisation. Nous avons répertorié quatre phases d'utilisation, qui s'identifient aux principales phases de fonctionnement du moteur : moteur à l'arrêt, lancement du moteur, moteur tournant et une phase "incident" qui correspond à une panne ou un dysfonctionnement d'un élément du système ou d'un élément extérieur au système.

Pour chacune de ces phases, nous avons exprimé les fonctions principales, fonctions pour lesquelles l'objet a été développé et les fonctions contraintes, qui découlent de l'existence du produit. Par exemple, pour la phase d'utilisation moteur arrêté, la première fonction principale

CONFIDENTIEL  
RENAULT

consiste à alimenter les charges électriques et la première fonction contrainte, à ne pas compromettre le fonctionnement ultérieur du véhicule, c'est-à-dire, entre autres, à assurer le prochain démarrage.

Toutes ces fonctions sont détaillées dans le CdCF porté en annexe.

**CONFIDENTIEL**  
**RENAULT**

*Loin de répondre à un exercice de style, la rédaction du cahier des charges fonctionnel nous a permis de clarifier la définition du système, de préciser le besoin des clients pour ce produit et surtout de mener une réflexion commune au sein de notre groupe de travail, non en terme de solutions mais de fonctions à remplir pour satisfaire conducteur et passagers. Certains points, notamment les aspects sécurité auraient très bien pu rester dans l'ombre sans le détail des différentes phases de fonctionnement, comme certaines solutions pourraient être arbitrairement éliminées car apparemment de conception plus complexe alors qu'elles répondent parfaitement aux fonctions énoncées. Cette étape, certes longue et laborieuse, permet d'aborder la phase de conception dans un environnement de qualité qui, nous l'espérons, nous évitera à l'avenir de perdre du temps dans des modifications coûteuses ou de nous égarer dans des détails techniques inutiles.*

### 3.2.2. Cadre de l'étude ARDUE

Parallèlement à cette analyse fonctionnelle, le même groupe de travail s'est attelé à la conception d'une architecture duale en vue d'une éventuelle application sur certains modèles de la W73, ce qui a quelque peu modifié les orientations techniques de l'étude.

#### 3.2.2.1. Application au programme P5

Comme nous l'expliquions en introduction, le démarrage des moteurs diesel de forte cylindrée nécessite des démarreurs de puissance électrique élevée. Par ailleurs, sur les véhicules haut de gamme, la consommation électrique est importante et les cas de dévers fréquents. Afin de fournir puissance et énergie dans l'un et l'autre cas, le montage d'une grosse batterie (bac L5) peut être envisagé. Ces diesel seront équipés d'une boîte de vitesse automatique, volumineuse elle aussi. Par des jeux de construction, le volume de l'emplacement batterie s'en trouve diminué à tel point qu'il ne peut accepter une batterie L5. La solution la plus immédiate consiste à déporter la batterie dans le coffre. Cependant la longueur de câble induit des chutes de tension aux bornes du démarreur capables d'interdire un démarrage dans des conditions difficiles (température faible, utilisation après une longue période de parking,...).

A cette première solution, la DEEE a donc décidé de confronter le système des batteries duales. Les premières conclusions quant aux pour et contre de ces deux propositions devant être prêtes pour fin 1996, nous avons pris comme véhicule cible pour la suite de notre étude la W73, nom de code de la remplaçante Safrane, équipée d'un gros moteur diesel, avec un fort niveau d'équipement électrique.

**CONFIDENTIEL**  
**RENAULT**

Pour des raisons pratiques de communication, nous avons donné un nom à ce projet : ARDUE pour ARchitectures DUales Electriques.

Etant donné que de nombreuses orientations techniques concernant la W73 ne sont pas encore figées et que les outils de simulation nous permettent d'extrapoler les résultats, il a été décidé de prendre comme véhicule d'essai une X56 (Laguna) équipée d'un moteur G8Tt (2,2l turbo diesel) avec un niveau d'équipement E4 (niveau le plus élevé).

### 3.2.2.2. Conception sous contraintes

Ce nouvel environnement a quelque peu modifié l'éclairage de l'étude et en particulier, il nous a fallu intégrer des contraintes fortes de délais et de coût.

De coût en premier lieu, car la W73, forte motorisation diesel toute équipée ne représentera pas la majorité des véhicules de cette gamme. Il n'est donc pas question que les modifications nécessaires au montage de notre système sur quelques véhicules engendrent des surcoûts sur un grand nombre. Autrement dit, nous devons concevoir un système "prêt à monter", s'adaptant très facilement à l'architecture classique.

La contrainte de délai a tout autant d'influence sur le choix de l'architecture. Revenons à nos deux types de stratégie de pilotage du système de gestion de charge : les stratégies "priorité état de charge" et "priorité stabilité de la tension". D'après CEAC, ces stratégies amènent à des conceptions différentes des batteries de démarrage ; en particulier, la seconde stratégie pousse cette batterie à fournir de l'énergie pendant le roulage, ce qui la rapproche d'une batterie de service. L'équipementier n'ayant pas à ce jour travaillé ce type d'utilisation, les délais de conception et de fabrication de prototypes s'en trouvent considérablement augmentés. De plus, côté constructeur, un certain nombre de composants électriques montés sur P5 existent déjà. Par conséquent, des bénéfices tels qu'une diminution du coût de la protection des composants sensibles aux variations de la tension, sont négligeables. Une fois n'est pas coutume, les tolérances du constructeur convergeant vers les impératifs de l'équipementier, nous nous concentrerons pour le projet ARDUE sur la stratégie "priorité à l'état de charge".

*Le véhicule d'essai de l'étude ARDUE est une Laguna 2,2l turbo diesel avec le plus haut niveau d'équipement électrique. Les résultats seront extrapolés par simulation au véhicule cible de l'étude : la W73, forte motorisation diesel. Les contraintes de coûts et de délais imposées par la DEEE nous amènent à étudier en premier lieu la stratégie qui favorise la conservation d'un état de charge maximal de la batterie de démarrage et nous poussent à concevoir un système très facilement adaptable au réseau électrique classique.*

Le planning de l'étude est porté pour information en annexe.

### **3.2.3. Sélection des architectures**

La perspective d'une application sur P5 permet de préciser les contraintes de conception et par conséquent de restreindre le nombre d'architectures proposées.

### 3.2.3.1. Modification de critères

Dans le cadre de ce projet, l'application du critère C2, "amélioration de la qualité de l'environnement électrique", se traduit par le fait qu'il ne faut pas dégrader les prestations actuelles. Comme nous l'avons dit, toute amélioration des caractéristiques ne pourra être appréciée en tant que telle puisque les principaux intéressés, les organes électriques sensibles aux variations de tension, sont déjà conçus pour supporter les chutes de tension produites sur le réseau "classique". Par conséquent, nous pouvons admettre qu'une chute de tension ait lieu, en particulier au démarrage, du moment qu'elle n'est pas supérieure à ce qu'elle est aujourd'hui.

La notation des architectures, dont nous avons décrit précédemment le principe, montre que cette modification du critère C2 ne change pas le choix des cinq architectures finales. Cependant, pour les architectures à interrupteur commandable, une seconde stratégie de pilotage pendant le démarrage est à étudier. Nous l'avons déjà évoquée ; elle consiste à fermer le relais de manière à ce que la batterie de service participe au démarrage. Les charges réseau subissent une chute de tension, moindre qu'aujourd'hui cependant puisque les deux batteries sont en parallèle.

### 3.2.3.2. Architectures écartées

Nota : ces architectures sont représentées sur feuille A3 en annexe.

#### 3.2.3.2.1. Architecture 3

L'architecture 3 est équipée d'un interrupteur de type transistor. Comme nous l'avons vu dans le chapitre sur l'élévation de la tension, l'emploi de l'électronique de puissance est encore peu développé dans l'automobile. Vu les courants à passer (entre 50 et 100 A), le prix de l'interrupteur risque donc d'être trop élevé pour une application sur P5.

#### 3.2.3.2.2. Architecture 2

L'architecture 2 est équipée de deux diodes. Celle qui est placée entre l'alternateur et la batterie de service a pour but d'interdire la participation de la batterie de service au démarrage et dans certaines configurations, d'éviter les risques de surcharge aux bornes de la batterie de service. Or, pour l'application P5, cette batterie est placée dans le coffre. La température ambiante moins élevée que sous le capot et la chute de tension dans les câbles évitent donc tout risque de surcharge.

Par ailleurs, nous avons vu que la participation de la batterie de service au démarrage n'était pas exclue. Le surcoût dû à cette seconde diode, qui devrait passer une centaine d'ampères (le courant alternateur) n'est donc pas justifié.

#### 3.2.3.2.3. Architecture 5

L'architecture 5 est équipée de deux relais. Lorsque la batterie de service est déchargée avant le démarrage, l'interrupteur R2, placé entre les charges moteur et la batterie de service est ouvert de telle manière que la batterie de démarrage se décharge uniquement dans le démarreur et les charges moteur et n'aille pas alimenter les composants annexes qui peuvent être en marche au démarrage (lunette arrière chauffante, ventilation habitacle...).

En stratégie 1, c'est là sa seule fonction. Ce rôle peut être assumé soit par un relais +APC moteur tournant (provisionné sur P5), soit par une gestion "intelligente" des charges par l'UCH (Unité Centrale Habitacle), carte électronique qui pilote un certain nombre de relais en fonction de divers paramètres. Ces solutions nous amènent donc à préférer à cette architecture, l'architecture à un seul relais avec une gestion des charges de service complémentaire (qu'il reste à définir).

Nous nous concentrerons donc sur les deux architectures les plus intéressantes pour l'application sur P5, qui sont l'architecture 1, équipée d'une diode, et l'architecture 4, équipée d'un unique relais, la gestion de certaines charges étant assurée par l'UCH ou par un relais +APC moteur tournant. Cette architecture se décline selon deux stratégies. La première autorise la participation de la batterie de service au démarrage. La seconde interdit cette participation, excepté lorsque la batterie de service n'est pas suffisamment chargée pour assurer le bon fonctionnement des charges moteur.

En charge, les deux stratégies sont de type "priorité à l'état de charge" pour les raisons déjà exposées.

#### **3.2.4. Structure des deux architectures ARDUE**

Afin de départager ces deux architectures, ainsi que les deux stratégies associées, soit, au total trois solutions, nous allons étudier leur structure et mode de fonctionnement dans les quatre phases d'utilisation client définies dans l'analyse fonctionnelle.

Nous allons, dans ce paragraphe, détailler nos schémas jusque-là assez généraux, en précisant les charges à connecter à la batterie de démarrage ou à la batterie de service et les informations qui nous sont nécessaires pour commander les relais.

##### 3.2.4.1. Branchement des organes

L'objectif est évidemment de placer le plus de charges électriques du côté de la batterie de service, pour limiter, à l'arrêt du véhicule, les risques d'une décharge de la batterie de démarrage. Cependant tant des réglementations sur la sécurité que des raisons pratiques ou encore des contraintes après-vente peuvent nous obliger à connecter certaines charges à la batterie de démarrage, pour éviter d'engendrer des incidents lorsque la batterie de service est déchargée.

Par rapport au fonctionnement actuel, la donne est effectivement quelque peu modifiée. Aujourd'hui, votre batterie à plat, vous ne démarrez pas. Avec le système ARDUE, la batterie assure l'alimentation du démarreur, quel que soit l'état de charge de la batterie de service, qui a tout loisir de se recharger lorsque l'alternateur tourne.

Le cas où la batterie de démarrage est déchargée est par contre traité différemment. Si cette batterie est déchargée au point de ne plus pouvoir alimenter les quelques charges qui lui seront connectées directement, elle ne pourra assurer le démarrage, même avec l'aide de la batterie de service. Le système ARDUE est, de toute manière, conçu de telle sorte que ce cas ne puisse

survenir qu'à la suite d'une panne du système, d'un vieillissement de la batterie et de tout autre incident qui nécessite réparation.

Notre souci se résume donc en ces termes : en cas de batterie de service déchargée, nous devons faire en sorte que le conducteur puisse démarrer en toute sécurité.

#### 3.2.4.1.1. Aspect réglementaire

Selon les normes de sécurité en vigueur, les warnings et les veilleuses doivent pouvoir fonctionner pendant le démarrage. L'emplacement de ces charges dépend de l'architecture choisie.

Pour ce qui est de l'architecture à relais, ces charges peuvent être connectées à la batterie de service. Au démarrage, lorsque celle-ci est chargée, ces charges sont alimentées. Lorsque la batterie de service est déchargée au point de ne plus pouvoir assurer leur bon fonctionnement, l'interrupteur est fermé et la batterie de démarrage prend le relais de la batterie de service.

En ce qui concerne l'architecture à diode, les veilleuses et les warnings devraient être connectées à la batterie de démarrage. Dans le cas contraire, lorsque la batterie de service est déchargée, la diode ne permet pas à la batterie de démarrage d'alimenter ces charges.

#### 3.2.4.1.2. Aspect pratique

Sur la W73, le démarreur ne peut être alimenté que si la présence de la clef dans le barillet est reconnue par un dispositif appelé transpondeur, qui capte l'entrée de la clef dans le barillet. Imaginons que ce transpondeur soit connecté à la batterie de service alors que celle-ci est déchargée à tel point que l'information "clef dans le barillet" n'est pas détectée. Si le conducteur souhaite démarrer, notre système de gestion de charge, non averti de la présence de la clef, laisse le relais ouvert alors qu'il devrait être fermé pour que la batterie de démarrage vienne alimenter les charges moteur nécessaire au démarrage. Le moteur ne démarre pas, bien que la batterie de démarrage puisse assurer le lancement du moteur.

Pour éviter cette situation désagréable, le transpondeur doit être connecté sur la batterie de démarrage.

En ce qui concerne l'architecture à diode, l'injection ainsi que le dispositif de chauffage des bougies doivent, pour les mêmes raisons, être branchés sur la batterie de démarrage.

#### 3.2.4.1.3. Aspect après-vente

Reprenons l'exemple précédent. La batterie de service est déchargée à tel point que la télécommande d'ouverture des portes ne fonctionne plus. Le conducteur déverrouille les portes et éteint l'alarme avec sa clef. Le transpondeur reconnaît la présence de la clef et le conducteur peut démarrer puisque la batterie de démarrage est chargée. Il note donc que sa télécommande ne répond plus alors que sa voiture fonctionne normalement. Résultat, il risque de courir chez son garagiste alors que sa batterie de service est simplement déchargée temporairement. Cette situation est à éviter. C'est pourquoi nous connecterons la télécommande d'ouverture des portes ainsi que les serrures électriques sur la batterie de démarrage.

Remarque : la télécommande et le transpondeur sont, dans la pratique, alimentés par l'UCH (Unité de Contrôle Habitacle) qui sera donc branchée sur la batterie de démarrage.

### 3.2.4.2. Détail des architectures

Nous pouvons dès à présent étudier la structure des deux architectures étudiées.

#### 3.2.4.2.1. Architecture à relais

Le schéma détaillé est représenté sur la figure n°62 :

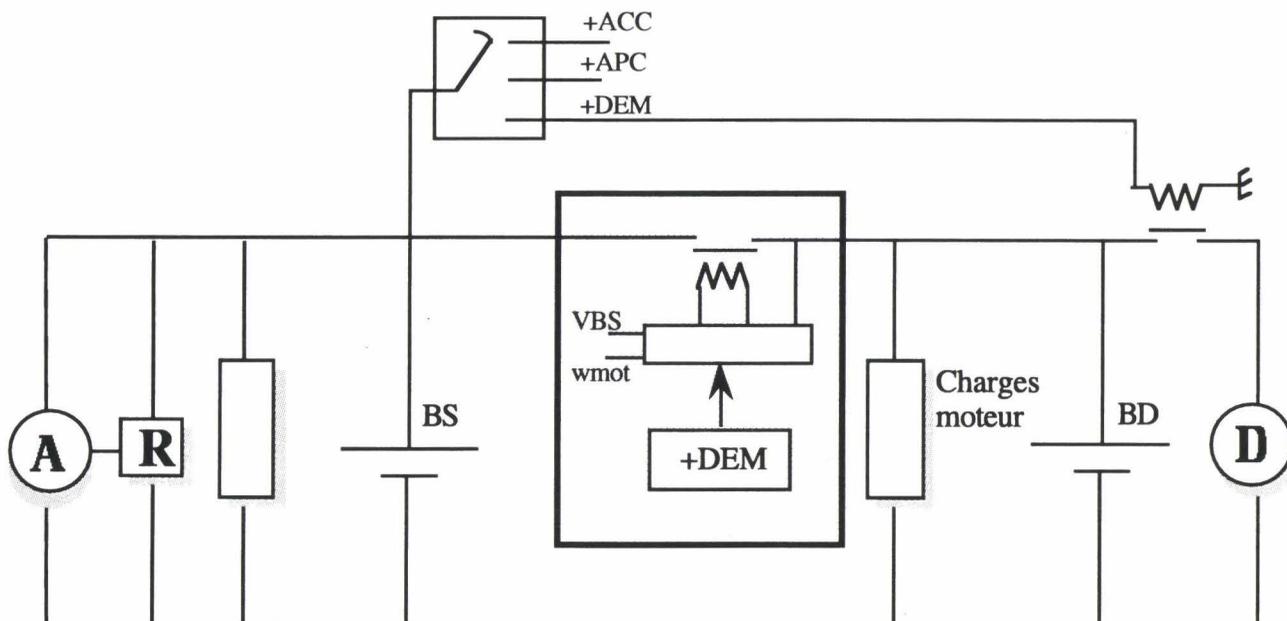


Figure n°62 : structure de l'architecture à relais

Nous avons représenté ici le barillet de la clef qui connecte, selon sa position, la batterie de service aux consommateurs branchés sur la ligne +ACC (accessoires : radio, ventilation...), +APC (après contact) et +DEM (démarreur).

Les charges moteur sont constituées de l'UCH (Unité de Contrôle Habitacle) et des serrures électriques.

Le système de gestion de charge est alimenté uniquement par la batterie de démarrage, censée être chargée la plupart du temps. Nous avons vu que, de toute façon, si elle est déchargée au point qu'elle ne puisse assurer l'alimentation des charges qui lui sont connectées, le démarrage est impossible.

Un cas particulier reste encore à étudier. Effectivement, lorsque la batterie de service est déchargée, avec une tension à ses bornes proche de zéro, la clef a beau être sur la position +APC ou +DEM, les charges connectées à ces lignes ne sont plus alimentées. Par conséquent, le démarrage ne peut avoir lieu, alors que la batterie de démarrage est chargée.

Pour remédier à cette difficulté, la solution suivante est proposée (figure n°63) :

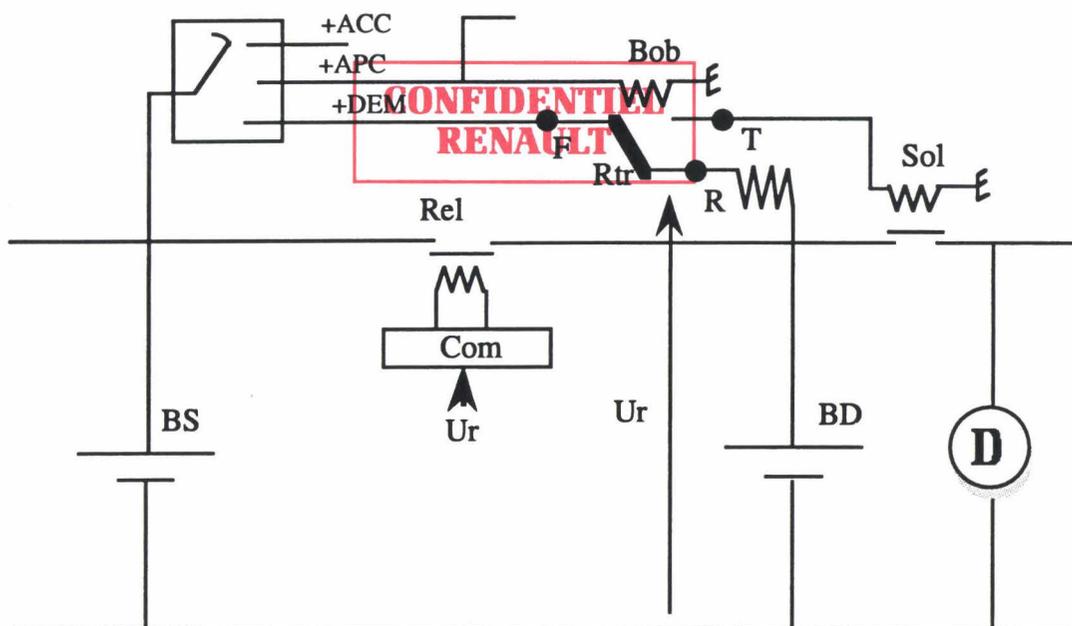


Figure n°63 : dispositif de reconnaissance de la position +DEM

Un relais "travail / repos", Rtr, est ajouté. Sa borne fixe, F, est située sur le +DEM (en sortie de barillet), la borne "travail", T, est connectée au solénoïde du démarreur et la borne "repos", R, est reliée à la borne positive de la batterie de démarrage via une résistance de valeur élevée. La bobine de relais, Bob, est sur le +APC. Au repos, ce relais connecte le +DEM à la batterie de démarrage.

Deux cas peuvent se présenter :

1) la batterie de service est suffisamment chargée pour détecter la position de la clef dans le contacteur démarreur. Lorsque la clef passe en position +APC, la bobine du relais est alimentée et le relais bascule en position "travail", connectant ainsi le solénoïde au +DEM. Lorsque la clef passe en position +DEM, le solénoïde est alimenté et connecte l'induit du démarreur à la batterie de démarrage.

2) la batterie de service n'est pas suffisamment chargée pour détecter la position de la clef. Lorsque la clef passe en position +APC, le courant passant dans la bobine du relais "travail / repos" n'est pas suffisant pour faire basculer le relais et lorsque la clef passe en position +DEM, la tension à la borne "repos" du relais passe de la tension aux bornes de la batterie de démarrage, VBD, à la tension aux bornes de la batterie de service, VBS, très faible. Ce changement de tension est détecté par le dispositif de commande du relais de séparation des deux batterie, Rel. Si ce relais est aussitôt fermé, Rtr bascule en position "travail" et le relais du démarreur se ferme alors que les charges moteur de type préchauffage n'ont pas fonctionné. Dans des conditions difficiles, le moteur peut ne pas démarrer. C'est pourquoi, après avoir détecté le changement de tension  $U_r$ , on attend que la clef quitte la position +DEM pour enclencher le relais,

en partant du principe que le conducteur tentera de démarrer une seconde fois. La position +APC sera alors détectée comme dans le cas 1, les charges moteur de type préchauffage alimentées puis le démarrage du moteur assuré.

**CONFIDENTIEL  
RENAULT**

Ce dispositif, qui permet de démarrer quel que soit l'état de charge de la batterie de service a fait l'objet d'une demande de dépôt de brevet [63].

#### 3.2.4.2.2. Architecture à diode

Les choses sont un peu différentes en ce qui concerne l'architecture à diode. Comme nous l'avons vu, aux charges connectées à la batterie de démarrage viennent s'ajouter l'injection (commande et puissance), les bougies de pré et de post-chauffage, les warnings et les veilleuses. Le schéma correspondant est le suivant :

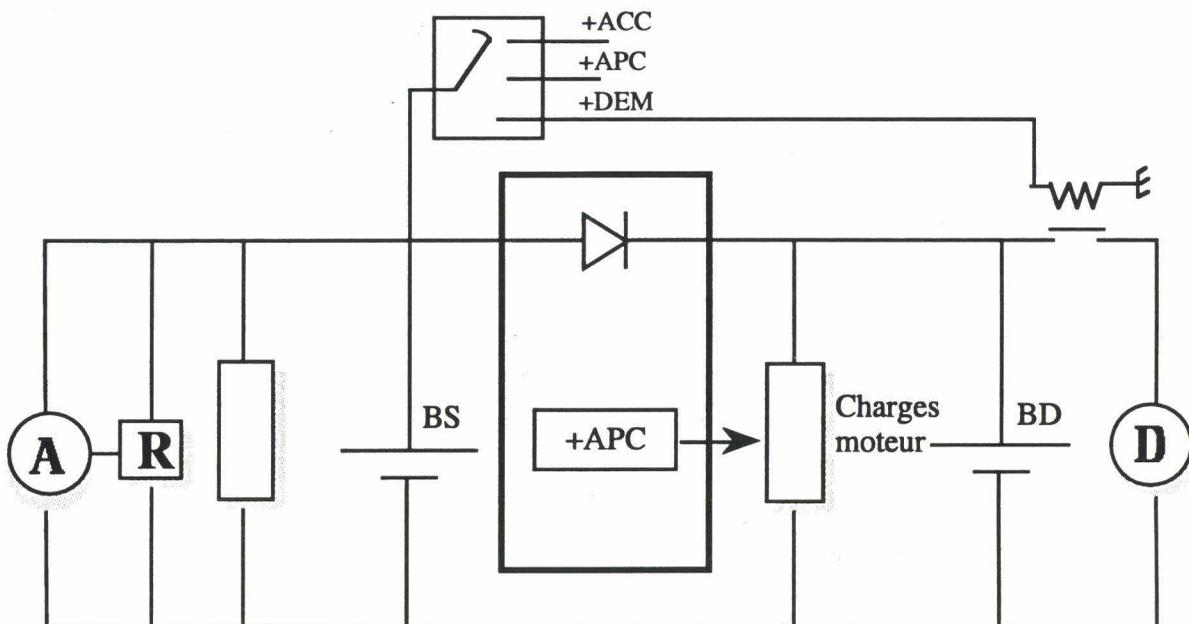


Figure n°64 : structure de l'architecture à diode

Alors que warnings et veilleuses sont directement connectés à la batterie, injecteurs et bougies de chauffage sont aujourd'hui sur la ligne +APC. Un dispositif supplémentaire est donc à prévoir pour commander l'alimentation de ces charges lorsque la clef est sur le +APC, quel que soit l'état de charge de la batterie.

#### 3.2.4.3. Premières estimations de dimensionnement

En nous appuyant sur les consommations électriques de notre véhicule d'essai, il nous est facile d'estimer les courants passant dans chaque ligne, selon les architectures et stratégies choisies.

**CONFIDENTIEL  
RENAULT**

De rapides calculs nous mènent à un courant inférieur à 150 A dans l'interrupteur, le courant à couper restant en deçà de 5 A (l'interrupteur est ouvert pour une tension de consigne telle que la

batterie absorbe ou fournit alors un faible courant). Ces estimations ont amené nos services électroniques à envisager un relais ou une diode de 150 A. Les premières informations concernant le volume et la masse de ces interrupteurs sont les suivantes :

- relais 150 A d'un volume de 70 x 40 x 80 mm pour un coût de 50 F environ pour 100 000 unités (sans le support, ni l'électronique de commande). La température de fonctionnement du relais monte jusqu'à 125°C,
- diode 200 A d'un volume de 100 x 100 x 100 mm (radiateur compris) pour un coût identique. Sa température de fonctionnement est limitée à 80°C.

Les températures de fonctionnement sont importantes à prendre en compte pour décider de l'emplacement du boîtier.

La section du câble est limitée d'un côté par le courant à passer et de l'autre par l'emplacement restreint prévu pour le passage du câble sur le véhicule.

Le dimensionnement des batteries est encore plus délicat. Un cahier des charges élaboré en interne a été fourni à CEAC pour qu'ils estiment la masse et le volume des batteries selon les différents cas de figure.

#### 3.2.4.4. Comparaison des deux architectures

Le dimensionnement des batteries et de l'électronique n'est pas le seul critère que nous ayons à prendre en compte pour départager ces deux architectures. La faculté d'adaptation du système ARDUE sur un réseau électrique classique a tout autant de poids par les économies engendrées. Plutôt que de lister les avantages et inconvénients, nous nous attacherons à décrire quelques points délicats.

La participation de la batterie de service à tous les démarrages permet, a priori, de revoir à la baisse la taille de la batterie de démarrage. Cependant, si le cahier des charges impose de démarrer dans les mêmes conditions quel que soit l'état de charge de la batterie de service, la batterie de démarrage conserve sa taille. Effectivement, elle doit, dans le cas où la batterie de service est déchargée, fournir le courant de démarrage à elle seule. Or la batterie de démarrage est dimensionnée pour les cas de démarrage à froid (-23°C). L'occurrence d'un essai de démarrage à -23°C avec une batterie de service déchargée est très faible sur la durée de vie d'un véhicule. Par conséquent, la batterie de démarrage risque d'être surdimensionnée pour répondre à une situation qui a statistiquement peu de risques de se produire.

L'avantage potentiel d'une réduction du volume et de la masse de la batterie de démarrage par la participation de la batterie de service se joue donc sur les prétentions du cahier des charges.

Sur route, à vitesse élevée, la température sous capot est basse et la tension du régulateur de l'alternateur élevée. Prenons le cas d'un réseau classique avec batterie unique. Une fois que la batterie est chargée, une forte tension à ses bornes peut provoquer des phénomènes de surcharge

néfaste à sa durée de vie. La diode, par la chute de tension qu'elle développe, évite ce phénomène. Selon que le profil d'utilisation comporte majoritairement de la ville ou de la route, la diode représente un intérêt ou un inconvénient.

**CONFIDENTIEL**

D'autres critères sont, bien sûr, à prendre en compte, comme la fiabilité des différents composants, en particulier des interrupteurs. De plus, nous devons garder à l'esprit la réalité suivante : si pour des problèmes de délais et de coût, une solution est préférée aujourd'hui et montée sur véhicule avec des dispositifs complémentaires palliant ces défauts, lorsque, dans quelques années, une seconde solution sera enfin prête ou s'avérera plus économique, il sera difficile de revenir en arrière car la première solution aura été validée sur véhicule. Par conséquent, à prestations égales, il est bon de choisir l'architecture qui présentera la plus grande souplesse d'adaptation et qui sera la plus ouverte à d'éventuelles modifications de contraintes.

*S'il est encore trop tôt pour se prononcer sur l'architecture duale la plus adaptée pour la remplaçante de la Safrane, la perspective de cette éventuelle application nous a conduit à redéfinir précisément les fonctions attendues de ce type de réseau au cours de l'analyse fonctionnelle du système.*

*Les nouvelles contraintes de délais et de coût à prendre en compte mêlées à l'assouplissement de certaines exigences ont quelque peu modifié les critères de sélection précédemment établis. Si aucune architecture n'est venue s'ajouter à la liste des cinq retenues, une nouvelle stratégie est à envisager : elle consiste à faire participer la batterie de service au démarrage et présenterait l'intérêt de pouvoir réduire la taille et le poids de la batterie de démarrage. La comparaison du comportement de ces architectures nous a permis d'écarter trois d'entre elles pour ne conserver que l'architecture à un "relais" et l'architecture à diode.*

*L'étude détaillée de leur structure montre que des dispositifs supplémentaires sont à prévoir afin d'assurer un bon fonctionnement du réseau dans toutes les conditions de charge de la batterie de service. Elle permet aussi de fixer un premier ordre de grandeur du volume et du coût des interrupteurs, cette première estimation restant à confirmer et à compléter par les caractéristiques des batteries et de l'électronique de commande des interrupteurs. D'autres critères seront aussi à prendre en compte pour le choix définitif, qui dépendra tout autant de l'ambition du cahier des charges et des orientations techniques que des qualités intrinsèques de l'architecture.*

Cette étude de cas ne doit pas nous faire oublier que des solutions différentes peuvent convenir à d'autres applications. En particulier, à plus long terme, une nouvelle technologie d'accumulateur électrique pourrait permettre de diminuer le volume et la masse des batteries.

**CONFIDENTIEL  
RENAULT**

### 3.3. Les supercondensateurs : une alternative à la batterie de démarrage ?

La batterie de démarrage d'une architecture duale est une batterie de puissance, qui, si nous exceptons sa fonction moteur arrêté, fournit un fort courant pendant un temps très court. Le développement des supercondensateurs de forte énergie permet d'envisager à terme leur emploi pour assumer cette tâche. Ces nouveaux composants, encore à l'état de prototypes pour les puissances concernées ont, de par leur structure, une forte puissance massique et une durée de vie importante. Ils présentent donc, au premier abord, quelques qualités automobiles essentielles. Ils ont d'ailleurs, ces derniers temps, fait couler beaucoup d'encre, tant au travers de publications que de brevets.

Après avoir passé en revue ces différents articles, nous détaillerons quelques calculs simples qui nous donneront une idée plus précise des performances des supercondensateurs. Nous concluons en envisageant quelles pourraient être leurs applications sur véhicule.

#### 3.3.1. Principe de fonctionnement

Les supercondensateurs ou condensateurs double couche ne sont pas constitués à proprement parler d'un isolant diélectrique, comme les condensateurs, mais de carbone actif plongé dans un électrolyte. Chaque particule de carbone se comporte comme un condensateur, une couche d'ions négatifs ou positifs se formant à sa surface.

Les principes de charge et de décharge sont illustrés par le schéma n°65 [70] :

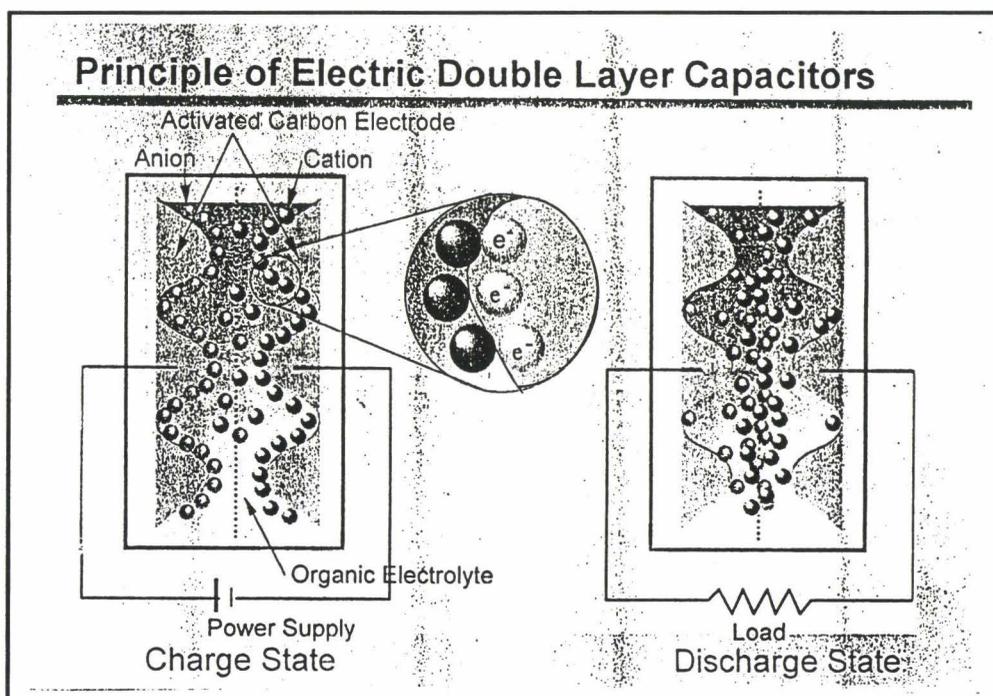


Figure n°65 : principe de fonctionnement des supercondensateurs

**CONFIDENTIEL  
RENAULT**

Les charbons actifs portent la surface des électrodes à  $1500 \text{ m}^2/\text{g}$ . La capacité de  $0,3$  à  $0,4 \text{ F/m}^2$  conduit à des capacités massiques théoriques de l'ordre de  $500 \text{ F/g}$ . En pratique, cette capacité est de  $100$  à  $200 \text{ F/g}$ .

L'énergie disponible est supérieure à celle délivrée par un condensateur et contrairement aux batteries, la charge et la décharge des supercondensateurs ne font appel à aucune réaction chimique. Elles sont parfaitement réversibles et surtout très rapides.

D'un point de vue pratique, l'ensemble des particules de carbone est séparé par une membrane et plongé dans un électrolyte d'acide sulfurique ou d'hydroxyde de potassium [66], comme représenté sur la figure n°66.

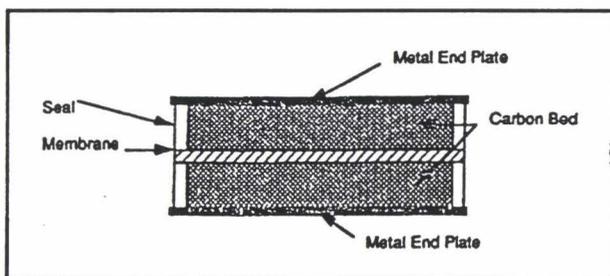


Figure n°66 : structure des supercondensateurs

### 3.3.2. Etat de l'art

La découverte du principe de fonctionnement du supercondensateur date de 1887 mais la recherche sur ses propriétés ne s'est développée qu'à partir des années 1960.

Aujourd'hui, des supercondensateurs de faible capacité sont commercialisés et destinés à l'électronique. Les supercondensateurs de capacité plus élevée (supérieure à  $100 \text{ F}$ ) font l'objet de prototypes. La société Panasonic a, par exemple, développé un supercondensateur de  $1500 \text{ F}$  fonctionnant sous  $2,3 \text{ V}$ . Il se présente sous la forme d'un cylindre de  $77 \text{ mm}$  de diamètre et de  $145 \text{ mm}$  de hauteur, soit un volume de  $675 \text{ ml}$  pour un poids de  $850 \text{ g}$  [70].

D'autres sociétés travaillent aujourd'hui sur les supercondensateurs. Les énergies massiques des prototypes étudiés varient entre  $1$  et  $3 \text{ Wh/kg}$  et la puissance maximum entre  $350$  et  $1200 \text{ W/kg}$ . Le prototype de plus forte capacité a été développé par Alcatel Alsthom et Saft dans le cadre du programme européen Joule. Sa capacité est égale à  $1800 \text{ F}$  et son volume à  $0,6 \text{ l}$  pour une puissance spécifique de  $1000 \text{ W/kg}$  [69].

Remarque : pour fixer les idées, l'énergie massique d'une batterie est d'environ  $42 \text{ Wh/kg}$ . En ce qui concerne la puissance massique, il est délicat d'avancer des chiffres car nous ne savons pas comment elle est ici calculée.

### 3.3.3. Charge et décharge d'un montage série / parallèle

Nous allons étudier autour d'un cas d'application concernant le démarrage quelles sont les performances que nous pouvons attendre des supercondensateurs.

**CONFIDENTIEL  
RENAULT**

Prenons l'exemple de l'alimentation du démarreur par des supercondensateurs de 1500 F sous 2,3 V avec une résistance interne de 5 mΩ. Nous considérerons que le démarreur est une source de courant consommant 325 A. D'après le cahier des charges [23], la tension aux bornes de l'accumulateur d'énergie ne doit pas descendre sous 7 V au bout de 15 s.

La tension nominale du démarreur étant égale à 12 V, l'association de six composants en série est obligatoire, étant donné que, pour accroître leur longévité, ces supercondensateurs ne doivent pas fonctionner sous une tension supérieure à 2,3 V.

Soit  $n$ , le nombre de branches en parallèle. La capacité et la résistance équivalentes de notre montage égalent :

$$C_{eq} = \frac{n}{6} \times 1500 \quad R_{eq} = \frac{6}{n} \times 0,005$$

La décharge du condensateur se déroule selon le schéma n°67 :

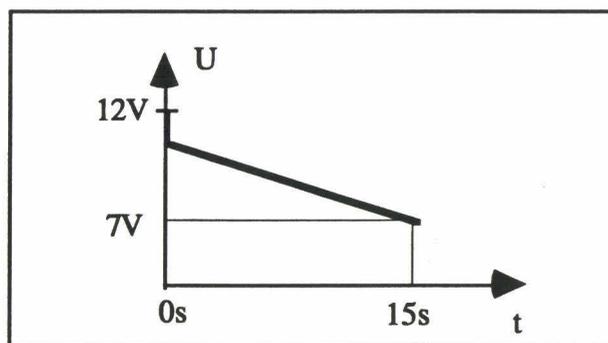


Figure n°67 : spécification concernant la décharge du supercondensateur lors du démarrage

La chute de tension au temps 0 est due à la résistance en série. Au bout d'un temps  $t$ , la tension aux bornes du supercondensateur s'écrit :

$$U = 12 \text{ V} - (R_{eq} \times I + \frac{I}{C_{eq}} \times t)$$

Le respect de la tension à 15 s est obtenu pour  $n = 6$ .

Considérons que le supercondensateur se recharge lorsque l'alternateur tourne sous une tension de 13 V. Sans aucun dispositif limiteur de courant, le courant de recharge maximal est égal à 350 A pour un temps de recharge de 22 s. Les temps de recharge sous des courants constants de 20, 40 et 60 A sont respectivement égaux à 4 mn, 2 mn et 82 s et donc peu élevés, comparés à ceux de la batterie.

**CONFIDENTIEL  
RENAULT**

Remarque : d'après certaines études [70], le courant de charge d'un supercondensateur est "auto limité" car le circuit équivalent est constitué d'un ensemble de petits condensateurs montés en parallèle. Chacun d'eux ayant une capacité  $C_n$  et une résistance de série  $R_n$  différentes, le courant de charge, somme des courants  $I_n$ , a la caractéristique suivante (en pointillé) :

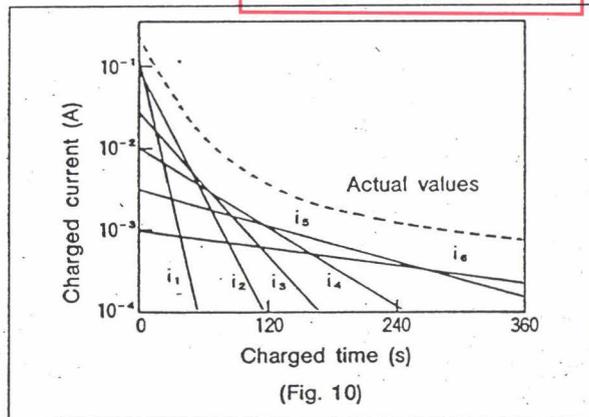


Figure n°68 : courant de charge d'un supercondensateur

Le phénomène est le même à la décharge. Par conséquent, aucun contrôleur de courant ne serait nécessaire.

Aujourd'hui, 36 condensateurs de 1500 F constituent un volume de 24,3 l et une masse de 30,6 kg. En comparaison, une batterie de démarrage de 400 A (bac L1) prend un volume de 5,8 l pour un poids de 11,1 kg. Elle garde donc toujours une longueur d'avance en ce qui concerne ces caractéristiques. Néanmoins, des gains sont certainement à attendre de l'agencement optimisé des supercondensateurs pour l'application envisagée.

Remarque :

1) la faible énergie dont disposent les supercondensateurs n'autorise pas la connexion permanente d'une charge électrique à leurs bornes ; les prestations en mode dégradé ne peuvent donc pas être assurées de la même manière qu'avec une batterie de démarrage ;

2) d'autres applications automobiles de ces composants sont à envisager ; c'est le cas du chauffage du pot catalytique ou encore des charges électriques de dépollution, qui consomment un fort courant pendant un temps très court.

### 3.3.4. Etude de brevets

De nombreux chercheurs n'ont pas attendu l'amélioration des caractéristiques massiques des supercondensateurs pour s'intéresser au sujet. Les principales applications automobiles ayant fait l'objet d'un brevet concernent surtout les véhicules électriques. Le supercondensateur est censé soutenir les batteries de puissance au démarrage du véhicule et lors des phases d'accélération afin d'en améliorer les performances dynamiques.

Sur le principe des batteries duales, l'association supercondensateur / batterie fonctionne de telle manière que le supercondensateur aide la batterie au démarrage et se recharge en roulage lorsque le réseau n'est pas en dévers. La batterie peut alors être dimensionnée comme une batterie de service et le supercondensateur serait amené à délivrer une puissance moindre que celle que nous avons calculée dans notre exemple précédent.

Cette association fait l'objet de plusieurs brevets de société japonaises. Cependant le procédé de recharge n'apparaît dans aucun d'entre eux. Il peut être généralisé à d'autres applications automobiles, en particulier en ce qui concerne l'alimentation de toute charge électrique par un supercondensateur. Nous l'avons donc protégé par un brevet [73].

*Cette étude succincte du fonctionnement et des performances des supercondensateurs de forte puissance, de développement très récent, montre que si aujourd'hui la batterie offre des caractéristiques volume - masse plus attractives, les supercondensateurs présentent un temps de recharge plus court et une durée de vie accrue. En ce qui concerne l'aspect système, les études des constructeurs et équipementiers portent plus sur le véhicule électrique que sur le véhicule thermique. Cependant, dans le cadre de l'étude des réseaux duaux, l'utilisation des supercondensateurs en tant qu'"accumulateur de démarrage" présente à première vue des avantages qui justifient une étude approfondie de ces nouveaux composants, d'autant plus que, selon les fabricants, leur énergie et leur puissance massiques pourraient doubler d'ici quelques années.*

**CONFIDENTIEL  
RENAULT**

*L'analyse des modes de fonctionnement de la batterie actuelle à l'arrêt, au démarrage et en roulage conduit au principe même d'un réseau à deux batteries dont l'une est dédiée au démarrage et l'autre à l'alimentation des charges électriques, les deux batteries étant séparées par un système de gestion de charge.*

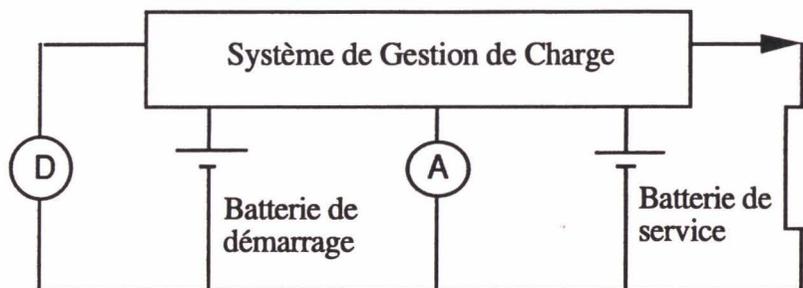


Figure n°69 : schéma de principe des réseaux à deux batteries

*Le fonctionnement spécifique des deux batteries, contrôlé par le système de gestion de charge permet d'en optimiser le dimensionnement (volume et masse) et d'en accroître la durée de vie. Le nombre de non-démarrages dus à une batterie déchargée (à cause de l'oubli des feux par exemple) diminue fortement car la batterie de démarrage conserve toujours un bon état de charge. De plus, la batterie de service peut être déportée dans l'habitacle ou dans le coffre, libérant de la place sous le capot.*

*L'état de l'art nous a permis de donner un premier visage à ce type de réseaux et d'en préciser les intérêts selon les modes de fonctionnement. Afin de ne pas passer à côté d'architectures intéressantes, nous sommes partie d'une représentation générale d'un système de gestion de charge comprenant au plus trois interrupteurs. Parmi les configurations viables, nous avons sélectionné celles qui répondaient au mieux à une liste de critères préalablement établie.*

*Cet exercice a abouti à cinq architectures, dont le système de gestion de charge est constitué soit d'une ou deux diodes, soit d'un interrupteur de type transistor, soit d'un ou deux relais. Les stratégies de pilotage du système de gestion de charge consiste à séparer les deux batteries à l'arrêt, au démarrage et en cas de dévers, lorsque l'état de charge de la batterie de démarrage risque de devenir insuffisant pour assurer le prochain démarrage.*

*Des essais antérieurs nous ont permis d'analyser les avantages et les inconvénients des architectures à diodes et nous avons pu, par quelques simulations, appréhender le fonctionnement des autres solutions. Dans un cas comme dans l'autre, il apparaît clairement que le choix d'une de ces architectures dépend non seulement de nos exigences — en matière, entre autres, de qualité de la tension sur le réseau, de démarrage avec une batterie déchargée ... — mais aussi du niveau d'équipement électrique du véhicule cible.*

*Nous avons donc précisé, à travers une analyse fonctionnelle des réseaux duaux, quelles étaient les contraintes à satisfaire et nous avons travaillé sur un cas particulier, concernant une éventuelle application sur certains modèles de la remplaçante de la Safrane. Deux architectures répondent aux conditions fixées dans le cadre de cette étude :*

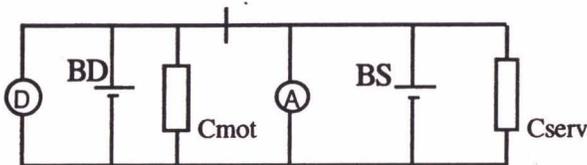


Figure n°70 : architecture à diode

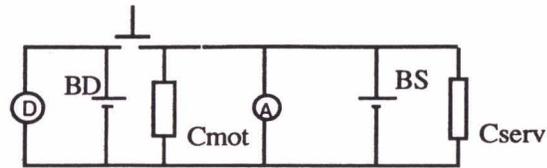


Figure n°71 : architecture à relais

Pour la seconde solution (figure n°71), deux stratégies de commande de l'interrupteur de type "relais" sont envisageables au démarrage, consistant l'une à isoler les deux batteries et l'autre, à l'inverse, à faire participer la batterie de service. Dans tous les cas, les deux batteries sont séparées à l'arrêt et en cas de dévers.

L'étude détaillée de ces schémas généraux nous a amenée à concevoir des dispositifs supplémentaires pour améliorer le comportement en mode dégradé et nous a permis de donner une première estimation des courants des batteries et des interrupteurs afin de rédiger les pré-cahiers des charges.

Il faut garder à l'esprit que la solution retenue au bout du compte dépendra, bien évidemment, des contraintes que nous nous sommes fixées ; un cas de figure différent aurait peut-être abouti à un choix autre. En particulier, certaines stratégies de pilotage des interrupteurs permettent de conserver une tension élevée aux bornes de certains organes électriques lorsque le réseau est en dévers. Elles pourraient être tout à fait adaptées à l'alimentation de nouvelles charges de dépollution, fonctionnant pendant une durée limitée après le démarrage.

Nous nous sommes aussi penchée sur le développement à plus long terme des réseaux duaux. Afin de diminuer masse et volume, la batterie de démarrage pourrait être remplacée par un ensemble de supercondensateurs. Ces composants, encore à l'état de prototype, ont pour avantage de se recharger très rapidement (en quelques minutes) pour une durée de vie supérieure à celle du véhicule. Si leur puissance et leur énergie massiques, bien que prometteuses, restent encore à améliorer, leurs qualités potentielles justifient une veille technologique approfondie sur le sujet.

Quels que soient la configuration, la stratégie de pilotage des interrupteurs et le type d'accumulateurs retenus, ces architectures à deux batteries permettent de mieux répartir la puissance disponible sur le réseau. Si le coût de cette solution est certainement supérieur à celui des réseaux de bord actuel (batteries spécifiques, interrupteurs et électronique de commande à développer, câblage à modifier), il est sans aucun doute moindre que le coût d'une élévation de la tension du réseau de bord, pénalisée par le saut technologique nécessaire. A l'horizon d'une consommation électrique moyenne de 2 kW, les réseaux à deux batteries semblent donc plus adaptés aux contraintes automobiles.

## 4. CONCLUSION GENERALE

Bien qu'à l'aube du prochain millénaire le temps soit aux économies d'énergie, la puissance électrique demandée au réseau de bord automobile ne cesse d'augmenter. Nous avons estimé les besoins sur la prochaine génération de véhicules haut de gamme (dans les années 2000 - 2010) à 2 kW maximum. Si une telle puissance peut tout à fait être produite en 12 V, il n'en reste pas moins que la batterie et l'alternateur correspondants sont de volume et de masse importants, à tel point que leur réserver une place sous le capot relève parfois d'un véritable casse-tête. De plus, la puissance délivrée par l'alternateur étant, en bout de courroie, prélevée sur l'arbre moteur, la consommation de carburant augmente, ce qui n'est pas sans alerter les constructeurs automobiles.

L'objectif de cette thèse était de proposer de nouvelles architectures électriques (alternateur, batterie, démarreur, réseau électrique ...):

- délivrant la puissance requise sur le réseau de bord,
- d'une taille et d'un volume raisonnables,
- fonctionnant avec un bon rendement afin de limiter la part du réseau dans la consommation en carburant,
- d'une fiabilité et d'une durée de vie au moins égale à celles de l'architecture électrique actuelle.

Avant de prendre à bras le corps l'étude de l'élévation de tension alors en cours, nous avons caractérisé tant qualitativement que quantitativement les besoins électriques.

En ce qui concerne l'aspect quantitatif, notre démonstration s'appuie sur deux raisonnements convergents : une première approche "historique" permet d'extrapoler la valeur de la consommation électrique à venir et la seconde, orientée "produit", consiste à étudier quels sont les organes électriques susceptibles d'équiper les véhicules futurs. Rien n'empêche néanmoins la progression linéaire de la consommation électrique dans le temps d'être sujette à un pic passager, suite à des attentes clients originales ou encore à l'application d'une norme imprévue, qui obligerait à équiper les véhicules de systèmes gourmands en courant. Cependant, notre prévision à dix ans a des chances d'être avérée, étant donné que la définition produit des véhicules de la prochaine génération — qui fixe dans les grandes lignes son équipement — est bien avancée.

Quant à l'étude qualitative de cette puissance, elle montre qu'il est nécessaire de prendre en compte son profil temporel. Deux types de fonctionnement se distinguent alors clairement, une phase "démarrage" et une phase "roulage", qui amènent à dessiner des architectures 12 V a priori tout aussi adaptées que l'élévation de la tension du réseau de bord à 24, 36 ou 48 V pour fournir les profils d'intensité qui seront requis à l'avenir.

Car les conclusions sur l'élévation de tension sont mitigées. Si l'idée consistait à passer à une tension de bord supérieure afin de produire plus de puissance dans des volumes restreints, l'étude

menée à ce sujet montre que les gains obtenus sont loin d'être ceux qu'on avait espérés, tant en terme de taille, de masse ou encore de rendement. Cette solution est, de plus, fortement pénalisée par son coût élevé, dû non seulement aux sauts technologiques parfois nécessaires, mais surtout à l'adaptation des outils industriels pour la fabrication des composants fonctionnant sous une tension supérieure.

A plus long terme cependant, ce changement de tension pourrait s'avérer nécessaire pour répondre à une demande en puissance plus élevée. Cette solution devra être plébiscitée par une majorité de constructeurs afin que le surcoût associé soit moins élevé. Le 24 V semble, dans cette optique, le niveau de tension le moins contraignant, étant donné que les risques humains associés en cas de contact avec une partie sous tension du circuit sont encore très faibles. Cette tension est adoptée depuis longtemps sur les camions. Ainsi non seulement leur expérience pourrait être mise à profit mais surtout l'outil industriel ainsi qu'un bon nombre de composants existent déjà, même s'ils ne sont conçus à ce jour que pour des petites séries. Les études montrent aussi que, dans ce cas, peu de nouvelles technologies sont à envisager, le savoir-faire 12 V pouvant s'adapter au 24 V. Le coût associé à ce changement de tension serait donc moindre que celui qui correspond à un passage à 36 ou 48 V.

Cette étude met de plus en évidence les limites d'une analyse purement "papier". En particulier, il est parfois difficile de faire la part du vrai et de l'inexact dans les conclusions des études menées par les équipementiers. Effectivement, en ce qui concerne la majorité des organes électriques, le savoir-faire pointu se trouve de leur côté. Par conséquent, si la perspective d'une élévation de tension les effraie, leurs premières conclusions seront très certainement pessimistes. Et inversement. La réalisation d'un prototype permettrait de confirmer ou infirmer les affirmations de chacun en poussant, d'une part, les équipementiers à un travail approfondi sur le sujet et, d'autre part, en mesurant les paramètres délicats à estimer par la seule théorie, comme par exemple les phénomènes de couplage dans le câblage.

La seconde solution étudiée consiste à mieux adapter l'offre à la demande en 12 V, en remplaçant la batterie actuelle par deux plus petites, dédiées chacune à un fonctionnement spécifique. Effectivement, l'analyse du fonctionnement du réseau électrique actuel fait apparaître deux besoins distincts : un fort appel de puissance au lancement du moteur, fourni par la batterie, suivi d'une consommation d'intensité moindre durant le reste du trajet. D'où l'idée d'associer au démarreur une batterie de forte puissance mais de faible capacité et d'assurer l'alimentation des autres charges électriques à partir d'une seconde batterie de capacité plus élevée.

Le fonctionnement spécifique de ces deux batteries permet d'en accroître la durée de vie ainsi que la puissance et l'énergie massiques et volumiques. Comme elles sont reliées par un système de gestion qui conserve un bon état de charge de la batterie dite de démarrage, le nombre de non-démarrages dus, par exemple, à des feux oubliés diminue fortement. De plus, la seconde batterie, dite de service, peut être déportée à l'arrière du véhicule, libérant ainsi de la place sous le capot.

Apte aux décharges profondes et répétées, cette batterie peut dans une certaine mesure, éviter d'augmenter la taille de l'alternateur et par conséquent la consommation en carburant. Cependant, ces réseaux permettent avant tout de mieux gérer la puissance électrique selon les différentes phases de fonctionnement. S'il reste à quantifier, le rapport prestation / coût est sans aucun doute supérieur à celui de l'élévation de tension, dont la mise en œuvre est loin d'être aussi immédiate.

Nous avons abordé l'étude de ces réseaux à deux batteries, en cherchant non pas à présenter les avantages et inconvénients généraux d'une architecture mais, au contraire, à fixer les points essentiels du cahier des charges et à dessiner un ensemble quasi-exhaustif d'architectures y répondant. L'étude spécifique ARDUE, qui concerne une éventuelle application sur certains modèles de la remplaçante de la Safrane, montre que, selon le classement des différents critères, les architectures et les stratégies retenues varient.

Ici encore, la réalisation d'un prototype nous permettra de combler les lacunes de l'étude théorique, bien que, dans ce cas, nous puissions nous appuyer sur un logiciel de simulation pour affiner l'étude "papier". Cependant, si le comportement à la décharge d'une batterie hybride est aujourd'hui identifié [74], le modèle de la charge reste à valider, d'autant plus qu'il s'agit ici de batteries de technologie nouvelle. La fiabilité des différents éléments et la sûreté de fonctionnement de l'ensemble sont aussi à éprouver.

Néanmoins, l'étude générale des architectures à deux batteries est à poursuivre. La liste de critères établie peut être enrichie des éléments nouveaux apparus dans l'analyse fonctionnelle, comme, par exemple, la souplesse d'adaptation du système sur un véhicule série. Il suffira par la suite de sélectionner les critères communs au cahier des charges fonctionnel et de leur attribuer un poids représentatif pour déterminer les architectures et stratégies adaptées. Il sera alors plus facile de répondre rapidement à des besoins se rapportant aussi bien à un véhicule particulier qu'à un véhicule utilitaire ou industriel.

Le cahier des charges fonctionnel du système ARDUE ouvrirait aussi la voie à d'autres architectures et stratégies, si le temps ne nous était pas compté. Certaines de ces solutions mériteraient d'ailleurs d'être creusées. Par exemple, nous avons étudié un système de relayage qui assure le démarrage dans toutes conditions. Un contacteur de démarrage de conception nouvelle peut aussi être envisagé, même si, d'après les bureaux d'étude, cette spécificité par rapport au véhicule série coûte a priori plus cher que notre électronique. Ce point reste à confirmer auprès de l'équipementier concerné et des bureaux d'études câblage, la fiabilité du système et la facilité de montage de l'ensemble étant aussi à prendre en compte.

Enfin, les solutions étudiées pour répondre au problème énoncé en introduction, peuvent s'avérer tout à fait complémentaires. Effectivement, ce n'est pas parce que nous savons produire plus de puissance qu'il ne faut pas chercher à mieux en gérer la distribution. Le montage de deux batteries duales sur un réseau 24 V présenterait les mêmes intérêts qu'en 12 V. D'ailleurs, cette solution est à l'étude pour les véhicules industriels et utilitaires.

Le développement des supercondensateurs, condensateurs de capacité élevée et de forte puissance massique et volumique permet d'envisager de manière plus générale la délocalisation des sources d'énergie. Un tel système associerait un accumulateur d'énergie à un ensemble d'organes regroupés selon leur mode de fonctionnement. Si des gains en rendement sont à attendre (faible dissipation d'énergie dans les câbles courts et diminution du nombre et de l'amplitude des perturbations sur le réseau), il reste à prouver que cette disposition présente aussi des avantages en terme d'encombrement, de masse et de fiabilité.

L'analyse fonctionnelle de l'ensemble du réseau électrique pourrait faire ressortir l'intérêt de cette solution ou de toute autre proposition d'architecture électrique. Elle s'inscrirait dans la continuité du travail effectué au cours de ces trois années de recherche, en ce sens que nous avons en permanence cherché à définir, voire redéfinir, le "cahier des charges" à satisfaire, avant même d'étudier objectivement qu'elles étaient les solutions adaptées.

Cette démarche générale, qui consiste à spécifier les besoins des clients avant de chercher de manière rigoureuse les solutions les plus adaptées, s'insère dans le cadre plus large d'une approche "Qualité" de la conception. Si l'énoncé semble relever de l'évidence, autant les contraintes de délais qu'une mise en œuvre laborieuse de méthodes peu concrètes conduisent quelquefois à se fonder plus sur des convictions forgées d'intuition puis d'expérience que sur une analyse rigoureuse et objective. Pourtant, loin d'inhiber la créativité, l'analyse de la valeur la canalise et révèle des solutions garantes d'une satisfaction maximale du client au juste coût.

C'est en ce sens que l'analyse fonctionnelle de l'ensemble du réseau électrique pourrait s'avérer fructueuse. Il s'agirait ici de réfléchir non aux solutions — quel couple alternateur - batterie correspond à la puissance demandée ? ... — mais aux fonctions que doit remplir le réseau — quels sont les types de charges à alimenter, quel est le niveau de qualité de tension attendu ... Ce travail s'annonce certes difficile et de longue haleine car il faut réunir les différents services concernés des études à l'après-vente et touchant de près comme de loin à l'électricité automobile. Mais le jeu en vaut certainement la chandelle car, si depuis les réseaux électriques des années 30 — constitués du démarreur, du dispositif d'allumage et des feux — des systèmes électriques de toutes sortes se sont développés et se développent encore, l'architecture électrique, elle, est toujours la même.

<b>BIBLIOGRAPHIE</b>
----------------------

**Chiffrer la puissance requise sur les réseaux électriques de bord du futur**

[1] Présentation de l'équipementier Valeo à la réunion du sous-groupe Prometheus "Electrical Architecture", le 26 Avril 1989

**• Evolution de la consommation électrique**

- [2] E. Lamartinie 1994  
*Evolution de la consommation électrique de 1972 à nos jours*  
 Note de service H31/94420
- [3] MM Vogelssberger et Galliet 1992  
*Architectures électriques de puissance des véhicules*  
 Colloque à mi-parcours du PREDIT
- [4] S. Anderson, R. Erickson et R. Martin 1991  
*An improved automotive power distribution system using nonlinear resonant switch converters*  
 IEEE transactions on power electronics, vol. 6, no. 1, January 1991

**• Calcul de la consommation électrique**

- [5] E. Lamartinie 1995  
*Exemple de consommation électrique future*  
 Note de service H31/95269
- [6] Thierry Gaudillot 1992  
*La dernière bataille de l'automobile européenne*  
 Edition Fayart ; § 16 : L'automobile du futur
- [7] Daniel Goeudevert 1990  
*Des voitures et des hommes*  
 Edition de Fallois - Paris ; p. 171 à 188
- [8] Rapport du groupe de stratégie industrielle "automobile" du Commissariat Général du Plan  
*L'automobile : les défis et les hommes* 1992  
 La Documentation Française
- [9] MIRA 1993  
*CAR 2000*
- [10] E. d'Orsay, J.M. Nozeron, J.F. Duclert 1992  
*Le contrôle et l'enrichissement des fonctions du véhicule par l'électronique*  
 Culture Technique n°25 - Automobile et Progrès
- [11] *Bienvenue dans un monde plus électronique* 1994  
 Information du véhicule n° 211 - Nov./Déc. 1994
- [12] *2010 Vehicle Definitions Keys* 1991  
 Etude du groupe de travail WG3 dans le cadre de Prometheus

[13] Entretien avec R. Bastien - Service 60123  
21 Février 1995

[14] E. Lamartinie 1995  
*Chronogrammes de fonctionnement des principaux organes électriques*  
Note de service H31/95268

#### • Solutions en 12V

[15] E. Lamartinie, H. Duval 1994  
*Circuit de charge pour batterie de véhicule automobile*  
Pli d'huissier n° 9042/94

[16] E. Lamartinie, H. Duval 1994  
*Procédé d'optimisation de fonctionnement d'un alternateur et dispositif de mise en œuvre du procédé.*  
Brevet n°95 - 06782

### Elévation de la tension

#### • Historique : passage du 6 au 12V

[17] L. Givens 1990  
*A technical history of the automobile*  
Automotive Engineering - Vol. 98, n°6 - June 1990

[18] Entretien avec Mr Letohic - Service du Patrimoine  
18 Janvier 1995

[19] Entretien au Club des Amateurs d'Anciennes Renault  
3 Juillet 1995

[20] G. Hatry et C. Le Maître 1982  
*Dossiers chronologiques Renault - Tome 1 à 6*  
Ed. Lafourcade

#### • Niveau de tension admissible

### Surtensions électriques

[21] Norme Internationale ISO 7637 1990  
*Véhicules routiers - Perturbations électriques par conduction et par couplage*

[22] Procédure d'essai n° 36-00-804/..A 1993  
*Équipements électriques et électroniques - Tenue en surtensions*

[23] Cahier des charges n° 36-00-400/..B 1993  
*Environnement physique des équipements électriques et électroniques*

[24] Note technique H31/92295 1992  
*Qualité de la distribution électrique : synthèse des essais de load-dump*  
B. Angrand - B. Peyraud

- [25] Rapport de stage 1992  
*Etude des couplage électromagnétiques entre les câbles*  
J. Duthu
- [26] A. Carballeira 1993  
*Evaluation des risques encourus au niveau des systèmes contacts - isolants par le passage de 12 à 24V ou 48V de la tension d'alimentation des véhicules automobiles*  
LCIE (Laboratoire Central des Etudes Electriques)

Sécurité électrique

- [27] CEI 479-1 et 479-2 1984-1987  
*Effets du courant passant dans le corps humain*
- [28] NF C 15-100 1991  
*Installations électriques à basse tension*  
Règles
- [29] Décret n° 1978.II 1988  
*Protection des travailleurs contre les courants électriques*  
Art. 7 p.12 et 3 p. 62
- [30] UTE C18.510 1990  
*Recueil d'instructions générales de sécurité d'ordre électrique*
- [31] Projet CEN TC 301 N 66E Mars 1995  
*Electrically propelled road vehicles - Specific prescriptions for safety*
- [32] R. Auber et L. Richard  
*Préventions des accidents électriques*  
Techniques de l'Ingénieur - D1 : Electrotechnique Générale  
§ 2 : Accident d'origine électrique : nature et importance
- [33] SAE J2232 1992  
*Vehicle system voltage : initial recommendations*
- [34] Biegelmeier G. 1987  
*Die Wirkung des elektrischen Stromes auf des Menschen und der elektrische Widerstand des menschlichen Körpers*  
vde-verlag gmbh - Berlin und offenbach
- [35] Garcia J. 1983  
*Influences du courant et de la tension (en fonction du temps) sur la physiologie humaine. Courbes de sécurité U(t) en fonction de BB1, BB2, BB3 et BB4.*  
CNAM, Examen oral probatoire
- [36] d.e.r. 92- faits marquants 1992  
*Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France*  
p. 97 - 98
- [37] A. Bossavit 1993  
*Mathematical modelling of the problem of micro-currents generated in living bodies by power lines*  
International Journal of Applied Electromagnetics in Materials 4 (1994) 291 - 299

- [38] T.S. Perry 1994  
*Today's view of magnetic fields*  
 IEEE Spectrum - december 94  
 p. 14 - 23
- [39] Entretien avec A. Bossavit 1993  
 EDF - Direction des Etudes et Recherches - Service Informatique et Mathématiques Appliquées

• **Incidence de l'élévation de tension sur les organes électriques**

- [40] E. Lamartinie 1993  
*Architectures électriques des véhicules futurs*  
 Rapport de DEA de Génie Electrique - USTL
- [41] A. Romagny 1991  
*Elevation de la tension du réseau de bord*  
 Note de service
- [42] A. Le Douaron 1993  
*Commentaires sur le rapport de DEA [iet]*

Articles SAE parus lors du congrès "Future transpotations Technology Conference and Exposition" à Portland, Oregon le 5 Juillet 1991

- [43] J.V. Hellmann, R.J. Sandel 1991  
*Dual / high Voltage Vehicle Electrical Systems*  
 SAE Technical Paper Series n°911652
- [44] G.A. Williams, M.J. Holt 1991  
*The future of vehicle electrical power systems and their impact on system design*  
 SAE Technical Paper Series n°911653
- [45] M.F. Matouka 1991  
*Design considerations for higher voltage automotive electrical systems*  
 SAE Technical Paper Series n°911654
- [46] R.T. Johnson 1991  
*Impact of higher vehicle system voltage on automotive batteries*  
 SAE Technical Paper Series n°911655
- [47] B. Mohan, E. Macke 1991  
*Electromagnetic components in dual voltage systems*  
 SAE Technical Paper Series n°911656
- [48] J. C. Erskine 1991  
*Power dissipation in MOS power transistors for automotive applications : system voltage considerations*  
 SAE Technical Paper Series n°911657

- [49] B. Davis, R. Frank, R. Valentine 1991  
*The impact of higher system voltage on automotive semiconductors*  
 SAE Technical Paper Series n°911658

#### Autres articles SAE

- [50] R. J. Sandel 1993  
*A rule based design process and evolutionnary architecture for the vehicle power supply*  
 SAE Technical Paper Series n°932864
- [51] A. Williams, J. Smith, H. Evans, J. Scholfield, J. Elvidge 1994  
*"Getting best out of 12 Volts" - The developpement of an advandced electrical architecture vehicle*  
 SAE Technical Paper Series n°940368

#### Batteries

- [52] Cahier Technique de Bosch 1985  
*Batteries*
- [53] C. Pascon (CEAC) 1995  
*Batteries de tensions élevées 24/48 Volts pour véhicules automobiles*  
 Etude Prometheus n°304

#### Alternateurs

- [54] Cahier Technique de Bosch 1985  
*Alternateurs triphasés*
- [55] M. Galliet 1994  
*Reflexions sur l'augmentation de la tension du réseau des véhicules routiers*  
 Rapport pour le groupe WG03 de Prometheus

#### Cablage

- [56] J.A. Evans 1990  
*Influence of higher voltages on cables, electricel connections and fuses*  
 Présentation à la réunion du groupe WG03 de prometheus - 6 Décembre 1990

#### Architectures électriques duales

##### • Articles

- [57] P. Withera (Power Beat International) 1993  
*Intelligent automotive battery system*  
 Journal of Power Sources, n°42 - p.195 à 209
- [58] J.P. Douady, C. Pascon, A. Dugast, G. Fossati 1993  
*Optimized batteries for cars with dual electrical architectures*  
 Salon de Genève 1993

##### • Brevets

- [59] 1991  
*Device for supplying electric power in a motor vehicle*  
 Brevet n° DE 41 38 943

- [60] 1994  
*3 poles battery switches*  
Brevet n° NZ WO 94/04 394
- [61] 1990  
*Zwei batteriensystem*  
Brevet n° DE 40 28 242
- [62] E. Lamartinie 1995  
*Dispositif d'alimentation des charges électriques dans un véhicule automobile et procédé de commance d'un tel dispositif.*  
Brevet n° 95 085 19
- [63] E. Lamartinie, P. Huguet 1996  
*Demande d'un dépôt de brevet concernant un système permettant de commander un relais séparant deux batteries.*  
Note de service n°H31/96.163
- [64] E. Lamartinie, F. Delaveau, H. Duval, A. Bouteraon 1996  
*Demande d'un dépôt de brevet concernant deux architectures à deux batteries ainsi que quatre stratégies de fonctionnement associées.*  
Note de service n°H31/96.248
- **Analyse fonctionnelle**
- [65] 1995  
Documents présentés à la formation "Analyse Fonctionnelle et de la valeur en conception"
- **Supercondensateurs**
- [66] F. Rose, C. Johnson, T. Owens, B. Stephens 1994  
*Limiting factors for carbon based chemical double-layer capacitors*  
Journal of Power Sources, n°47 - p. 303 à 312
- [67] E. Blank, C. Farahmandi, A. Trippe 1995  
*Improved electric vehicule performances with pulsed power capacitors*  
Maxwell Laboratories
- [68] 1995  
*Les condensateurs s'attaquent aux fortes énergies*  
Usine Nouvelle - n°2510 - 6 juillet 1995
- [69] 1995  
*Un condensateur de 1800 Farad*  
Industries et Techniques - n°763 - Septembre 1995
- [70] 1995  
*Technical Guide of Electric Double Layer Capacitors*  
Panasonic - Matsushita Electronic Components
- [71] C. Hiron 1993  
*Les supercondensateurs*  
Note de service du groupe Véhicule Electrique
- [72] 1995  
*Compte rendu n° CH/126.95 sur la réunion du groupe Véhicule Electrique avec Bolloré Technologies (Quimper)*

---

[73] E. Lamartinie, S. Cartier

1996

*Demande d'un dépôt de brevet concernant un réseau électrique pour véhicule thermique équipé d'un supercondensateur.*

Note de service n° H31/96.139

### **Conclusion**

[74] H. Duval

1993

*Modélisation du réseau électrique de bord d'un véhicule thermique*

Thèse de Doctorat de l'Université de Paris VI

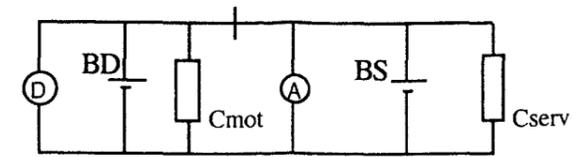
---

**ANNEXE**

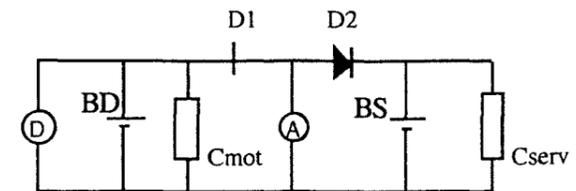
- 1) Schémas des architectures présentées au chapitre 3.
  
- 2) Planning du projet ARDUE
  
- 3) Cahier des Charges Fonctionnel du système ARDUE

**ARCHITECTURES PRESENTÉES AU CHAPITRE 3**

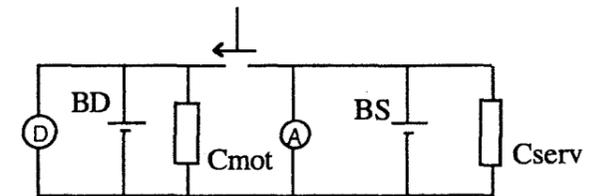
Architecture à diode (1) :



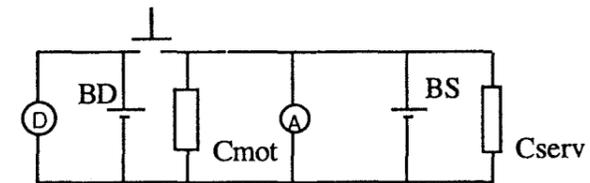
Architecture à deux diodes (2) :



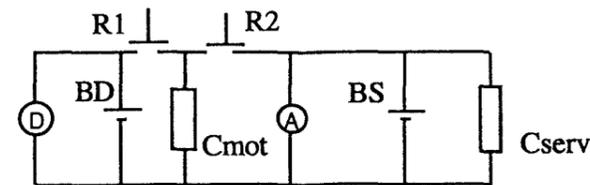
Architecture à interrupteur de type transistor (3) :



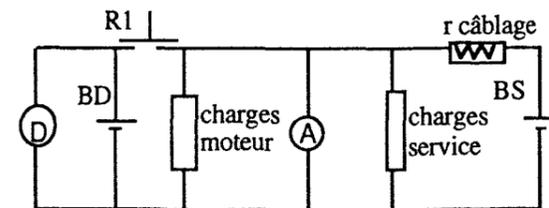
Architecture à relais (4) :



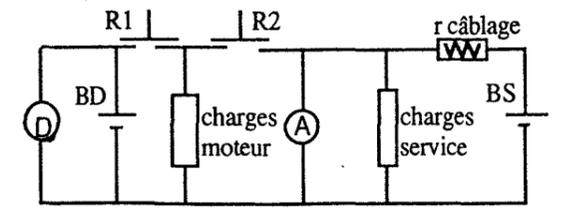
Architecture à deux relais (5) :



Architectures simulées :



Architecture 4

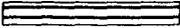


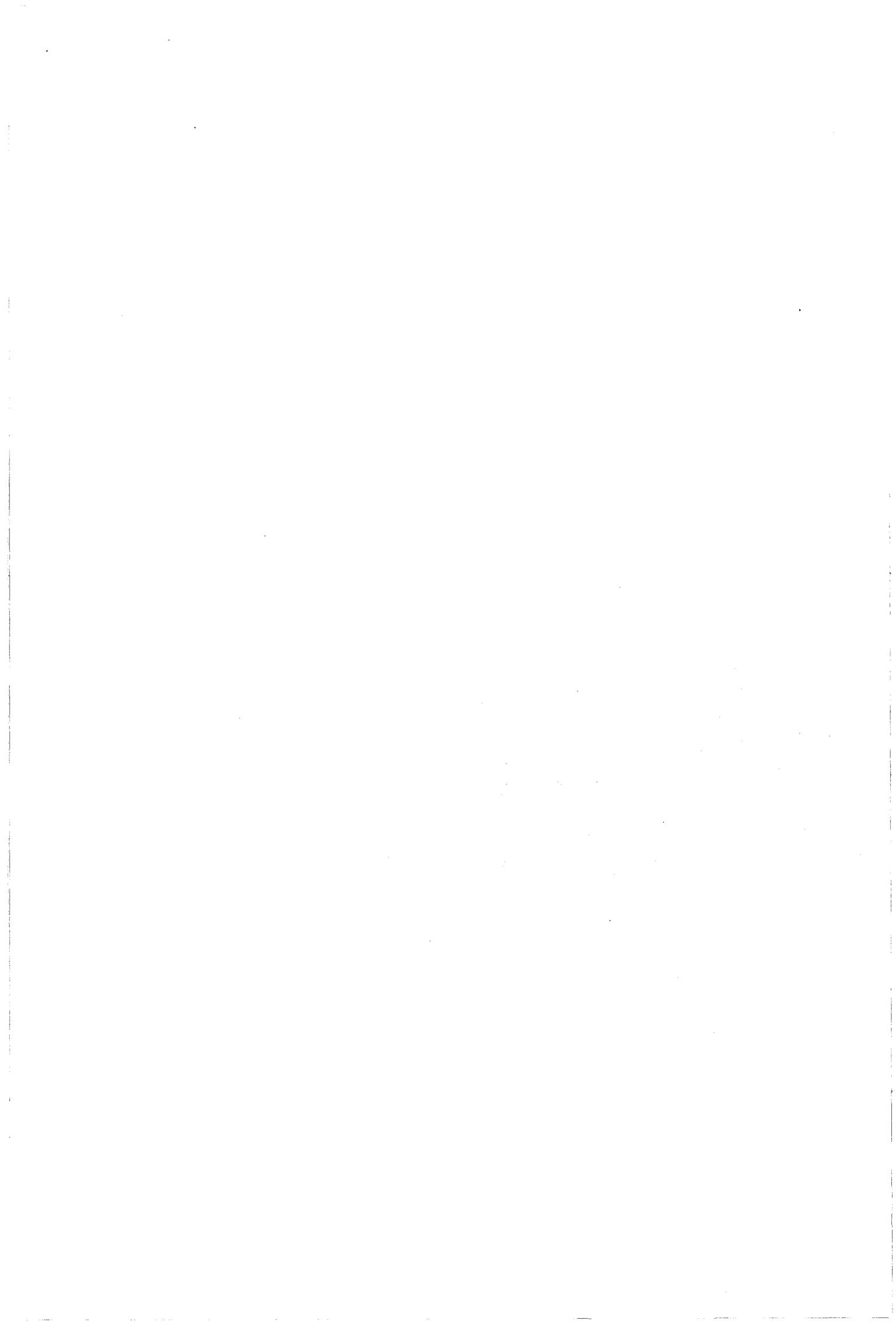
Architecture 5

# ETUDE ARDUE

N°	Nom	1996												Jan		
		Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aoû	Sep	Oct		Nov	Déc
1	<b>ANALYSE FONCTIONNELLE</b>	█														
12	<b>CAHIERS DES CHARGES</b>				█											
13	CDC Batterie de Service					▬										
14	CDC Batterie de démarrage					▬										
15	CDC Régulation Alternateur					▬										
16	CDC Electronique de puissance				▬											
17	<b>BATTERIE DE SERVICE</b>	█														
18	Modélisation de la batterie de service	█														
23	Fabrication des prototypes de batterie de service										▨					
24	<b>BATTERIE DEMARRAGE</b>	█														
25	Modélisation de la batterie de démarrage	█														
30	Fabrication des prototypes de batterie de démarrage										▨					
31	<b>SIMULATION</b>					█										
35	<b>PREPARATION DES ESSAIS</b>					█										
46	<b>ESSAIS VEHICULE</b>												█			
52	<b>Dossier Qualité Coût Délais Poids</b>					█										

Critique 

Non critique 



# CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL ARDUE

**VERSION 1.6 du 28 juin 1996**

Avertissement : cette version du cahier des charges fonctionnel du système ARDUE n'est pas la version définitive. Il reste à préciser, pour la majeure partie des fonctions principales et contraintes, les critères de valeur, qui permettront d'apprécier si une solution est satisfaisante ou non. Ces critères seront établis à partir des premiers prototypes batteries, des simulations et des essais sur véhicule.

<b>TABLE DES MATIERES</b>
---------------------------

1.AVANT PROPOS .....	158
2.DEFINITION DU PRODUIT.....	158
3.ANALYSE DU BESOIN.....	159
3.1.DETERMINATION DU BESOIN .....	159
3.2.VALIDATION DU BESOIN.....	159
4.CYCLE DE VIE DU PRODUIT ARDUE .....	161
4.1.LISTE DES DIFFERENTES PHASES DU CYCLE DE VIE .....	161
4.2.TABLEAU RECAPITULATIF.....	163
5.ELEMENTS DU MILIEU EXTERIEUR D'UTILISATION (EME).....	164
5.1.CARACTERISATION DES EME.....	164
6.DOCUMENTS NORMATIFS CITES .....	168
7.ANALYSE DES PHASES D'UTILISATION DU PRODUIT.....	169
7.1.Phase 06 : MOTEUR ARRETE (véhicule à l'arrêt ou roulant) (U).....	169
7.2.Phase 07 : LANCEMENT DU MOTEUR.....	173
7.3.Phase 08 - MOTEUR TOURNANT (U) .....	175
7.4.Phase 9 - UTILISATION EN CAS D'INCIDENT (Mode dégradé) (U).....	178

<b>8.ANALYSE DES PHASES HORS UTILISATION.....</b>	<b>181</b>
8.1.Phase 1 - FABRICATION DES COMPOSANTS (H.U).....	181
8.2.Phase 2 - ASSEMBLAGE DU SYSTEME ARDUE (Naissance) (H.U).....	182
8.3.Phase 3 - MONTAGE DU SYSTEME ARDUE SUR VEHICULE (H.U).....	183
8.4.Phase 4 - TRANSPORT DU VEHICULE (H.U).....	184
8.5.Phase 5 : STOCKAGE DU VÉHICULE (H.U) .....	185
8.6.Phase 10 - MAINTENANCE DU VEHICULE (H.U).....	186
8.7.Phase 11 - RECUPERATION ET RECYCLAGE DU SYSTEME ARDUE (Mort du système ARDUE) (H.U) .....	187
8.8.Phase 12 - COMMERCIALISATION (H.U).....	188

## **1. AVANT PROPOS**

Le Cahier des Charges Fonctionnel du produit concerné est un document à valeur permanente, qui comporte donc peu de valeurs quantifiées et renvoie aux documents de définition du produit (plan fonctionnel notamment) pour trouver indication des autres valeurs, qui sont, a priori, spécifiques à un projet. L'association du CdCF et du plan (fonctionnel ou de fabrication s'il existe) constitue la spécification univoque du produit.

La première étape consiste à définir le produit avant d'identifier la nature du besoin de ce produit par le client. Le cycle de vie du produit est ensuite décomposé en phases d'utilisation (U.) (ici au nombre de quatre) et en phases hors utilisation (H.U.) (au nombre de huit). Chaque phase d'utilisation du cycle de vie fait l'objet d'un paragraphe spécifique où sont définies et détaillées les fonctions principales et les fonctions contraintes que doit remplir le produit. L'analyse des phases hors utilisation est limitée à la présentation des graphes de fonction et à l'énoncé des fonctions.

## **2. DEFINITION DU PRODUIT**

Sous l'appellation "ARchitecture Duale Electrique" sont regroupés les éléments suivants :

- deux éléments accumulateurs d'énergie électrique, dont un est dédié à l'alimentation du démarreur.
- le régulateur de l'alternateur,
- un groupe d'interrupteurs permettant de connecter les éléments suscités entre-eux,
- un groupe de capteurs associés aux éléments générateurs d'énergie, aux charges électriques et au groupe d'interrupteurs, inhérents à la fonction,
- les liaisons (électriques, mécaniques) entre les différents composants et avec d'autres organes du véhicule et avec la structure du véhicule (en particulier, les fixations des batteries).

### **3. ANALYSE DU BESOIN**

#### **3.1. DETERMINATION DU BESOIN**

##### A qui ou à quoi le produit rend-t-il service ?

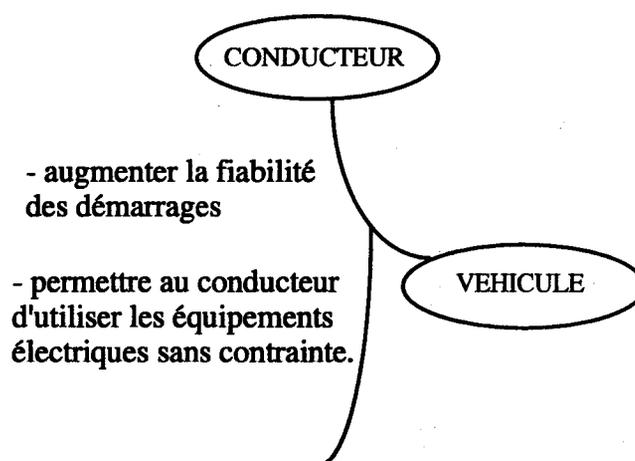
Le système ARDUE rend service au conducteur.

##### Sur qui ou sur quoi le produit agit-il ?

Le système ARDUE agit sur le circuit électrique en particulier et sur l'architecture du véhicule en général.

##### Quel est le but du produit ?

- permettre au conducteur d'utiliser les équipements électriques de son véhicule sans contrainte,
- augmenter la fiabilité au démarrage.



#### **3.2. VALIDATION DU BESOIN**

##### Pourquoi le besoin existe-t-il?

- plaintes clients sur le non-démarrage,

##### Qu'est-ce qui pourrait faire évoluer le besoin ?

- changement de l'architecture sous capot,
- modification de la puissance électrique nécessaire,
- technologie des accumulateurs d'énergie électrique,
- adaptation aux véhicules hybrides, électriques et industriels.

Qu'est-ce qui pourrait faire disparaître le produit ?

- changement de l'architecture sous capot,
- nouvelles technologies d'accumulateurs d'énergie électrique,
- modification de la puissance électrique nécessaire,
- coût prohibitif

## **4. CYCLE DE VIE DU PRODUIT ARDUE**

### **4.1. LISTE DES DIFFERENTES PHASES DU CYCLE DE VIE**

**Phase 1 - FABRICATION DES COMPOSANTS (H.U)**

**Phase 2 - ASSEMBLAGE DU SYSTEME ARDUE (Naissance) (H.U)**

- Transport et stockage des composants (en provenance des fournisseurs),
- Assemblage et contrôle du système ARDUE,
- Stockage du système ARDUE.

**Phase 3 - MONTAGE DU SYSTEME ARDUE SUR VEHICULE (H.U)**

- Transport du système ARDUE
- Conditionnement du système ARDUE,
- Montage et contrôle du système ARDUE dans le véhicule,
- Stockage du véhicule à la fin du montage.

**Phase 4 - TRANSPORT DU VEHICULE (H.U)**

- Chargement du véhicule sur le moyen de transport,
- Transport proprement dit,
- Livraison du véhicule (déchargement).

**Phase 5 - STOCKAGE DU VEHICULE (H.U)**

- Intermédiaire,
- Chez le concessionnaire.

**UTILISATION NORMALE DU VEHICULE (U)**

**Phase 6 - MOTEUR ARRETE, (véhicule à l'arrêt ou roulant) (U)**

**Phase 7 - LANCEMENT DU MOTEUR (U)**

**Phase 8 - MOTEUR TOURNANT (U)**

**Phase 9 - UTILISATION EN CAS D'INCIDENT (Mode dégradé) (U)**

**\* Sûreté de fonctionnement**

- Pannes du système ARDUE (Causes internes),
- Autres pannes du véhicule en dehors du système ARDUE (Causes externes).

**\* Accident du véhicule.**

**Phase 10 - MAINTENANCE DU VEHICULE (H.U)**

- Chez l'automobiliste (garage particulier),
- Chez le garagiste, le réparateur (Réseau RENAULT ou Autre)
- Maintenance curative (incident),
- Maintenance préventive (entretien)
- Démontage du système,
- Equipements de seconde monte.

**Phase 11 - RECUPERATION ET RECYCLAGE DU SYSTEME ARDUE (H.U)**

- Décomposition des éléments constitutifs du système ARDUE,
- Récupération des éléments recyclables et recyclage,
- Destruction des éléments non recyclables.

**Phase 12 - COMMERCIALISATION (H.U)**

- Promotion du produit

#### 4.2. TABLEAU RECAPITULATIF

Phases du cycle de vie	Exigences à respecter
Fabrication des composants Assemblage du système ARDUE Montage du système ARDUE sur véhicule Transport du véhicule Stockage du véhicule	Les contraintes liées à ces phases du cycle de vie seront précisées dans un cahier des charges à définir.
Utilisation du véhicule Utilisation normale : - moteur arrêté, - lancement du moteur, - moteur tournant Utilisation en cas d'incident	Les contraintes liées à ces phases du cycle de vie font l'objet du présent cahier des charges fonctionnel.
Maintenance du véhicule Récupération et recyclage du système Commercialisation	Les contraintes liées à ces phases du cycle de vie seront précisées dans un cahier des charges à définir.

## **5. ELEMENTS DU MILIEU EXTERIEUR D'UTILISATION (EME)**

### **5.1. CARACTERISATION DES EME**

#### **5.1.1. Aire de stockage**

- Parkings sans abri (majorité),
- Parkings avec abri (surtout chez les concessionnaires)
- Type de sol : béton, asphalte, terre battue, .....

#### **5.1.2. Alternateur**

Alternateurs gamme; alternateur refroidi par eau; alternateur refroidi par air.

CdC n°36-06-203 : "Alternateur triphasé à redresseur et régulateur incorporés"

Fiche technique (données nécessaires à la simulation sous Sirex) : cf. note SIREXV2 / C 2.00

#### **5.1.3. Ambiance**

##### **\* A l'extérieur du véhicule:**

- En intérieur: essentiellement parking souterrain: température; humidité; milieu corrosif; salinité, inondation du parking (pluies torrentielles, ruptures de canalisations, infiltrations),

- En extérieur: ensoleillement et rayonnement; température; humidité; intempéries: pluie, neige, grêle, vent, orage, tempête, tempête de sable, poussière, salinité (proximité de la mer), sable, gel; projections dues au roulage du véhicule ou à celui d'autres véhicules: gravillon, gravier, sable, neige, glace, grêle, grêlons, boue; présence d'objets hétéroclites sur la chaussée (pierres, bidons, bouteilles, animaux morts...),

##### **\* A l'intérieur du véhicule:**

- Ambiance dans le compartiment moteur: température; humidité; carburant et hydrocarbures en général; fluide hydraulique; fluide de freins; liquide du système de refroidissement; huile moteur; huile de boîte.

- Ambiance dans l'habitacle : température; humidité, projection de fluides

\* Environnement électrique : fonctionnement de l'ensemble des composants électriques, électrostatiques et électromagnétiques (situés dans et hors du véhicule).

#### **5.1.4. Charges électriques**

- Ensemble "charges électriques véhicule" + "charges électriques conducteur".

#### **5.1.5. Charges électriques conducteur**

- Charges électriques enclenchées par le conducteur ou les passagers :
  - charges électriques de sécurité : feux, warning, ... (charges connectées sur le + BAT).
  - charges électriques de confort : chauffage, LARC ...
- Caractérisées par leur intensité sous tension nominale et leur profil d'utilisation.
  - liste des consommateurs électriques et des intensités correspondantes en fonction du véhicule, du moteur, du niveau d'équipement de base et des options prises en compte
  - profil d'utilisation des consommateurs : cf. note H31/95.268 et note SIREXV2 / CS / 2.00

#### **5.1.6. Charges électriques véhicule**

- Charges électriques qui ne sont pas enclenchées directement par le conducteur et les passagers, excepté le démarreur,
- Caractérisées par leur intensité sous tension nominale et leur profil d'utilisation.
  - Liste des consommateurs électriques et des intensités correspondantes en fonction du véhicule, du moteur, du niveau d'équipement de base et des options prises en compte
  - Profil d'utilisation des consommateurs : cf. note H31/95.268 et note SIREXV2 / CS / 2.00

#### **5.1.7. Conducteur**

#### **5.1.8. Démarreur**

Démarreurs toute gamme .

CdC n°36-01-012 : "Démarreur 12 Volts à contact électromécanique".

Fiche technique (données nécessaires à la simulation sous Sirex) : cf. note SIREXV2 / CS / 2.00

#### **5.1.9. Incident**

Types d'incident :

- (i) incidents intrinsèques au système ARDUE,
- (ii) incidents provenant d'autres organes du véhicule,
- (iii) accidents du véhicule (trafic, obstacles, conducteur)
- (iv) incidents dus à une utilisation mauvaise du véhicule (hors conditions normales d'utilisation)

(i) incidents intrinsèques au système ARDUE :

- panne ou dysfonctionnement d'un ou des deux accumulateurs,
- panne ou dysfonctionnement du régulateur de l'alternateur,
- panne du groupe d'interrupteurs,
- panne des capteurs,
- panne des dispositifs de liaison (électriques ou mécaniques) des différents organes entre eux.

(ii) incidents provenant d'autres organes du véhicule :

- panne ou dysfonctionnement de l'alternateur,
- panne ou dysfonctionnement du moteur,
- panne ou dysfonctionnement du démarreur,
- panne ou dysfonctionnement des charges électriques,
- panne ou dysfonctionnement des liaisons entre les composants du système et les autres organes du véhicule ou la structure du véhicule.

(iii) accidents du véhicule (trafic, obstacles, conducteur)

- accident du véhicule après-vente,
- résistance aux chocs normalisés (dissipation d'énergie).

(iv) incidents dus à une utilisation mauvaise du véhicule (hors conditions normales d'utilisation)

- inversion de la tension batterie (essai de démarrage avec une batterie extérieure, ...),
- mauvais branchement des composants du système,
- mauvais branchement des composants au système,
- accumulateur de seconde monte non adapté,
- utilisation abusive des consommateurs électriques : éclairage, radio, allume cigare, équipements de seconde monte et consommateurs pouvant être enclenchés moteur arrêté.

#### **5.1.10. Moteur**

\* Moteur thermique : moteur gamme

Fiche technique (données nécessaires à la simulation sous Sirex) : cf. note SIREXV2 / CS / 2.00

\* Moteur électrique (à considérer dans le cadre des applications véhicule électrique et (ou) véhicule hybride électrique-thermique).

#### **5.1.11. Opérateur**

Jockey - conducteur de véhicule à faible qualification technique.

### **5.1.12. Passagers**

### **5.1.13. Réceptacle**

Le réceptacle est défini comme étant composé de l'habitacle, du coffre, de la boîte à eau et du compartiment moteur.

\* **Habitacle:**

- Volume dédié aux occupants du véhicule (conducteur et passagers).

\* **Coffre:**

- Volume dédié au rangement des bagages

\* **Compartiment moteur:**

- Volume délimité par le capot moteur, le tablier, la boîte à eau, la structure avant et la ligne 0 .
- Autres systèmes ou composants logés dans le compartiment moteur ; selon les véhicules : GMP, boîte de vitesse, moteur, transmissions, système de freinage, organes du système ABS, barre anti-roulis, organes de la suspension pilotée, groupe optique, système de refroidissement, systèmes électroniques, accessoires moteur, avertisseurs, alarmes véhicule, boîtes à relais, tuyauteries et câblages, système de direction (direction mécanique, direction assistée électrique ou direction assistée hydraulique), ligne d'échappement, système de dépollution, cric, roue de secours.

\* **Boîte à eau**

- systèmes logés dans la boîte à eau : système de chauffage, système d'essuie-glaces

### **5.1.14. Sens**

(design / ergonomie / marketing...)

- Vue (design, esthétisme)
- Toucher (profil sensoriel)
- Odorat .
- Ouïe (confort auditif)
- Goût (sans objet)

### **5.1.15. Véhicule**

Véhicule automobile toute gamme

Fiche technique (données nécessaires à la simulation sous Sirex) : cf. note SIREXV2 / CS / 2.00

## **6. DOCUMENTS NORMATIFS CITES**

### **6.1. CdC**

- 16-00-003 : "Pièces en plastique - Prescriptions générales"  
36-00-802 : "Environnement physique des équipements électriques électroniques - Prescriptions générales"  
36-00-808 : "CEM - Mutisme radioélectrique des équipements électriques et électroniques"  
36-00-009 : "Fils électriques basse tension"  
36-00-202 : "Gaine de protection de câblage électrique en plastique"  
36-01-803 : "Batteries d'accumulateurs de démarrage au plomb - 12V sans entretien"  
36-05-013 : "Câblage électrique"  
36-05-019 : "Connexions électriques"  
36-05-207 : "Gainnes annelées fendues de protection des câblages électriques"  
36-05-208 : "Manchons thermorétractables à paroi interne adhésive"  
36-06-203 : "Alternateurs triphasés à redresseur et régulateur incorporés"

#### **6.1.1. Normes**

- 00-10-415 : "Réalisation et fourniture des produits - Prescriptions générales"  
01-50-110 : "Accessibilité boulonnerie - visserie à filetage métrique ISO"

#### **6.1.2. Procédures d'essais**

- 36-00-803 : "CEM - Immunité du véhicule aux perturbations électromagnétiques"  
36-00-804 : "Équipements électriques et électroniques - Tenue aux surtensions"  
36-00-805 : "CEM - Mutisme radioélectrique du véhicule"  
36-00-806 : "CEM - Immunité des équipements aux perturbations électromagnétiques"  
36-00-807 : "CEM - Mutisme radioélectrique des équipements électriques / électroniques"

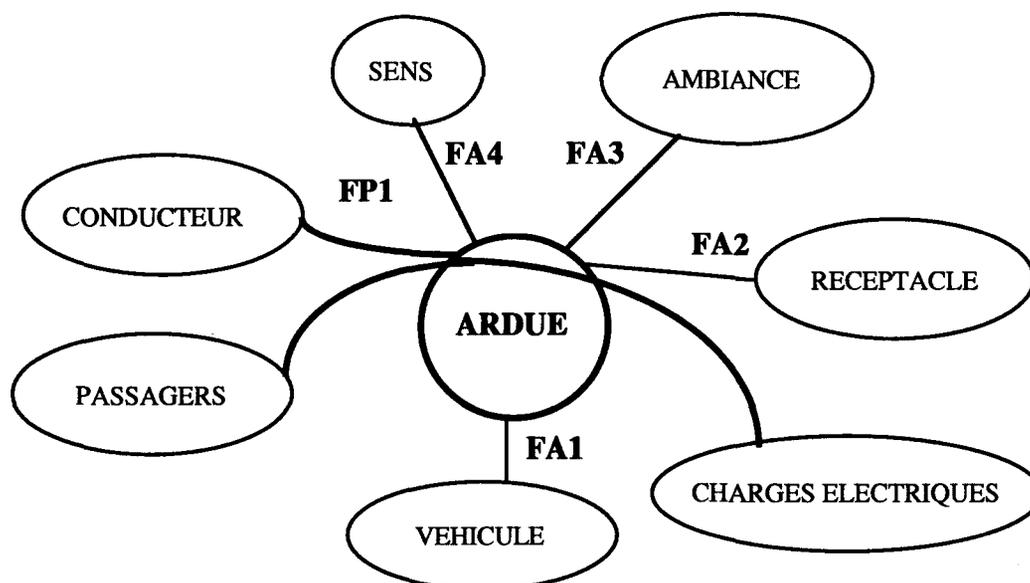
#### **6.1.3. Projet de cahier des charges**

- NC 93-278 : "Batteries d'accumulateurs de démarrage au plomb - 12V"

## 7. ANALYSE DES PHASES D'UTILISATION DU PRODUIT

### 7.1. Phase 06 : MOTEUR ARRETE (véhicule à l'arrêt ou roulant) (U)

#### 7.1.1. Schéma fonctionnel



FP1 : Alimenter les charges électriques, y compris celles enclenchées par le conducteur ou les passagers quand le moteur est arrêté.

FA1 : Ne pas compromettre le fonctionnement ultérieur du véhicule lorsque le moteur est arrêté.

FA2 : Ne pas interagir avec le réceptacle pendant que le moteur est arrêté.

FA3 : Résister à l'ambiance (agressions) sans la perturber pendant que le moteur est arrêté.

FA4 : Etre agréable aux sens pendant que le moteur est arrêté.

#### 7.1.2. Caractérisation des fonctions

**FP1 : Alimenter les charges électriques, y compris celles enclenchées par le conducteur ou les passagers quand le moteur est arrêté.**

- alimenter, c'est fournir la puissance et l'énergie demandées par les consommateurs électriques connectés au système ARDUE.

\* puissance : couple (tension, courant)

- tension

. le système ARDUE doit fournir un niveau de tension respectant les classes de tension définies, à ce jour, dans le CdC n°36-00-802, c'est-à-dire, selon les charges électriques :

classe 1 : de 10,5 V à 16 V

classe 2 : de 5,5 V à 16 V

. qualité de la tension : aucun CdC sur le sujet connu à ce jour.

- courant : le système ARDUE doit fournir le courant demandé par les consommateurs connectés.

\* énergie : fournir la puissance pendant le temps nécessaire.

• charges électriques connectées en fonction de la position de la clef dans le barillet du démarreur :

1) clef hors du barillet

- l'alimentation des charges électriques branchées sur le +BAT est assurée par le système ARDUE (tension, courant, temps à préciser selon le véhicule). Le système doit être capable d'alimenter les consommateurs permanents pendant un mois et d'assurer ensuite le lancement du moteur.

2) clef dans le barillet mais non tournée

- l'alimentation des charges électriques branchées sur le +BAT est assurée par le système ARDUE (tension, courant, temps à préciser selon le véhicule).

3) clef tournée dans le barillet sur la position accessoires (+ ACC) :

- l'alimentation des charges électriques branchées sur le +BAT et le +ACC est assurée par le système ARDUE (tension, courant, temps à préciser selon le véhicule).

4) clef tournée dans le barillet sur la position +APC :

- l'alimentation des charges électriques conducteur de sécurité et des charges électriques véhicule connectées sur le +BAT, le +ACC et le +APC est assurée (tension, courant, temps à préciser selon le véhicule),

- l'alimentation des charges électriques conducteur de confort connectées sur le +ACC et le +APC peut être coupée (tension, courant, temps à préciser selon le véhicule),

**FA1 : Ne pas compromettre le fonctionnement ultérieur du véhicule lorsque le moteur est arrêté.**

• ne pas compromettre le fonctionnement ultérieur, c'est :

\* assurer le prochain démarrage, c'est-à-dire réserver la puissance et l'énergie dans les accumulateurs nécessaires au prochain démarrage, c'est-à-dire nécessaires à l'alimentation

\* assurer le prochain démarrage, c'est-à-dire réserver la puissance et l'énergie dans les accumulateurs nécessaires au prochain démarrage, c'est-à-dire nécessaires à l'alimentation des charges électriques véhicule et des charges conducteur de sécurité alimentées sur le +APC sous la tension de démarrage.

\* ne pas dégrader le fonctionnement du véhicule moteur tournant, c'est alimenter les charges électriques sous une tension supérieure à leur tension minimale de sécurité (si elle est définie dans leur cahier des charges).

- permettre la prise d'information par tout autre système.

### **FA2 : Ne pas interagir avec le réceptacle pendant que le moteur est arrêté.**

- ne pas interagir (mécaniquement), c'est:

- s'insérer dans le volume pré-défini sous des contraintes de géométrie et de sécurité (à définir selon le véhicule).

- ne pas perturber ni être perturbé (mécaniquement) par le fonctionnement des autres sous-systèmes ; cf. CdC n°36-00-802 :

- § 2.6 : classe de vibrations et de chocs,

- § 5.2.1 : tenue des fixations,

- § 5.2.2 : tenue aux chocs,

- § 5.2.4 : tenue aux vibrations

### **FA3 : Résister à l'ambiance sans la perturber pendant que le moteur est arrêté.**

- résister, c'est satisfaire les exigences RENAULT de résistance aux agressions ambiantes dans le compartiment moteur et dans l'habitacle ; cf. CdC n°36-00-802 :

- § 2 : classes de température, d'étanchéité, d'humidité, de gravillonnage

- § 5.1 : conditions climatiques d'essais

- § 5.2.3 : tenue au gravillonnage

- § 5.3 : essais de tenue à l'environnement électrique

- § 5.4 : essais de tenue à l'environnement climatique

- sans la perturber :

- cf. CdC n°36-00-802

- § 3.2 : plage de fréquences interdites

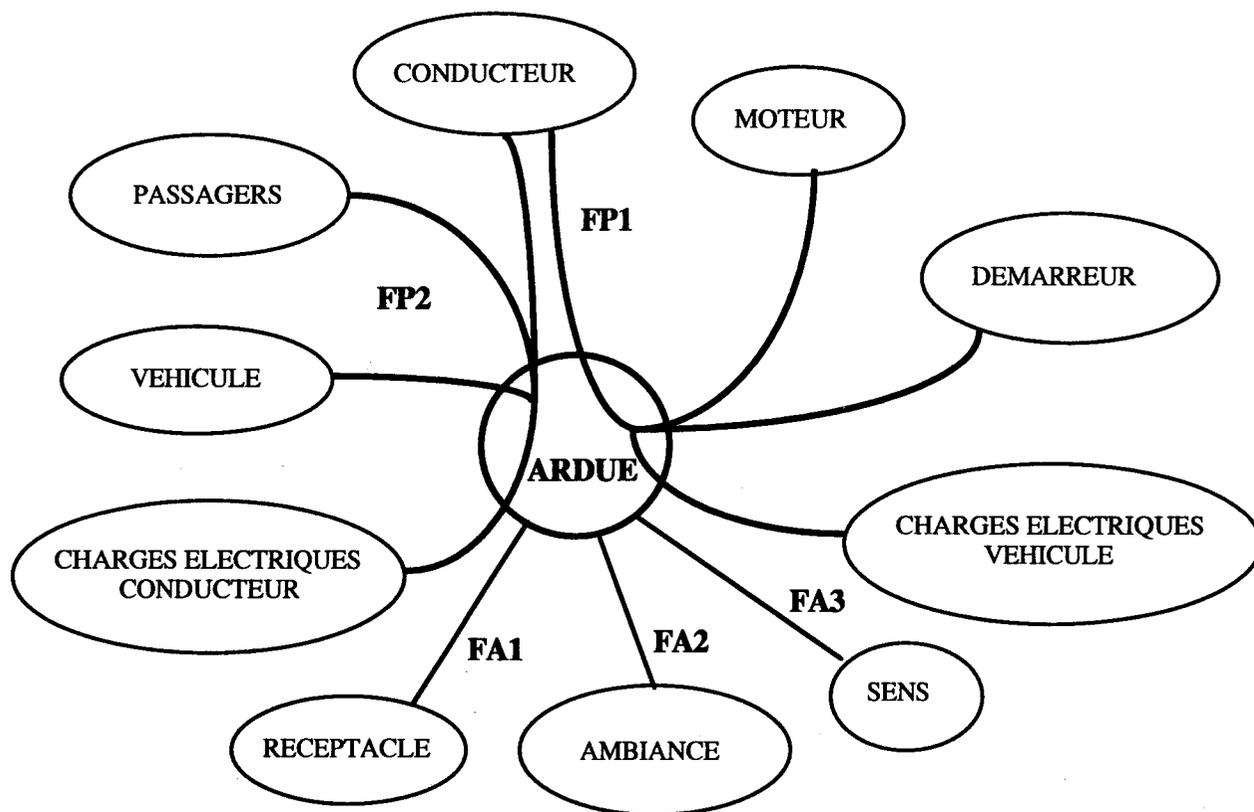
- § 5.3.9 : mutisme radioélectrique

**FA4 : Etre agréable aux sens pendant que le moteur est arrêté.**

- le système ARDUE ne doit pas gêner le conducteur et les passagers
  - la batterie ne doit pas dégager des gaz ou des liquides toxiques ou présenter des évolutions d'aspect inquiétant (cf. dossier de sécurité batterie),
  - niveaux acoustiques acceptables : cf. CdC n°36-00-802, § classes de nuisance sonore,
  - pas d'élévation de température ou de "fuites électriques"

## 7.2. Phase 07 : LANCEMENT DU MOTEUR

### 7.2.1. Schéma fonctionnel



FP1 : Permettre au conducteur de lancer le moteur en alimentant les charges électriques véhicule et le démarreur.

FP2 : Gérer l'alimentation des charges électriques conducteur, pendant le lancement du moteur.

FA1 : Ne pas interagir avec le réceptacle pendant le lancement du moteur.

FA2 : Résister à l'ambiance sans la perturber pendant le lancement du moteur.

FA3 : Etre agréable aux sens pendant le lancement du moteur.

### 7.2.2. Caractérisation des fonctions

**FP1 : Permettre au conducteur de lancer le moteur en alimentant le démarreur et les charges électriques véhicule.**

- le lancement du moteur se fait par une action du conducteur sur la clef de contact.

A la position de la clef sur "démarrage", correspond :

- l'alimentation des charges électriques véhicule connectées sur le +BAT,
- l'alimentation des charges électriques moteur connectées sur le +APC,

- l'alimentation du démarreur.

• alimenter : fournir la puissance et l'énergie demandées par les consommateurs électriques connectés au système ARDUE,

\* puissance : couple (tension, courant)

- tension

. le système ARDUE doit fournir un niveau de tension respectant les classes de tension définies, à ce jour, dans le CdC n°36-00-802, c'est-à-dire, selon les charges électriques :

classe 1 : de 10,5 V à 16 V

classe 2 : de 5,5 V à 16 V

. qualité de la tension : chute de tension admissible pendant le lancement du moteur : cf. CdC n°36-01-803 et NC 93-278, §4.3 "Aptitude au démarrage".

- courant : le système ARDUE doit fournir le courant demandé par les consommateurs connectés.

\* énergie : fournir la puissance pendant le temps nécessaire.

• permettre la prise d'information par tout autre système.

## **FP2 : Gérer l'alimentation des charges électriques conducteur pendant le démarrage.**

• pendant le démarrage :

- l'alimentation des charges conducteur de sécurité est assurée,

- l'alimentation de certaines charges conducteur de confort peut être coupée.

## **FA1 : Ne pas interagir avec le réceptacle pendant le lancement du moteur.**

cf. phase 6

## **FA2 : Résister à l'ambiance sans la perturber pendant le lancement du moteur véhicule**

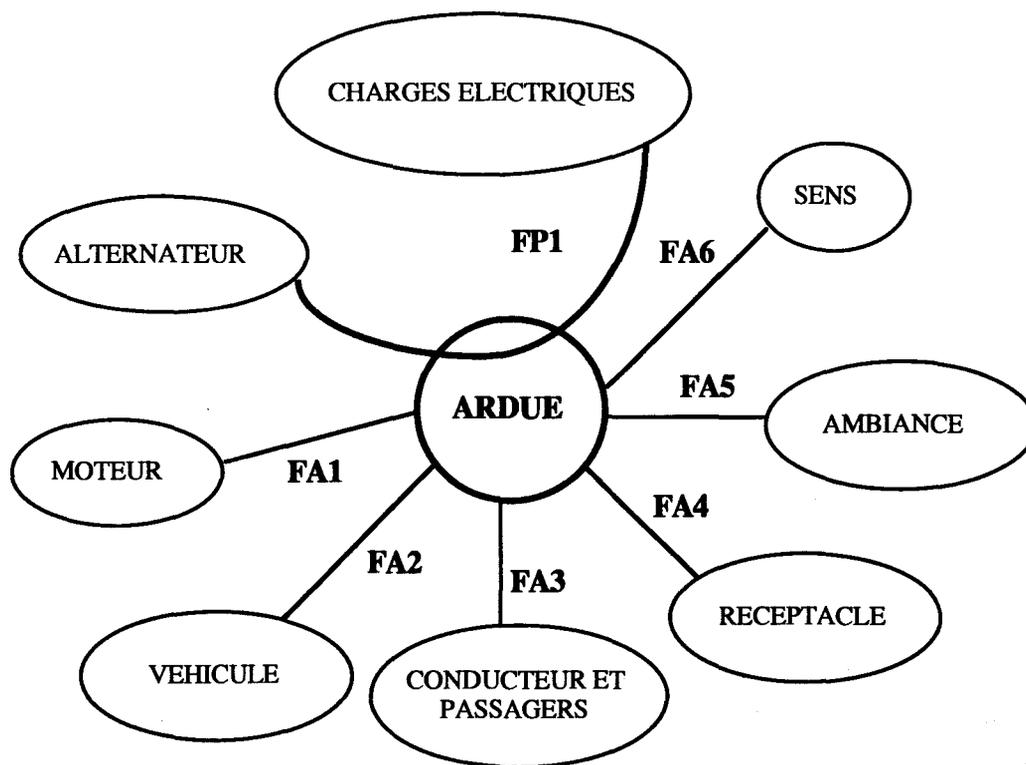
cf. phase 6

## **FA3 : Etre agréable aux sens pendant le lancement du moteur véhicule.**

cf. phase 6

### 7.3. Phase 08 - MOTEUR TOURNANT (U)

#### 7.3.1. Schéma fonctionnel



**FP1** : Optimiser l'échange d'énergie et de puissance avec les charges et l'alternateur, pendant que le moteur tourne.

**FA1** : Ne pas dégrader la consommation en carburant pendant que le moteur tourne.

**FA2** : Ne pas compromettre le fonctionnement ultérieur du véhicule pendant que le moteur tourne.

**FA3** : Ne pas gêner le conducteur et les passagers pendant que le moteur tourne.

**FA4** : Ne pas interagir avec le réceptacle pendant que le moteur tourne.

**FA5** : Résister à l'ambiance sans la perturber pendant que le moteur tourne.

**FA6** : Etre agréable aux sens pendant que le moteur tourne.

### **7.3.2. Caractérisation des fonctions**

**FP1 : Optimiser l'échange d'énergie et de puissance avec les charges et l'alternateur, pendant que le moteur tourne.**

• **échange de puissance et d'énergie :**

\* **du système ARDUE vers les charges électriques et l'alternateur :**

- contrôle et commande de l'alternateur pour assurer l'alimentation des charges électriques,
- le système ARDUE doit fournir, le cas échéant, aux charges électriques et à lui-même, le complément d'énergie et de puissance nécessaire.

\* **des charges électriques et de l'alternateur vers le système ARDUE :**

- contrôle et commande de l'alternateur pour assurer le meilleur couple tension / courant nécessaire à la recharge des accumulateurs du système ARDUE,
- contrôle et commande de l'alternateur pour assurer l'alimentation des organes électriques du système ARDUE.

• **alimenter :** fournir la puissance et l'énergie demandées par les consommateurs électriques connectés au système ARDUE,

\* **puissance :** couple (tension, courant)

- tension
  - . le système ARDUE doit fournir un niveau de tension respectant les classes de tension définies, à ce jour, dans le CdC n°36-00-802, c'est-à-dire, selon les charges électriques :
    - classe 1 : de 10,5 V à 16 V
    - classe 2 : de 5,5 V à 16 V
  - . qualité de la tension : oscillations de la tension à moyennes et hautes fréquences : cf. CdC n° 36-06-203, § 6.9.
- courant : le système ARDUE doit fournir le courant demandé par les consommateurs connectés.

\* **énergie :** fournir la puissance pendant le temps nécessaire.

• **permettre la prise d'information par tout autre système.**

**FA1 : Ne pas dégrader la consommation en carburant pendant que le moteur tourne au ralenti**

- minimiser la masse du système,
- maximiser le rendement du système.

**FA2 : Ne pas compromettre le fonctionnement ultérieur du véhicule pendant que le moteur tourne.**

- ne pas compromettre le fonctionnement ultérieur, c'est :
  - \* assurer le bon fonctionnement du véhicule lorsque le moteur est arrêté : cf. phase "moteur arrêté",
  - \* assurer le prochain démarrage, c'est réserver la puissance et l'énergie dans les accumulateurs, nécessaires au prochain démarrage, c'est-à-dire nécessaires à l'alimentation des charges électriques véhicule alimentées sur le +APC et le démarreur sous la tension de démarrage.

**FA3 : Ne pas gêner le conducteur et les passagers pendant que le moteur tourne.**

- ne pas induire de variations de tension susceptibles d'altérer le fonctionnement de certaines charges, comme les feux.

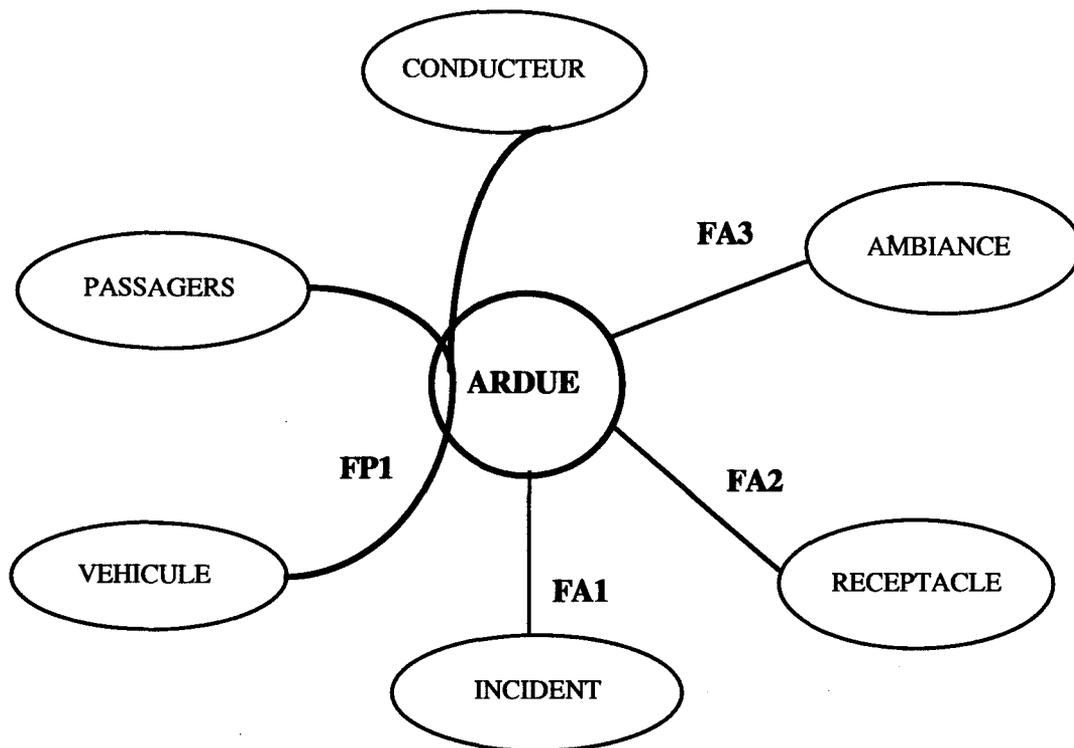
**FA4 : Ne pas interagir avec le réceptacle pendant que le moteur tourne.**  
cf. phase 6

**FA5 : Résister à l'ambiance sans la perturber pendant que le moteur tourne.**  
cf. phase 6

**FA6 : Etre agréable aux sens pendant que le moteur tourne.**  
cf. phase 6

## 7.4. Phase 9 - UTILISATION EN CAS D'INCIDENT (Mode dégradé) (U)

### 7.4.1. Schéma fonctionnel



**FP1** : Garantir la sécurité du conducteur et des passagers en cas d'incident, en préservant l'intégrité et en gardant le contrôle du véhicule.

**FA1** : Résister à l'incident après l'avoir détecté et en fonction de sa gravité.

**FA2** : Minimiser la perturbation du réceptacle pendant l'incident, en fonction de sa gravité.

**FA3** : Signaler une agression vers l'ambiance.

### 7.4.2. Caractérisation des fonctions

**FP1** : Garantir la sécurité du conducteur et des passagers en cas d'incident, en préservant l'intégrité du véhicule.

- pour tout incident intrinsèque au système ARDUE, on doit minimiser les risques par rapport à ce qui existe (l'identification et la quantification de ces risques supplémentaires seront à traiter ultérieurement dans l'AMDEC).

- cette fonction doit être assurée en minimisant les désagréments engendrés sur le conducteur et/ou les passagers. Minimiser les désagréments, c'est :

- avoir une fiabilité du diagnostic ( ne pas donner des informations erronées sur l'incident),
- générer des niveaux acoustiques acceptables,
- protéger les occupants du véhicule,
- ne pas être à l'origine d'étincelles ou d'arc dangereux.

### **FA1 : Résister à l'incident après l'avoir détecté et en fonction de sa gravité.**

- détecter l'incident : l'action de détection se fait par le calculateur ou au moyen de :

- l'auto-diagnostic,
- la présence d'une anomalie de fonctionnement,
- la surveillance des capteurs.

- en fonction de sa gravité (ce critère ne doit être envisagé que dans le cas d'incident lié au système ARDUE) :

- dans le cas d'un mode dégradé irréversible, les causes seraient un ou plusieurs des facteurs suivants :

- panne du régulateur,
- panne de l'électronique de commande des interrupteurs,
- panne de l'accumulateur de démarrage (fin de vie, load-dump)

- actions à mener :

- moteur arrêté : favoriser le prochain démarrage,
- lancement du moteur : favoriser l'alimentation des charges véhicule,
- moteur tournant : favoriser l'alimentation des charges véhicule et des charges passager de sécurité

- dans le cas d'un mode dégradé réversible, le système doit remédier seul à la panne et minimiser l'effet client : le client ne doit pas se rendre compte du dysfonctionnement.

### **FA2 : Minimiser la perturbation du réceptacle pendant l'incident, en fonction de sa gravité.**

- panne du régulateur : limiter les risques d'incendie et de sa propagation, dans le cas d'un dysfonctionnement interne (court-circuit).

- panne ou dysfonctionnement des accumulateurs : limiter les risques d'incendie et sa propagation, dans le cas d'un dysfonctionnement interne (court-circuit). On ne doit pas générer de fuite de fluide et minimiser les risques d'explosion. Il faut informer le conducteur de ce défaut.

- panne des interrupteurs et capteurs : limiter les risques d'incendie et de sa propagation, dans le cas d'un dysfonctionnement interne (court-circuit).

- rupture des liaisons électriques : limiter les risques d'incendie et sa propagation.

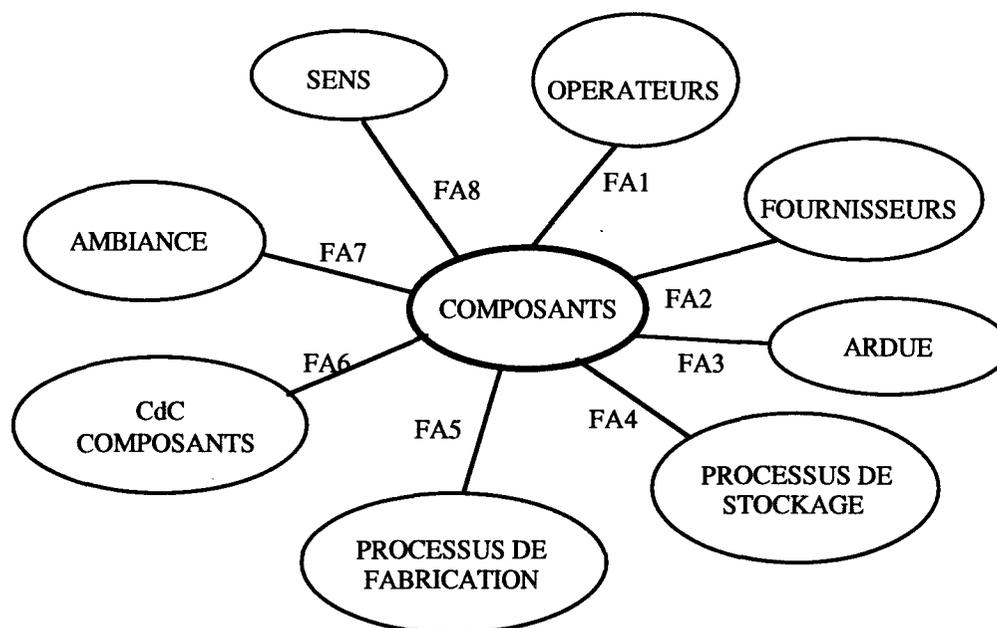
- rupture des liaisons mécaniques : limiter le déplacement du système dans le compartiment moteur ou dans l'habitacle.

**FA3 : Signaler une agression vers l'ambiance.**

En cas de mode dégradé irréversible, le système doit informer le conducteur du défaut.

## 8. ANALYSE DES PHASES HORS UTILISATION

### 8.1. Phase 1 - FABRICATION DES COMPOSANTS (H.U)



FA1 : Etre manipulables par les opérateurs.

FA2 : Etre à disposition en temps, en heure et en quantité chez les fournisseurs.

FA3 : S'assembler à terme dans le système ARDUE.

FA4 : Etre compatible avec le processus de stockage.

FA5 : Etre compatible avec le processus de fabrication.

FA6 : Etre conforme au Cahier des Charges Composants du système ARDUE.

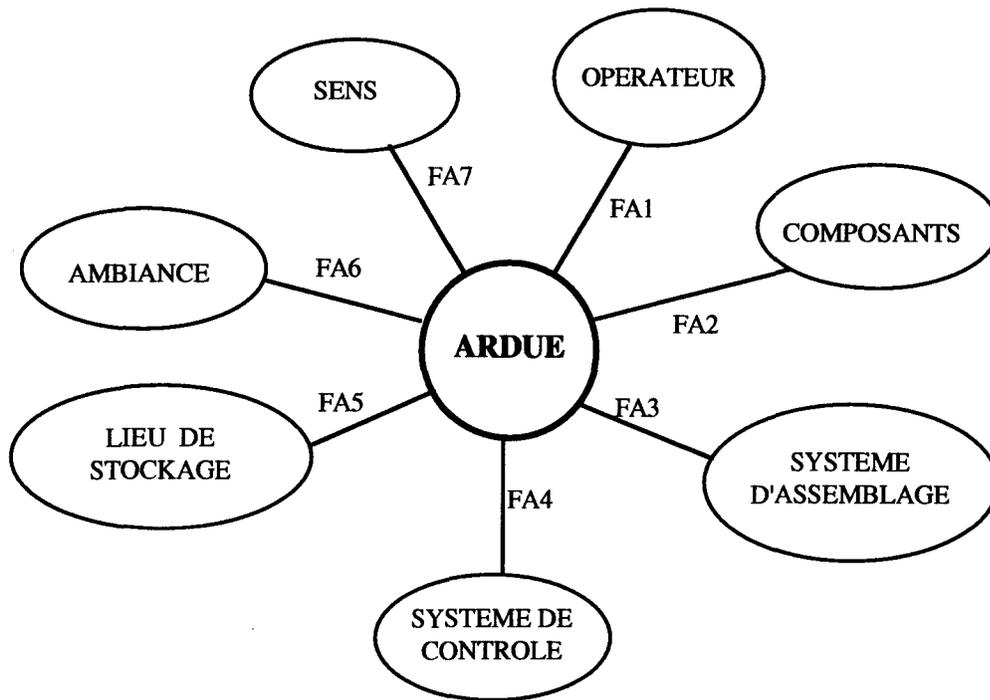
FA7 : Résister à l'ambiance (agressions) pendant la fabrication .

FA8 : Etre agréable aux sens pendant la fabrication.

Documents de référence :

00-10-415, 36-05-019, 36-00-802, 36-05-009, 36-05-013, 36-05-202, 36-05-207, 36-05-208

## 8.2. Phase 2 - ASSEMBLAGE DU SYSTEME ARDUE (Naissance) (H.U)



FA1 : Etre manipulable par l'opérateur pendant l'assemblage.

FA2 : Contenir les bons composants.

FA3 : Etre accessible au système d'assemblage.

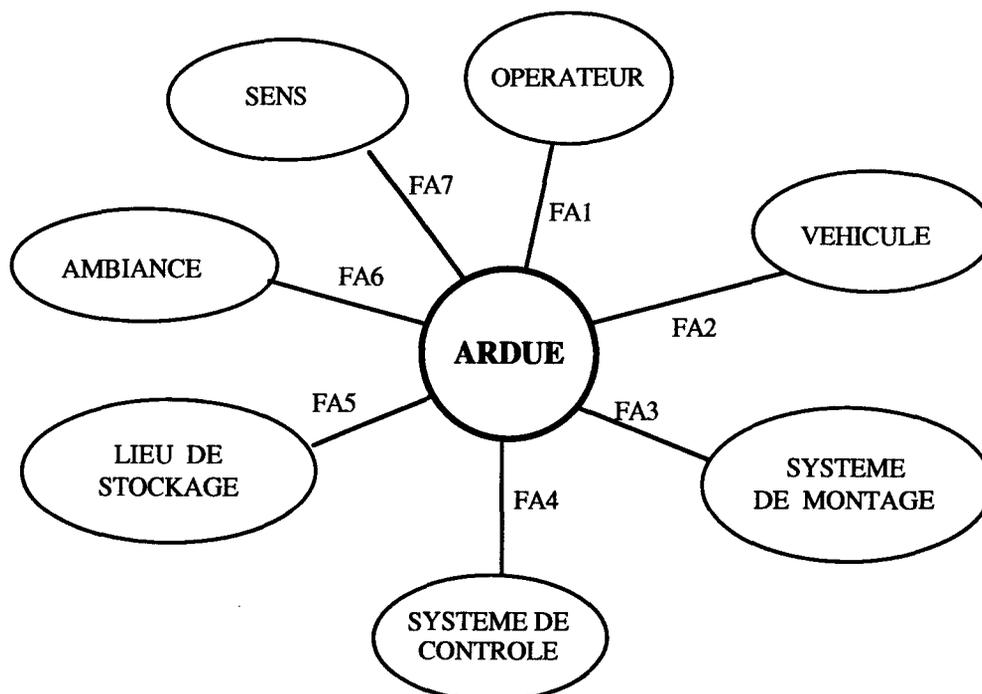
FA4 : Etre accessible au système de contrôle d'assemblage.

FA5 : Accéder au lieu de stockage après l'assemblage

FA6 : Résister à l'ambiance (agressions) pendant l'assemblage.

FA7 : Etre agréable aux sens pendant l'assemblage.

### 8.3. Phase 3 - MONTAGE DU SYSTEME ARDUE SUR VEHICULE (H.U)



FA1 : Etre manipulable par l'opérateur pendant le montage sur véhicule.

FA2 : Se monter sur le véhicule.

FA3 : Etre accessible au système de montage sur véhicule.

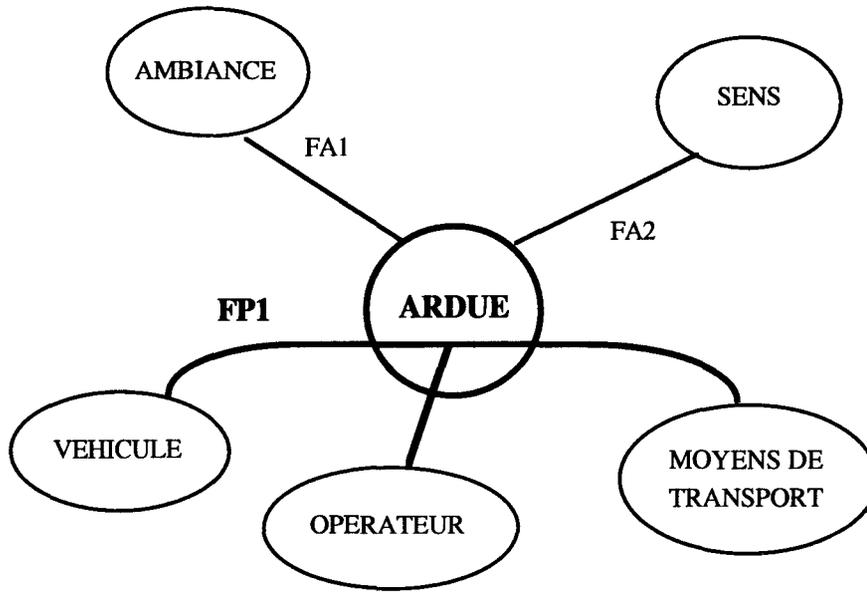
FA4 : Etre accessible au système de contrôle du montage sur véhicule.

FA5 : Etre récupérable du lieu de stockage.

FA6 : Résister à l'ambiance (agressions) pendant le montage sur véhicule.

FA7 : Etre agréable aux sens pendant le montage sur véhicule.

#### 8.4. Phase 4 - TRANSPORT DU VEHICULE (H.U)

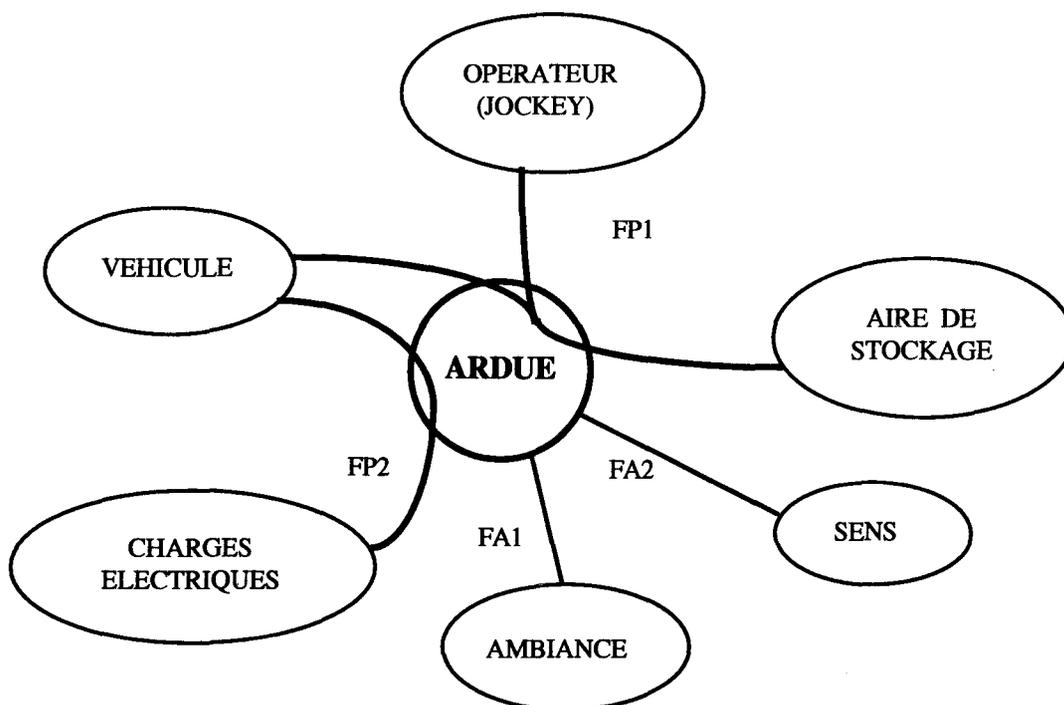


**FP1** : Permettre à l'opérateur de charger ou décharger le véhicule sur différents moyens de transport .

**FA1** : Résister à l'ambiance (agressions) pendant le transport du véhicule.

**FA2** : Etre agréable aux sens pendant le transport.

### 8.5. Phase 5 : STOCKAGE DU VÉHICULE (H.U)

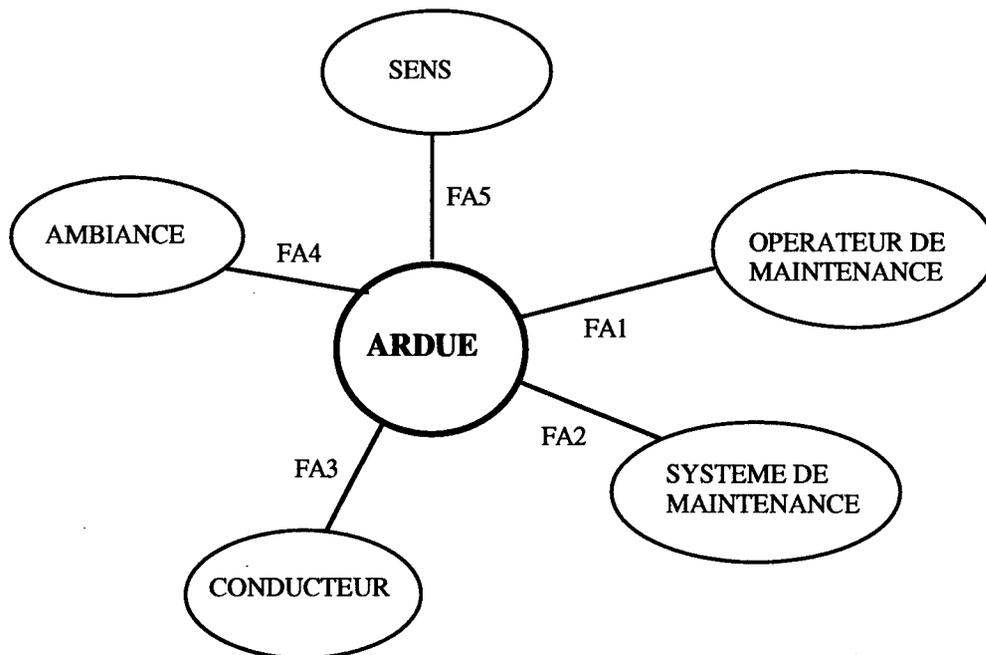


**FP1** : Permettre à l'opérateur (jockey) de garer le véhicule sur une aire de stockage.

**FP2** : Alimenter les charges électriques moteur coupé sans compromettre le fonctionnement ultérieur du véhicule.

**FA1** : Résister à l'ambiance (agressions) pendant le stockage du véhicule.

**FA2** : Etre agréable aux sens pendant le stockage du véhicule.

**8.6. Phase 10 - MAINTENANCE DU VEHICULE (H.U)**

FA1 : Etre maintenable par l'opérateur de maintenance.

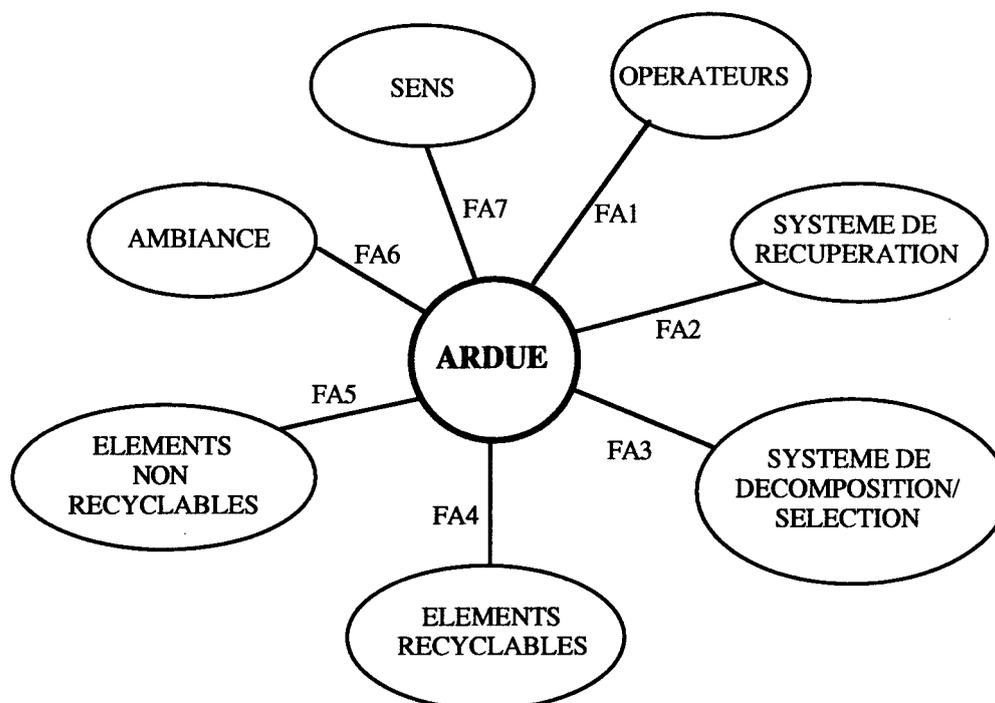
FA2 : Etre accessible au système de maintenance.

FA3 : Minimiser la gêne procurée au conducteur pendant la maintenance.

FA4 : Résister sans la perturber à l'ambiance pendant la maintenance.

FA5: Etre agréable aux sens pendant la maintenance.

### 8.7. Phase 11 - RECUPERATION ET RECYCLAGE DU SYSTEME ARDUE (Mort du système ARDUE) (H.U)



**FA1 : Etre manipulable par les opérateurs pendant le recyclage.**

**FA2 : Etre accessible à un système de récupération.**

**FA3 : Etre accessible à un système de décomposition/sélection.**

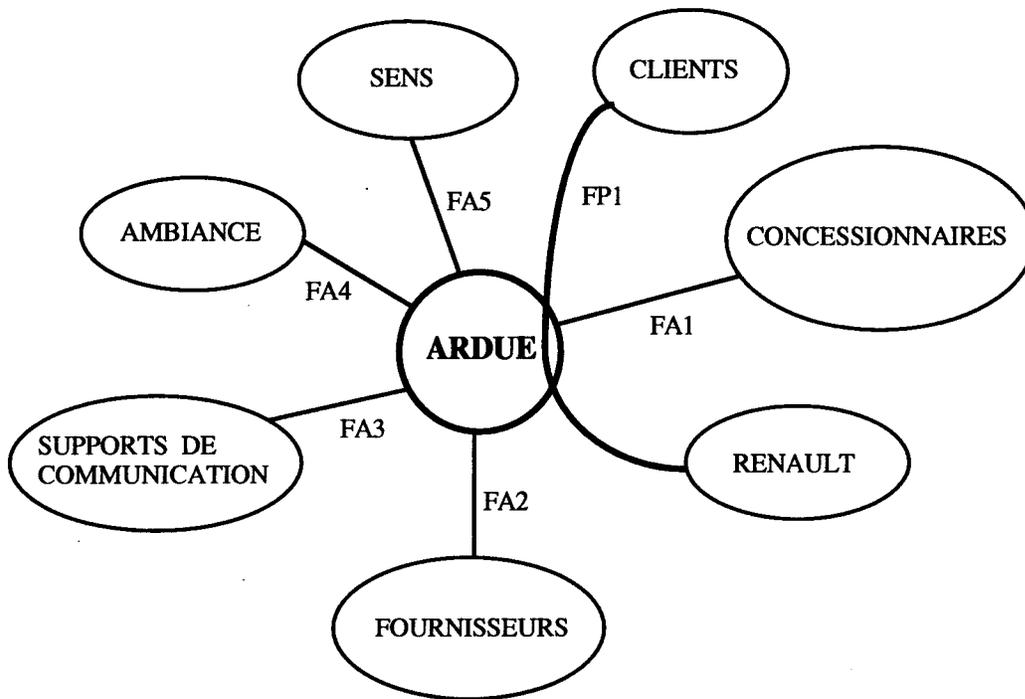
**FA4 : Générer un maximum d'éléments recyclables.**

**FA5 : Générer un minimum d'éléments non recyclables.**

**FA6 : Ne pas perturber l'ambiance pendant le recyclage.**

**FA7 : Etre agréable aux sens pendant le recyclage.**

### 8.8. Phase 12 - COMMERCIALISATION (H.U)



**FP1 : Permettre à RENAULT d'accroître la satisfaction de ses clients.**

**FA1 : Etre plébiscité par les concessionnaires.**

**FA2 : Motiver les fournisseurs (partenariat)**

**FA3 : Etre accessible aux supports de communication.**

**FA4 : Résister à l'ambiance pendant la commercialisation.**

**FA5 : Etre agréable aux sens pendant la commercialisation.**



# **NOUVELLES ARCHITECTURES ELECTRIQUES POUR VEHICULE THERMIQUE**

## **Résumé**

L'objet de cette thèse est de proposer de nouveaux réseaux de distribution électrique capables de produire une puissance suffisante pour une consommation en carburant minimale. Deux solutions sont envisagées : d'une part, l'élévation de la tension du réseau, dont le coût prévisionnel est important comparé aux gains potentiels et d'autre part, une architecture 12 V à deux batteries, la première étant dédiée au démarreur et la seconde, à l'alimentation des autres charges électriques.

The aim of this PhD is to propose an vehicle electrical architecture which is able to provide sufficient power for minimum petrol consumption. Two solutions are studied. The first is an increased supply voltage, whose cost is important compared with its potential advantages. The second is a 12 V architecture with two batteries, the first for supplying the starter and a second one for supplying the other electrical loads.

## **Mots-clés**

**AUTOMOBILE**

**RESEAU DE BORD**

**ALIMENTATION ELECTRIQUE**

**BATTERIE.**