



# Modélisation et optimisation des systèmes complexes en conception innovante : application aux chaines de transmission hybrides

Nesrine Ben Beldi

## ► To cite this version:

Nesrine Ben Beldi. Modélisation et optimisation des systèmes complexes en conception innovante : application aux chaines de transmission hybrides. Mécanique des structures [physics.class-ph]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2015. Français. NNT : 2015ENAM0028 . tel-03270787

**HAL Id: tel-03270787**

**<https://pastel.hal.science/tel-03270787>**

Submitted on 25 Jun 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

**Doctorat ParisTech**  
**T H È S E**

pour obtenir le grade de docteur délivré par

**L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

**Spécialité “ Mécanique ”**

*présentée et soutenue publiquement par*

**Nesrine BEN BELDI**

le 7 Septembre 2015

**Modélisation et optimisation des systèmes complexes en conception  
innovante : application aux chaines de transmission hybrides**

Directeur de thèse : **Lionel ROUCOULES**  
Co-encadrement de la thèse : **François MALBURET**

**Jury**

**M. François MALBURET**, Maître de conférences, LSIS, ENSAM  
**M. Pascal LAFON**, Professeur des universités, LASMIS, UTT  
**M. Vincent LANFRANCHI**, Professeur des universités, LEC, UTC  
**M. François MARECHAL**, Professeur des universités, SCI-STI-FM, EPFL  
**M. Lionel ROUCOULES**, Professeur des universités, LSIS, ENSAM  
**M. Sylvain ALLANO**, Responsable Direction Scientifique, PSA Peugeot Citroën  
**M. Pierre GAUTHIER**, Chef de projet MTI, PSA Peugeot Citroën

Président de Jury  
Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Examineur  
Examineur

**T  
H  
È  
S  
E**



## **Remerciements**

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail de thèse et qui sont notamment l'équipe de projet MTX à PSA Peugeot Citroën et l'équipe INSM du laboratoire LSIS.

Je remercie particulièrement Mr François MALBURET de m'avoir donné cette opportunité pour faire cette thèse et d'avoir cru en moi tout au long de notre collaboration qui dure depuis 2011 et que j'espère qu'elle continuera à exister plus longtemps.

Je remercie Mr Lionel ROUCOULES de m'avoir fait confiance en me laissant libre dans la gestion de mon planning de travail et de m'avoir appuyé tout au long de mes travaux.

Un grand merci à Mr Pierre GAUTHIER qui m'a appris toutes les astuces du métier de l'automobile, qui m'a formé techniquement, et surtout qui m'a donné la chance de comprendre, d'apprendre mais aussi d'être force de proposition dans un domaine aussi passionnant.

Je présente un énorme merci à Mr Pierre Emmanuel DUMOUCHEL pour tout ce que nous avons fait ensemble tout au long de cette thèse, pour les moments de réflexions cognitives qu'on partageait et pour son amitié qui vaut de l'or.

Je remercie Mr Tomasz KRYSINSKI et Mr Ladimir PRINCE pour leur support hiérarchique qui a permis d'assurer un bon déroulement de cette thèse.

Je remercie ma famille Lotfi, Afifa et Brahim BEN BELDI d'avoir été toujours présent, de m'avoir toujours soutenu et donner le courage pour avancer et aller vers l'avant, de m'avoir toujours couvert d'amour et de compassion et surtout d'avoir toujours cru en moi.

Je remercie ma cousine Ahlem BEN OTHMAN qui n'a jamais cessé de me guider et de m'orienter vers les chemins possibles donnant la paix intérieure, l'amour de soi-même et surtout l'évolution vers la meilleure version de soi.

Je dédie ce manuscrit à la mémoire de Mr Abdelkarim BEN RHIMA mon professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis décédé en 2013, ainsi qu'à ma grand-mère Nejia JOUINI et ma cousine Lamia BEN OTHMAN.

Pour finir, je remercie du fond du cœur chaque personne qui a cru en moi et qui m'a guidé d'une façon ou d'une autre à savoir que la richesse de la vie n'est autre que l'amour de ceux qui nous entoure et que le succès n'est autre que la passion en ce que nous faisons.

## Résumé

Dans un contexte industriel qui évolue rapidement et constamment, les constructeurs automobiles sont amenés à développer des produits qui soient en adéquation avec des demandes d'un marché international et qui respectent en même temps les contraintes réglementaires imposées. Les systèmes de chaîne de transmission hybrides rentrent donc dans cette volonté des constructeurs à vouloir proposer des produits véhicules performants, à faible coût et respectant les contraintes d'émission de gaz polluants. A travers le travail effectué dans cette thèse, nous proposons une démarche de conception permettant de modéliser un système technique complexe à différents niveaux systémiques au cours du cycle de conception, de l'optimiser localement à partir des expertises métiers, de modéliser les connaissances collaboratives qui sont échangées entre les modèles métiers et d'optimiser l'espace de conception afin de converger vers une solution de conception optimale dans un contexte d'innovation ou nous partons de la feuille blanche.

L'objectif de ce travail est de proposer une nouvelle façon d'aborder les problèmes de conception des systèmes complexes, qui s'adapte au contexte de conception innovante tout comme la conception routinière. Ceci afin de permettre aux entreprises telles que PSA Peugeot Citroën de pouvoir proposer des produits avec des technologies à forte rupture tout en réduisant leurs coûts et garantir leurs images de marque. Ce travail a été illustré et validé à travers les résultats obtenus dans le cadre du projet de conception de chaîne de transmission hybride MTI effectué au département d'innovation de PSA Peugeot Citroën.

### **Mots clés:**

Conception des systèmes complexes, modélisation multi-vues, ingénierie dirigée par les modèles, optimisation, chaîne de transmission hybride, modèles d'expertises.

## Sommaire

|                                                                                                                                                   |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>LISTE DES ILLUSTRATIONS .....</b>                                                                                                              | <b>8</b>  |
| <b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>                                                                                                                   | <b>12</b> |
| <b>NOMENCLATURE .....</b>                                                                                                                         | <b>14</b> |
| <b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>                                                                                                                | <b>19</b> |
| I.    CONTEXTE DE LA THESE : MODELISATION ET CONCEPTION DES CDT HYBRIDES .....                                                                    | 20        |
| II.   PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE TRAITEE .....                                                                                                    | 23        |
| III.  ORGANISATION DU MEMOIRE .....                                                                                                               | 23        |
| <b>CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART DE L'ETUDE .....</b>                                                                                                | <b>27</b> |
| I.    DEFINITIONS DES SYSTEMES, SOUS-SYSTEMES ET SYSTEMES COMPLEXES .....                                                                         | 29        |
| 1. <i>Systèmes et sous-systèmes .....</i>                                                                                                         | <i>29</i> |
| 2. <i>Les systèmes complexes .....</i>                                                                                                            | <i>30</i> |
| 3. <i>Classification des systèmes complexes .....</i>                                                                                             | <i>32</i> |
| II.   MODELISATION DES SYSTEMES CONCRETS MULTI-PHYSIQUES.....                                                                                     | 33        |
| 1. <i>Modélisation et modèles en ingénierie système.....</i>                                                                                      | <i>33</i> |
| 2. <i>Modélisation et méta-modèles en ingénierie système.....</i>                                                                                 | <i>34</i> |
| 3. <i>Modélisation des connaissances dans un environnement de conception .....</i>                                                                | <i>35</i> |
| 4. <i>Modèles de données de spécifications fonctionnelles d'un système concret :<br/>définition de l'espace technologique et fonctionnel.....</i> | <i>39</i> |
| 5. <i>Modèles de données de spécifications structurelles d'un système concret : définition<br/>de l'espace structurel .....</i>                   | <i>41</i> |
| 5.1.  Les modèles de simulation physiques et phénoménologiques .....                                                                              | 41        |
| 5.2.  Les modèles de simulation heuristiques.....                                                                                                 | 44        |
| 6. <i>Modèles de données comportementaux d'un système concret : définition de l'espace<br/>comportemental.....</i>                                | <i>44</i> |
| 6.1.  Le modèle conceptuel F-PP-T.....                                                                                                            | 45        |
| 6.2.  Le modèle conceptuel Bond Graph.....                                                                                                        | 46        |
| 6.3.  La représentation conceptuelle à l'aide des méthodes des stratégies de gestion<br>d'énergie.....                                            | 47        |
| 7. <i>Résumé de l'état de l'art relatif aux modèles de données métiers .....</i>                                                                  | <i>51</i> |
| III.  MODELISATION DES CONNAISSANCES COLLABORATIVES : DEFINITION DE L'ESPACE DE<br>COLLABORATION ET DE CONVERGENCE .....                          | 52        |
| 1. <i>Approches d'implémentation des modèles de données collaboratives.....</i>                                                                   | <i>52</i> |
| 2. <i>Les modèles de collaboration .....</i>                                                                                                      | <i>54</i> |
| 2.1.  Le méta-modèle FBS-PPRE.....                                                                                                                | 54        |
| 2.2.  Le méta-modèle CPM .....                                                                                                                    | 56        |
| 2.3.  Le méta-modèle produit de MOKA .....                                                                                                        | 57        |
| 2.4.  Le méta-modèle intégré dans CODEMO .....                                                                                                    | 58        |
| 2.5.  Le méta-modèle PPO .....                                                                                                                    | 60        |
| 2.6.  Le méta-modèle KCMModel.....                                                                                                                | 62        |
| 2.7.  Le méta-modèle SysML « System modeling language ».....                                                                                      | 63        |

|                                                                                                                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.8. Résumé sur les modèles de collaboration .....                                                                                                                                | 64        |
| 3. Mécanismes de convergence et de recherche dans l'espace des solutions de conception.....                                                                                       | 66        |
| 3.1. Les approches « Pareto ».....                                                                                                                                                | 67        |
| 3.2. Les approches « Plan d'expériences ».....                                                                                                                                    | 67        |
| 3.3. Les approches « CSP ».....                                                                                                                                                   | 68        |
| 3.4. Résumé de l'état de l'art sur les mécanismes de convergence.....                                                                                                             | 70        |
| IV. POSITIONNEMENT DES TRAVAUX DE RECHERCHE FACE A L'ETAT DE L'ART.....                                                                                                           | 70        |
| <b>CHAPITRE 2 : APPROCHE DE MODELISATION DU SYSTEME TECHNIQUE POUR UNE OPTIMISATION LOCALE DU SYSTEME MTI.....</b>                                                                | <b>75</b> |
| I. PRESENTATION DU SYSTEME TECHNIQUE ET DU PROJET « MTI » .....                                                                                                                   | 76        |
| 1. Caractéristiques du système de CDT MTI.....                                                                                                                                    | 78        |
| 1.1. Analyse de la concurrence.....                                                                                                                                               | 78        |
| 1.2. Orientation du choix des principes physiques du système MTI.....                                                                                                             | 80        |
| II. DEFINITION DES FONCTIONS DE CONCEPTION AINSI QUE DES NIVEAUX DE MODELISATION DU SYSTEME MTI .....                                                                             | 81        |
| 1. Les fonctions de conception à satisfaire pour les CDT hybrides .....                                                                                                           | 81        |
| 1.1. La fonction 'Consommation' .....                                                                                                                                             | 82        |
| 1.2. La fonction 'Prestations et performances' .....                                                                                                                              | 85        |
| a. Prestations dynamiques du véhicule .....                                                                                                                                       | 85        |
| b. Prestations relatives à l'agrément de conduite .....                                                                                                                           | 86        |
| 1.3. La fonction 'architecture' .....                                                                                                                                             | 87        |
| 1.4. La fonction 'PRF : Prix de revient de fabrication' .....                                                                                                                     | 87        |
| 1.5. La fonction 'SDF : Sureté de fonctionnement' .....                                                                                                                           | 88        |
| 2. Décomposition des niveaux systémiques de modélisation.....                                                                                                                     | 89        |
| 2.1. Définition des niveaux systémiques de modélisation considérées.....                                                                                                          | 89        |
| III. APPROCHE DE DEFINITION DE L'ESPACE TECHNOLOGIQUE ET FONCTIONNEL : CONSTRUCTION DU CdC ET DEFINITION DES SPECIFICATIONS DU SYSTEME MTI AU NIVEAU SYSTEMIQUE 0 .....           | 91        |
| 1. Mise en équation du problème d'optimisation .....                                                                                                                              | 94        |
| 2. Présentation de l'approche d'optimisation au niveau systémique 0.....                                                                                                          | 96        |
| 3. Stratégie de gestion d'énergie pour le problème d'optimisation .....                                                                                                           | 98        |
| 4. Simulation et construction du CdC au niveau systémique 0 .....                                                                                                                 | 100       |
| 4.1. Analyses des résultats obtenus .....                                                                                                                                         | 105       |
| 4.2. Conclusions et définition de l'espace technologique et fonctionnel.....                                                                                                      | 112       |
| IV. APPROCHE DE DEFINITION DE L'ESPACE STRUCTUREL: DEFINITION DES SPECIFICATIONS ET OPTIMISATION DE L'ARCHITECTURE ORGANIQUE DU SYSTEME POUR LES NIVEAUX SYSTEMIQUES 1 ET 2 ..... | 115       |
| 1. Mise en équation du problème de conception .....                                                                                                                               | 117       |
| 1.1. Modélisation et optimisation du système SS2.....                                                                                                                             | 117       |
| 2. Approche d'optimisation de l'architecture structurelle .....                                                                                                                   | 122       |
| 3. Simulation et conception de l'architecture structurelle du système.....                                                                                                        | 124       |

|                                                                                                                                                                    |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4. Conclusions et présentation de l'espace structurel considéré pour le système MTI                                                                                | 129        |
| V. APPROCHE DE DEFINITION DE L'ESPACE COMPORTEMENTAL DEFINITION DES SPECIFICATIONS ET OPTIMISATION ENERGETIQUE POUR LE CONTROLE DU SYSTEME MTI AUX NIVEAUX 1 ET 2: | 130        |
| 1. Mise en place de la stratégie énergétique et développement de la strate de contrôle pour le système MTI.....                                                    | 131        |
| 2. Approche d'optimisation de la stratégie de gestion d'énergie du système MTI ....                                                                                | 138        |
| 2.1. Stratégie de gestion d'énergie optimisée.....                                                                                                                 | 139        |
| 3. Simulation et développement des lois de commandes .....                                                                                                         | 141        |
| 3.1. Calcul des lois de commandes .....                                                                                                                            | 141        |
| 3.2. Simulation des stratégies de gestion d'énergie .....                                                                                                          | 145        |
| 3.3. Conclusion et définition de l'espace comportemental .....                                                                                                     | 148        |
| VI. CONCLUSION ET PRESENTATION DE L'ENVIRONNEMENT DE CONCEPTION DU SYSTEME TECHNIQUE .....                                                                         | 149        |
| <b>CHAPITRE 3 : APPROCHE DE MODELISATION DES CONNAISSANCES ET DE DEFINITION DE L'ESPACE COLLABORATIF .....</b>                                                     | <b>151</b> |
| I. DEFINITION DE L'ESPACE DE COLLABORATION : MODELISATION ET REPRESENTATION DES CONNAISSANCES HETEROGENES COLLABORATIVES .....                                     | 153        |
| II. MISE EN PLACE DU META-MODELE UNIFIE PPO ET IMPLEMENTATION SOUS ECLIPSE MODELING FRAMEWORK.....                                                                 | 158        |
| III. OPTIMISATION DANS L'ESPACE DE SOLUTIONS ADMISSIBLES GLOBAL .....                                                                                              | 163        |
| 1. Développement du propageur de contraintes CSP dans Or-Tool.....                                                                                                 | 164        |
| 2. Optimisation et simulation de l'expérimentation sur le système MTI.....                                                                                         | 165        |
| IV. CONCLUSION ET PRESENTATION DE L'ENVIRONNEMENT DE CONCEPTION DU SYSTEME TECHNIQUE MTI .....                                                                     | 169        |
| <b>CONCLUSION GENERALE .....</b>                                                                                                                                   | <b>171</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIES.....</b>                                                                                                                                         | <b>175</b> |
| <b>ANNEXES.....</b>                                                                                                                                                | <b>181</b> |
| I. CONDITIONS DE PASSAGE DES MODES DE FONCTIONNEMENT DE LA CDT eMTI : A1... 181                                                                                    |            |



## Liste des Illustrations

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURE 1. CYCLE EN V DES PHASES DE DEVELOPPEMENT D'UN PRODUIT (COURS_MICROLIC) ..                                                | 21 |
| FIGURE 2. DESCRIPTION DE L'ESPACE DE TRAVAIL DE LA THESE .....                                                                   | 24 |
| FIGURE 3. LES ESPACES D'EXPERTISES CONSIDERES POUR LA MODELISATION .....                                                         | 28 |
| FIGURE 4. REPRESENTATION DE L'ARCHITECTURE A QUATRE NIVEAUX (DIAZ & AL, 2003) .....                                              | 34 |
| FIGURE 5. MODELE DE PLATON POUR REPRESENTER LES CONNAISSANCES (DUTANT& ENGEL, 2005) .....                                        | 35 |
| FIGURE 6. THEORIE DES MODELES CONCEPTUELS (MICOIN, 2006) .....                                                                   | 38 |
| FIGURE 7. EXEMPLE D'UN MODELE DE SIMULATION (MICOIN, 2006) .....                                                                 | 39 |
| FIGURE 8. REPRESENTATION D'UNE FONCTION D'UN SYSTEME TECHNIQUE .....                                                             | 40 |
| FIGURE 9. REPRESENTATION PAR LA THEORIE DES GRAPHS D'UN SYSTEME BIELLE MANIVELLE .....                                           | 42 |
| FIGURE 10. MODELE DE DONNEES POUR LE CHOIX DES COMPOSANTS TECHNOLOGIQUES .....                                                   | 45 |
| FIGURE 11. MODELISATION D'UN SYSTEME DE ROTOR DE MOTEUR ELECTRIQUE ISSU DE LA MODELISATION F-PP-T (KLEIN MEYER, 2008) .....      | 46 |
| FIGURE 12. REPRESENTATION BOND GRAPH D'UN SYSTEME MASSE-RESSORT (FICHO, 2006) ..                                                 | 47 |
| FIGURE 13. CLASSIFICATION DES STRATEGIES DE GESTION ENERGETIQUES .....                                                           | 48 |
| FIGURE 14. CALCUL DES CHEMINS OPTIMAUX (JALAL, 2007) .....                                                                       | 50 |
| FIGURE 15. CALCUL DES COUTS ENERGETIQUES DE CHAQUE CHEMIN OPTIMAL (JALAL, 2007) ..                                               | 50 |
| FIGURE 16. RELATIONS ENTRE LES MODELES DE DONNEES D'EXPERTISES .....                                                             | 52 |
| FIGURE 17. LES APPROCHES D'IMPLEMENTATION PAR INTEGRATION, UNIFICATION ET FEDERATION DES MODELES DE DONNEES COLLABORATIVES ..... | 53 |
| FIGURE 18. DIAGRAMME DE CLASSES DU META-MODELE FBS-PPRE (LABROUSSE&AL, 2008)                                                     | 55 |
| FIGURE 19. CATEGORIES DE CLASSE DU META-MODELE CPM (SUDARSAN&AL, 2005) .....                                                     | 56 |
| FIGURE 20. META-MODELE DU PRODUIT MOKA (STOKES, 2001) .....                                                                      | 57 |
| FIGURE 21. MODELE INFORMEL ICARE DE MOKA .....                                                                                   | 58 |
| FIGURE 22. MODELEUR DE CONCEPTION INTEGREE CODEMO (ROUCOULES, 1999) .....                                                        | 59 |
| FIGURE 23. DECOMPOSITION MULTI-VUES DANS CODEMO (ROUCOULES, 1999) .....                                                          | 60 |
| FIGURE 24. DIAGRAMME DE CLASSES DU META-MODELE PPO (NOEL, 2008) .....                                                            | 61 |
| FIGURE 25. DIAGRAMME DE CLASSES DU META-MODELE PRODUIT DANS PPO (NOEL, 2008) ....                                                | 62 |
| FIGURE 26. PROCESSUS GLOBAL DE KCMETHOD (BADIN, 2011) .....                                                                      | 62 |
| FIGURE 27. PROCESSUS GLOBAL ET PRINCIPE DE KCMETHOD (BADIN, 2011) .....                                                          | 63 |
| FIGURE 28. DIAGRAMME SysML (OMG, 2008) .....                                                                                     | 64 |
| FIGURE 29. POSITIONNEMENT DES MODELES DE COLLABORATION DANS L'ENVIRONNEMENT DE CONCEPTION .....                                  | 66 |
| FIGURE 30. FLOWCHART DE L'APPROCHE "PARETO" (YVARS, 2012) .....                                                                  | 67 |
| FIGURE 31. FLOWCHART DE L'APPROCHE DOE (YVARS, 2012) .....                                                                       | 68 |
| FIGURE 32. FLOWCHART DE L'APPROCHE CSP (YVARS, 2012) .....                                                                       | 69 |
| FIGURE 33. ENVIRONNEMENT DE CONCEPTION DE NOTRE PROPOSITION DE RECHERCHE .....                                                   | 71 |
| FIGURE 34. L'ENVIRONNEMENT DE CONCEPTION CONSIDERE .....                                                                         | 76 |
| FIGURE 35. LE SYSTEME FLYWHEEL (VOLANT D'INERTIE) DE PORSCH (WIKIPEDIA) .....                                                    | 78 |
| FIGURE 36. LE SYSTEME FLYWHEEL DE VOLVO (TECHNO-CAR, 2011) .....                                                                 | 79 |

|                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURE 37.CONFIGURATION MACROSCOPIQUE DE MTI.....                                                                                                            | 81  |
| FIGURE 38.CYCLE D'HOMOLOGATION MVEG .....                                                                                                                    | 82  |
| FIGURE 39.CYCLE D'HOMOLOGATION WLTC .....                                                                                                                    | 83  |
| FIGURE 40.CARTOGRAPHIES DE CSE POUR UN MOTEUR THERMIQUE .....                                                                                                | 84  |
| FIGURE 41.EXEMPLES D'ACCELERATIONS CIBLES POUR LE TYPAGE DU CONDUCTEUR.....                                                                                  | 86  |
| FIGURE 42.EVOLUTION DES DIMENSIONS DE L'ENVIRONNEMENT DE CONCEPTION .....                                                                                    | 89  |
| FIGURE 43.PROJECTION DES NIVEAUX DE MODELISATION DANS L'ESPACE DE CONCEPTION .....                                                                           | 91  |
| FIGURE 44.SYSTEME A OPTIMISER ET A DEFINIR.....                                                                                                              | 94  |
| FIGURE 45.MODELISATION DU SYSTEME MTI AU NIVEAU 0 .....                                                                                                      | 94  |
| FIGURE 46.DIAGRAMME DE L'APPROCHE D'OPTIMISATION DU CdC DEVELOPPEE .....                                                                                     | 97  |
| FIGURE 47.FONCTIONNEMENT DU SUPERVISEUR .....                                                                                                                | 99  |
| FIGURE 48. ORGANIGRAMME DU MODELE MATLAB POUR L'OPTIMISATION DU CdC .....                                                                                    | 101 |
| FIGURE 49. PROCEDURE D'HOMOLOGATION DE LA CONSOMMATION POUR LES VEHICULES<br>HYBRIDES (DOCUMENT INTERNE PSA) .....                                           | 103 |
| FIGURE 50. CALCUL DE LA DISTANCE ZEV .....                                                                                                                   | 104 |
| FIGURE 51. EXEMPLE DE NIVEAUX D'INFLUENCES DES DEGRES DE LIBERTE SUR LA FONCTION<br>CONSOMMATION DU SYSTEME EMTI.....                                        | 104 |
| FIGURE 52.L'ESPACE DE SOLUTIONS CALCULEES A PARTIR DU PLAN D'EXPERIENCES .....                                                                               | 105 |
| FIGURE 53. DOMAINES DE VALIDITE DE L'ESPACE TECHNOLOGIQUE ET FONCTIONNEL DE LA<br>MACHINE ELECTRIQUE PAR RAPPORT A LA CONSOMMATION DU MOTEUR THERMIQUE ..... | 106 |
| FIGURE 54.EVOLUTION DE LA CONSOMMATION DU MOTEUR THERMIQUE PAR RAPPORT AUX<br>PARAMETRES DU SYSTEME ELECTRIQUE.....                                          | 107 |
| FIGURE 55. EVOLUTION DE LA DISTANCE ZEV PAR RAPPORT AUX PARAMETRES DU SYSTEME<br>ELECTRIQUE .....                                                            | 108 |
| FIGURE 56. EVOLUTION DES OBJECTIFS (CONSOMMATION ET DISTANCE ZEV) PAR RAPPORT AUX<br>PARAMETRES DU VOLANT D'INERTIE .....                                    | 108 |
| FIGURE 57. FONCTIONNEMENT DU SYSTEME EMTI LORS DU ROULAGE DU VEHICULE .....                                                                                  | 109 |
| FIGURE 58. COURBES DE PARETO POUR L'EVALUATION DES SOLUTIONS DE LA PUISSANCE DE LA<br>MACHINE ELECTRIQUE A ISO CONSOMMATION ET ISO DISTANCE ZEV .....        | 111 |
| FIGURE 59. COURBES DE PARETO POUR L'EVALUATION DES SOLUTIONS DE SOC DE LA BATTERIE<br>A ISO CONSOMMATION ET ISO DISTANCE ZEV .....                           | 112 |
| FIGURE 60.ESPACE TECHNOLOGIQUE OPTIMISE .....                                                                                                                | 113 |
| FIGURE 61. COURBE PARETO DE COMPARAISON DE PRF POUR LE SYSTEME EMTI ET LE SYSTEME<br>HEV CLASSIQUE .....                                                     | 114 |
| FIGURE 62.SYSTEME MTI VERSION HYBRIDE MECANIQUE .....                                                                                                        | 115 |
| FIGURE 63.DECOMPOSITION SYSTEMIQUE NIVEAU 1 DE MODELISATION.....                                                                                             | 116 |
| FIGURE 64.MODELISATION SIMPLIFIEE DU SOUS-SYSTEME SS2 .....                                                                                                  | 118 |
| FIGURE 65. COUPE AXIALE D'UN VOLANT D'INERTIE CYLINDRIQUE .....                                                                                              | 118 |
| FIGURE 66. SCHEMA CINEMATIQUE D'UN TRAIN EPICYCLOÏDAL .....                                                                                                  | 119 |
| FIGURE 67. APPROCHE D'OPTIMISATION DE L'ARCHITECTURE MECANIQUE ET DE DEFINITION DE<br>L'ESPACE STRUCTUREL .....                                              | 123 |
| FIGURE 68. EXEMPLE DE REDUCTION DES DOMAINES D'EXISTENCE DES PARAMETRES<br>STRUCTURELS DU VOLANT D'INERTIE .....                                             | 124 |
| FIGURE 69. DEFINITION DE L'ESPACE STRUCTUREL DU SYSTEME VOLANT D'INERTIE.....                                                                                | 125 |

|                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURE 70. COMPARAISONS ENTRE LES DIFFERENTES SOLUTIONS CALCULEES.....                                                                     | 126 |
| FIGURE 71.SOLUTION D'ARCHITECTURE OPTIMALE DU SYSTEME SS2 .....                                                                            | 127 |
| FIGURE 72. VUE DE COUPE DU SYSTEME SS2 MODELISE SOUS CATIA.....                                                                            | 128 |
| FIGURE 73. VUE D'ENSEMBLE DE L'ARCHITECTURE MECANIQUE DE LA CDT MTI (SYSTEME SS2<br>ET SS3) .....                                          | 128 |
| FIGURE 74.DECOMPOSITION SYSTEMIQUE DE LA CDT MTI DE MODELISATION .....                                                                     | 129 |
| FIGURE 75.EVOLUTION DES PARAMETRES DESCRIPTIFS DU VOLANT D'INERTIE .....                                                                   | 130 |
| FIGURE 76.LIMITATION DU ROULAGE HYBRIDE A 90 KM/H POUR LE CYCLE CONSIDERE WLTC<br>.....                                                    | 132 |
| FIGURE 77.TRANSFERT D'ENERGIE QUAND LE VEHICULE EST A L'ARRET .....                                                                        | 132 |
| FIGURE 78.TRANSFERT D'ENERGIE EN ROULAGE FULL HYBRIDE MECANIQUE .....                                                                      | 133 |
| FIGURE 79.TRANSFERT D'ENERGIE EN ROULAGE FULL THERMIQUE .....                                                                              | 133 |
| FIGURE 80.TRANSFERT D'ENERGIE EN FREINAGE PAR RECUPERATION .....                                                                           | 133 |
| FIGURE 81.TRANSFERT D'ENERGIE EN ROULAGE MIXTE.....                                                                                        | 134 |
| FIGURE 82.TRANSFERT D'ENERGIE POUR LE DEMARRAGE DU MTH.....                                                                                | 134 |
| FIGURE 83.DEMARCHE DE SUPERVISION ET DE CALCUL .....                                                                                       | 136 |
| FIGURE 84.AUTOMATE D'ETATS FINIS DES MODES DE FONCTIONNEMENT.....                                                                          | 137 |
| FIGURE 85.APPROCHE D'OPTIMISATION ENERGETIQUE DU SYSTEME MTI .....                                                                         | 140 |
| FIGURE 86. FONCTIONNEMENT DU MOTEUR THERMIQUE POUR LES DEUX STRATEGIES DE<br>GESTION D'ENERGIE DEVELOPPEES .....                           | 140 |
| FIGURE 87. PROFIL D'ENERGIE DU VOLANT D'INERTIE EN FONCTION DE LA VITESSE DU VEHICULE<br>.....                                             | 141 |
| FIGURE 88. LES DIFFERENTS ETATS DES EMBRAYAGES DU SYSTEME MTI.....                                                                         | 142 |
| FIGURE 89.DECOMPOSITION A PARTIR DES DIFFERENTS SYSTEMES DE COUPLAGE .....                                                                 | 143 |
| FIGURE 90. POSTES D'ECHANGES D'ENERGIE DANS LA BRANCHE HYBRIDE DU SYSTEME MTI..                                                            | 145 |
| FIGURE 91. MODELISATION A L'AIDE DU FORMALISME BOND GRAPH DU SYSTEME MTI.....                                                              | 146 |
| FIGURE 92. OUTILS DE SIMULATION DU COMPORTEMENT DU SYSTEME MTI.....                                                                        | 147 |
| FIGURE 93.EXEMPLE DE COMPARAISON PAR RAPPORT A LA COMMANDE DE LA TRANSMISSION<br>MECANIQUE EN FONCTION DU CHANGEMENT DE LA STRATEGIE ..... | 148 |
| FIGURE 94. ENVIRONNEMENT DE CONCEPTION DU SYSTEME MTI.....                                                                                 | 152 |
| FIGURE 95. DESCRIPTION DU SYSTEME MTI ET REPRESENTATION DE SA DECOMPOSITION<br>SYSTEMIQUE DANS L'ENVIRONNEMENT DE CONCEPTION .....         | 154 |
| FIGURE 96. EXEMPLE DE REPRESENTATION D'UN ESPACE METIER DU SYSTEME MTI DANS UN<br>NIVEAU PRECIS.....                                       | 155 |
| FIGURE 97. MODELISATION MULTI-VUES DES CONNAISSANCES COLLABORATIVES DU SYSTEME<br>MTI .....                                                | 157 |
| FIGURE 98. REPRESENTATION DES ENTITES DE MODELISATION .....                                                                                | 158 |
| FIGURE 99. DESCRIPTION DES COMPOSANTS DE MODELISATION.....                                                                                 | 159 |
| FIGURE 100. MODELISATION DES DONNEES D'ENTREE/SORTIE DES MODELES METIERS .....                                                             | 159 |
| FIGURE 101. DESCRIPTION DES INTERFACES DE COLLABORATION.....                                                                               | 160 |
| FIGURE 102. DESCRIPTION DES RELATIONS INTRA ET INTER-MODELES.....                                                                          | 161 |
| FIGURE 103. DESCRIPTION DES FONCTIONS DE CONCEPTION A L'AIDE DES VUES .....                                                                | 161 |
| FIGURE 104. REPRESENTATION DES ESPACES D'EXPERTISES .....                                                                                  | 161 |
| FIGURE 105. META-MODELE UNIFIE PPO RELATIF AU SYSTEME MTI .....                                                                            | 162 |

|                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURE 106. INSTANCIATION DES DONNEES DU SYSTEME MTI DANS LE META-MODELE PPO.                                        | 163 |
| FIGURE 107. REPRESENTATION DE LA CASCADE DES SPECIFICATIONS AU COURS DU CYCLE DE<br>CONCEPTION DU SYSTEME MTI.....   | 164 |
| FIGURE 108. PRINCIPE DE DEVELOPPEMENT DU CSP .....                                                                   | 165 |
| FIGURE 109. RENSEIGNEMENT DES DONNEES PARAMETRIQUES COMMUNES AUX MODELE<br>MATLAB MOA N2 ET CATIA ARCHI MECA.....    | 166 |
| FIGURE 110. CONTRAINTES DE PROPAGATION.....                                                                          | 167 |
| FIGURE 111. REDUCTION DE LA TAILLE DE L'ESPACE DE SOLUTIONS ADMISSIBLES A PARTIR DU<br>CALCUL CSP SUR OR-TOOL .....  | 168 |
| FIGURE 112. EVOLUTION D'APCP EN FONCTION DE CPX ET APZ REPRESENTANT AINSI L'ESPACE<br>DE SOLUTIONS ADMISSIBLES ..... | 169 |
| FIGURE 113. SYSTEME DE CDT HYBRIDE MECANIQUE MTI DE PSA.....                                                         | 173 |

## Liste des Tableaux

|                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| TABLEAU 1. MODELES DE DONNEES DES SYSTEMES CONCRETS MULTI-PHYSIQUES .....                       | 51  |
| TABLEAU 2. PRESENTATION DES META-MODELES MEDiateURS POUR LES DONNEES<br>COLLABORATIVES .....    | 65  |
| TABLEAU 3. LES CLASSES DES VEHICULES EN FONCTION DE LA PM.....                                  | 83  |
| TABLEAU 4. PROBLEME D'OPTIMISATION DU CdC DU SYSTEME MTI.....                                   | 95  |
| TABLEAU 5-AUTOMATE VEHICULE .....                                                               | 99  |
| TABLEAU 6-AUTOMATE MODES DE FONCTIONNEMENT .....                                                | 100 |
| TABLEAU 7-AUTOMATE DES MODES DE FONCTIONNEMENT POUR LA STRATEGIE OPTIMISEE...                   | 110 |
| TABLEAU 8. LES CONTRAINTES DE CONCEPTION CONSIDEREES AU NIVEAU 0.....                           | 113 |
| TABLEAU 9-SOLUTION TECHNOLOGIQUE OPTIMALE POUR LE SYSTEME eMTI .....                            | 114 |
| TABLEAU 10-PERFORMANCES OBTENUES POUR LA SOLUTION OPTIMALE.....                                 | 114 |
| TABLEAU 11. DEFINITION DES INCONNUS DU PROBLEME D'OPTIMISATION .....                            | 120 |
| TABLEAU 12-LES CONTRAINTES DE CONCEPTION CONSIDEREES POUR LE SYSTEME SS2.....                   | 122 |
| TABLEAU 13-PARAMETRES DE STRUCTURES DE LA SOLUTION D'ARCHITECTURE RETENUE .....                 | 127 |
| TABLEAU 14-LES MODES DE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME MTI.....                                      | 135 |
| TABLEAU 15-PARAMETRES DE LOIS DE COMMANDES POUR LE SYSTEME MTI.....                             | 135 |
| TABLEAU 16-LOIS DE COMMANDE DES SYSTEMES DE COUPLAGES .....                                     | 143 |
| TABLEAU 17-INTERFACE DE CONNEXION DEVELOPPE ENTRE LES DEUX MODELES.....                         | 147 |
| TABLEAU 18. REPRESENTATION DES CONCEPTS DE MODELISATION DANS LE META-MODELE<br>PRODUIT PPO..... | 160 |
| TABLEAU 19. PRESENTATION DE LA SOLUTION DE CONCEPTION RETENUE .....                             | 169 |

## Liste des Abréviations

|                  |                                                             |
|------------------|-------------------------------------------------------------|
| CdC              | Cahier des charges                                          |
| CDT              | Chaine de transmission                                      |
| MTI              | Modular Inertial Transmission                               |
| IDM              | Ingénierie dirigée par les modèles                          |
| HEV              | Hybrid Electric Vehicle                                     |
| PHEV             | PlugIn Hybrid Electric Vehicle                              |
| EV               | Electric Vehicle                                            |
| CVT              | Continuously variable transmission                          |
| eMTI             | Electrical Modular Inertial Transmission                    |
| NEDC             | New European Driving Cycle                                  |
| MVEG             | Motor Vehicle Emissions Group                               |
| WLTP             | Worldwide harmonized Light Vehicles Test Procedures         |
| WLTC             | Worldwide harmonized Light Vehicles Test Cycle              |
| GMP              | Groupe motopropulseur dans un véhicule                      |
| ZEV              | Zero emission vehicle                                       |
| R <sub>CDC</sub> | Distance totale parcourue en cycle Depleting et transitoire |
| R <sub>CDA</sub> | Distance totale parcourue en cycle Depleting uniquement     |

## Nomenclature

|                       |                                                                                                   |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $C_{Mth}$             | Couple du moteur thermique (Nm)                                                                   |
| $\omega_{Mth}$        | Vitesse de rotation du moteur thermique (rad.s <sup>-1</sup> ) ou (tr.mn <sup>-1</sup> )          |
| $Conso_{Mth}$         | Consommation du moteur thermique (g/km)                                                           |
| $P_m$                 | Puissance massique du véhicule (W/kg)                                                             |
| $V_{max}$             | Vitesse maximale du véhicule (km/h)                                                               |
| $\dot{m}_{carburant}$ | Débit d'essence (g/s)                                                                             |
| $P_{effective}$       | Puissance moteur effective calculée au niveau du vilebrequin (W)                                  |
| $CSE$                 | Consommation spécifique effective du moteur thermique (g/kWh)                                     |
| $\eta_{gMth}$         | Rendement global du moteur thermique                                                              |
| $PCI$                 | Pouvoir calorifique du carburant (kJ/kg)                                                          |
| $E_{CVI\_min}$        | Energie cinétique minimale du volant d'inertie (kJ)                                               |
| $E_{CVI\_max}$        | Energie cinétique maximale du volant d'inertie (kJ)                                               |
| $E_{CVI\_utile}$      | Energie cinétique disponible dans le volant d'inertie (kJ)                                        |
| $E_{CVI\_utile\_max}$ | Energie cinétique maximale disponible dans le volant d'inertie (kJ)                               |
| $\omega_{VI}$         | Vitesse de rotation du volant d'inertie (rad.s <sup>-1</sup> ) ou (tr.mn <sup>-1</sup> )          |
| $\omega_{VI\_maxi}$   | Vitesse de rotation maximale du volant d'inertie (rad.s <sup>-1</sup> ) ou (tr.mn <sup>-1</sup> ) |
| $\omega_{VI\_min}$    | Vitesse de rotation minimale du volant d'inertie (rad.s <sup>-1</sup> ) ou (tr.mn <sup>-1</sup> ) |
| $P_{VI\_max}$         | Puissance maximale du volant d'inertie (kW)                                                       |
| $P_{VI}$              | Puissance du volant d'inertie (kW)                                                                |
| $E_{CVI}$             | Energie cinétique du volant d'inertie (kJ)                                                        |
| $\eta_{VI}$           | Rendement du volant d'inertie                                                                     |
| $I_{VI}$              | Inertie du volant d'inertie (kg m <sup>2</sup> )                                                  |
| $SOC$                 | Etat de charge de la batterie (% de kWh)                                                          |
| $SOC_{max}$           | Etat de charge maximale que la batterie peut avoir (% de kWh)                                     |
| $SOC_{min}$           | Etat de charge minimale que la batterie peut avoir (% de kWh)                                     |

|                           |                                                                                                                                                      |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $i(t)$                    | Courant aux bornes de la batterie (A)                                                                                                                |
| $C$                       | Capacité de la batterie (Ah)                                                                                                                         |
| $P_{Mel\_max}$            | Puissance maximale de la machine électrique (kW)                                                                                                     |
| $P_{batterie}$            | Puissance globale de la batterie (kW)                                                                                                                |
| $Pertes_{Mel}$            | Pertes de la machine électrique (kW)                                                                                                                 |
| $Pertes_{batterie}$       | Pertes de la batterie (kW)                                                                                                                           |
| $P_{batterie\_effective}$ | Puissance effective de la batterie (kW)                                                                                                              |
| $\eta_{Elec}$             | Rendement global du système électrique                                                                                                               |
| $q_{essence}$             | Quantité de carburant injectée (g de CO <sub>2</sub> )                                                                                               |
| $P_{roue}$                | Puissance à la roue (kW)                                                                                                                             |
| $\eta_{transmission}$     | Rendement global de la transmission mécanique                                                                                                        |
| $P_{Elec}$                | Puissance aux bornes du système électrique (kW)                                                                                                      |
| $E_{Consigne\_roue}$      | Energie cinétique du véhicule (kJ)                                                                                                                   |
| $\omega_{VI\_Niveau\_AP}$ | Vitesse de rotation du Volant d'inertie vue au niveau de l'arbre<br>primaire de la boîte de vitesse (rad.s <sup>-1</sup> ) ou (tr.mn <sup>-1</sup> ) |
| $e_{VI\_carter}$          | Epaisseur entre le volant d'inertie et son carter (mm)                                                                                               |
| $r_{int\_VI}$             | Rayon intérieur du volant d'inertie (mm)                                                                                                             |
| $r_{ext\_VI}$             | Rayon extérieur du volant d'inertie (mm)                                                                                                             |
| $L_{axial\_VI}$           | Largeur axiale du volant d'inertie (mm)                                                                                                              |
| $L_{elec\_VI}$            | Largeur axiale de la machine électrique (mm)                                                                                                         |
| $R_{TE}$                  | Rapport de réduction du train épicycloïdale                                                                                                          |
| $d_{pC}$                  | Diamètre primitif de la couronne du train épicycloïdal (mm)                                                                                          |
| $d_{pS}$                  | Diamètre primitif du satellite du train épicycloïdal (mm)                                                                                            |
| $d_{pP}$                  | Diamètre primitif du planétaire du train épicycloïdal (mm)                                                                                           |
| $d_{int\_Emb\_VI}$        | Diamètre intérieur de l'embrayage du volant d'inertie (mm)                                                                                           |
| $d_{ext\_Emb\_VI}$        | Diamètre extérieur de l'embrayage du volant d'inertie (mm)                                                                                           |



|                             |                                                                         |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| $n_{Emb\_VI}$               | Nombre de disques de l'embrayage du volant d'inertie (mm)               |
| $CT_{maxi\_Emb\_VI}$        | Couple transmissible maximale Embrayage du volant d'inertie (Nm)        |
| $d_{int\_Emb\_Mth}$         | Diamètre intérieur de l'embrayage du moteur thermique (mm)              |
| $d_{ext\_Emb\_Mth}$         | Diamètre extérieur de l'embrayage du moteur thermique (mm)              |
| $n_{Emb\_Mth}$              | Nombre de disques de l'embrayage du moteur thermique (mm)               |
| $CT_{maxi\_Emb\_Mth}$       | Couple transmissible maximale Embrayage du moteur thermique (Nm)        |
| $d_{int\_piston\_Emb\_Mth}$ | Diamètre intérieur du piston Embrayage moteur thermique (mm)            |
| $d_{ext\_piston\_Emb\_Mth}$ | Diamètre extérieur du piston Embrayage moteur thermique (mm)            |
| $d_{int\_piston\_Emb\_VI}$  | Diamètre intérieur du piston Embrayage du volant d'inertie (mm)         |
| $d_{ext\_piston\_Emb\_Mth}$ | Diamètre extérieur du piston Embrayage du volant d'inertie (mm)         |
| $\sigma_{maxi\_elastique}$  | Limite de rupture élastique du volant d'inertie                         |
| $CT_{maxi}$                 | Couple transmissible maximale autorisé par le fournisseur (Nm)          |
| $masse_{VI}$                | Masse du volant d'inertie (kg)                                          |
| $R_{global}$                | Rapport de réduction global de la transmission mécanique de MTI         |
| $C_{frein}$                 | Couple du système de freinage piloté (Nm)                               |
| $\eta_{rech\_par\_récup}$   | Rendement de recharge par récupération du volant d'inertie              |
| $E_{C\_décélération}$       | La quantité d'énergie de décélération (kJ)                              |
| $E_{C\_nécess\_ph\_prop}$   | La quantité d'énergie nécessaire pour la phase de propulsion (kJ)       |
| $CT_{Emb}$                  | Couple transmissible des embrayages (Nm)                                |
| $Err_{Vit}$                 | L'erreur calculée entre une vitesse cible et une vitesse réelle (km/h)  |
| $Vit_{Veh}$                 | Vitesse du véhicule calculée (km/h)                                     |
| $CnsVit_{Veh}$              | La vitesse véhicule cible demandée en consigne (km/h)                   |
| $CT_{Emb\_Rav\_Ent}$        | Couple transmissible du train ravigneau en entrée boîte de vitesse (Nm) |
| $C_{SBV}$                   | Couple en sortie de boîte de vitesse incluant le pont différentiel (Nm) |
| $CLDR$                      | Couple relatif à la loi de route du véhicule (Nm)                       |
| $I_{Veh}$                   | Inertie du véhicule (kg.m <sup>2</sup> )                                |

|                       |                                                                            |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| $\dot{\omega}_{roue}$ | Accélération des roues du véhicule ( $\text{rad.s}^{-2}$ )                 |
| $C_{AP}$              | Couple sur l'arbre primaire (Nm)                                           |
| $\dot{\omega}_{AP}$   | Accélération de l'arbre primaire ( $\text{rad.s}^{-2}$ )                   |
| $\omega_{AP}$         | Vitesse de rotation de l'arbre primaire ( $\text{rad.s}^{-2}$ )            |
| $\omega_{roue}$       | Vitesse de rotation des roues du véhicule ( $\text{rad.s}^{-2}$ )          |
| $\dot{R}_{global}$    | Dérivée du rapport de réduction global de la transmission mécanique de MTI |
| $I_{AP}$              | Inertie de l'arbre primaire ( $\text{kg.m}^2$ )                            |
| $AS1x$                | Entraxe de l'arbre secondaire 1 suivant l'axe x (mm)                       |
| $AS1z$                | Entraxe de l'arbre secondaire 1 suivant l'axe z (mm)                       |
| $AS2x$                | Entraxe de l'arbre secondaire 2 suivant l'axe x (mm)                       |
| $AS2z$                | Entraxe de l'arbre secondaire 2 suivant l'axe z (mm)                       |
| $AS3x$                | Entraxe de l'arbre secondaire 3 suivant l'axe x (mm)                       |
| $AS3z$                | Entraxe de l'arbre secondaire 3 suivant l'axe z (mm)                       |
| $AS4x$                | Entraxe de l'arbre secondaire 4 suivant l'axe x (mm)                       |
| $AS4z$                | Entraxe de l'arbre secondaire 4 suivant l'axe z (mm)                       |
| $APx$                 | Entraxe de l'arbre primaire suivant l'axe x (mm)                           |
| $APz$                 | Entraxe de l'arbre primaire suivant l'axe z (mm)                           |
| $CPx$                 | Entraxe de la couronne de pont suivant l'axe x (mm)                        |
| $CPz$                 | Entraxe de la couronne de pont suivant l'axe z (mm)                        |
| $APCP$                | Proximité entre l'arbre secondaire et la couronne de pont (mm)             |
| $E_{batterie}$        | Energie effective de la batterie à un instant t (MJ)                       |
| $E_{batterie\_max}$   | Energie maximale disponible dans la batterie (MJ)                          |



## Introduction générale

L'humanité n'a jamais été témoin d'un monde aussi évolutif et changeant comme l'est le nôtre aujourd'hui. Notre ère est caractérisée par une rapide expansion et d'innombrables phases de transition qui ont pour but d'assurer l'adaptation des systèmes déjà existants vers de nouvelles formes et/ou structures de fonctionnement. Qu'il s'agisse d'un système politico-économique d'un gouvernement, d'un schéma social prédéfini, ou bien d'une orientation industrielle d'un milieu quelconque, tout est susceptible d'être remis en cause, modifié et/ou changé en fonction des demandes et des exigences des nouvelles tendances relatives au mode de vie de l'Homme. Ces tendances sont le plus souvent issues de l'environnement dans lequel nous coexistons et traduisent d'une façon ou d'une autre nos aptitudes d'évolution en tant qu'espèce. Elles sont issues de l'état de nos systèmes économiques (prospérant, en crise, stagnant, etc.), mais aussi de l'état de notre planète (polluée, écosystème en déséquilibre, etc.), et sont conditionnées par nos dépendances aux fluctuations du prix des sources d'énergie indispensables à notre mode de vie. L'une des sources la plus importante est l'énergie fossile qui a influencé d'une manière considérable la croissance et l'inflation dans les pays du monde. En effet, l'impact des fluctuations du prix du pétrole sur l'orientation des politiques économico-sociales est devenu une évidence de vie pour nous. Cependant, de par les fortes instabilités de ces sources et les dégâts engendrés sur l'environnement suite à leurs utilisations, nous avons commencé à prendre en compte l'impact environnemental à travers la mise en place de nouvelles normes et réglementations et à réfléchir sur les différents aspects de l'écoconception lors du développement de nos produits industriels. Ces normes se traduisent dans l'industrie de transport par une prise de conscience collective permettant de limiter les émissions des gaz polluants et leur dépendance à l'énergie fossile. Ainsi, les constructeurs automobiles sont amenés à réadapter leurs produits en fonction de ces nouvelles règles et d'intégrer les concepts de l'écoconception tout au long du cycle de vie du produit (Garcia, 2015).

Ceci dit, les impacts environnementaux ne sont pas les seuls qui influencent l'évolution de l'industrie automobile ainsi que son schéma économique. De par le fait du caractère concurrentiel de ce secteur ainsi que la migration vers une structure de mondialisation, le marché de l'automobile évolue d'un marché local (exemple : le marché européen, le marché américain, etc.) vers une politique de marché international. En effet, les constructeurs d'automobile aujourd'hui, sont amenés à concevoir des produits qui doivent s'adapter, non plus aux exigences locales de leur marché habituel et connu, mais plutôt aux différentes exigences contenues dans l'internationalisation du marché de l'automobile.

Tous ces éléments ont favorisé l'expansion et l'évolution des notions d'hybridation dans le secteur de l'automobile. Le premier concept hybride est apparu en 1905 avec le brevet déposé par Piper pour son moteur gasoil-électrique et a été témoin de plusieurs changements. En effet, suite aux avancées technologiques remarquables effectuées sur les moteurs thermiques et la disponibilité des énergies fossiles, les voitures hybrides ont disparu pour réapparaître de nouveau dans les années 70 qui se caractérisent par les premières crises pétrolières. Puis, l'intérêt porté par les constructeurs automobiles envers les véhicules hybrides a été ralenti

encore une fois suite à la chute du prix du pétrole, et ce n'est que deux décennies plus tard qu'ils ont commencé sérieusement à investir dans ce domaine dans le but de réduire leurs coûts de production et de s'aligner aux normes et réglementations limitant les consommations des voitures.

Afin de concevoir ces systèmes de véhicules hybrides, plusieurs techniques et moyens sont utilisés parmi lesquels nous pouvons citer les avancées effectuées sur les modes de fonctionnement du moteur thermique et sur l'allègement du véhicule grâce à l'utilisation de nouveaux matériaux plus légers que l'acier tels que l'aluminium ou les matériaux composites. Cependant, ce n'est qu'après avoir exploité la majorité des pistes d'amélioration des performances du moteur thermique, que les constructeurs ont commencé à étudier et à réfléchir sur une autre piste d'amélioration portant sur les chaînes de transmission. Nous assistons ainsi aujourd'hui à l'apparition de concepts de chaînes de transmission hybrides dites CDT hybrides, avec des spécificités particulières, telles que la possibilité de stocker de l'énergie dans un accumulateur spécifique, et/ou la possibilité de fonctionner sur des points de meilleurs rendements, etc.

Les chaînes de transmission d'un véhicule particulier, sont devenues de nos jours un élément majeur permettant la réalisation de la fonction d'hybridation d'un véhicule donné, mais aussi la réduction des émissions polluantes, qui sont principalement issues du moteur thermique, ainsi que l'amélioration des performances du véhicule grâce à l'intégration de certaines fonctionnalités particulières que nous n'avons pas la possibilité d'avoir avec un véhicule conventionnel (exemple : les fonctions Boost<sup>1</sup>, roulage en zéro émission<sup>2</sup>, etc.) Ainsi, la conception des chaînes de transmission hybride, doit être effectuée de manière à prendre en compte la diversité technologique et les contraintes de fonctionnement des composants de ces systèmes multi-physiques, mais aussi en respectant le temps de conception et les performances exprimées dans le cahier des charges (CdC). Les méthodes de conception et de dimensionnement de ses systèmes doivent alors être adaptées en fonction des nouvelles spécificités et fonctionnalités requises pour les CDT hybrides

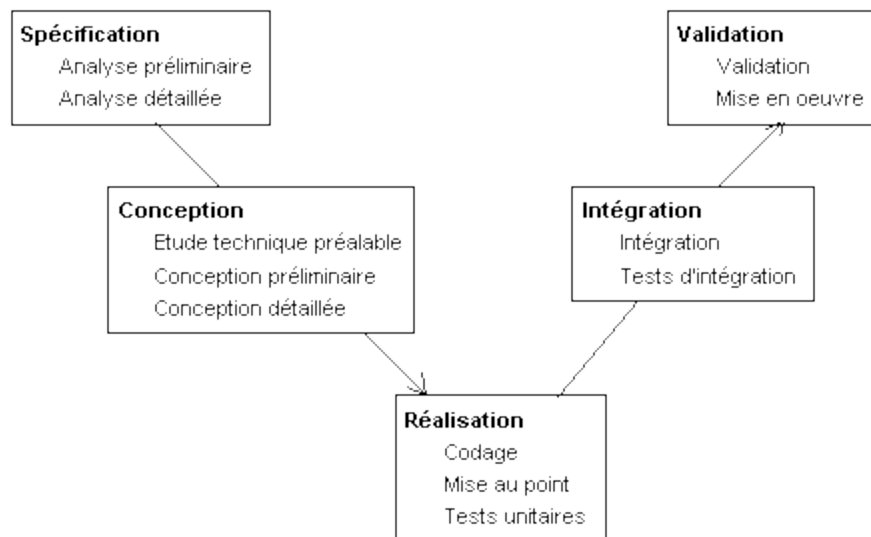
## **I. Contexte de la thèse : modélisation et conception des CDT hybrides**

La conception des chaînes de transmission hybrides, s'appuie principalement sur le savoir-faire, l'expertise et l'expérience de l'équipe des concepteurs. La démarche de conception suivie se base sur le très classique Cycle en V (Figure 1) avec les différentes étapes de spécifications, de dimensionnement, et de validation.

---

<sup>1</sup> La fonction BOOST consiste à générer par le système hybride une puissance supplémentaire à celle délivrée par le moteur thermique lors de l'accélération du véhicule.

<sup>2</sup> Consiste à rouler par le véhicule sans générer les émissions polluantes de CO<sub>2</sub> et de NO<sub>x</sub>



**Figure 1. Cycle en V des phases de développement d'un produit (Cours\_Microlic)**

Chacune des étapes fait appel à différentes méthodes telles que l'analyse fonctionnelle pour la phase de spécifications ou bien la modélisation énergétique du système par exemple pour la phase de conception détaillée, permettant ainsi à l'ingénieur de proposer un résultat. En effet, ce dernier peut s'appuyer sur un ensemble d'étapes d'essais et de corrections, qui sont effectuées à l'aide de la simulation numérique, des démarches d'optimisation ou bien des démarches inverses (Laffite, 2004) afin de pouvoir dimensionner son système et améliorer ses performances. Cependant, ces méthodes n'utilisent pas la même formulation du problème (le problème peut être exprimé d'une manière analytique, ou même par une simple phrase), ne gèrent pas les mêmes données (performances, comportement, prix, etc.), et par la suite, ils ne fournissent pas le même type de résultats (consommation, prix, prestations, etc.).

Lors de la conception d'une chaîne de transmission hybride, les ingénieurs se retrouvent confrontés à des difficultés de plusieurs types. Les premières sont issues du contexte socio-économique et de la stratégie de marketing et de marques, qui définissent principalement la prise de décision hiérarchique lorsqu'il s'agit de concevoir un système. Dans le cadre de ces travaux de recherche, ces aspects ne seront pas traités. Cependant, de ce premier type de difficulté, naît le besoin d'innover et de réfléchir aux verrous technologiques liés à la conception des chaînes de transmission hybrides. Ainsi, apparaît la seconde source de difficultés concernant ce type de système relative à leur aspect technologique (quelle technologie choisir?), paramétrique (quelles sont les dimensions du système?) et comportementale (quelle stratégie de fonctionnement et de commandes adopter pour faire fonctionner le système correctement?). Le choix du principe physique ainsi que la solution technologique sont largement influencés par les tendances et l'évolution du marché de la concurrence. En effet, il existe aujourd'hui une très grande gamme de solutions de conception, qui peuvent être envisageables ou même réalisables par rapport à chaque organe, ainsi que les sous-systèmes qui le constituent. L'évaluation et le choix des technologies deviennent par la suite difficiles à réaliser : le problème de conception devient pluridisciplinaire (faisant apparaître différentes disciplines telles que la mécanique,

l'électronique embarquée, l'automatisme, etc.), et les structures et architectures conventionnelles sont dès lors remises en cause.

La troisième source de difficulté que les ingénieurs rencontrent, lors de la conception des systèmes complexes tels que les chaînes de transmission hybrides, est relative à la définition des données du cahier des charges CdC. Généralement, le cahier des charges de ce type de système comporte une liste de spécificités et d'exigences qui sont requises. Ces exigences sont exprimées sous forme de performances que le système doit assurer pour des cas de vie ou une série de cas de vie qui doivent être réalistes. Cependant, les performances requises ne dépendent pas uniquement du fonctionnement propre du système, mais plutôt de l'ensemble de son fonctionnement avec celui des autres systèmes qui sont en interaction (exemple : moteur thermique, habitacle du véhicule, liaison au sol, etc.). Ceci fait augmenter le nombre de contraintes à prendre en compte ainsi que les exigences intrinsèques et extrinsèques à satisfaire. Les spécificités du cahier des charges sont dès lors amenées à évoluer en fonction de l'évolution du projet de conception et des choix technologiques qui sont pris en compte (le type de motorisation, le type de véhicule, etc.), et expriment des objectifs à atteindre par le système ou les sous-systèmes, mais en aucun moment ils ne donnent des informations sur la manière de les réaliser. Les concepteurs effectuent leurs optimisations et leurs simulations d'une manière indépendante ou en parallèle, et se retrouvent vers la dernière phase du processus de conception confrontés à des situations de vie qu'ils n'ont pas considérées ou bien qui ne se sont tout simplement pas apparues auparavant.

Cette évolution des spécifications énoncées dans le CdC constitue un challenge très important pour les concepteurs, et devient encore plus problématique dans un contexte de conception innovante (Frey, 2010), où les connaissances sur le produit sont très limitées ou insuffisantes pour pouvoir statuer sur les solutions technologiques à considérer, ainsi que les performances à exiger.

Cependant, il se trouve que ces modèles conventionnels dans la plupart des cas, ont déjà atteint un certain niveau de maturité les rendant difficilement exploitables. Cette difficulté apparaît clairement dans le cas où l'architecture et la technologie embarquée dans le système à concevoir ne sont pas figées et peuvent être amenées à changer.

Ainsi, la problématique de conception liée aux systèmes complexes peut être essentiellement exprimée en trois points :

- Un CdC ayant des spécifications qui évoluent au cours du processus de conception (par exemple une fonction de conception fixée au début à une valeur donnée X peut être modifiée au cours du processus de conception vers une valeur Y en fonction des contraintes d'expertises et des limites de la technologie choisie), et qui se déclinent au sein du système et des sous-systèmes.
- Un choix technologique très divers parmi les solutions à retenir (il existe plusieurs technologies d'hybridation à retenir telles que les technologies électriques ou inertielles ou même pneumatiques, plusieurs technologies de boîte de vitesse telles que les boîtes manuelles ou automatiques, etc.) ;

- Des modèles et outils d'analyse de comportement et de simulation limités à la représentation des organes technologiques spécifiques, dont l'exploitation est difficile dans le cas où l'on conçoit de nouveaux organes (telles que les modèles de simulation numérique qui se basent sur des bibliothèques d'organes conventionnels pour les composants du système) ;

Cette thèse rentre donc dans ce contexte portant sur la modélisation et la conception des systèmes complexes en innovation. Nos travaux s'inscrivent dans le cadre d'une convention CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche), entre la société PSA Peugeot Citroën et le Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes aux Arts et Métiers centre d'Aix-en-Provence. Ils ont été illustrés et testés dans le cadre du projet d'innovation MTI, effectué au sein du service d'Innovation à PSA Peugeot Citroën. Le système technique support est une chaîne de transmission hybride nommée « MTI : Modular Transmission Inertial ».

## II. Problématique de recherche traitée

En se basant sur les éléments mentionnés dans le paragraphe précédent, nous proposons à travers cette thèse de présenter une approche de modélisation permettant la conception de systèmes complexes.

Le but de notre approche est de faciliter l'exploitation et l'utilisation des modèles d'expertises utilisés afin de les adapter à la conception innovante, sans dégrader la qualité des résultats obtenus, et d'aider les concepteurs à converger vers des solutions de conception optimales, au plus tôt dans le processus de conception. Elle vient en réponse à la question de recherche suivante : « **Comment favoriser au mieux la convergence vers les solutions de conception optimales dans un contexte de conception innovante pour les systèmes complexes ?** ».

## III. Organisation du mémoire

Le premier chapitre présentera l'état de l'art relatif à la conception et la **modélisation des systèmes complexes multi-physiques**, ainsi que la **convergence vers des solutions de conception optimales** dans le cadre d'une **conception innovante**. En introduisant les notions et les terminologies utilisées dans le cadre de l'étude, nous présenterons les différents types de modélisations existantes relatives aux systèmes complexes. Cette description s'appuie sur les **espaces d'expertises** :

1. **l'espace technologique et fonctionnel** qui contient les spécifications du CdC
2. **l'espace structurel** dans lequel nous retrouvons les données relatives au dimensionnement et à la structure du système
3. **l'espace comportemental** qui décrit les performances et l'aptitude du système à évoluer correctement dans son environnement.



Ces espaces sont formés à partir des **modèles de données d'expertise** qui sont utilisés par les **experts métiers** pour arriver à **modéliser** et **optimiser** le système en fonction de leurs contraintes (Figure 2). L'agencement de ces modèles et la gestion de leurs données sont par la suite décrits à travers les approches de modélisation des connaissances collaboratives. Ce chapitre positionne l'état de l'art face à la question de recherche et introduit donc les propositions faites dans le cadre de cette thèse.

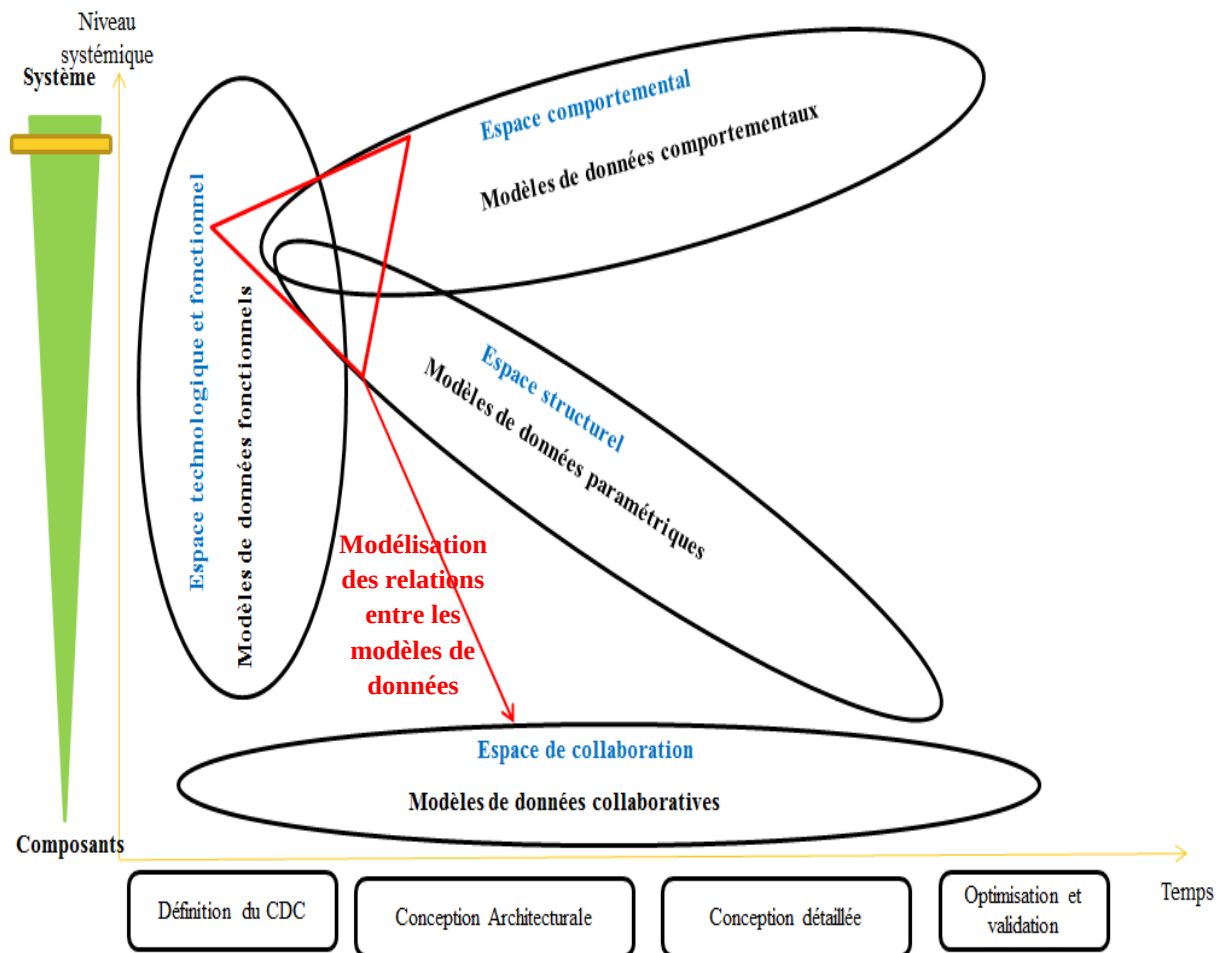


Figure 2. Description de l'espace de travail de la thèse

Le deuxième chapitre portera sur la modélisation proposée concernant les **modèles de données des spécifications ainsi que des données paramétriques et comportementaux du système**. Une présentation du système de chaîne de transmission hybride MTI constituant le support de nos résultats est effectuée. Nous décrirons ensuite la mise en place de la démarche proposée et nous présenterons les différents modèles d'expertises développés pour satisfaire les fonctions de conception qui ont été définies dans le cadre du projet de conception. Ces modèles permettent de décrire le fonctionnement et l'architecture du système à concevoir, mais aussi de gérer l'évolution du CdC. Il s'agit à ce niveau de **définir les approches d'optimisation** que nous avons utilisées pour orienter au mieux le choix de la technologie

retenue, mais aussi l'analyse et l'évaluation des performances du système de chaîne de transmission hybride MTI. Ainsi, l'optimisation effectuée grâce aux modèles développés est locale dans le sens où elle permet d'optimiser les résultats relatifs à chaque fonction de conception définie indépendamment les unes des autres.

Le troisième et dernier chapitre de ce mémoire, porte sur le développement de notre approche de modélisation de l'espace de collaboration à travers l'utilisation des **modèles de données collaboratives**. Une présentation du méta-modèle développé est effectuée afin de permettre de définir le modèle de propagation de contraintes utilisé. Il s'agit à ce niveau de montrer les résultats de notre proposition appliquée dans le cadre du projet de conception du système MTI, afin de réduire le nombre d'itérations et le nombre de solutions admissibles dans l'espace de conception, permettant ainsi la convergence vers la solution de conception optimale du système d'étude.

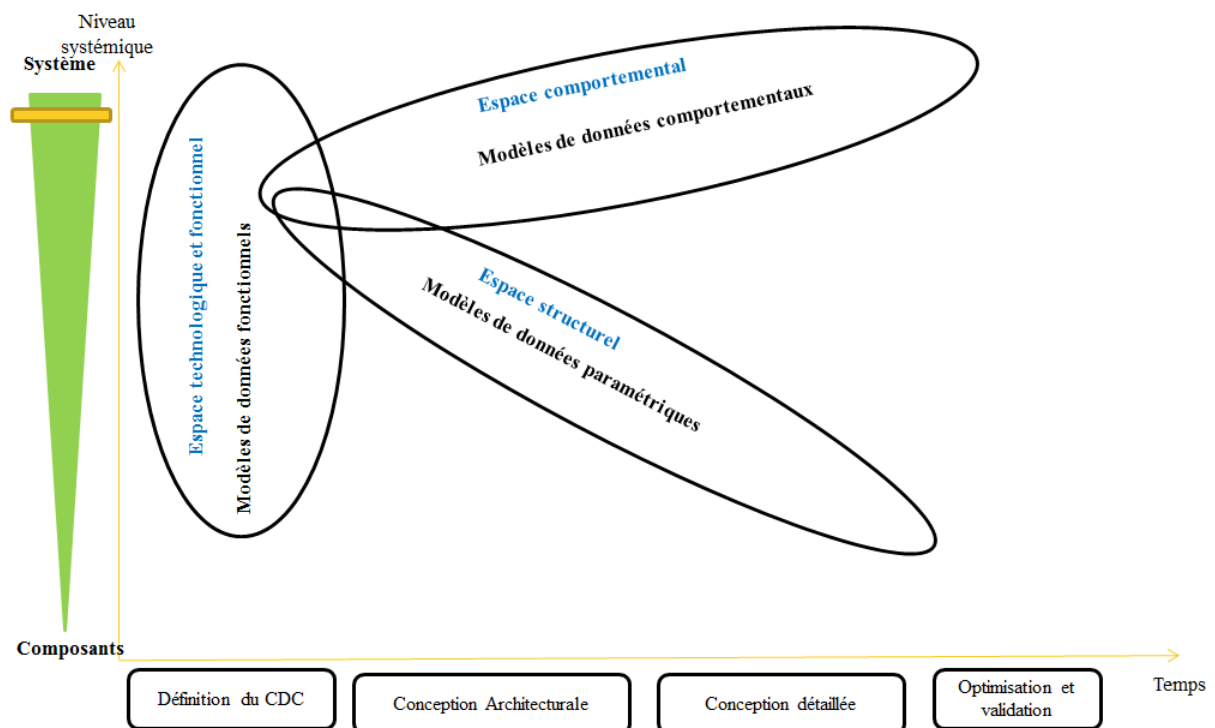
Notre proposition sera illustrée et validée à chaque niveau de modélisation par les résultats obtenus sur le système de chaîne de transmission hybride MTI.

Ce mémoire est ensuite clôturé par une conclusion dans laquelle nous rappellerons les objectifs de notre étude ainsi que les résultats de notre proposition. Un bilan de notre travail de recherche sera présenté suivi d'une conclusion dans laquelle nous mentionnerons les perspectives et les améliorations à réaliser.



## **Chapitre 1 : Etat de l'art de l'étude**

Lors de la conception d'une chaîne de transmission hybride, nous nous retrouvons confrontés à une problématique mettant en évidence les notions des systèmes complexes tout au long du cycle de conception. Cette notion diffère d'une discipline à une autre d'un point de vue scientifique, ce qui nous ramène à débiter ce chapitre par une étude des terminologies qui seront utilisées tout au long de nos travaux, afin d'introduire les définitions que nous considérons, vis-à-vis de la complexité d'un système multi-physique. Cette étude est suivie par une présentation des différentes définitions portant sur la modélisation des systèmes, la notion de modèles ainsi que les méta-modèles considérés à notre sens. Ces **modèles d'expertises** (fonctionnels, comportementaux, et structurels) permettent de modéliser un système complexe et d'analyser ses fonctionnalités par rapport aux performances ciblées. Il s'agit à ce niveau de donner une première vision de l'environnement de conception d'un produit en s'intéressant uniquement aux approches d'optimisation fonctionnelle, structurelle et comportementale utilisées par les différents experts métiers impliqués afin de converger vers des solutions de conception optimisées localement en fonction de leurs périmètres d'expertises comme l'illustre la Figure 3.



**Figure 3.les espaces d'expertises considérés pour la modélisation**

Les approches et modèles présentés à ce stade permettent de construire le **cahier des charges** ainsi que **les 3 espaces d'expertises considérés**. Ceci fait apparaître des relations existantes au sein de chaque modèle, mais aussi reliant les différents modèles d'expertises utilisés. Ces relations traduisent des connaissances qui sont transmises d'un modèle à un autre et des contraintes de conception issues de l'expertise pluridisciplinaire.

La représentation de ces relations n'est autre qu'une modélisation des connaissances qu'elles traduisent, ce qui nous amène dans la suite de ce chapitre à présenter les différentes approches de modélisation des connaissances en ingénierie système, ainsi que les différents modèles existants à ce propos. Cette attention portée sur les relations intra-modèles exprime l'aspect collaboratif existant entre les trois espaces de modélisation que nous souhaitons définir et nous amène à étudier les différentes approches de modélisation existantes dans la littérature scientifique, afin de dynamiser l'environnement de conception d'un système complexe et d'autoriser au mieux l'aspect collaboratif. Ainsi nous parlerons à ce stade des approches d'ingénierie dirigée par les modèles en mentionnant les différents modèles de représentation de connaissances utilisés pour gérer les modèles métiers dans un espace de conception défini.

La dernière partie de ce chapitre sera dédiée à la présentation des différents mécanismes de convergence à travers lesquels l'espace de conception est réduit pour ne contenir que les solutions respectant les différentes contraintes de conception à chaque niveau.

## I. Définitions des systèmes, sous-systèmes et systèmes complexes

### 1. Systèmes et sous-systèmes

Quand il s'agit de trouver une terminologie exacte portant sur « un système », la littérature scientifique propose plusieurs définitions diverses parmi lesquelles nous considérons en premier lieu celle adoptée par (Micouin, 2006) dans ces travaux de recherche, s'énonçant comme suit: « *Par opposition à une collection d'objets dépourvus de relations entre eux, un système est une collection d'objets entretenant des relations les uns avec les autres, contrairement à un simple agrégat, l'existence de ses relations est la raison constitutive d'un système* ». Ainsi, un système ne peut exister sans avoir des relations qui permettent de relier ses composants.

Ainsi, un système  $\Sigma$  est caractérisé à un instant  $t$  donné, par :

- Sa composition  $C(\Sigma, t)$ , c'est-à-dire les objets ou les éléments qui le constituent à cet instant  $t$ .
- Son environnement  $E(\Sigma, t)$ , qui représente les éléments ne faisant pas partie du système à un instant  $t$ .
- Sa structure  $S(\Sigma, t)$ , qui est l'ensemble des relations que  $C(\Sigma, t)$  entretient avec lui-même, mais aussi avec  $E(\Sigma, t)$  à l'instant  $t$ . A ce niveau, il est important de noter que l'ensemble des relations que  $C(\Sigma, t)$  entretient avec lui-même, constitue l'architecture interne du système à un instant  $t$ . Dans la suite de nos travaux nous appellerons cet ensemble  $Si(\Sigma, t)$ .

L'ensemble  $Si(\Sigma, t)$  est nécessairement non vide sinon l'existence du système  $\Sigma$  à l'instant  $t$  est remise en cause. Quant à l'ensemble des relations que  $C(\Sigma, t)$  entretient avec l'environnement  $E(\Sigma, t)$ , il permet de définir la nature du système (clos si cet ensemble est vide, et ouvert dans le cas contraire). Cet ensemble est formé par les différents composants du

système qui sont considérés comme des sous-systèmes si et seulement s'ils sont constitués eux aussi par plusieurs sous éléments. Ainsi, un système peut être formé d'un ensemble de sous-systèmes qui peuvent eux aussi être formés par un ensemble de sous-sous-systèmes, etc. jusqu'au niveau élémentaire. Cette décomposition du système, représente ce que nous appelons en littérature scientifique « **la décomposition systémique** ».

Ainsi, la définition de (Micouin, 2006), met en avant non seulement la décomposition systémique, mais aussi l'évolution de chaque composant ainsi que celle du système lui-même au cours du temps. Et par la suite, il mentionne implicitement l'évolution des relations existantes entre ces composants et leurs environnements. Ces éléments définissant un système sont très importants dans le cadre de nos travaux de recherche, étant donné qu'ils constituent la base de notre approche de modélisation, ce qui justifie notre choix par rapport à la définition retenue.

## **2. Les systèmes complexes**

Avant de définir précisément, la terminologie que nous souhaitons adopter dans le cadre de nos travaux sur les systèmes complexes, il est important de définir tout d'abord ce que nous considérons par le terme « complexe ». En effet, l'utilisation de ce terme est assez récurrente dans notre vie quotidienne. Nous parlons de projets complexes, de situations complexes, de personnalités complexes, de relations complexes, de systèmes complexes, etc. ce terme a-t-il une unique signification ? Sinon laquelle retenons-nous ?

La littérature scientifique présente diverses définitions relatives à la complexité présentées et détaillées dans les travaux de recherche de Régis Barondeau. Ce terme, qui avait émergé vers les années cinquante en relation avec les concepts d'ingénierie système « la cybernétique » ainsi que les théories de rationalisation de l'information, vient d'abord du terme latin « *Complexus* » qui signifie tissé ou associé ensemble, et du terme « *Complecti* » qui veut dire l'existence d'éléments différents. À partir de cette terminologie, (Morin, 2005) définit alors la complexité comme étant « *un tissu de constituants hétérogènes inséparablement associés, et se pose sur le paradoxe de l'un et du multiple* ».

Cependant, quand nous parlons de systèmes complexes et en considérant cette définition de (Morin, 2005), une réflexion importante apparaît. Cette réflexion ne concerne que les éléments sur lesquels nous pouvons nous baser, afin de discerner la complexité ou pas d'un système, mais aussi de la différence existante entre un système complexe et un système compliqué.

La complication (complexe vs. Compliqué) d'après (Genelot, 2001) porte sur « *un empilement et une imbrication de dispositifs ou de paramètres de tout ordre, dont nous pouvons néanmoins venir à bout avec du temps et de l'expertise* ». En d'autres termes, la complication est à ce niveau de l'inconnu "connu" et prévisible. (Le Moigne, 1978) ajoute à cette définition l'aspect relations en reliant la complexité d'un système aux différentes relations arborescentes qui y existent. (Snowden, 2002) va même plus loin dans sa considération, en reliant la notion de complexité d'un système aux degrés d'incertitudes

existants. En effet, plus un système est complexe plus son processus de développement l'est aussi, et plus il comporte des éléments imprévisibles où malgré la précision des analyses qui peuvent être conduites il faudra certainement savoir comment gérer les impondérables.

(Axelrod&Cohen, 2000) considèrent qu'un système est complexe, si et seulement si, il présente un comportement imprévisible, et comporte divers composants ne pouvant pas être dissociés les uns des autres. Ils créent ainsi ce que nous appelons 'les systèmes adaptatifs complexes', en les définissant par *'un ensemble d'agents, qui s'adaptent tous les uns aux autres, et où l'avenir est extrêmement difficile à prédire'*. L'aspect d'adaptation relatif aux systèmes complexes, mentionné par (Le Moigne, 1999) dans ses travaux, souligne la capacité de ces systèmes à s'auto-organiser : *'La complexité apparaît et se développe avec l'émergence d'une capacité d'autonomie au sein d'un système : ses comportements sont élaborés par le système lui-même, de façon endogène; ouvert sur ses environnements qui le sollicitent et le contraignent, et en transaction avec eux il n'en est pas pour autant complètement dépendant : ayant ses projets propres, il est capable d'intelligence.'*

Dans la littérature scientifique trois principes de base ont été affectés aux concepts de systèmes complexes :

- **La dialogique**, qui consiste à maintenir la dualité au sein de l'unité entre deux logiques pouvant être à la fois complémentaires et antagonistes. Ce principe est le paradigme de la complexité, et vise non pas, à réduire le complexe au simple mais plutôt à intégrer le simple au complexe. Ainsi, ce principe renie l'existence d'un système unique, comme le mentionne (Morin, 1991) *'Le principe dialogique consiste à faire jouer ensemble de façon complémentaire des notions qui, prises séparément, seraient antagonistes et se rejetteraient les unes les autres. Le mot "dialogique" veut dire qu'il sera impossible d'arriver à une unification première ou ultime, à un principe unique, un maître mot; il y aura toujours quelque chose d'irréductible à un principe simple, que ce soit le hasard, l'incertitude, la contradiction ou l'organisation.'*
- **La récursion**, quant à elle porte sur les différentes interactions existantes entre les divers éléments d'un système complexe.
- **L'hologramme**, qui consiste à considérer que lorsqu'on découpe un système en différentes parties, les livrables de ces parties doivent permettre de produire le tout qui est le système. Cependant, bien souvent les responsables n'ont pas connaissance du 'tout', de sorte qu'une fois réalisés, les livrables ne peuvent pas s'intégrer proprement au tout. Ce principe a été largement décrit par (Morin, 2008) où il considère que *'La théorie des systèmes a réagi au réductionnisme, par le "holisme" ou l'idée du "tout". Mais croyant dépasser le réductionnisme, le "holisme" a en fait opéré une réduction au tout: d'où, non seulement sa cécité sur les parties en tant que parties, mais sa myopie sur l'organisation en tant qu'organisation, son ignorance de la complexité au sein de l'unité globale. Le tout, dès lors, devient une notion euphorique (puisque'on ignore les contraintes internes, les pertes de qualités au niveau des parties) fonctionnelle huilée (puisque'on ignore les virtualités antagonistes internes), une notion naïve.'*

Lorsque le système complexe intègre plusieurs types de principes physiques (électrique, mécanique, hydraulique, etc.), il est dit multi-physique et pluridisciplinaire.



Pouvoir gérer la complexité d'un système revient par la suite à essayer par un moyen ou un autre de maîtriser l'évolution inconnue de celui-ci, c'est-à-dire l'évolution de ses composants ainsi que les relations qui existent entre eux à tous les niveaux de conception. Pour ce faire, (Suh, 1990) propose à partir des principes de l'axiomatic design des concepts qui permettent de bien maîtriser et de réduire la complexité d'un système à travers la réduction du nombre de relations de dépendances qui existent entre les données du domaine de conception et les données du domaine fonctionnel en distinguant deux types de complexité (Suh, 2005) :

- Réelle « Time independent real complexity » ; définit comme étant la mesure du degré d'incertitude lié à la probabilité d'assurer une fonction de conception. Ce type de complexité peut être réduit à travers la conception d'un système découplé qui satisfait le même domaine fonctionnel.
- Imaginaire « Time independent imaginary complexity » ; définit comme étant les incertitudes qui apparaissent tout le long du processus de conception d'un système suite aux connaissances limitées du concepteur. Ce type de complexité existe uniquement dans les systèmes découplés et traduit un manque d'information ou une ignorance de certaines spécifications du système.

**Ainsi, pour conclure, nous pouvons retenir qu'un système complexe est un ensemble de plusieurs éléments distincts, inter reliés, interdépendants, et capable de s'adapter à ses environnements à partir de lois et de relations précises.** Car enfin de compte, comme l'a cité (Genelot, 2001) « *Admettre la complexité, c'est admettre que certains éléments de la réalité échappent à notre entendement* ». La maîtrise de la complexité d'un système revient dès lors à maîtriser les relations de couplages qui existent entre son domaine de conception et son domaine fonctionnel.

### **3. Classification des systèmes complexes**

L'étude portée sur la terminologie scientifique que nous avons menée concernant les systèmes complexes, a attiré notre attention sur leur diversité et l'importance axée sur la nature des données qu'ils contiennent ainsi que les fonctions qu'ils remplissent. Cette diversité nous amène alors à nous questionner sur la manière de classer et de catégoriser ce type de système.

Parmi les différentes classifications qui existent dans la littérature scientifique concernant les systèmes complexes, (Micouin, 2006) présente une approche de séparation basée sur la nature de l'objet sur lequel le système est fondé. Cette séparation est faite à partir de deux types d'objets :

- Les objets concrets, visibles réellement, et constituent ce qu'on appelle «les systèmes matériels ». Ces systèmes sont définis par la norme ISO 15288, et présentent une structure formée à partir des différentes relations matérielles (liaisons ou structures statiques, interactions ou structures dynamiques, etc.) qui existent entre les objets matériels qui les constituent. Ces systèmes peuvent être alors un véhicule automobile, un moteur thermique, une boîte de vitesses, etc.

- Les objets dits abstraits, résultants d'une première activité de réflexion exercée par un individu. Ce type d'objets constitue la composition d'une catégorie de systèmes appelés "les systèmes conceptuels", et peuvent se présenter sous la forme des concepts, de théories et/ou des propositions produites par des raisonnements humains. La structure relative à ce type de système est alors formée par des relations formelles se traduisant en ingénierie système par des concepts tels que l'analyse fonctionnelle d'un véhicule automobile, un modèle de conception d'un système de transmission de puissance, ou une simulation dynamique, etc. Les systèmes conceptuels présentent une forte dépendance liée à leurs concepteurs et contiennent pratiquement tout le savoir-faire de leurs créateurs.

**Dans le cadre de nos travaux, nous avons choisi de travailler à partir de cette classification des systèmes complexes, puisqu'elle suffit à représenter notre champ d'études.**

## **II. Modélisation des systèmes concrets multi-physiques**

### **1. Modélisation et modèles en ingénierie système**

La définition donnée par le dictionnaire français Larousse par rapport à la définition du terme « Modélisation » se résume à « *la description d'un réel, quelle que soit sa nature, de sorte à pouvoir simuler mentalement son fonctionnement* ». Cette définition met en évidence la fonction principale de la modélisation qui est « *décrire* », son objectif « *comprendre mentalement* », ainsi que l'objet modélisé « un réel ». Ce réel peut être un système conceptuel ou concret, comme il peut être une idée, une démarche, ou un processus.

Un modèle est décrit dans la littérature scientifique et plus précisément dans les travaux de (Combemale, 2008) comme étant « *une abstraction d'un système, modélisé sous la forme d'un ensemble de faits construits dans une intention particulière. Un modèle doit pouvoir être utilisé pour répondre à des questions sur le système modélisé* ». Cette définition, met en évidence des aspects importants relatifs aux modèles. En effet, (Combemale, 2008) considère qu'un modèle est construit dans le but de répondre aux questionnements des ingénieurs sur le système à concevoir (évaluation comportementale, composition systémique et performances d'un système donné, etc.) et de ce fait, un modèle n'a pas de sens s'il ne remplit pas une fonction particulière souhaitée par le modélisateur, qui peut ou pas, être en même temps le concepteur du système. Cette fonction peut être soit la représentation d'un phénomène physique, soit la représentation de données relatives au système à modéliser ou même des théories de ces phénomènes ou de ces données (axiomes, lois, etc.).

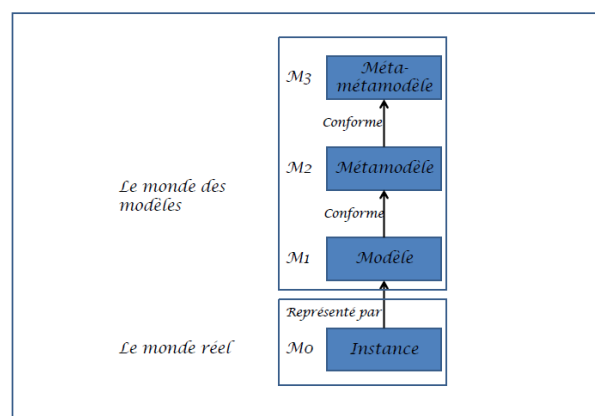
Dans ses travaux de recherche, (Charpentier, 2014) présente un état de l'art des différents modèles qui existent dans la littérature permettant de représenter un système réel. Nous retrouvons à titre d'exemple :

- Les modèles physiques réalisés à partir d'une représentation de taille réduite ou augmentée du système réel.
- les modèles géométriques 3D obtenus à l'aide des outils CAO et qui ne sont autres que des modèles physiques implémentés dans ces outils.
- Les modèles idéalisés reposent quant à eux sur des approximations et des hypothèses permettant d'appréhender plus facilement le comportement du système à modéliser
- Les modèles analogiques construits à partir de certaines analogies et similitudes avec un autre modèle utilisant les mêmes lois physiques par exemple.
- Les modèles phénoménologiques sont définis comme étant des modèles qui représentent uniquement les propriétés observables de leurs objectifs sans postuler des mécanismes cachés.
- Les modèles de données considérés comme des versions corrigées, rectifiées, parfois même idéalisées des données obtenues suite à une observation immédiate appelées données brutes.
- Les modèles orientés produits et ingénierie système qui permettent de décrire l'aspect structurel d'un système à partir des notions de composants, sous composants et relations entre les composants. Ils intègrent aussi des aspects fonctionnels et comportementaux.

La modélisation d'un système concret consiste à représenter à travers des modèles particuliers les connaissances qui sont relatives à sa conception. Et de ce fait, il est important pour nous de présenter les types de connaissances considérées ainsi que les méthodes de représentation relatives.

## 2. Modélisation et méta-modèles en ingénierie système

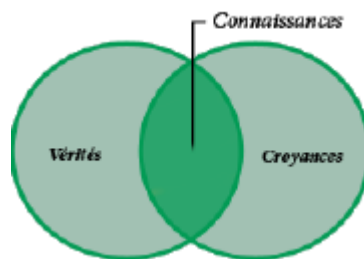
En nous basant sur la représentation de l'architecture de modélisation à quatre niveaux proposée par l'OMG (Object Management Group), un méta-modèle apparaît comme étant un langage de modélisation permettant d'exprimer un modèle. Les concepts manipulés ainsi que la syntaxe abstraite de ce langage modélisation est définie par un méta-modèle (Figure 4).



**Figure 4. Représentation de l'architecture à quatre niveaux (Diaz & al, 2003)**

### 3. Modélisation des connaissances dans un environnement de conception

Quand il s'agit de définir la notion de connaissance, la littérature scientifique contient divers termes et explications issues des travaux des philosophes contemporains. Cependant, malgré l'importance que la notion de connaissance joue dans notre ère, le premier modèle permettant de la représenter fut établi par Platon (Figure 5) et est basé sur une proposition d'analyse de la connaissance (Dutant& Engel, 2005).



**Figure 5. Modèle de Platon pour représenter les connaissances (Dutant& Engel, 2005)**

Cependant, il se trouve que ce modèle malgré le fait qu'il fournit un critère d'analyse de la connaissance, il ne la définit pas en soi, ce qui la place dans le rang des notions difficiles à appréhender. En effet, il n'existe pas aujourd'hui un consensus permettant de donner une définition précise de la connaissance. Ce qui n'exclut pas par contre la présence d'une certaine typologie à ce propos.

(Kant, 1781) propose une première typologie fondée sur une distinction fondamentale entre la connaissance tacite et la connaissance explicite. La connaissance tacite dite aussi personnelle du fait qu'elle se localise dans la tête de l'individu, n'est pas toujours facilement traduite. Ce type de connaissance est très implicite, fait appel au savoir-faire de la personne ainsi que son vécu, et peut être difficile ou même impossible d'être exploitable par un autre individu. Quant à la connaissance explicite, son exploitation est basée sur des codes et des langages formels, et est structurée généralement dans un document apparaissant sous forme tangible, ce qui permet son exploitation par d'autres individus.

Ceci nous amène à conclure que la notion de connaissance est dépendante de la capacité qu'un individu possède pour exprimer son savoir. Cependant, dans le milieu industriel, la construction de connaissance va bien au-delà de ce type de typologie, et se repose principalement sur deux approches scientifiques : le constructivisme et le positivisme.

L'approche constructiviste, apparue à travers les travaux de (Le Moigne, 1995), considère que la connaissance n'est autre qu'une construction sociale, dont sa valeur de vérité dépend uniquement de la nature et de la fiabilité de son consensus. Il s'agit alors de construire à partir des connaissances partielles des acteurs au travers des activités qu'ils sont entrain d'exécuter, la représentation des processus. L'identification des liens formels entre les acteurs est alors réalisée grâce à l'apparition des problèmes rencontrés dans le processus de conception.

L'approche positiviste quant à elle, considère la connaissance en tant qu'une vérité naturelle dont la valeur est issue d'une démonstration irréfutable, effectuée à partir des axiomes et de certains théorèmes. Elle est ainsi, corrélée à l'expérience du réel et indépendante de la volonté des acteurs.

Pour conclure, nous pouvons statuer sur le fait que la connaissance, est avant tout une problématique liée à sa représentation. Les données formant la connaissance sont issues de différents individus qui la représentent en fonction de leurs divers modèles ou schémas mentaux, et leur propre interprétation de leur environnement. Ainsi, comme le mentionne (Monticolo, 2008), une information doit être tout d'abord mentionnée afin qu'elle puisse être exploitée dans un contexte précis, par les acteurs métiers pour pouvoir créer de nouvelles connaissances.

Plusieurs classifications des modèles permettant de gérer et de structurer la connaissance dans un processus de conception au sein d'un groupe projet existent dans la littérature. Ces modèles ont été résumés dans les travaux de (Krause&al, 2006) en trois catégories :

- Les modèles de ressources, appelés aussi 'modèles d'organisation d'entreprise', permettent de gérer l'ensemble des informations relatives aux ressources disponibles dans les activités de l'entreprise (hardware, software, ressources humaines ou matérielles, etc.). Ce type de modèle a pour but de gérer l'affectation de ces ressources (Kim et al, 2001) en fonction du pilotage de l'organisation tout en prenant en compte l'évaluation des indicateurs des performances.
- Les modèles d'activités ou de processus, qui ont pour but de formaliser l'enchainement des activités et des tâches que doit réaliser le groupe projet.
- Les modèles de données du système qui sont généralement basés sur un modèle de produit particulier, permettant de structurer l'ensemble des informations qui lui sont relatives ainsi que son cycle de vie globale.

La gestion des connaissances permet alors de répondre aux problématiques de capitalisation de connaissances cruciales pour une meilleure prise en compte des contraintes issues des divers domaines métiers. Elle facilite ainsi la collaboration et optimise le processus de conception. De nombreuses méthodes existent, visant à capitaliser les connaissances, et sont classées selon des approches ascendantes (les modèles sont définis à partir des données, exemple : CommonKADS), ou descendantes (les données sont interprétées à partir des modèles tels que par exemple MKSM (Ermine, 2000)).

**Nos travaux de thèse portent essentiellement sur la représentation des connaissances relatives aux modèles de données du système. En effet, la formulation des activités de conception ainsi que les ressources allouées au projet ne sont pas traités dans notre étude.**

La modélisation des systèmes techniques dans un processus de conception, met en évidence trois types d'activités à considérer (Roucoules&al, 2006) :

- Les activités individuelles de type asynchrones dans lesquelles l'évaluation du produit s'effectue par chacun des acteurs. Ces acteurs sont considérés des experts métiers en fonction de leurs propres critères d'évaluation, ainsi que ceux relatifs au produit lui-même.
- Les activités collaboratives asynchrones qui sont généralement déclenchées suite à un désaccord, et ont pour but de comprendre les argumentations des différents acteurs afin de converger à la fin vers une décision commune.
- Les activités collaboratives synchrones qui ne sont pas forcément connues au début du processus de conception. Dans ce cas, la convergence de la solution s'effectue suite à des jalons si les activités de conception sont connues, sinon elles sont couplées aux activités collaboratives asynchrones.

Au cours du processus de conception, l'impact des experts métiers est une boucle constante (Roucoules, 2007) qui permet l'augmentation des informations relatives au système. Les spécifications de chacun des experts représentent des fonctions dans le processus de conception qui sont traduites dans le concept de *Knowledge- Intensive Engineering* (Tomiya, 1995) par des attributs technologiques.

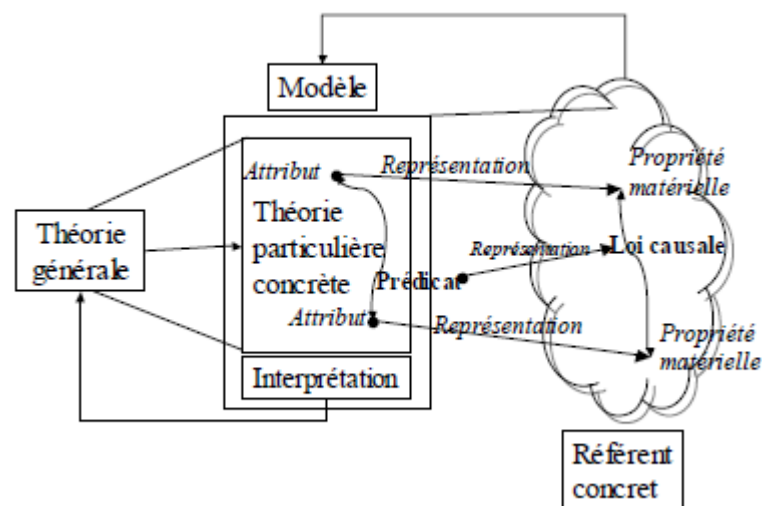
La représentation du système technique dans un environnement de conception, consiste alors à représenter ces trois types d'activités. (Oosterman, 2001) établit dans ces travaux de recherche une première classification des modèles de représentation qui peuvent être considérés. Cette classification se base sur deux principales catégories de modèles :

- Les **modèles descriptifs**, qui permettent de décrire les activités d'expertises métiers apparaissant dans le processus de conception. Ces modèles sont basés principalement sur 5 étapes (énoncé du problème, décomposition du problème, recherche et exploration des solutions, évaluation et sélection des solutions, et agencement des solutions (Frey, 2010))
- Les **modèles prescriptifs** (Pahl&al, 1996), décrivent quant à eux les étapes permettant le développement d'un processus de conception. Ces modèles sont basés sur 4 phases (Clarification de la tâche, conception du principe, conception architecturale, conception détaillée. Chaque étape contient les activités d'expertises métiers décrites par les modèles descriptifs. Cependant, une autre décomposition des modèles prescriptifs a été intégrée (Albano&Suh, 1992), grâce à l'apparition du concept d'Axiomatic Design en tant qu'une nouvelle démarche produit permettant ainsi de décomposer le modèle sous la forme de 4 domaines (client, fonctionnel, structurel et processus).

Nous nous intéresserons dans le cadre de cette thèse, uniquement à la représentation à partir des **modèles descriptifs**. Les modèles prescriptifs ne feront pas partie de notre étude étant donné que nos travaux portent seulement sur les domaines fonctionnels et structurels d'un point de vue système et non pas processus.

En reprenant les phases de conception de (Pahl&al, 1996), les modèles descriptifs peuvent être classés en trois catégories en fonction de la nature de leurs utilisations :

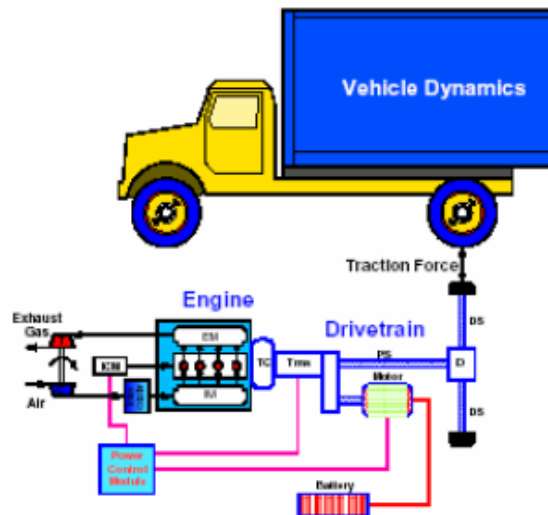
- **Les modèles de données de spécifications fonctionnelles du système** ; ces modèles permettent de définir l'**espace technologique et fonctionnel**. Ils décrivent les fonctions générales que le système doit satisfaire (la raison d'existence du système), ainsi que la technologie choisie (parmi les différentes solutions technologiques existantes).
- **Les modèles de données de spécifications structurelles du système** ; ces modèles permettent de définir l'**espace structurel** considéré. Ils gèrent des données relatives aux caractéristiques du système à concevoir telles que sa géométrie, ses composants, le type de matériaux utilisés, etc.
- **Les modèles de données de spécifications comportementales du système** ; qui permettent de définir l'**espace comportemental** et fournissent les informations nécessaires à la description et à la visualisation du comportement évolutif du système. Ces modèles peuvent être simplifiés (hypothèses simplificatrices) ou avancés dans le cadre d'une analyse locale et se basent pour la plupart du temps, sur des algorithmes d'évaluation comportementale. (Micouin, 2006) classifie ces modèles dans ces travaux en deux catégories :
  - Les modèles conceptuels, qui représentent un système ou un objet concret et sont destinés à supporter une théorie. Ces modèles ne sont pas spécifiques aux modèles de comportement, nous avons choisi de les présenter à ce niveau en adéquation avec notre contexte de travail de thèse. Cette représentation conceptuelle peut être illustrée par un schéma figuratif et à défaut de sa base théorique, le modèle dans ce cas ne sert qu'à répondre à des questionnements rhétoriques et heuristiques, ce qui limite l'utilisation du potentiel complet de la modélisation (Figure 6).



**Figure 6. Théorie des modèles conceptuels (Micouin, 2006)**

- Les modèles de simulation qui permettent quant à eux, d'anticiper certains aspects du comportement d'un système avant qu'il existe physiquement. Ces modèles reposent principalement sur la notion des théories spécifiques, qui représentent la « solution hypothético-déductive » et permettent de relier les

entités composant l'espace  $C(\Sigma, t)$  d'un système  $\Sigma$  qui ne sont autre que les lois physiques décrivant le comportement de chaque entité. L'ingénieur sélectionne alors les parties dont il a besoin, les adapte si nécessaire et les assemble ensuite. Ainsi, ces modèles permettent d'anticiper le comportement du système à un niveau de confiance variable, afin de comprendre ses réactions envers son environnement et les différentes sollicitations auxquelles il est soumis (Figure 7).



**Figure 7. Exemple d'un modèle de simulation (Micouin, 2006)**

Chaque phase du processus de conception contient alors des modèles descriptifs qui peuvent être conceptuels et/ou de simulation. Ces modèles délimitent les trois espaces de conception (technologique, comportementale et structurel).

Dans la suite de ce paragraphe, nous allons présenter quelques exemples de ces modèles à partir des différents espaces qu'ils permettent de définir.

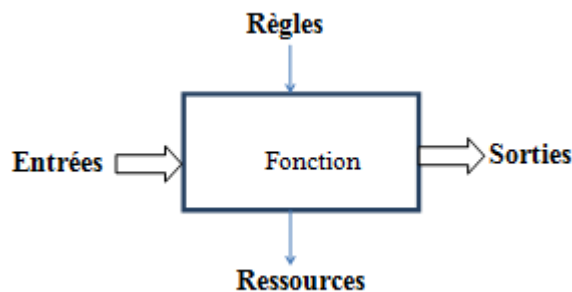
#### **4. Modèles de données de spécifications fonctionnelles d'un système concret : définition de l'espace technologique et fonctionnel**

Un système existe dans le but de remplir une ou plusieurs fonctions. Une fonction est généralement considérée comme étant une transformation de données d'entrée permettant d'obtenir les données de sortie. Pour réaliser cette transformation, la fonction s'appuie sur des ressources et suit certaines règles.

La description de ses fonctions ainsi que les liens qui les relient, se fait à l'aide de l'analyse fonctionnelle (Figure 8). Il s'agit à ce niveau de décrire ce que fait le système « le quoi ? » indépendamment de la façon dont il le fait « le comment ? ». Les méthodes de représentation fonctionnelle d'un système technique permettent principalement de définir ses paramètres fonctionnels ainsi que ses différents modes de fonctionnement. Ces paramètres sont souvent les éléments à travers lesquels le fonctionnement du système peut être caractérisé (exemple : pour un embrayage mécanique, les paramètres fonctionnels peuvent être le couple transmissible maximum, la pression maximale, etc.), et caractérisent les bornes ou bien les



frontières des conditions de fonctionnement du système technique considéré. Quant aux différents modes de fonctionnement, ils font référence généralement aux différents états que le système peut prendre tout le long de son utilisation (exemple : embrayage ouvert, fermé ou glissant).



**Figure 8. Représentation d'une fonction d'un système technique**

Afin de déterminer la fonction terminale, les fonctions sont généralement décomposées hiérarchiquement et cette décomposition est représentée par une arborescence fonctionnelle. Les liens existants entre ses fonctions sont généralement de nature temporelle et logique : les liens temporels ont pour objectif de décrire l'ordre temporel dans lequel s'effectue une fonction par rapport à une autre. Cet ordre peut être de type séquentiel, parallèle ou bien itératif, et peut inclure des contraintes de temps aux fonctions.

À partir de ces données, le cahier des charges d'un système est construit afin de justifier l'existence du système en répondant à la question du « Pourquoi ce système existe ? » à travers la fonction terminale définie, mais aussi de justifier le choix des technologies utilisées par les concepteurs « Quelles technologies choisir ? ». La représentation des spécifications peut être effectuée à l'aide de :

- **L'analyse fonctionnelle externe (AFE)** qui est une autre appellation de l'analyse fonctionnelle du besoin (AFB) (AFNOR, 1991); elle représente le fondement sur lequel est basé la constitution du cahier des charges fonctionnel et elle assure plusieurs rôles dont les plus importants consistent à établir les phases de cycle de vie de l'étude, présenter les interactions du système avec son environnement extérieur pour ces phases retenues, recenser l'ensemble des fonctions et les caractériser sous forme de critères d'appréciation de niveaux et de flexibilités.
- **L'analyse fonctionnelle interne (AFI)** consiste à formaliser l'architecture du produit à partir de la définition des fonctions techniques (AFNOR, 1990) des sous composants. Elle est aussi appelée Analyse fonctionnelle technique et est réalisée à partir du **diagramme FAST** « Functional Analysis System Technique » qui a été créé par (Bytheway, 2007). Ce diagramme permet de déterminer les relations existantes entre les fonctions établies par le cahier des charges et le produit à travers un enchaînement de questions : pourquoi, comment et quand.

- **Le bloc diagramme fonctionnel « BDF »** permet d'identifier les composants et les éventuelles interactions entre eux en discernant les phénomènes physiques qui interviennent dans la conception d'un système. Ainsi, un composant peut être représenté par une boîte noire dont les flux d'entrée et de sortie sont la matière, l'énergie et le signal (Frey, 2010).

Ce premier niveau de modélisation permet de définir le « Concept Opérationnel » du système à concevoir. Il donne une idée sur le fonctionnement du système dans son environnement externe en s'appuyant seulement sur les objectifs et les contraintes qui lui sont appliqués, sans prendre en considération l'agencement des fonctions ainsi que les liens existants entre ses composants.

Ainsi, une modélisation plus fine permettant d'aller encore plus dans les détails est requise afin de maîtriser toutes les données du système à concevoir et qui va bien au de la de la vue macroscopique largement réalisée et satisfaite via les outils mentionnés précédemment. Et c'est précisément à ce niveau que nous retrouvons la notion de « Cas d'usages », qui permet de décrire dynamiquement un exemple type de fonctionnement dans le cadre d'une séquence d'actions et/ou d'interactions, mettant ainsi en évidence :

- Le système ainsi que les interfaces qui le relie à d'autres systèmes
- Les performances du système
- Les modes de fonctionnement du système
- Le sous-système de soutien qui le compose
- Les situations et les environnements dans lesquels le système est mis en œuvre

La définition des spécifications du cahier des charges d'un système concret constitue la première phase caractéristique du cycle de conception (Pahl&al, 1996). Le cahier des charges est la feuille de route à partir de laquelle découlent toutes les fonctions de conception que le système doit impérativement satisfaire.

## **5. Modèles de données de spécifications structurelles d'un système concret : définition de l'espace structurel**

Lors de la conception d'un système mécanique, plusieurs méthodes de recherche de solution organique peuvent être considérées. Parmi ces méthodes, nous pouvons citer :

### ***5.1. Les modèles de simulation physiques et phénoménologiques***

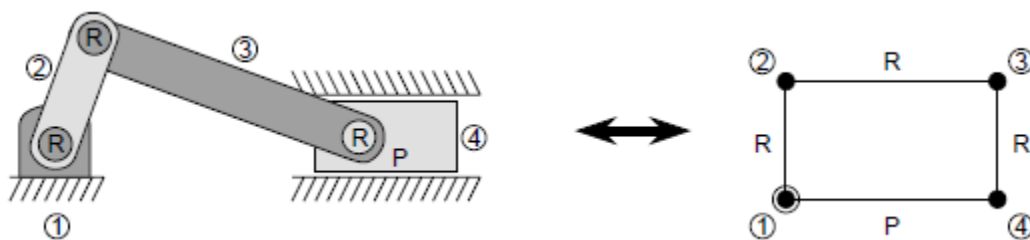
Ces méthodes se basent sur les principes physiques et phénoménologiques propres au système à concevoir tels que les échanges des flux énergétiques, les principes physiques mécaniques, etc. et se résument à :

- **L'utilisation de graphes de mécanismes**; cette méthode sur laquelle ont porté les travaux de (Freudenstein& al, 1979) permet de donner une définition de la structure du

système (c'est-à-dire le choix de ses composants, leurs positions, leurs dimensions, etc.). Les divers solides formant les composants du système à modéliser sont les sommets du graphe, ainsi que le bâti (Figure 9). Les liaisons correspondent aux arêtes du graphe et sont accompagnées par des étiquettes afin de mentionner leurs natures. Le passage de l'étape de graphe de liaisons vers la représentation cinématique du système se fait grâce à des méthodes exhaustives qui nécessitent la construction de tous les graphes répertoriés par le nombre de boucles des liaisons du même type. En raisonnant sur la symétrie du graphe et sur les relations qui lui sont propres, il est alors possible de trouver la cinématique appropriée du système. Plusieurs mécanismes distincts peuvent correspondre à un seul graphe, ce qui fait que ce dernier ne constitue pas une signature unique à chaque composant. Pour monter du mécanisme à partir du graphe, le concepteur doit faire preuve d'imagination et de créativité afin de trouver la forme des pièces, leurs positions respectives ainsi que la disposition exacte des liaisons. Cette méthode permet de mieux comprendre et d'analyser la cinématique des mécanismes existants. Dans leurs travaux, Freudenstein et Maki distinguent deux types de synthèse de mécanismes basée sur cette méthode :

- La synthèse de la structure ; elle porte sur le choix du nombre, de la nature et de la disposition des liaisons entre certains éléments du système à déterminer.
- La synthèse fonctionnelle ; elle intervient après la synthèse de la structure, et permet de déterminer les dimensions principales du mécanisme à l'aide des relations fonctionnelles.

Les auteurs ont montré l'efficacité de leurs méthodes à l'aide des exemples sur lesquels ils ont travaillé, mais ils ont conclu qu'elle ne peut être appliquée que sur des cas de conception simplifiée. Ceci est dû au fait que le nombre de solutions organiques déduites de la synthèse effectuée est proportionnel aux nombres du type de mécanismes à concevoir. Il est important aussi de noter, que le graphe n'est qu'une représentation dégénérée du mécanisme du système à concevoir, et fait perdre beaucoup d'informations par rapport au schéma cinématique. Ces travaux ont connu beaucoup de succès, et ont inspiré plusieurs auteurs, tels que Hoeltzel et Chieng (Hoeltzel & Chieng, 1990), où ils proposent l'énumération automatique des graphes qui vérifient une base de règles topologiques, pour en tirer ensuite des schémas de mécanismes plans. Ces travaux ont permis de statuer sur la durée de calcul qui est relativement assez longue, et sur le fait que l'obtention d'une solution organique n'est pas garantie.



**Figure 9. Représentation par la théorie des graphes d'un système bielle manivelle**

- **Les méthodes basées sur des atelas mécaniques;** se basent sur le principe de la conception par chainage arrière et ont été proposées par (Hoeltzel& Chieng, 1990) . Pour un point de mécanisme donné, l'utilisateur choisit la trajectoire qu'il souhaite le système voir suivre à partir d'une base de choix de trajectoires préalablement créées. L'association entre cette trajectoire et la structure de mécanisme est obtenue à partir d'un réseau neuronal. L'avantage de cette méthode réside dans la réduction du temps de calcul comparée à la méthode par théorie de graphes, néanmoins, la convergence vers une solution n'est garantie que dans le cas où elle se retrouve dans la base de données préalablement introduite. Ainsi pour améliorer cette approche, (Subramanian&Wang, 1993) proposent une méthode de synthèse de mécanismes basée sur la cinématique. Le principe consiste à fournir à l'algorithme la position des solides d'entrée-sortie et la description mathématique qualitative des mouvements qui doivent les animer. L'algorithme génère à partir de ses données, la liste exhaustive des topologies et géométries de mécanismes satisfaisants les spécifications précédentes. Chaque mécanisme-solution est représenté par un ensemble de corps solide 3D et les solutions sont classées par ordre de complexité croissante. Quant aux mouvements relatifs, ils sont regroupés en catégories hiérarchiques. Deux notions relatives apparaissent suite à cette représentation :

- Les mécanismes abstraits ; représentant la relation simple existante entre l'espace des configurations ou les positions possibles, et les solides d'entrée-sortie.
- Les mécanismes concrets ; traduisant la relation précédente en un arrangement tridimensionnel de solides rigides.

L'algorithme est alors capable de déterminer le nombre et la nature des mécanismes à employer ainsi que certaines dimensions ou positions des pièces, à partir d'une loi de composition. Le calcul est alors divisé en deux étapes :

- Une énumération est effectuée afin de déterminer une combinaison de mécanismes abstraits satisfaisante
- Tous les mécanismes composés possibles sont générés par remplacement de chaque mécanisme abstrait par un mécanisme concret.

- **L'utilisation des approches numériques d'optimisation ;** ces méthodes se basent sur les principes d'optimisation, cherchant à minimiser une certaine fonction objective et permettent de définir l'espace structurel. Parmi ces méthodes nous pouvant citer :

- La méthode énergétique, qui consiste à trouver la trajectoire d'un effecteur représentatif du système à concevoir, durant laquelle nous cherchons à minimiser la quantité d'énergie de déformation des variables dimensionnelles du mécanisme. Les dimensions qui seront considérées, sont celles qui correspondent à la trajectoire dans laquelle l'énergie est quasi-nulle. Par exemple : pour un système de train épicycloïdal mécanique, les diamètres primitifs qui seront considérés pour ses composants sont ceux qui réduisent la quantité d'énergie dissipée.
- L'optimisation topologique structurale ; cette méthode se base sur l'utilisation de variables continues, permettant la mesure de la densité de la matière dans une forme. Il s'agit de trouver une optimisation d'une configuration singulière,

dans laquelle les faibles densités de matière correspondent aux articulations du système. Quant aux zones plus denses, elles sont remplacées par des pièces en un matériau homogène, ayant un comportement équivalent.

### **5.2. Les modèles de simulation heuristiques**

Ces méthodes utilisent les connaissances des experts métiers et les données connues par les concepteurs à partir d'une certaine base de données pour faire le choix de la solution organique du système :

- **La recherche d'une solution toute faite dans un catalogue** ; cette méthode se base sur le connu, et limite le choix des technologies organiques embarquées à celles existantes uniquement. Elle nécessite aussi la connaissance au préalable d'un cahier des charges figé et qui n'évolue pas au cours du processus de conception, afin de ne pas remettre en question la solution organique choisie.
- **L'élimination des mauvaises solutions à partir des connaissances d'expertises** ; cette méthode consiste à faire un tri itératif sur les solutions qui ne respectent pas les exigences du cahier des charges, qui par ailleurs doit aussi être connu et figé. La solution organique retenue est celle qui arrive à passer toutes les étapes itératives dans le tri, donc par élimination.

La représentation de la décomposition d'un système ne fait pas intervenir les caractéristiques de ses composants (géométrie, poids, volume, etc.), mais elle permet juste de détailler les composants qu'il possède et les différentes fonctions qui leurs sont associées. La relation entre l'architecture fonctionnelle et l'architecture physique est dépourvue de bijection, il est nécessaire dans un premier temps d'effectuer l'allocation des fonctions puis dans un second temps de réaliser d'une manière itérative les équilibres de partage des composants par les fonctions en prenant en compte leurs contraintes propres. La réussite de l'intégration des composants dans le système s'effectue à travers une vérification des interfaces qui existent entre eux.

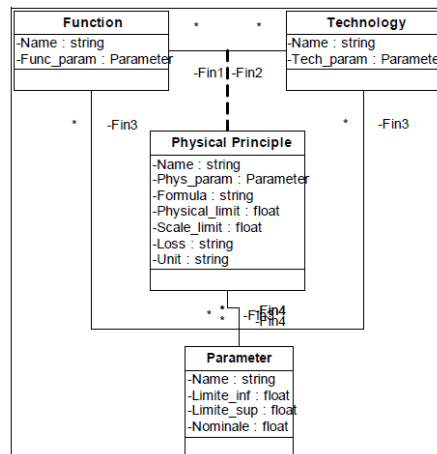
## **6. Modèles de données comportementaux d'un système concret : définition de l'espace comportemental**

Plusieurs outils ont été développés afin de permettre la représentation et la définition comportementale d'un système technique. La plupart de ses outils se reposent sur des approches énergétiques permettant de définir le comportement du système technique à concevoir dans son environnement et d'évaluer par la suite ses performances par rapport aux objectifs considérés.

### 6.1. Le modèle conceptuel F-PP-T

L'utilisation des concepts de modélisation en ingénierie système dans le but d'appuyer les concepteurs dans leurs choix de composants techniques du système à concevoir, a été largement traitée dans la littérature scientifique à travers les outils que nous avons mentionnés précédemment dans ce chapitre. Cependant, dans un contexte de conception innovante, dans lequel la réalisation et l'évaluation comportementale au plus tôt du système ne sont pas possibles étant donné que la structure du système à concevoir n'est pas figée, nous nous retrouvons face à un environnement de conception dans lequel les informations échangées et les données utilisées évoluent rapidement en fonction de l'évolution du système. Il est important de trouver une méthode permettant la navigation dynamique et flexible dans l'espace de conception afin de permettre de réitérer sur les résultats obtenus rapidement et au plus tôt, réduisant ainsi le nombre de solutions techniques admissibles et faisant converger les modèles métiers vers une architecture optimale du système souhaité.

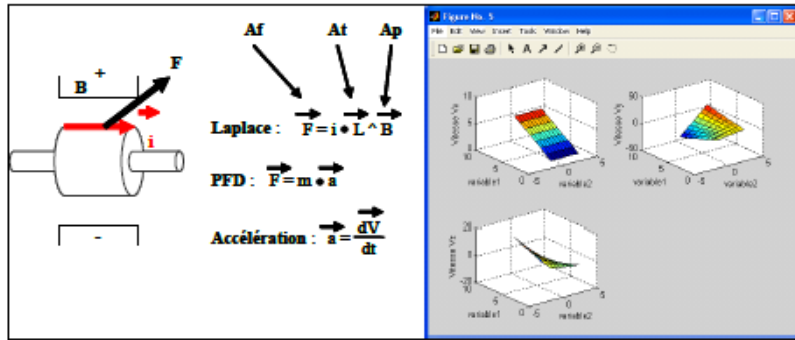
Pour ce faire, (Klein Meyer, 2008) propose dans ses travaux une approche basée sur un modèle métier (Figure 10) F-PP-T simplifié (Fonctions techniques, Principes physiques, Technologies) qui est une spécification du modèle FBS de (Gero, 1990).



**Figure 10. Modèle de données pour le choix des composants technologiques**

**(Klein Meyer, 2008)**

Le système est représenté par un ensemble d'attributs (fonctionnels 'Af', physiques 'Ap', ou technologiques 'At'). Ainsi, à partir des relations qui sont instanciées entre les relations de ces différents attributs, et la caractérisation des paramètres par des valeurs min/max, l'évaluation comportementale de la solution est résolue. Des algorithmes d'évaluation comportementale sont utilisés, afin d'analyser la réponse des paramètres technologiques 'At' sur les paramètres fonctionnels 'Af', à partir de relations analytiques issues de la physique et les paramètres physiques 'Ap' (Figure 11).



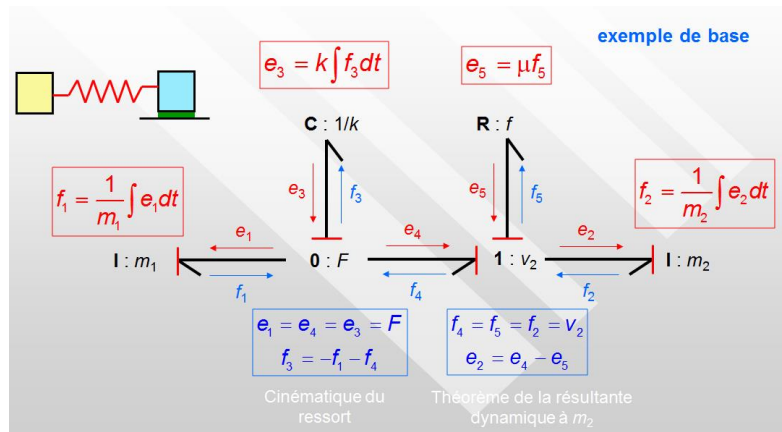
**Figure 11. Modélisation d'un système de rotor de moteur électrique issu de la modélisation F-PP-T (Klein Meyer, 2008)**

Ainsi, au fur et à mesure de l'avancement du processus de conception, et de l'évolution du paramètre "At", l'expert peut recalculer la réponse comportementale de la solution.

Les flux échangés lors du choix d'un composant technique, (Rozenburg&al, 1995) sont représentés par un modèle d'interface basé sur la formalisation des flux énergétiques. Ce modèle présente des éléments tels que le squelette d'usage du modèle, qui permet de modéliser la trajectoire des flux énergétiques, la peau d'usage, qui représente la surface fonctionnelle immatérielle à travers laquelle circule un flux énergétique, et l'élément technologique, qui traduit le résultat de l'activité présentant dans certains cas des niveaux granulaires différents (système, sous-système, ou pièce).

## **6.2.Le modèle conceptuel Bond Graph**

(Paytner, 1961) fut le premier à présenter la méthode des Bond Graphs appelée aussi Graphes des liens ou Graphes des liaisons. La formalisation de cette méthode s'est par la suite effectuée grâce à Karnopp et Rosenberg (Karnopp&Rosenberg, 1990) et est arrivée en Europe vers la fin des années 70 à travers l'Université Twente et la société Alstom. L'avantage des Bond Graphs réside dans le fait que la représentation du modèle est unique et peut être appliquée dans différents domaines de la physique. Cette méthode est basée sur la notion de transferts de flux de puissance entre les différents composants d'un système donné (Figure 12). Le modèle Bond Graph permet à partir d'une représentation des transferts d'énergie dans le système d'évaluer son comportement et de déterminer le modèle mathématique qui lui est associé. Ce langage Bond Graph est constitué d'éléments particuliers (éléments passifs, éléments actifs et éléments de jonction).



**Figure 12.Représentation bond graph d'un système masse-ressort (Fichou, 2006)**

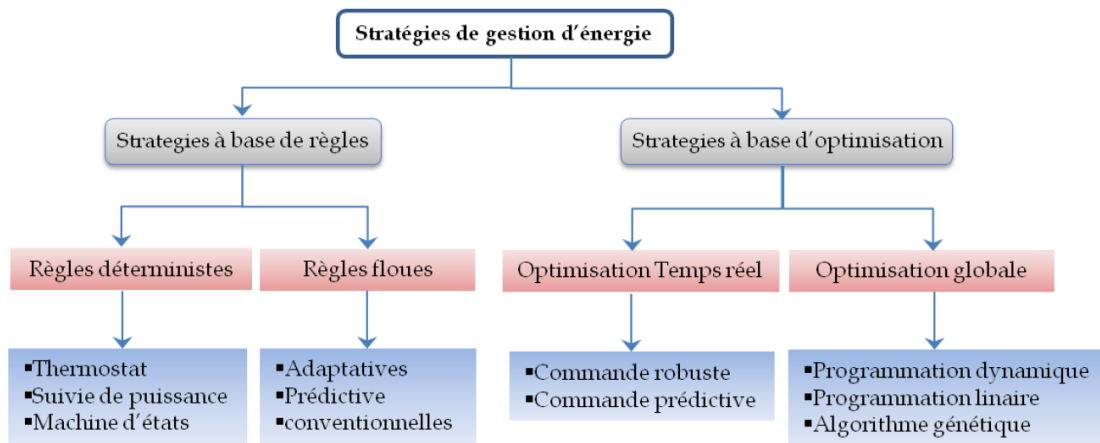
Le système est modélisé par la suite grâce à l'agencement de ces éléments et la création des relations adéquates entre eux. Les éléments passifs transforment la puissance en dissipant l'énergie ou en la stockant ; les éléments actifs représentent d'une part les sources de flux ou d'efforts, et d'autre part les détecteurs qui indiquent simplement la présence d'un capteur. Quant aux éléments de jonctions, ils permettent de coupler les éléments passifs et actifs.

Les aspects phénoménologiques et énergétiques de ce formalisme permettent d'aborder aisément la modélisation et l'étude des systèmes pluridisciplinaires. Son utilisation dans le milieu industriel et spécialement le secteur de l'automobile, fut appuyée par plusieurs travaux tels que ceux d' (Horvat&Tobler, 1985) effectués au sein de Ford Motor Company, et qui ont apporté une contribution importante concernant la modélisation des systèmes des CDT automobiles permettant de développer les modèles de contrôle commandes, ou les travaux de (Lefebvre, 2003) qui ont porté sur les systèmes des liaisons au sol, ou bien les travaux de (Laffite, 2002) effectués au sein de la société PSA Peugeot Citroën, et portent sur la modélisation des systèmes d'actionnement des CDT automobiles à partir de méthodes inverses (Ngwompo& al, 1996).

### **6.3.La représentation conceptuelle à l'aide des méthodes des stratégies de gestion d'énergie**

Ces méthodes se basent sur les principes de l'équilibre énergétique entre la quantité d'énergie demandée au système et celle que le système est réellement capable de fournir. Ces approches (Figure 13) font appel à des principes d'optimisation permettant de calculer le ratio optimal du coût énergétique dépensé par le système pour assurer la fonction requise. Ce coût est exprimé dans la plupart des cas par une commande à partir de laquelle le comportement du système est déduit.





**Figure 13. Classification des stratégies de gestion énergétiques**

Un état de l'art présentant ces différentes stratégies a été effectué dans les travaux de recherche de (Sadoun, 2013) :

- Les stratégies de gestion à base de règles permettent une distribution efficace de la puissance entre les différents organes du système à partir d'un contrôle des flux énergétiques. Ces stratégies permettent de faire fonctionner le système en temps réel et tolèrent des imprécisions au niveau des mesures. Elles sont facilement adaptables aux valeurs initiales des règles considérées. Les règles déterministes sont définies en lien direct avec l'objectif tant dis que les règles floues elles sont définies au préalable et sont gérées à travers la logique floue. Par exemple: Faire fonctionner la machine électrique sur ces points de fonctionnement optimaux afin de délivrer la puissance électrique nécessaire pour maintenir le niveau d'énergie dans la batterie entre deux valeurs min/max.
- Les stratégies à base d'optimisation où nous chercherons à trouver la stratégie de gestion permettant de minimiser des fonctions objectives telles que la consommation du véhicule par exemple. Les principes d'optimisation généralement utilisés à ce propos cherchent à définir à partir des contraintes du système (par exemple les valeurs min/max de l'énergie stockée dans la batterie, la tension maxi de la batterie, etc.) la commande optimale à appliquer au système pour qu'il ait le comportement souhaité. Ces principes sont:
  - **L'optimisation par le principe de Pontryagine** ; Le principe de cette méthode se repose sur la recherche d'une commande optimale qui permet de faire évoluer un système donné, d'un état vers un autre, tout en prenant en compte les contraintes d'état du système ou des commandes d'entrée. Ce principe a été formulé par le mathématicien russe Lev Semenovich Pontryagin à partir de 1952, faisant ainsi apparaître « le principe du minimum ou maximum de Pontryagin », dans lequel il a rattaché l'utilisation des équations d'Euler-Lagrange dans le domaine du calcul des variations. Le principe de Pontryagin stipule que : « Une commande est considérée optimale, si et seulement si, elle permet de minimiser l'Hamiltonien d'une fonction objective à minimiser, dans un espace de commandes admissibles, et ayant des

conditions d'optimalité de premier ou de second ordre». Ainsi, un système dynamique peut être décrit par son état de charge  $X(t)$  correspondant à :

$$x(t+1) = x(t) + P_{(Ne,Ce)}\tau \quad (1)$$

Tel que :

$P_{(Ne,Ce)}$  est la puissance consommée par le système technique

$\tau$  est la période d'échantillonnage.

Ainsi, le problème d'optimisation pour la recherche de la commande optimale, peut s'écrire à l'aide des multiplicateurs de Lagrange  $\lambda(t)$ , en considérant les contraintes dynamiques du système, comme étant adjointes à son Lagrangien, ce qui nous permet de définir l'Hamiltonien  $f'$  de la fonction objective à minimiser. La trajectoire de la commande optimale doit vérifier les conditions d'optimalité suivantes :

- Les conditions dites au premier ordre données par les dérivées partielles de  $f'$ ,  $\forall t \in \{0 \dots N-1\}$  :

$$\diamond \frac{\partial f'}{\partial \lambda(t)} = 0 \Leftrightarrow x(t+1) - x(t) - P(C_{Mth})\tau = 0 \quad (2)$$

$$\diamond \frac{\partial f'}{\partial x(t)} = 0 \Leftrightarrow \lambda(t-1) - \lambda(t) = 0 \Leftrightarrow \lambda(t) = \lambda(0) \quad (3)$$

$$\diamond \frac{\partial f'}{\partial C_{mth}(t)} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial Conso(C_{Mth})}{\partial C_{Mth}(t)} - \lambda(t) \frac{\partial P(C_{Mth})}{\partial C_{Mth}(t)} = 0 \quad (4)$$

- Les conditions dites du second ordre ; qui sont données par la dérivée partielle seconde de  $f'$ ,  $\forall t \in \{0 \dots N-1\}$  :

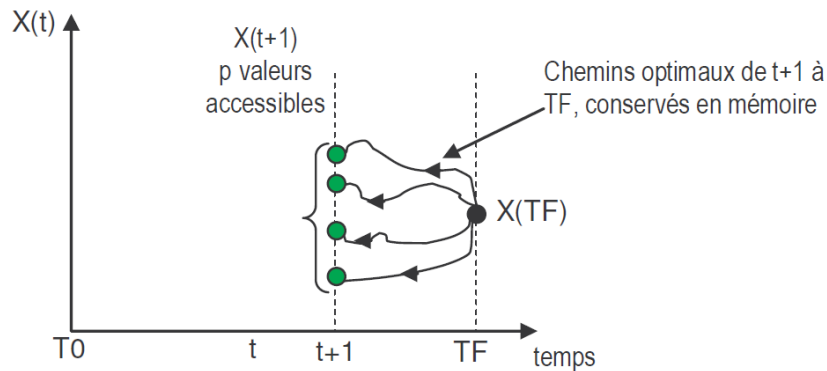
$$\diamond \frac{\partial^2 f'}{\partial C_{mth}(t)^2} \geq 0 \Leftrightarrow \frac{\partial^2 Conso(C_{Mth})}{\partial C_{Mth}(t)^2} - \lambda(t) \frac{\partial^2 P(C_{Mth})}{\partial C_{Mth}(t)^2} \geq 0 \quad (5)$$

Ce qui nous ramène à considérer la constante  $\lambda$  apparaît alors comme un seuil de régulation de l'état énergétique du système énergétique.

La méthode de la commande optimale par le principe du minimum de Pontryagin a l'avantage d'être assez rapide en termes de temps de calcul. Cependant, la résolution de ce problème d'optimisation nécessite la connaissance de la valeur de  $\lambda(0)$ , qui peut être calculé à partir d'une recherche par dichotomie sur la valeur de  $\lambda$ .

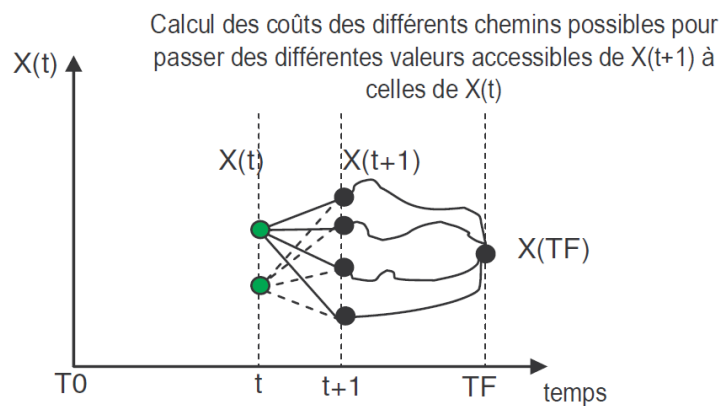
- **L'optimisation par programmation dynamique;** Cette méthode de recherche de la commande optimale, se base sur le principe d'optimalité de Bellman (1953), qui s'énonce comme suit: « Une suite de décisions est optimale si, quels que soient l'état et l'instant considérés, les décisions ultérieures constituent une suite optimale de décisions pour le sous problème dynamique ayant cet état et cet instant comme conditions initiales ». La commande optimale est alors calculée en remontant de l'état et l'instant final vers l'état et l'instant initial, de la manière suivante :

- Pour chaque pas de calcul, on calcule les  $p$  commandes optimales permettant d'aller des  $p$  valeurs atteignables de l'état  $x(t_f)$ , à l'état  $x(t + 1)$  correspondant à l'instant  $t+1$  sont calculées (Figure 14) :



**Figure 14. Calcul des chemins optimaux (Jalal, 2007)**

- Ensuite, le cout des commandes qui permettent d'atteindre chaque valeur discrète de  $x(t)$  à partir de  $x(t + 1)$  est évalué (Figure 15) :



**Figure 15. Calcul des coûts énergétiques de chaque chemin optimal (Jalal, 2007)**

Etant donné que les coûts des chemins pour aller de  $x(t + 1)$  à  $x(t_f)$  sont connus, ainsi que les couts des chemins pour aller de  $x(t)$  à  $x(t + 1)$ , il devient possible alors de calculer le cout des chemins pour aller de  $x(t)$  à  $x(t_f)$ . Les chemins optimaux correspondant au minimum calculé pour chacune des valeurs de  $x(t)$  et sont alors conservés en mémoire. Ce qui nous donne, une fois  $T0$  atteint, les  $p$  chemins optimaux correspondant aux  $p$  valeurs discrètes de  $x$  accessibles à  $T0$ . Cette méthode permet de déterminer la consommation énergétique optimale possible, pour chaque point de discrétisation. Cependant, son application nécessite la connaissance préalable du trajet à effectuer.

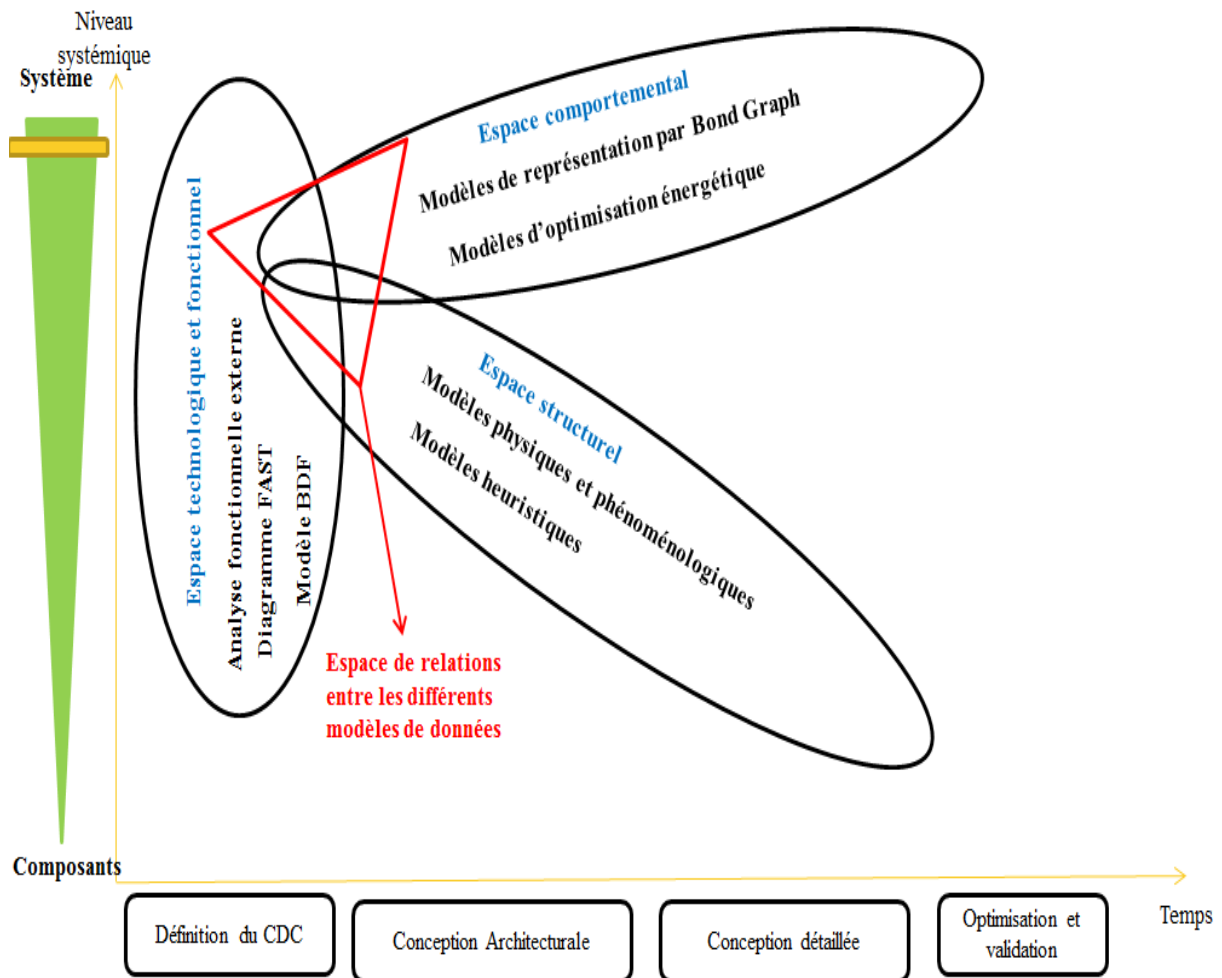
## 7. Résumé de l'état de l'art relatif aux modèles de données métiers

Nous avons présenté précédemment quelques exemples des modèles de données utilisés par les experts métiers afin de pouvoir concevoir des systèmes complexes concrets (Tableau 1).

| Définition de l'espace fonctionnel et technologique                                              | Définition de l'espace structurel                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Définition de l'espace comportemental                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• AFE</li> <li>• Diagramme FAST</li> <li>• BDE</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modèles phénoménologiques : (graphes des mécanismes, utilisation des atelas mécaniques, utilisation des approches d'optimisation)</li> <li>• Modèles heuristiques: (recherche d'une solution toute faite dans un catalogue, élimination des mauvaises solutions)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modèle F-PP-T</li> <li>• Modèle à l'aide de la représentation par l'outil Bond Graph</li> <li>• Modèle à l'aide des stratégies de gestion d'énergie</li> </ul> |

**Tableau 1. Modèles de données des systèmes concrets multi-physiques**

Ces modèles ont pour objectif de mieux orienter les concepteurs dans leurs choix de conception afin qu'ils puissent converger vers des solutions optimisées dans chacun des espaces de conception prédéfinis (Figure 16). Il existe de nombreux autres modèles permettant de traiter les expertises métiers dans les différentes phases de conception, mais l'objet de ce travail de thèse n'est pas de les comparer ni d'en proposer un nouveau modèle. Ce que nous allons faire c'est plutôt d'observer le comportement de ces espaces d'expertises ainsi que les modèles de données qui les définissent et de remarquer la présence de certaines relations les reliant ensemble. Ce sont bien ces relations qui feront l'objet de notre travail (cf. Section IV du chapitre 1 : «Positionnement des travaux de recherche face à l'état de l'art»).



**Figure 16. Relations entre les modèles de données d'expertises**

Ces relations traduisent des connaissances qui sont communes entre plusieurs modèles d'expertises, même si ces modèles ne figurent pas au même niveau de conception. Un changement dans l'une des données d'un modèle d'expertise dans l'espace structurel peut impacter les résultats obtenus par un autre modèle d'expertise dans l'espace comportemental par exemple.

Ainsi, nous présenterons dans la suite de ce chapitre les approches et outils existants dans la littérature, qui permettent à partir des modèles de représentation des connaissances différentes (hétérogènes), d'intégrer l'aspect collaboratif et d'assurer la convergence vers des solutions de conception respectant au mieux toutes les contraintes métiers.

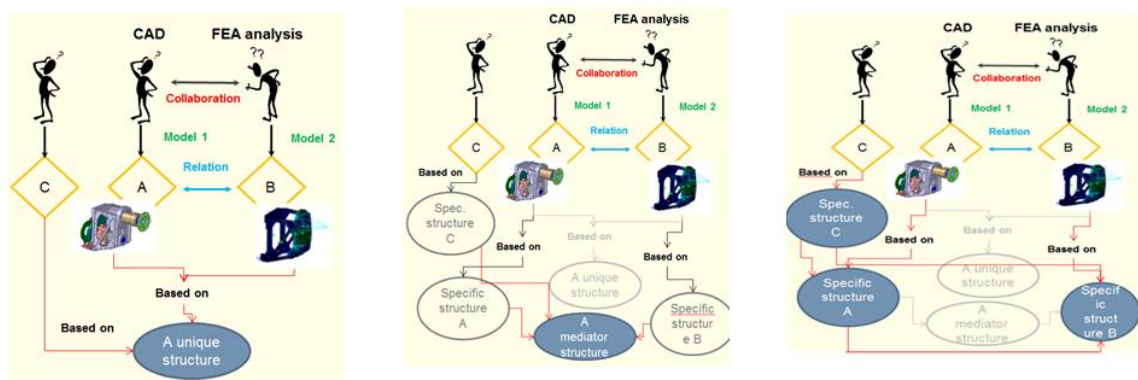
### **III. Modélisation des connaissances collaboratives : Définition de l'espace de collaboration et de convergence**

#### **1. Approches d'implémentation des modèles de données collaboratives**

Dans le but de dynamiser un processus de conception d'un système complexe et de le rendre plus collaboratif, trois principales approches existent en ingénierie système permettant la mise

en évidence de cet aspect. Ces approches sont définies par la norme (ISO-14258-1998, 1998) et permettent dans tous les cas de mettre en relation certains concepts d'un méta-modèle de données (au sens des méta-modèle définis précédemment), et les concepts d'un autre méta-modèle. Nous pourrions facilement étendre cela aux concepts de plusieurs méta-modèles sources vers les concepts de plusieurs méta-modèles cibles :

- La modélisation par intégration, dans laquelle tous les concepts de modélisation du système sont gérés par un unique méta-modèle. Les relations entre concepts sont alors intrinsèques au méta-modèle même. Cette approche est sûrement intéressante dès lors que le méta-modèle est figé, mais ne permet pas facilement une extension des concepts du méta-modèle dès lors, par exemple, qu'une nouvelle expertise doit apporter de nouvelles connaissances sur le système.
- La modélisation par unification, dans laquelle il existe un méta-modèle « pivot » permettant le dialogue entre les différents concepts des autres méta-modèles. Les relations entre méta-modèles cibles et le méta-modèle « pivot », lors de l'ajout de nouveaux méta-modèles sont facilités en créant la nouvelle carte de traduction sémantique sans toucher et perturber les autres.
- La modélisation par fédération, pour laquelle les relations sont intégrées directement dans les traductions sémantiques entre méta-modèles. Elles sont donc très faciles à mettre en place, mais assez chronophage dès lors qu'il y a beaucoup de relations de collaboration à traiter.



**Figure 17. Les approches d'implémentation par intégration, unification et fédération des modèles de données collaboratives**

Ces approches, permettent de représenter d'une façon ou d'une autre, les grandes fonctions de modélisation des systèmes complexes relatifs à la prise en compte:

- Des niveaux systémiques du système à modéliser ;
- Des relations multi-physiques existantes entre le système et son environnement, mais aussi entre ses composants ;
- De la maturité du système au cours d'un processus de conception (spécifications, concept, détails, etc.) ;

L'implémentation de ses approches fut dès lors effectuée grâce à l'apparition de l'ingénierie dirigée par les modèles IDM dans les années 80 dans le domaine du génie logiciel. En effet, cette époque a assisté à la naissance de l'approche objet qui considère que « tout est objet », pour évoluer ensuite vers l'approche IDM ou « tout est modèle ». Dans le milieu informatique, la conception des systèmes sous forme d'objets communicants entre eux a été acquise, il s'est posé la question sur la manière la plus adéquate de les classer en fonction de leurs différentes origines (objets métiers, techniques, etc.), c'est à ce niveau que l'approche IDM est apparue, permettant de fournir un très grand nombre de modèles qui représentent séparément les volontés des utilisateurs, des concepteurs, des architectes, etc.

Dans un contexte d'IDM les modèles peuvent être utilisés comme des éléments de conception, d'analyse ou de la documentation. Le principe de cette approche se base sur l'exploitation des modèles en tant que données d'entrée au processus de conception en les présentant en tant que moyens de description des activités humaines, ce qui favorise la collaboration entre les différents acteurs projet (Halin&al, 2005). L'environnement de l'IDM permet de définir des langages de modélisation et des transformations des modèles, à partir des formalismes hétérogènes permettant de définir la sémantique et la structure des langages et des transformations des modèles tels que présentés

Parmi les principaux langages de méta-modélisation existants dans le domaine de l'IDM, nous pouvons citer MOF (Meta-Objet-Facilities) qui a été normalisé par l'OMG lors de la construction de l'UML, EMOF (Essential MOF), et Ecore qui est le langage défini par IBM et utilisé dans l'EMF (Eclipse Modeling Framework).

Ainsi, l'IDM peut être considérée comme une méthode permettant de structurer et d'organiser les modèles d'expertises existants dans un environnement de conception collaborative, dans le but de concevoir le système souhaité. Cette approche est alors dépendante de la mise en place des modèles experts ainsi que les points de vue du système traduits à travers ces modèles. La manière avec laquelle le système à concevoir est décrit représente les informations contenues dans les modèles d'expertises, et les fonctions que le système doit remplir représentent quant à elles les objectifs auxquelles doit répondre chaque modèle.

La suite de ce paragraphe sera dédiée à la présentation de quelques exemples de méta-modèle unifié. C'est l'option que nous avons choisie pour traiter les connaissances collaboratives même si d'autres approches sont traitées dans d'autres travaux (Iraqi-Houssaini&al, 2011).

## **2. Les modèles de collaboration**

### ***2.1. Le méta-modèle FBS-PPRE***

Ce méta-modèle unifié a été introduit pour la première fois par Labrousse (Labrousse&al, 2008) dans le cadre de ses travaux, et a pour but d'intégrer le modèle produit au modèle processus. Le méta-modèle FBS-PPRE « Function-Behavior-Structure-Product-Process-Resources-External-Effect », est réalisé à partir de concepts de produit, processus, ressources

et effet extérieur, couplés dans un modèle générique, qui lui est basé sur les concepts de FBS de (Gero, 1990). Il permet d'avoir accès aux éléments de processus pour analyser et extraire les éléments réutilisables dans le processus de conception. La notion de processus modélise dans ce contexte la dynamique des informations et définit de manière cohérente les comportements des différents objets manipulés (Figure 18).

**Figure 18. Diagramme de classes du méta-modèle FBS-PPRE (Labrousse&al, 2008)**

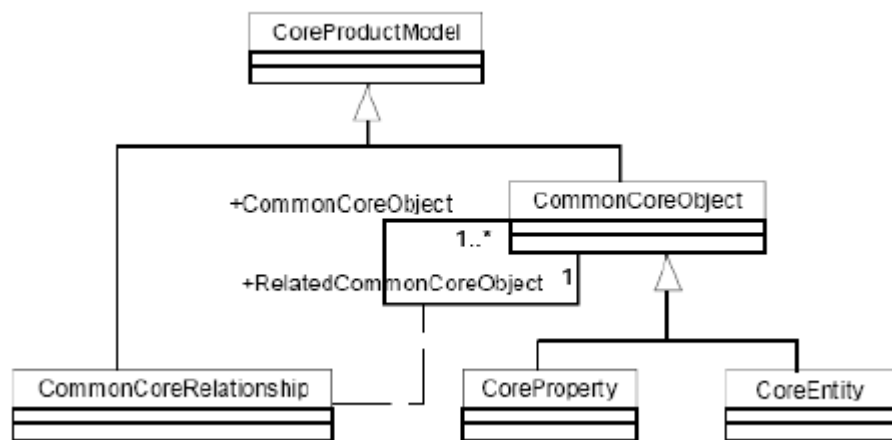
- La notion d'état, qui correspond à renvoyer des représentations de la structure à un instant donné.
- La notion d'indicateur de performance permettant d'évaluer le degré de satisfaction des objectifs.
- La notion de produit, processus et ressource, à partir de laquelle une distinction des différents rôles pour les objets d'entreprise est réalisée.
- La notion d'effet externe ou de contraintes, qui représente les normes, règlements, clients, etc.



## 2.2. Le méta-modèle CPM

Le méta-modèle CPM « Core Product Model » décrit dans les travaux de (Sudarsan&al, 2005) est un méta-modèle unifié conçu comme une représentation des informations relatives au développement de produits. Il sert à fournir une représentation de produits manufacturiers (Artefacts) et contient des concepts d'ingénierie qui vont au-delà de la géométrie. Ainsi, nous retrouvons les concepts relatifs à la forme du système à concevoir, sa fonction, son comportement, les matériaux utilisés, les décompositions physiques et fonctionnelles, ainsi que la mise en correspondance entre ses différents concepts. Ce méta-modèle est défini par un diagramme de classe UML représentant le produit et contenant cinq catégories de classes (Figure 19):

- Core Product Model, qui représente le plus haut niveau d'abstractions ;
- Common Core Object, qui est la classe de base pour toutes les classes d'objets donnant la couche de base du modèle ;
- Common Core Relationship, qui décrit les associations entre entités ;
- CoreEntity, représentant les entités réelles comme Artifact, Form, Feature, etc.
- CoreProperty, qui est la classe de base à partir de laquelle Fonction, Forme, Flux, Géométrie et Matériaux sont spécialisés ;



**Figure 19. Catégories de classe du méta-modèle CPM (Sudarsan&al, 2005)**

Le concept de Fonction est représenté dans ce diagramme UML par la classe « Function », avec une fonction particulière au modèle CPM qui est intégrée, représentant le transfert de flux (de type fluide, énergie, information, etc.), qu'il s'agisse d'une conversion de flux ou d'une transmission. Le concept Comportement est représenté par la classe « Behavior » décrivant ainsi comment un « Artefact » réalise sa « Fonction ». Le concept Structure du produit est défini à partir des notions d'Artefact représenté par un « Composant » ou un « Part », de Feature représentant la forme globale d'un Artefact à laquelle une fonction est attachée, et de Form.

### 2.3. Le méta-modèle produit de MOKA

Le projet MOKA (Stokes, 2001) réalisé dans le cadre du projet européen ESPRIT/AIT, est basé sur le formalisme UML afin de représenter l'ingénierie des connaissances au niveau des utilisateurs. Il permet de les déployer dans des applications KBE «Knowledge Based Engineering », comme un prototype des modèles spécifiques à un domaine d'application. Ce méta-modèle unifié s'appuie sur cinq vues du produit (Figure 20) :

- La vue structure, permettant de décrire la décomposition hiérarchique de la structure du produit à partir de pièces, d'assemblages et d'un ensemble de caractéristiques (Features).
- La vue fonction, permettant de définir la décomposition fonctionnelle du produit et les principes de solution de conception
- La vue comportement, permettant d'interpréter un modèle des divers états du système et de la transition d'un état à un autre
- La vue technologie, permettant de décrire les connaissances concernant une technologie associée au cycle de vie du produit. Cette vue contient, les informations concernant le processus de fabrication et les autres processus intervenant dans le cycle de vie du système.
- La vue représentation, permettant d'interpréter les connaissances liées à la géométrie de la structure (la dimension, le positionnement, la forme, etc.).

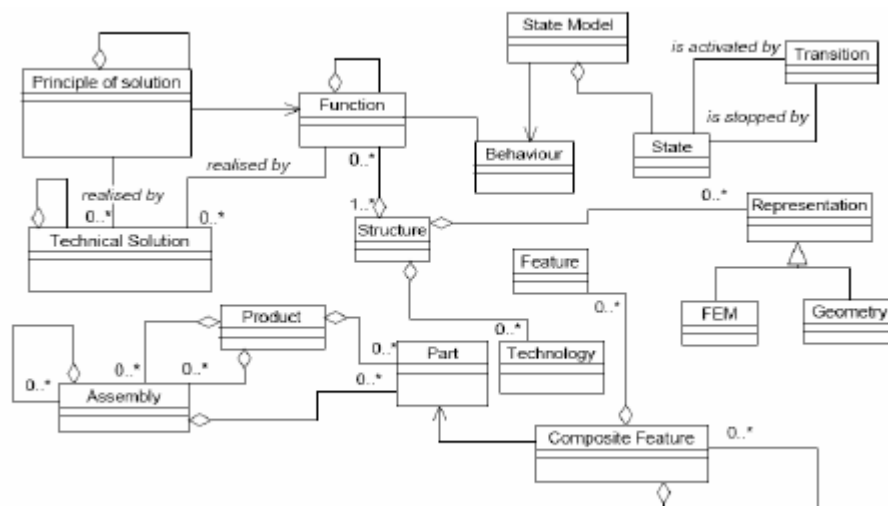
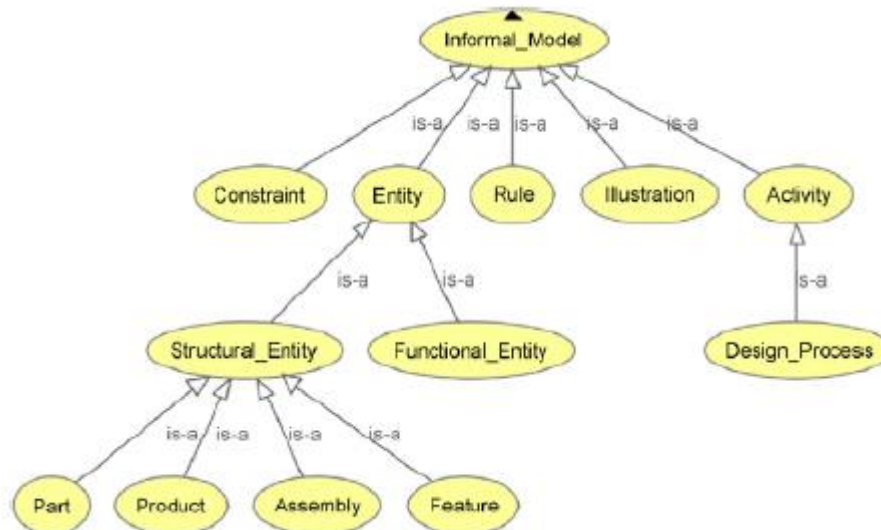


Figure 20. Méta-modèle du produit MOKA (Stokes, 2001)

Afin de représenter l'environnement de conception, le modèle proposé dans le cadre du projet MOKA inclut les catégories de connaissances qui sont issues des experts après qu'elles soient renseignées dans des fiches appliquées ICARE (Illustration, Contrainte, Activité, Règle, Entité), en définissant les éléments de connaissances de la manière suivante (Figure 21):

- Illustration, utilisée pour enregistrer les expériences vécues ou particulières,
- Contrainte, dans le but d'enregistrer les éventuelles limitations imposées sur le produit
- Activité, permettant de décrire le processus de conception
- Règle, permettant de traduire les contraintes dans le processus de conception
- Entité, qui décrit le système. Une entité peut être structurelle ou fonctionnelle.



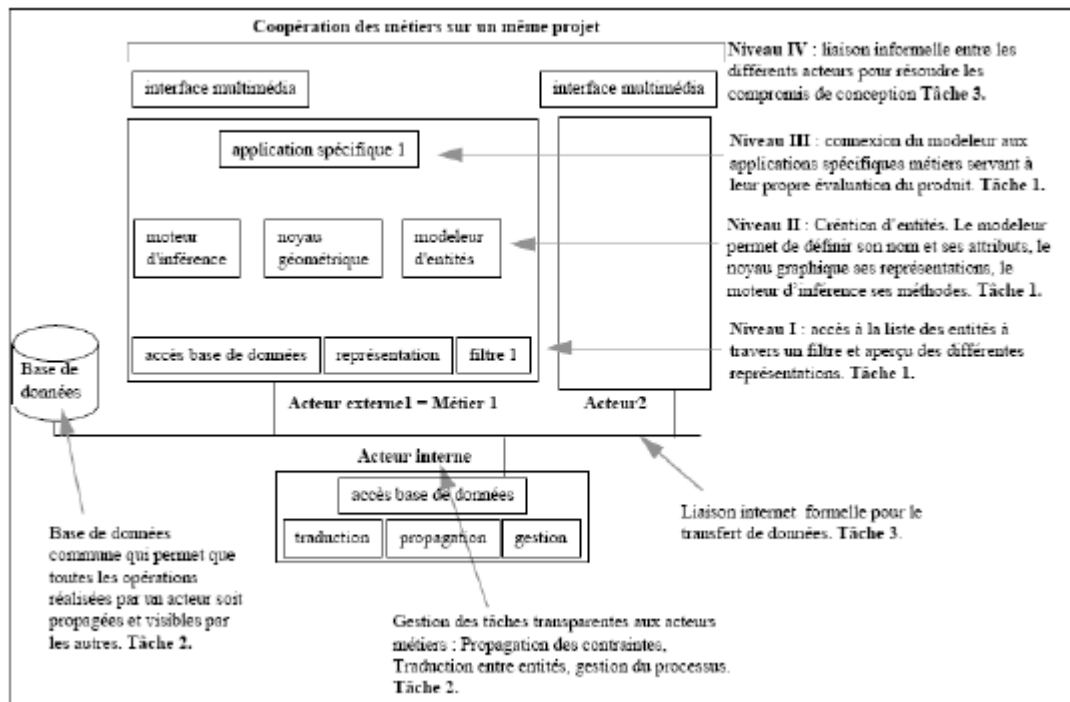
**Figure 21. Modèle informel ICARE de MOKA**

#### **2.4. Le méta-modèle intégré dans CODEMO**

Le méta-modèle unifié implémenté dans CODEMO (Co-Operative Design Modeler) et présenté dans les travaux de (Roucoules&Tichkiewitch, 2000), permet de servir de support pour la conception coopérative intégrée (Figure 22) dans un environnement informatique donné, favorisant ainsi la conception assistée par ordinateur. Ce méta-modèle permet de créer des décompositions multi-vues (Tichkiewitch&al, 1995) du système au cours de sa conception.

A partir de l'interface graphique du modelleur CODEMO, il est possible de créer de manière dynamique un modèle produit, avec ses différentes vues technologiques, son ossature, sa géométrie et métier (Roucoules, 1999), à travers les vues suivantes (Figure 22):

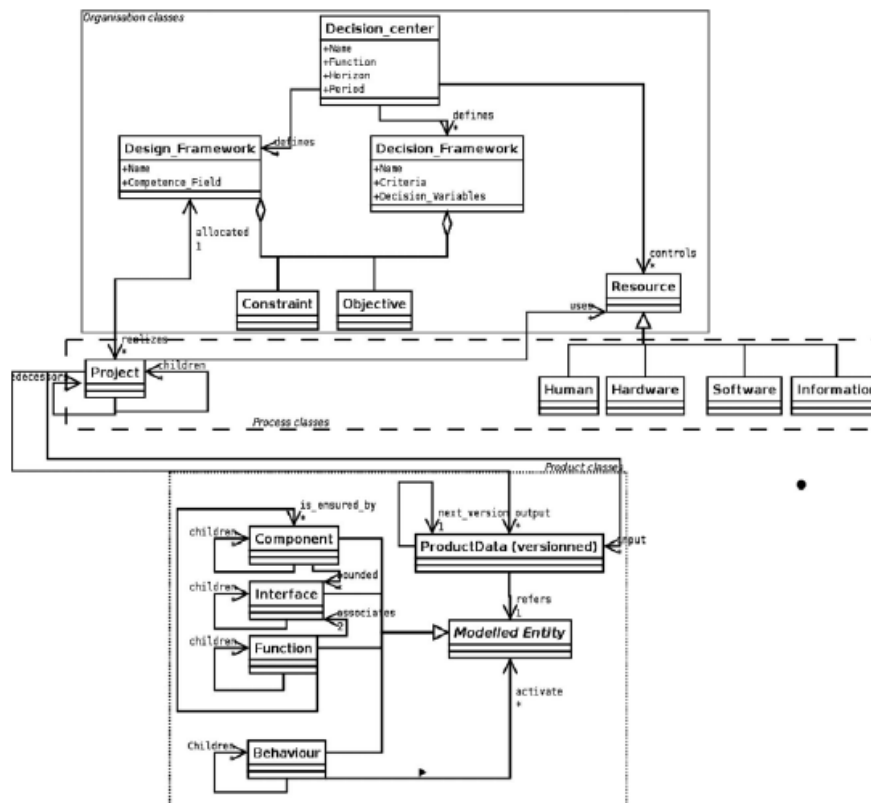
- La vue technologique, dans laquelle nous retrouvons la décomposition structurelle du système issue du modèle fonctionnel
- La vue ossature, permettant de représenter le système à partir de ses surfaces fonctionnelles
- La vue géométrique, qui n'est autre que le résultat des deux vues technologiques et ossature
- La vue métier, qui représente les connaissances des experts métier sur le système qu'ils expriment en créant leurs propres vues.



**Figure 22. Modelleur de conception intégrée CODEMO (Roucoules, 1999)**

Ce méta-modèle permet alors aux experts métiers d'avoir accès à la structure des données à travers les décompositions multi-vues (Figure 23), rendant leur modification possible si nécessaire, dans le but de faire évoluer la conception. Grâce au modelleur CODEMO, plusieurs représentations des données du système deviennent accessibles afin de fournir une vision compréhensible. Ainsi ce méta-modèle forme une base de données donnant accès aux différents acteurs, aux informations concernant les opérations réalisées par chacun d'eux, tout en la propageant ce qui la rend visible. La propagation d'information permet dans ce cas de faire apparaître les compromis dans le cas où une relation est violée.

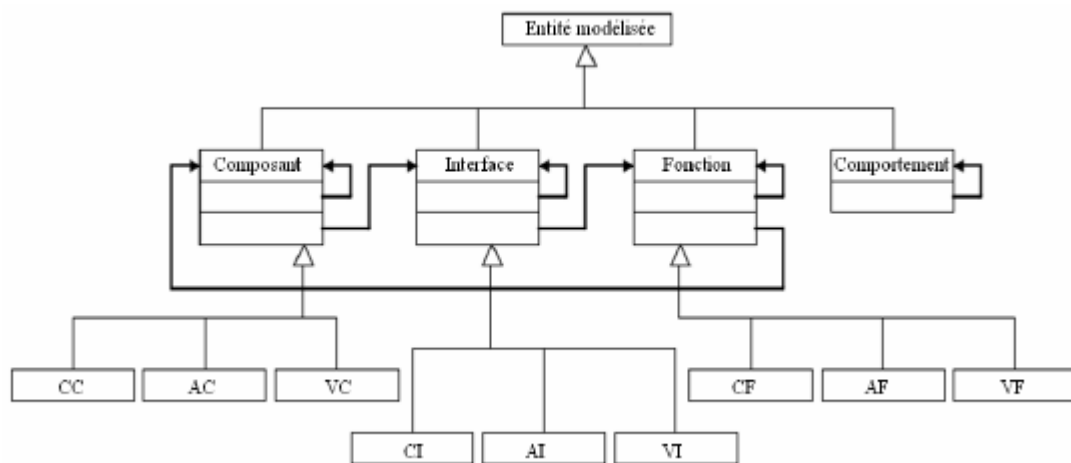




**Figure 24. Diagramme de classes du méta-modèle PPO (Noel, 2008)**

Le sous méta-modèle Produit du méta-modèle PPO permet de représenter un produit à l'aide des entités de base (Composant, Interface, Fonction et Comportement), avec des qualificatifs qui permettent d'envisager la description des familles de produit (Alternative), mais aussi de différencier les données partagées par l'ensemble des acteurs (Commun) de celles spécifiques à un métier (Vue) (Figure 25) :

- Un Composant donne une description structurale du système et peut être décomposé en sous-composants pour présenter un assemblage, un sous-assemblage ou même une pièce.
- Une interface est un lien entre un composant et un élément extérieur.
- Une fonction est une relation entre deux ou plusieurs composants à travers leurs interfaces, définissant un objectif à atteindre par le système à concevoir.
- Un comportement est un état du modèle dans les différentes phases du cycle de vie du produit, et est défini par la déclaration des composants, des interfaces et des fonctions.

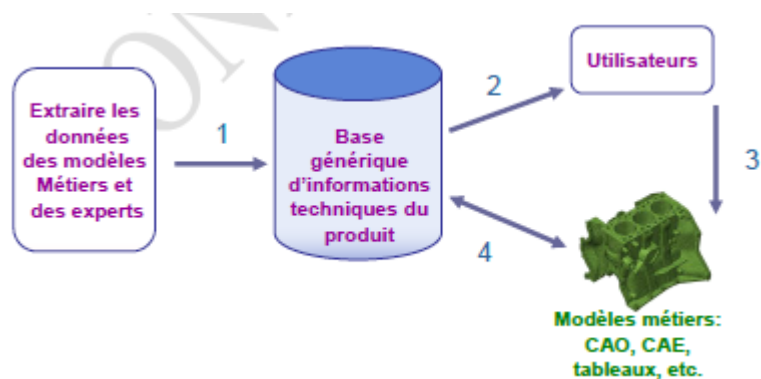


**Figure 25. Diagramme de classes du méta-modèle Produit dans PPO (Noel, 2008)**

La description de chaque entité peut être affinée par un qualificatif (Alternative, Commun ou Vue), faisant apparaître ainsi les composants CC qui ont la même description pour tous les experts, les composants AC qui sont décomposés en composantes alternatives, et les composants VC qui sont décomposés en plusieurs représentations spécifiques des expertises différentes.

## 2.6. Le méta-modèle KCMModel

Ce méta-modèle est basé sur une approche d'unification, fut proposée par (Badin, 2011) dans ses travaux de recherche et se focalise sur la gestion des paramètres et des règles encapsulés dans les modèles de conception et de simulation dans un environnement collaboratif. Cette approche va plus loin que l'échange des connaissances directement effectué entre les modèles métiers, en proposant une plateforme centrale dans laquelle toutes les connaissances sont structurées et bien gérées (Figure 26).



**Figure 26. Processus global de KCMMethod (Badin, 2011)**

KCMethod est une méthode de gestion de configuration des connaissances qui permet d'avoir un suivi dynamique des évolutions de paramètres et des règles dans le processus de conception d'un produit. Elle est basée sur deux concepts majeurs :

- Information CoreEntity (ICE) ; qui est une entité générique indécomposable permettant de capitaliser des données importantes extraites des modèles d'expertises, passant ainsi de l'état de donnée à l'état d'information. Cette entité est composée de données et de contraintes génériques, de sorte que l'ensemble des ICE constitue la base générique d'informations techniques relatives au produit, ayant un caractère dynamique et évolutif au fil du temps. Cependant, la création des ICE dans une activité de processus de conception passe obligatoirement par la création d'une knowledge configuration et de leurs instances dans cette dernière.
- Knowledge Configuration (KC) ; est constituée des instances des ICE et représente les connaissances du modèle avec lequel elle est synchronisée. En effet, pour permettre la réutilisation des ICE, un utilisateur fait une sélection dans la base des ICE de manière à ne retenir que celles dont il a besoin pour son activité. Il instancie cette sélection dans une Knowledge Configuration synchronisée avec son modèle d'expertise. Cette notion fait référence aux mécanismes de gestion en configuration en offrant tous les services de gestion des versions, de modifications et de la cohérence. L'intérêt des configurations réside dans le fait de disposer d'un mode de représentation homogène des connaissances qui peuvent être utilisées dans différentes activités du processus de conception (Figure 27).

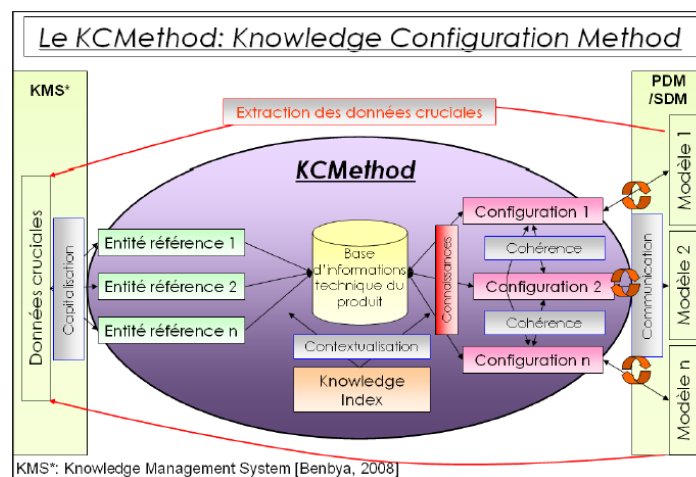


Figure 27. Processus global et principe de KCMethod (Badin, 2011)

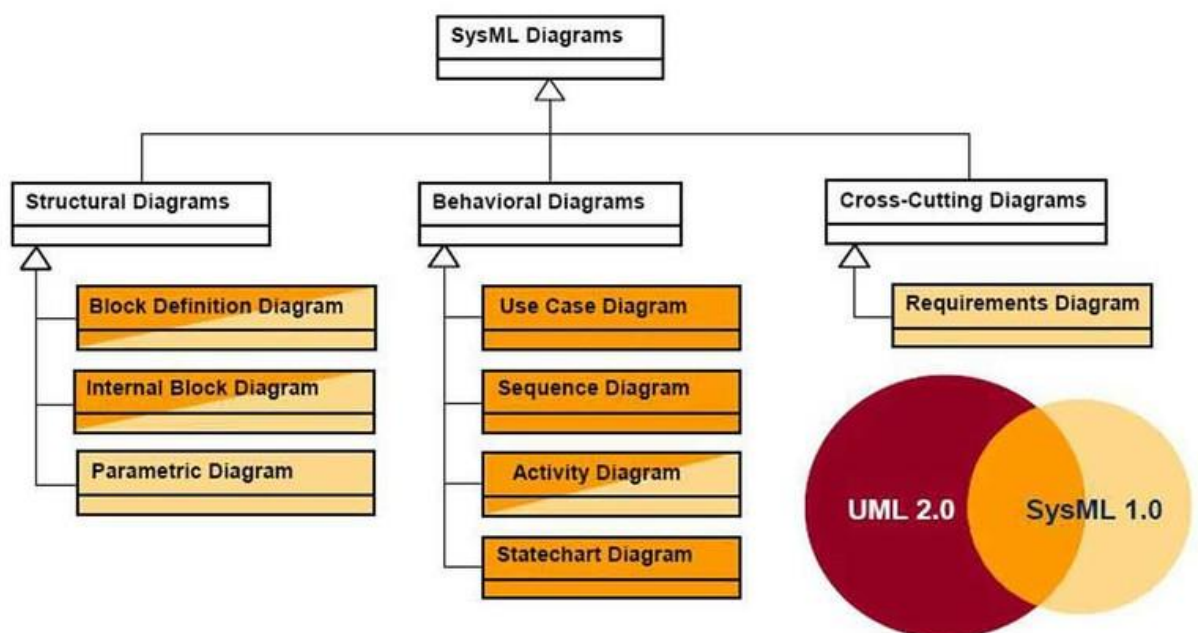
## 2.7. Le méta-modèle SysML « System modeling language »

Contrairement aux méta-modèles présentés précédemment, ce méta-modèle de données collaboratives est basé sur une approche d'intégration. Il fut développé pour la première fois en 2004 par le groupe « Partenaires SysML » dirigé par **Cris Kobryn** et **Sandford Friedenthal** (Friedenthal&al, 2009) dans le cadre d'un projet open source, qui le soumièrent à



l'OMG « Object Management Group » pour la première version de SysML 1.0. L'objectif de ce langage de modélisation est de permettre aux ingénieurs de réaliser les tâches de spécifications, d'analyse, de conception, de vérification et de validation de nombreux systèmes et sous-systèmes.

Ce langage utilise sept des treize diagrammes d'UML2 (Figure 28) et ajoute deux diagrammes spécifiques (diagramme des exigences et diagramme paramétrique). Le diagramme d'exigence permet de capturer efficacement les besoins fonctionnels de performances et d'interface. Quant au diagramme paramétrique, il permet de définir précisément la performance et les contraintes considérées (par exemple pour un système véhicule : l'accélération maximum, la capacité en air conditionné, etc.).



**Figure 28. Diagramme SysML (OMG, 2008)**

Ainsi, le méta-modèle basé sur le langage SysML est capable de modéliser une large gamme de systèmes, incluant tant du matériel, que du logiciel, de l'information, des processus, du personnel, ou des équipements (au sens large).

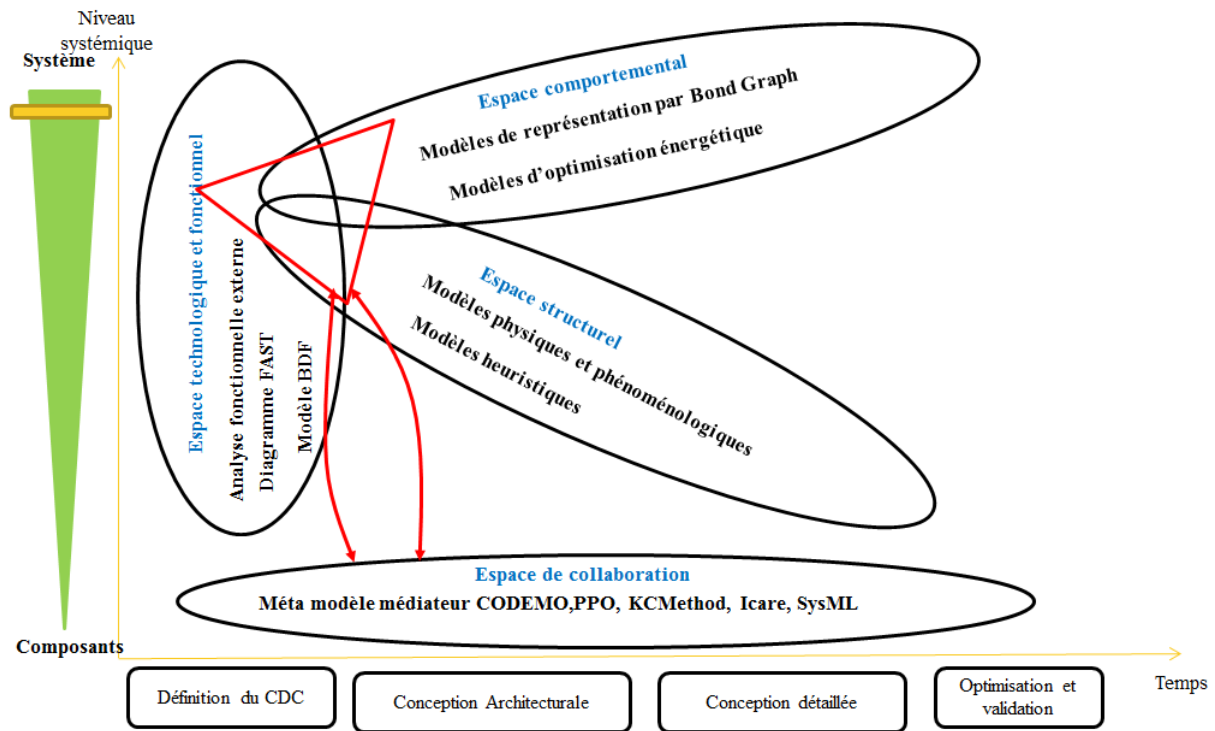
## **2.8. Résumé sur les modèles de collaboration**

Les modèles de collaboration présentés à partir des méta-modèles définis dans le (Tableau 2) permettent de mettre en relation les connaissances encapsulées dans les modèles d'expertise lors de la conception d'un système complexe.

| Définition de l'espace de collaboration |                     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Méta-modèles médiateurs                 | Approches utilisées | Concepts et notions                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Modèle FBS-PPRE                         | Unification         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fonction / Structure/ Comportement</li> <li>• Notions d'état</li> <li>• Notions d'indicateur de performance</li> <li>• Notions de produit / processus: ressources</li> <li>• Notions d'effet externe ou contrainte</li> </ul> |
| Modèle CPM                              | Unification         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Core product model</li> <li>• Common core object</li> <li>• Common core relationship</li> <li>• Core entity</li> <li>• Core properties</li> </ul>                                                                             |
| Modèle produit MOKA                     | Unification         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vue structure</li> <li>• Vue fonction</li> <li>• Vue comportement</li> <li>• Vue technologique</li> <li>• Vue représentation</li> </ul>                                                                                       |
| Modèle CODEMO                           | Unification         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vue technologique</li> <li>• Vue ossature</li> <li>• Vue géométrique</li> <li>• Vue métier</li> </ul>                                                                                                                         |
| Modèle PPO                              | Unification         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Composant, alternative</li> <li>• Interface</li> <li>• Fonction</li> <li>• Comportement</li> </ul>                                                                                                                            |
| Modèle KCMethod                         | Unification         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Information core entity</li> <li>• Knowledge configuration</li> </ul>                                                                                                                                                         |
| Modèle SysML                            | Intégration         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Structural diagrams</li> <li>• Behavioral diagrams</li> <li>• Cross-cutting diagrams</li> <li>• Requirements diagrams</li> </ul>                                                                                              |

**Tableau 2. Présentation des méta-modèles médiateurs pour les données collaboratives**

Ces modèles intègrent les approches de collaboration mentionnées au début de ce paragraphe, et permettent de structurer et de gérer les connaissances et les données d'expertises lors de la conception d'un produit (Figure 29).



**Figure 29. Positionnement des modèles de collaboration dans l'environnement de conception**

### 3. Mécanismes de convergence et de recherche dans l'espace des solutions de conception

De par les caractéristiques d'un système complexe (interdépendances de ses sous-systèmes, l'existence de plusieurs alternatives de solutions à considérer, intègre plusieurs principes physiques, évolue tout au long du cycle de vie, etc.), les concepteurs se retrouvent facilement confrontés à un grand nombre de configurations qu'ils doivent tester et évaluer afin d'en retenir que celles qui seraient optimales à partir de leurs contraintes d'expertises représentées par les modèles métiers et gérées dans les modèles de collaborations. Pour concevoir un tel système et faire le choix de la configuration à retenir le plutôt possible dans un processus de conception, il existe plusieurs approches permettant d'assister les concepteurs à réduire les dimensions de l'espace de solutions admissibles.

Ces approches ont été résumées dans les travaux de (Yvars, 2012), et se présentent principalement en trois types :

- Les approches basées sur l'intuition du concepteur utilisant des règles simplistes ou des Pareto

- Les approches basées sur des plans d'expériences
- Les approches basées sur l'utilisation des algorithmes de résolutions de problèmes à travers le calcul par intervalles combinés « CSP »

### 3.1. Les approches « Pareto »

Cette approche se base sur une optimisation intuitive des systèmes ou sous-systèmes qui peuvent être considérés comme les plus impactants (Figure 30). Elle utilise la loi empirique de Pareto (80% sur les produits et 20% sur les causes) en identifiant les sources d'impacts majeurs. Une recherche des solutions alternatives est par la suite réalisée et des analyses du cycle de vie sont effectuées à l'aide de nombreuses itérations pour affiner au mieux la définition du nouveau système. La difficulté de cette approche réside dans la forte consommation du temps de calcul puisque chaque solution alternative doit être évaluée pour voir si elle respecte bel et bien les contraintes de conception des différentes expertises. Des travaux d'amélioration ont été élaborés vis-à-vis de cette approche (Dewulf&al, 2005), où ils ont modélisé les paramètres principaux du produit et ils les ont pondérés par des poids environnementaux issus de la méthode Eco-Indicateur 99. Ceci permet d'identifier pour des systèmes simples et sans couplages des configurations générant les impacts les plus faibles.

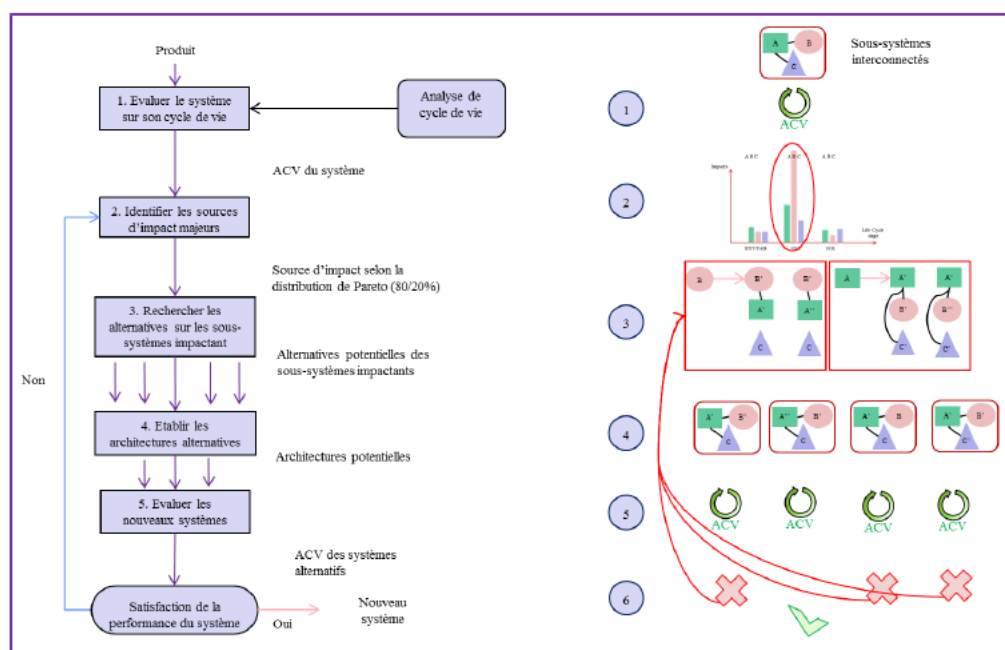


Figure 30. Flowchart de l'approche "Pareto" (Yvars, 2012)

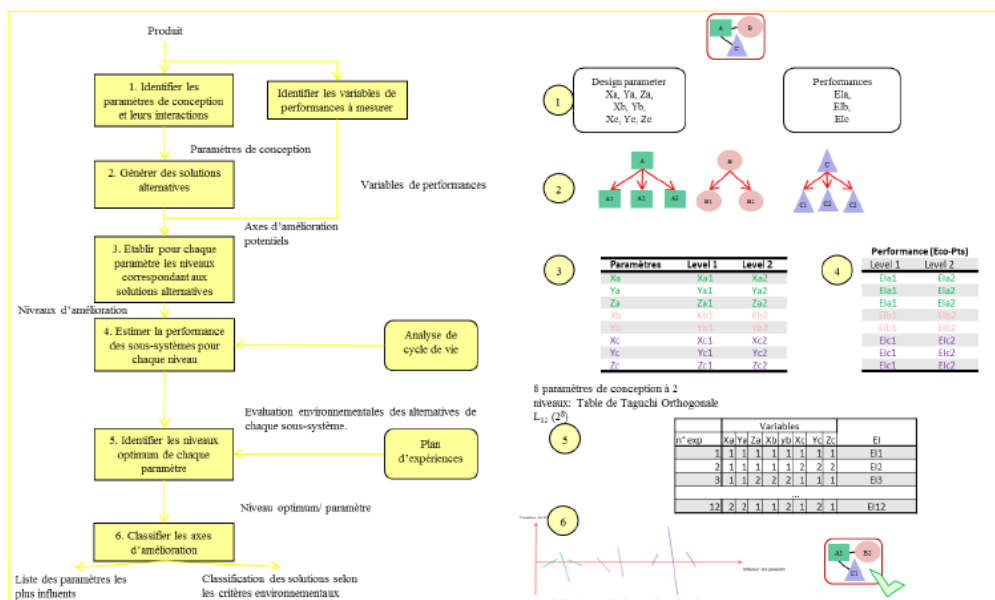
### 3.2. Les approches « Plan d'expériences »

Cette approche fut détaillée dans les travaux de (Millet&al, 2009) et s'appuie comme son nom l'indique, sur une combinaison de plans d'expériences (Figure 31). En fonction de leurs impacts sur la consommation énergétique du système global, les sous-systèmes sont classés en sous-systèmes actifs (ils consomment de l'énergie), ou bien passifs (ils n'interagissent pas

sur la consommation énergétique du système). À partir de cette classification un modèle générique est élaboré afin de définir fonctionnellement ces types de sous-systèmes ainsi que les interactions qu'ils ont. Les alternatives potentielles sont alors créées à partir d'une recherche créative et chaque voie d'amélioration de chaque sous-système est ensuite quantifiée fonction de critères précis. Ce travail de prospection peut être réalisé de deux façons :

- Par similitudes avec des produits concurrents ou connexes qui exploitent déjà ce type d'amélioration
- En faisant appel à des spécialistes techniques qui seront capables d'estimer les performances atteignables par cette amélioration

L'interprétation des résultats du plan d'expériences permettra de comprendre l'influence des différents paramètres sur le résultat global et de hiérarchiser les axes d'amélioration potentiels.



**Figure 31. Flowchart de l'approche DOE (Yvars, 2012)**

### 3.3. Les approches « CSP »

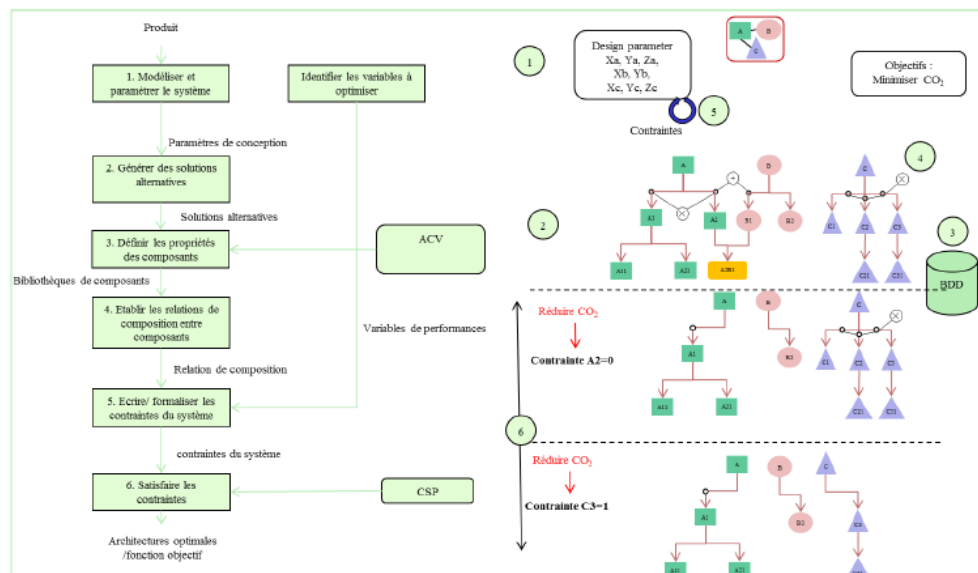
Cette approche est basée sur une combinaison de problème de satisfaction de contraintes CSP (Constraints Satisfaction Problem) (Montanari, 1971), et a été largement utilisée par les communautés des sciences de l'ingénieur au cours des deux dernières décennies. Cette approche a prouvé son efficacité dans des domaines tels que la préconception (Scaravetti, 2004), la résolution de problèmes de dimensionnement (Yvars&al, 2009), l'optimisation et même la configuration de plateforme de produit (Xie&al, 2005).

Un CSP est défini par :

- Un ensemble de variables  $X$  qui peuvent être de conception, de performance ou d'état.
- Un ensemble de domaines  $D$  qui peuvent être discrets ou continus et qui sont associés aux variables
- Un ensemble de contraintes  $C$  qui traduisent les fonctions structurantes réalisées par le système pendant la situation de vie de référence, et sont sous forme de relations explicites entre les variables. Chacune des contraintes porte sur une partie de l'ensemble des variables dont elle restreint les domaines  $D$ .

Ainsi, le problème de résolution d'un CSP revient alors à instancier chacune des variables de  $X$  dans son domaine de valeurs, tout en satisfaisant l'ensemble des contraintes  $C$  du problème

Ce type de résolution (Figure 32) garantit un ensemble complet de solutions et permet alors à l'équipe de conception de choisir la solution la plus adéquate à leur problème de solution, à partir des variables de performances et contraintes spécifiques. Cette résolution s'effectue généralement par réduction du domaine puisqu'il s'agit de remplacer à chaque fois un CSP initial par un CSP équivalent, mais avec un espace de recherche de solution plus restreint. Pour ce faire, il existe plusieurs moyens permettant d'arriver à la réduction de l'espace de solution telles que les essais-erreurs, la dichotomie, ou l'utilisation des techniques de filtrage qui s'appuient sur l'arithmétique des intervalles de (Moore, 1966) et la propagation de contraintes de (Mackworth, 1977). Mais le plus intéressant dans cette approche est le fait qu'elle offre la possibilité d'inférer des contraintes et des domaines (Chenouard, 2007), en propageant les informations contenues dans une contrainte vers les contraintes voisines.



**Figure 32. Flowchart de l'approche CSP (Yvars, 2012)**

L'utilisation des CSP en conception préliminaire offre une grande souplesse dans l'expression des connaissances et la modification et/ou la suppression des modèles d'expertises, et permet la résolution des problèmes génériques (Chenouard, 2007).

Il existe plusieurs outils permettant d'utiliser les concepts CSP tels que :

- L'outil ILog développé par IBM pour des applications d'aide à la décision analytiques basées sur l'optimisation.
- L'outil or-tool développé par Google pour résoudre les problèmes de propagation de contraintes CSP.

### ***3.4.Résumé de l'état de l'art sur les mécanismes de convergence***

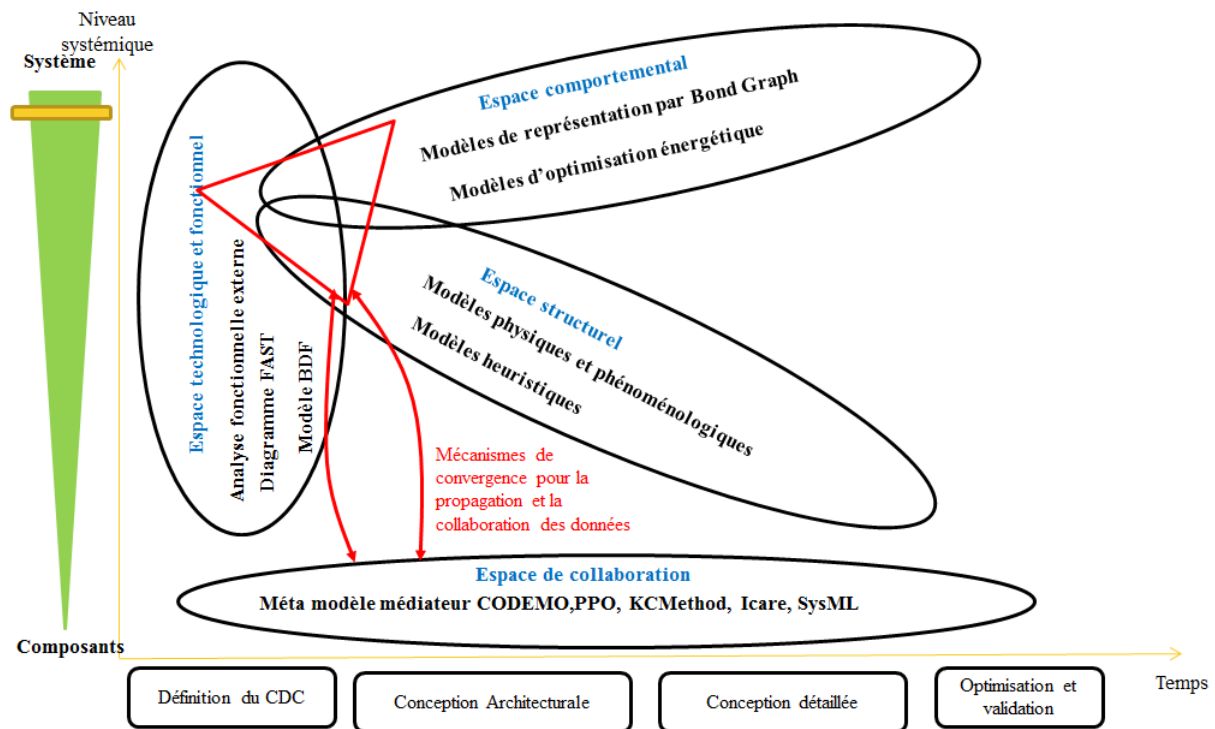
Ces méthodes s'inscrivent dans la recherche d'un optimum global de la solution de conception et ont été utilisées dans plusieurs travaux de recherche (Picheral, 2006) afin d'intégrer au mieux les incertitudes liées au problème de conception à la démarche d'optimisation utilisée pour converger vers un optimum robuste.

Malgré la diversité des méthodes et outils de conception, leurs applications et utilisations dans l'industrie semblent être toujours aussi limitées d'après (Karlsson&al, 2006). Ceci est principalement dû à la complexité de leur mise en place, le temps nécessaire pour les appliquer et le besoin de connaissances environnementales nécessaires à leur meilleure exploitation. Et c'est précisément dans ce contexte que s'inscrit notre proposition de recherche.

## **IV. Positionnement des travaux de recherche face à l'état de l'art**

Nous avons pu dans ce chapitre présenter l'état de l'art relatif aux différents concepts et approches sur lesquels nous nous sommes basées dans nos travaux.

En présentant les différents types de modèles qui permettent de **définir un système concret**, de **capitaliser les connaissances relatives aux modèles d'expertises** et de permettre la **collaboration et l'échange ainsi que la propagation d'information entre les différents experts** impliqués dans un projet de conception, nous avons balayé les outils existants répondant à notre problématique de conception d'une CDT hybride (Figure 33).



**Figure 33. Environnement de conception de notre proposition de recherche**

Les modèles d'expertises permettant de définir les trois espaces métiers (technologique et structurel, et comportemental) lors du processus de conception d'un système concret, sont dans la plupart des cas élaborés à partir des connaissances métiers spécifiques à leurs domaines d'expertises : les experts conception de l'architecture mécanique élaborent leurs modèles à partir d'un cahier des charges spécifique au domaine « conception mécanique interne ». Les solutions de conception qu'ils définissent dans ce cadre respectent uniquement ce cahier des charges et ne peuvent pas prendre en compte les spécifications du cahier des charges relatif aux experts contrôle commandes par exemple. Ceci génère concrètement des solutions de conception optimisées localement, et requiert un grand nombre d'itérations et d'échanges d'information entre les différents experts dans le cycle de conception afin de pouvoir converger vers une solution globale admissible qui n'est pas dans la majorité des cas optimale.

A travers l'intégration des approches de collaborations et des modèles de représentation des données collaboratives, il est devenu possible aujourd'hui de capitaliser les données d'expertises relatives à un projet de conception afin de réduire le nombre d'itérations et aider au mieux les experts à statuer sur la pertinence de la solution de conception choisie en fonction de leurs connaissances métiers. Ceci requiert la mise en place de tout un processus de collaboration au sein de l'entreprise afin de pouvoir prendre en compte les diverses données issues des différents modèles d'expertises qui sont élaborés aussi à l'aide d'outils de conception différents. Mais aussi, ce travail exige la présence d'un référentiel global qui soit fixé au tout début du projet de conception. Ce référentiel est généralement représenté par le cahier des charges du projet de conception qui est construit à partir des connaissances métiers



des experts impliqués, mais aussi des connaissances relatives au système à concevoir. Cette démarche de conception a prouvé son efficacité au sein des entreprises dans le cadre d'une conception routinière (Frey, 2010). Cependant dans un contexte de conception innovante, le référentiel présenté par le CdC du projet ne peut pas être fixé dès le début du processus de conception suite au manque de connaissances relatives au système à concevoir.

Nos travaux de recherche rentrent précisément dans ce contexte de travail étant donné que notre question de recherche traite de la conception des systèmes complexes multi-physiques en innovation. Nous ne chercherons pas à développer de nouveaux concepts relatifs à la modélisation de ce type de système ni à la représentation des connaissances d'expertises. Ce que nous proposons de faire c'est plutôt de présenter une démarche de conception qui permet de concevoir un système concret et de favoriser au mieux la convergence vers une solution de conception optimale.

Pour ce faire, nous nous baserons sur certains concepts qui ont été présentés dans l'état de l'art, tels que les algorithmes d'optimisation, les représentations à l'aide de l'outil bond graph, les plans d'expériences ainsi que les stratégies de gestion d'énergie pour construire et définir les trois espaces métiers relatifs au système de CDT hybride MTI que nous souhaitons concevoir. Notre proposition consistera alors **à mettre en place une démarche de conception** qui permet de prendre en compte l'évolution des spécifications relatives aux expertises métiers en fonction de l'évolution du système à concevoir tout au long du cycle de conception. Il s'agit donc de montrer une nouvelle manière d'aborder un problème de conception quand nous partons de la feuille blanche et de réduire au fur et à mesure l'espace de conception dans lequel nous travaillons. Comme cela sera détaillé dans le chapitre 2 (cf. Section I.1.2 : « Orientation du choix des principes physiques du système MTI »), le type du système traité comprend des particularités qui nous amène à faire des propositions originales concernant :

- **La modélisation du système et de ses différents niveaux systémiques** : En effet, l'optimisation effectuée à l'aide des outils mentionnés auparavant permet de prendre en compte les cascades de spécifications relatives aux espaces d'expertises, et leur évolution au cours du processus de conception. Chaque modèle métier développé permettra de modéliser une solution de conception optimisée dans les espaces d'expertises tout en prenant en compte les contraintes métiers considérées et les spécifications définies au niveau systémique précédent relatif à la décomposition du système à concevoir.
- **La modélisation des données de collaboration** : Nous avons choisi de représenter les connaissances relatives aux données de collaboration à l'aide d'un méta-modèle médiateur basé sur une approche d'unification. Ce choix est principalement issu de la maîtrise de ce méta-modèle au sein de notre équipe de recherche et n'exclut en aucun cas la possibilité d'effectuer le même travail avec les autres méta-modèles présentés dans l'état de l'art (sauf le méta-modèle KCMMethod qui fait appel à d'autres concepts de modélisation). A ce niveau notre valeur ajoutée réside dans l'adaptation du méta-modèle PPO afin de pouvoir prendre en compte les concepts de décomposition systémiques (niveau 0, 1 et 2), d'alternatives, de vues de conception, d'attributs, etc. et

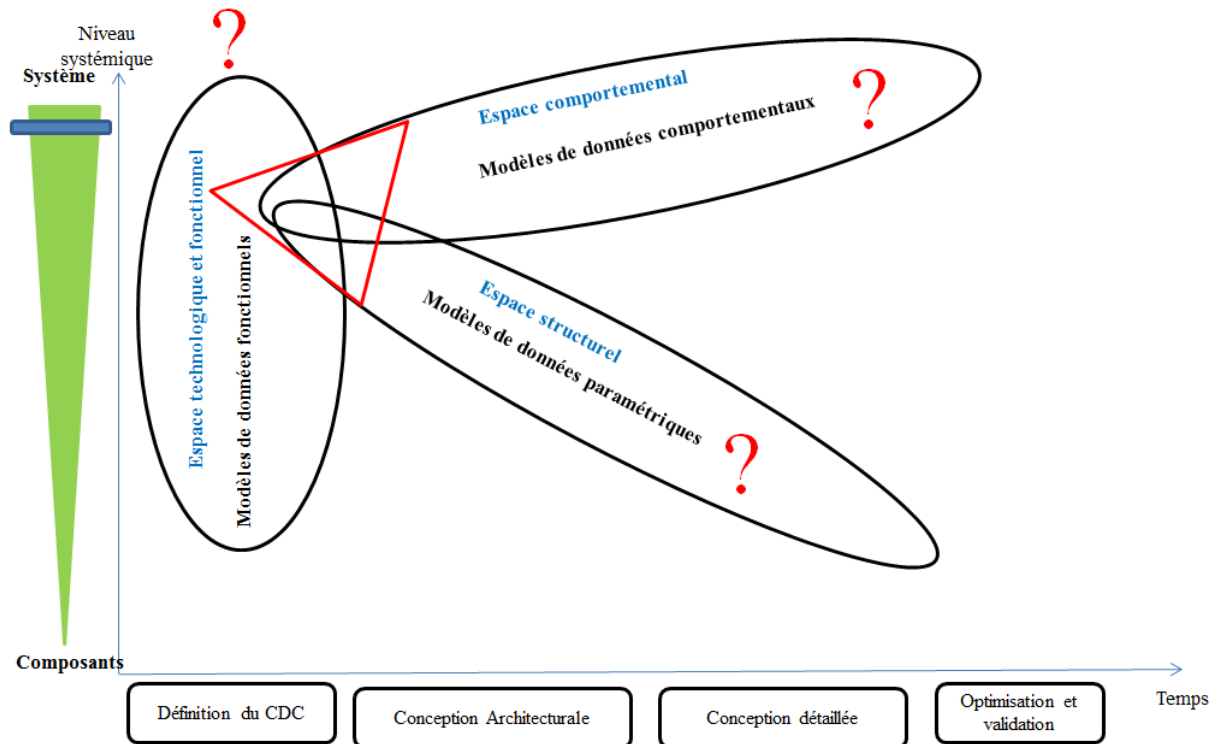
de l'implémenter dans une plateforme de modélisation EMF afin de pouvoir modéliser les données métiers issues des espaces d'expertises relatives au système de CDT hybride MTI. Ce travail est alors enrichi à travers l'expérimentation que nous avons effectuée, afin de coupler le méta-modèle PPO avec un propagateur de contraintes de type CSP permettant ainsi que réduire l'espace de solutions admissibles et de converger vers une solution de conception globale qui respectent les contraintes issues des trois espaces d'expertises.

Ainsi, à travers nos travaux nous ne chercherons pas à questionner l'existant, mais plutôt à présenter une nouvelle façon de faire qui permet de bien utiliser cet existant et d'en tirer profit de tout ce qui a été développé auparavant afin de faire évoluer les pratiques de conception et de réflexion au sein des entreprises telles que PSA pour pouvoir s'adapter rapidement à l'évolution de leurs marchés et aux exigences de leurs clients tout en assurant un certain niveau de qualité.



## **Chapitre 2 : Approche de modélisation du système technique pour une optimisation locale du système MTI**

Après avoir présenté l'état de l'art relatif à notre problématique de recherche, nous proposons dans ce chapitre de détailler la démarche de conception développée afin de pouvoir définir les trois espaces d'expertises (Figure 34) (fonctionnel, structurel et comportemental), du système de CDT hybride MTI. Notre démarche se base sur des modèles métiers élaborés à l'aide de concepts de plans d'expériences et d'algorithmes d'optimisation que nous avons présentés dans le chapitre précédent, mais aussi des stratégies de gestion énergétique et des représentations à l'aide de l'outil Bond Graph que nous avons utilisé pour analyser et évaluer le comportement du système à concevoir.



**Figure 34. L'environnement de conception considéré**

Nous débuterons ce chapitre par une présentation détaillée de la CDT MTI « Modular Inertial Transmission » afin de bien cerner le cas d'étude que nous nous proposons de traiter. Cela montrera la nature de ce système (multi physique, pluridisciplinaire, innovant, etc.).

## I. Présentation du système technique et du projet « MTI »

Les chaînes de transmission hybrides ont été principalement développées dans le but de réduire la consommation des véhicules, tout en garantissant un certain niveau de prestations et de performances. Dans un véhicule conventionnel, la traction du système est assurée par un moteur thermique qui puise l'énergie nécessaire stockée dans le réservoir de carburant. Cet organe est alors l'unique poste de consommation d'énergie et par la suite d'émissions polluantes. Ainsi, réduire le taux d'émission de gaz à effet de serre dans un véhicule conventionnel revient à réduire la consommation en carburant (g de CO<sub>2</sub> consommés) du moteur thermique.

Pour ce faire, les ingénieurs ont eu l'idée d'intégrer une autre source d'énergie permettant d'assurer les mêmes fonctionnalités qu'un moteur thermique et qui ne requiert pas l'utilisation de l'énergie stockée dans le réservoir de carburant pour assurer la propulsion du véhicule. Dès lors, il y a eu apparition des chaînes de transmission hybrides électriques à travers les technologies du HEV « Hybrid Electric Vehicle » qui sont les véhicules hybrides utilisant la récupération de l'énergie perdue lors du freinage ou celle fournie par le moteur thermique pour recharger la batterie, PHEV « PlugIn Hybrid Electric Vehicle » qui sont les véhicules hybrides rechargeables par un branchement à une source d'énergie extérieure telle qu'une prise de branchement à un réseau électrique pour recharger la batterie, ou même EV « Electric Vehicle » qui sont les véhicules 100% électriques dans lesquels il y a eu une suppression complète du moteur thermique dans le groupe motopropulseur du véhicule. Malgré les efforts qui sont mis en place par les constructeurs automobiles dans le monde entier, ainsi que les incitations des gouvernements pour migrer vers ce type de véhicules, leur commercialisation reste encore relativement faible comparée à celle des véhicules conventionnels. Cet écart de chiffres de ventes entre les deux types de véhicules est essentiellement dû à :

- Leur prix de ventes élevé en comparaison de celui de leurs homologues conventionnels. Ceci est principalement dû au fait que l'hybridation requiert plus de composants et l'utilisation des technologies qui coûtent relativement encore chères.
- La dépendance de ce type de véhicule à l'infrastructure urbaine : en effet, les technologies électriques nécessitent un aménagement des infrastructures routières et domestiques afin d'intégrer les bornes de recharge par exemple, etc.
- La réticence ressentie vis-à-vis du concept de l'électrification. Un véhicule électrique n'émet pas de polluants lors de son fonctionnement et ne consomme pas d'énergie fossile. En considérant le cycle de vie de ce type de système, l'énergie fossile utilisée pour produire l'énergie électrique de recharge des batteries, la fabrication des composants électriques, ainsi que leur recyclage en fin de vie, dépasse souvent celle utilisée pour réaliser le même parcours d'un véhicule conventionnel équipé d'un moteur thermique.

Cependant, malgré ces difficultés, les technologies des chaînes de transmission hybrides électriques constituent de nos jours le moyen d'hybridation le plus connu pour les consommateurs. Ceci explique clairement les efforts que les constructeurs sont en train de mener afin de valoriser ce type de technologies, tout en travaillant en parallèle à explorer d'autres pistes d'hybridation telles que l'hybridation pneumatique et l'hybridation mécanique par exemple, qui peuvent être étudiées et même utilisées un jour s'ils arrivent au même niveau de maîtrise et de maturité que l'hybridation électrique et s'avèrent être plus avantageuses.

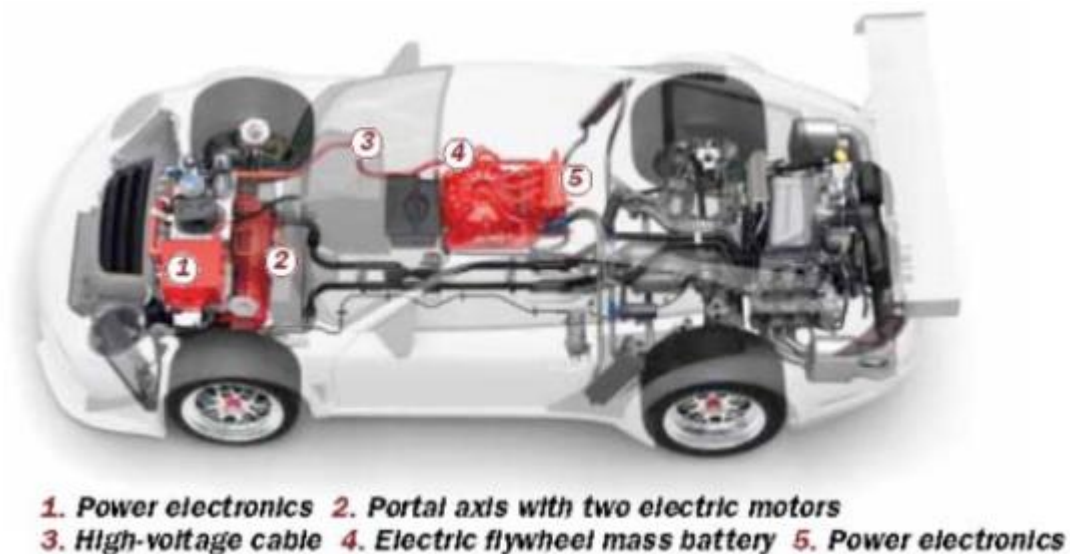
Le système de chaîne de transmission hybride MTI rentre dans ce contexte d'études exploratoires menées au sein du service d'innovation de PSA Peugeot Citroën, et se propose de traiter un type d'hybridation particulier basée sur le principe de l'hybridation inertielle et électrique/inertielle. L'objectif de ce projet est de concevoir un prototype avec ce type d'hybridation et d'évaluer sa faisabilité et ses performances par rapport aux besoins du marché et aux demandes du client.

## 1. Caractéristiques du système de CDT MTI

Le système de chaîne de transmission MTI rentre dans la catégorie des transmissions hybrides ayant un volant d'inertie comme source d'énergie supplémentaire au moteur thermique. Cette technologie a été utilisée pour la première fois dans une application automobile dans le contexte du sport automobile durant la saison 2009 (engineering, 2010), et repose sur le principe de récupération d'énergie lors des phases de freinage du véhicule. L'énergie stockée dans le volant d'inertie est utilisée par la suite pour assurer les phases d'accélération du véhicule soit en fournissant un surplus de puissance à celle délivrée par le moteur thermique pour les fortes demandes d'accélération, soit pour assurer toute l'accélération à partir du volant d'inertie.

### 1.1. Analyse de la concurrence

La firme Allemande Porsche a utilisé ce type de dispositif sur un modèle véhicule de type Porsche 911 GT3 de course d'endurance, permettant ainsi d'évaluer non seulement les gains de performance obtenus, mais aussi les gains de consommation du moteur thermique sur un tour de piste.



**Figure 35. Le système Flywheel (volant d'inertie) de Porsche (wikipédia)**

Dans cette configuration (Figure 35), les deux roues avant du véhicule sont connectées chacune à une machine électrique de 60 kW permettant ainsi de faire la répartition du couple entre les deux roues dans les phases de virage du véhicule. Au moment du freinage, le volant d'inertie peut être rechargé à travers les machines électriques. Ce volant tourne à une vitesse de rotation pouvant atteindre les 40 000 tr/mn et a la possibilité de fonctionner en tant que moteur après lui avoir injecté de l'électricité (MoteurNature, 2010)

Cependant, à cause de sa masse élevée de 47 kg qui handicape l'équilibre général du véhicule et de l'importance de son cycle de charge/décharge, la compagnie allemande a renoncé à le développer sur le reste de leurs gammes de véhicules et a choisi les technologies de l'hybridation électrique avec des batteries en Li-Ion pour ces véhicules hybrides.

Ce n'est qu'avec le prototype du constructeur suédois Volvo Powertrain et SKF que le volant d'inertie a été testé sur une application d'un véhicule particulier (Volvo S60), générant une réduction de 25% sur la consommation du véhicule (techno-car, 2011)

Ce système de Volvo (Figure 36) est réalisé à partir de fibres de carbone et pèse 6 kg. Il est monté dans une enceinte sous vide afin d'éviter les pertes par friction, et est accompagné d'une transmission continument variable CVT (Torotrak) qui permet d'avoir le changement de rapport de réduction adéquat pour assurer le passage de puissance durant les phases de stockage et de restitution d'énergie du volant. Pendant un freinage, le volant qui est monté sur l'essieu arrière du véhicule peut être accéléré jusqu'à 60 000 tr/mn. Une fois le volant chargé, c'est lui qui assurera l'apport d'énergie du véhicule pendant la phase d'accélération. Il est important de noter que la CVT est indépendante de la transmission principale de la voiture montée à l'avant avec le moteur thermique, ce qui permet de découpler les plages de fonctionnement des deux sources d'énergie.

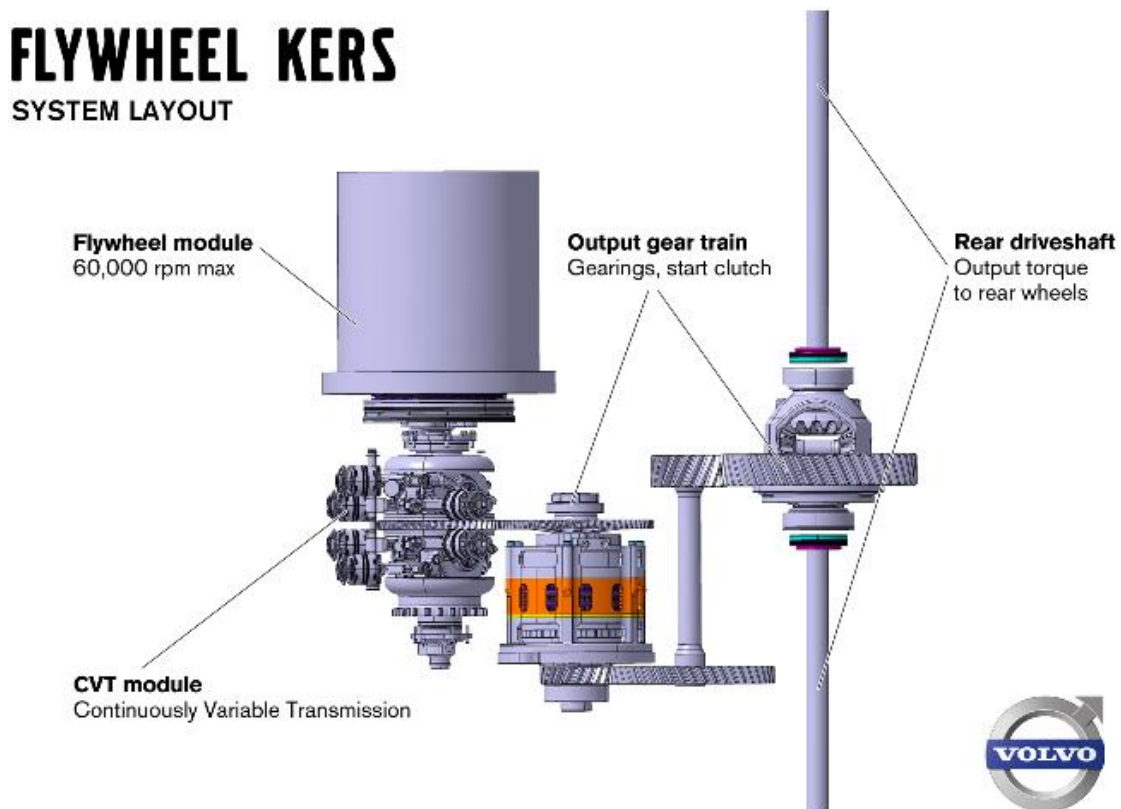


Figure 36. Le système Flywheel de Volvo (techno-car, 2011)



## ***1.2. Orientation du choix des principes physiques du système MTI***

Ces différentes technologies utilisées et développées par les concurrents nous ont poussés à nous poser des questions importantes relatives à la conception de ce type de système :

- Quelle est la technologie du système de transmission à choisir (CVT, boîte de vitesse discrète manuelle, boîte de vitesse discrète automatique, etc.) permettant d'assurer la démultiplication requise entre les sources d'énergie (moteur thermique et Volant d'inertie) et les roues du véhicule ?
- Quelle est la configuration de l'architecture organique à considérer (Volant d'inertie placé sur le train avant ou bien volant d'inertie placé sur le train arrière, etc.) pour avoir un meilleur fonctionnement du système global ?
- Comment peut-on piloter et commander correctement le système afin de permettre son fonctionnement correct et assurer les différentes fonctions qui lui sont requises ?
- Quel type de matériaux faut-il choisir pour avoir le meilleur rapport qualité/prix ?
- Quelles sont les pistes d'améliorations à considérer par rapport aux problèmes qui sont apparus suite aux travaux de la concurrence afin d'améliorer ce type d'hybridation et de pouvoir les utiliser sur des véhicules particuliers ?

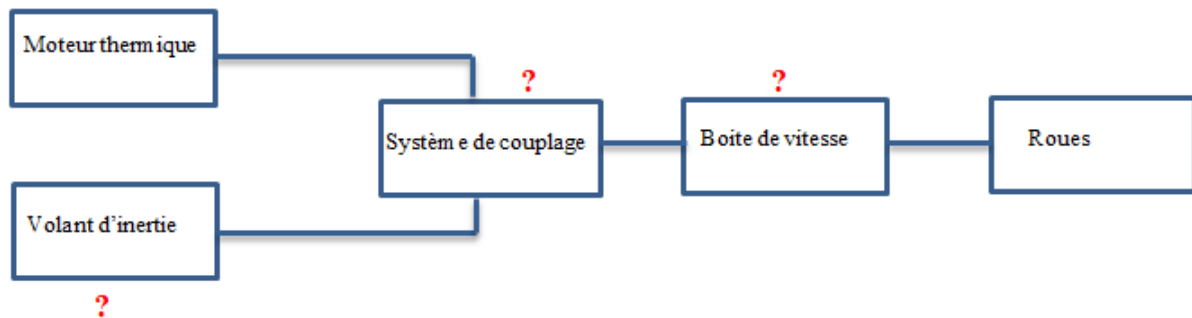
Ces interrogations constituent les premières réflexions auxquelles nous devons répondre lors de la conception du système de CDT MTI.

A partir de cette analyse de concurrence, une orientation vers le choix des différentes technologies à retenir a été effectuée :

- Pour les sources d'énergie, il a été convenu de considérer l'adaptation de la CDT avec les moteurs thermiques essences ou diesels comme source d'énergie fossile et le système de volant d'inertie comme source d'énergie alternative. Ce choix est issu de la volonté de PSA Peugeot Citroën pour explorer les différentes pistes d'hybridation mécaniques, pneumatiques, etc.
- Pour le système de transmission de puissance, le choix s'est fait en considérant les boîtes de vitesse automatiques de type CVT « Continuously Variable Transmission », qui peuvent avoir plusieurs plages de variation de rapport et par la suite plusieurs types d'ouverture. L'intérêt de ce type de transmission réside dans le fait qu'il permet de contrôler le couple du volant d'inertie à partir de la variation du rapport de réduction sans rupture de couple.
- Pour le couplage des organes, il a été choisi de retenir les systèmes d'embrayages humides. Ce choix est dû au fait qu'ils sont moins encombrants que les embrayages secs et qu'ils permettent de par le débit d'huile de lubrification qui passe à travers les disques d'évacuer plus facilement la thermique et de maintenir ainsi un couple transmissible stable.

Ces éléments sont par la suite pilotés par un système d'actionnement spécifique à chaque technologie et commandés par un système de pilotage qui sera défini.

Pour des raisons de coûts, il a été convenu de choisir une configuration particulière pour la chaîne de transmission MTI. En effet, nous avons décidé de placer le volant d'inertie sous le capot à l'avant du véhicule et de le coupler directement au moteur thermique et la boîte de vitesse à travers un système de couplage. Ce choix nous permet de garder un volume de conception libre sur le train arrière spécifique à l'ajout du système hybride électrique dans le cas où la version eMTI sera développée.



**Figure 37. Configuration Macroscopique de MTI**

Dans la (Figure 37) les postes disposants d'un point d'interrogation représentent les inconnus que nous devons définir, concevoir et optimiser lors de la conception du système MTI. Le moteur thermique et les roues qui représentent le véhicule ne sont pas considérés comme inconnus car nous cherchons à concevoir une chaîne de transmission hybride qui puisse être utilisée avec la plus part des moteurs thermiques de PSA, mais aussi implantable sur les différentes plateformes véhicules.

Mise à part les interrogations sur l'architecture du système, la chaîne de transmission MTI doit être capable de réaliser au moins les mêmes performances qu'une chaîne de transmission hybride électrique de type HEV. Ces dernières constituent alors les fonctions de conception qui délimitent le CdC du projet de conception.

Dans la suite, nous allons détailler ces fonctions de conception que nous chercherons à satisfaire au cours de la conception du système souhaité.

## **II. Définition des fonctions de conception ainsi que des niveaux de modélisation du système MTI**

### **1. Les fonctions de conception à satisfaire pour les CDT hybrides**

Lors de la conception des CDT hybrides, des fonctions de conception apparaissent dès l'élaboration du cahier des charges du projet et se traduisent généralement par :

- Les performances souhaitées par les clients

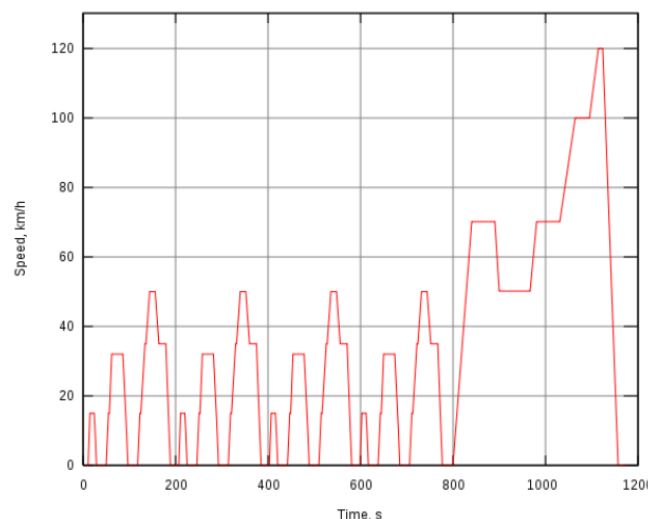
- Les prestations fonctionnelles définies à partir des critères du savoir-faire de l'entreprise
- Les objectifs financiers définis par la direction « Produit »
- Les contraintes de fonctionnement du système relatives aux normes d'homologation.
- Les exigences à satisfaire liées aux besoins du marché ciblé

### 1.1.La fonction 'Consommation'

Cette fonction est principalement relative aux performances du moteur thermique de la CDT hybride. Il s'agit ici de satisfaire une contrainte imposée sur la consommation du moteur thermique sur un cycle d'homologation donné.

Cette fonction représente un objectif principal que le système doit atteindre et qui est définie dans le CdC du projet. Elle est issue généralement des normes de fiscalité (CAFE<sup>3</sup>) relatives aux performances des moteurs thermiques principalement traduites par la consommation en g de carburant par km. Ils donnent les limites de consommation du véhicule tolérées et sont calculées sur des cycles de conduite homologués tels que :

- NEDC ou MVEG « *New European Driving Cycle* » ou « *Motor Vehicle Emissions Group* » (Figure 38) mis en place en Juillet 1973 est un « scénario » constitué d'accélération, de décélération et de paliers à vitesse constante sur une durée de 20 minutes. La vitesse du véhicule à tout moment du test doit être maintenue dans un certain écart de tolérance autour de la consigne. Ce cycle s'appuie sur un cycle plus ancien : ECE-15 à dominante urbaine qui est répété 4 fois et auquel s'ajoute un cycle extra-urbain (*Extra-Urban Driving Cycle* : EUDC).



**Figure 38.Cycle d'homologation MVEG**

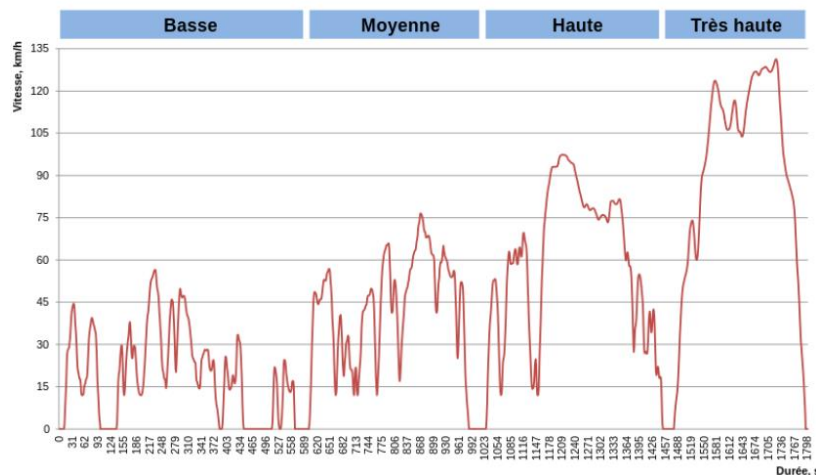
<sup>3</sup> CAFE : Corporate Average Fuel Economy

WLTP « *Worldwideharmonized Light vehicles Test Procedures*», est la nouvelle procédure d'homologation qui rentrera en vigueur en 2016 et utilise un cycle de conduite appelé WLTC (Figure 39). Cette procédure de test se base sur des indicateurs stricts qui portent sur les tests dynamométriques (qui consistent à mesurer la puissance mécanique produite par le moteur thermique à l'aide de systèmes de dynamomètres) et de résistance au roulement, les changements de vitesse, le poids total du véhicule (en y incluant les équipements en option, le chargement et les passagers), la qualité du carburant, la température ambiante, ainsi que le choix des modèles de pneus et leur pression de gonflage. En fonction de la classe du véhicule, généralement définie par la puissance massique  $P_m$  en W/kg (Tableau 3), un test est appliqué. Notons que comme la majorité des voitures appartiennent à la classe 3 nous ne présenterons que le cycle correspondant au test approprié pour cette classe. Ce cycle est divisé en quatre parties pour les véhicules de classe 3: basse, moyenne, haute et très haute vitesse. Si

$V_{\max} < 135$  km/h la partie très haute vitesse est remplacée par la partie basse vitesse.

|                    |                                              |
|--------------------|----------------------------------------------|
| Véhicules classe 1 | $P_m \leq 22 \text{ W/kg}$                   |
| Véhicules classe 2 | $22 \text{ W/kg} < P_m \leq 34 \text{ W/kg}$ |
| Véhicules classe 3 | $P_m > 34 \text{ W/kg}$                      |

**Tableau 3. Les classes des véhicules en fonction de la  $P_m$**



**Figure 39. Cycle d'homologation WLTC**

La consommation d'un moteur thermique est généralement exprimée soit en g de carburant par km soit en litre d'essence pour faire 100 km de distance parcourue.

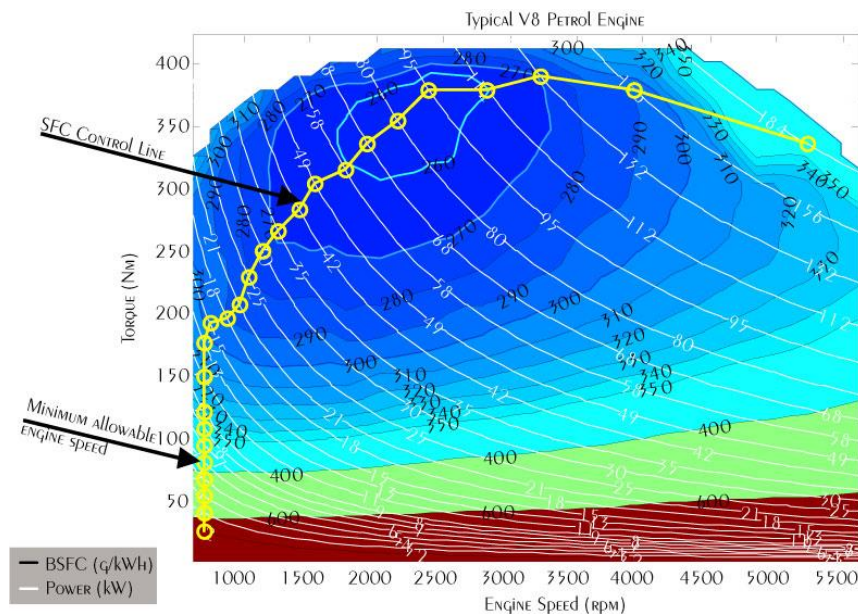
Cette consommation est calculée à partir de la consommation spécifique du moteur thermique sur tout le cycle de conduite. Cette grandeur appelée CSE représente la masse de carburant que le moteur consommerait dans le but de délivrer une puissance de 1 kW pendant une durée de temps d'une 1 heure.

$$CSE = \frac{\dot{m}_{\text{carburant}}}{P_{\text{effective}}} = \frac{3,6 \cdot 10^6}{\eta_{gMth \cdot PCI}} \text{Exprimée en (g/kWh)}$$

Avec :

- $\dot{m}_{carburant}$  le débit du carburant consommé, exprimé en (g/s)
- $P_{effective}$  la puissance du moteur thermique vue par le vilebrequin, exprimée en (W)
- $\eta_{gMth}$  le rendement global du moteur thermique
- $PCI$  le pouvoir calorifique du carburant exprimé en (kJ/kg)
- Le terme  $3,6.10^6$  correspond aux rapports de conversion des unités pour obtenir l'expression de la CSE en fonction du rendement global du moteur thermique et du pouvoir calorifique du carburant.

En pratique, des cartographies spécifiques (Figure 40) de chaque type de moteur ont été élaborées à partir d'expérimentations effectuées sur un banc d'essai, afin de spécifier les rendements et les CSE de chaque moteur. Ces cartographies permettent aux ingénieurs de calculer pour un point de fonctionnement donné du moteur (c'est-à-dire pour un couple moteur et un régime donné), la puissance effective ainsi que la CSE correspondante.



**Figure 40. Cartographies de CSE pour un moteur thermique**

A partir des valeurs de cette cartographie de CSE, il devient possible alors de définir la zone décrivant le fonctionnement optimal du moteur thermique. Cette zone se caractérise par des faibles valeurs de CSE et délimite des points de fonctionnement (couple/régime) pour lesquels le moteur possède un bon rendement.

Lors de la conception d'un GMP hybride, la fonction 'Consommation' traduit le premier niveau d'exigences que le système doit satisfaire. Généralement, les contraintes relatives à cette fonction permettent de construire le CdC du projet de conception, ainsi que l'objectif à atteindre par le GMP. Cette fonction est alors traduite par une valeur cible de consommation du moteur thermique sur un cycle d'homologation que le système doit être capable d'atteindre

comme par exemple un véhicule qui consomme 2 l de carburant pour faire 100 km sur un cycle d'homologation MVEG.

Les contraintes fixées sur la valeur de cet objectif de consommation sont issues de la fiscalité européenne mise en vigueur pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, et d'une analyse de concurrence effectuée par rapport aux différentes technologies de GMP hybride existantes. Elle est calculée à l'aide des approches de stratégies de gestion énergétique que nous présenterons ultérieurement, et qui sont effectués à plusieurs phases du processus de conception. Ainsi, la valeur de consommation cible, peut-être sujette à des modifications en fonction de l'avancement de la conception du système souhaité. La fonction 'Consommation', influence énormément la nature des technologies utilisées pour le GMP hybride, mais surtout les performances des composants intégrées ainsi que la stratégie de commandes et de fonctionnement adaptée.

### ***1.2.La fonction 'Prestations et performances'***

La deuxième fonction de conception qui intervient lors de la conception d'un GMP hybride, est la fonction 'prestations et performances'. Elle porte principalement sur les différentes prestations ou bien sur les performances que le système à concevoir doit être capable de réaliser. Certaines de ces prestations traduisent les demandes ou bien les besoins du client, tandis que d'autres sont relatives à la nature de la CDT hybride en la comparant avec d'autres systèmes du même type et ayant le même objectif.

L'autonomie du véhicule représente une performance à atteindre et à optimiser dans la conception des GMP hybrides. Cette grandeur représente la distance que le véhicule est susceptible de parcourir en roulant uniquement en mode full hybride sans faire intervenir le moteur thermique. Cette performance est exprimée en km et est appelée distance ZEV « Zero emission vehicle ».

Ainsi, nous distinguons deux types de prestations :

- Les prestations dynamiques du véhicule
- Les prestations relatives à l'agrément de conduite

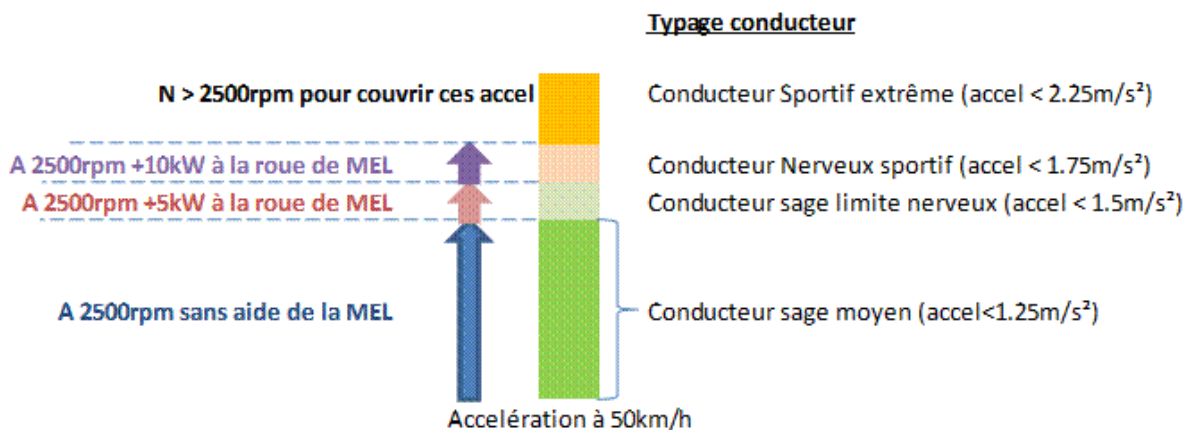
#### **a. Prestations dynamiques du véhicule**

Ces prestations traduisent le comportement du véhicule dans des cas de vie spécifiques. Elles sont généralement évaluées à l'aide de modèles de simulation, dans lesquels le GMP est soumis aux cas de vie souhaités afin de calculer les performances requises. Ces cas de vie peuvent porter sur :

- Le comportement du GMP lors de la phase de décollage du véhicule (correspondant à sa mise en marche depuis son état d'arrêt) par rapport à la masse du véhicule et à des

vitesse cibles différentes (Exemple : un décollage en ½ charge utile correspondant à une accélération du véhicule en sortie de la phase de décollage de  $3.3 \text{ m/s}^2$  et une vitesse de  $20 \text{ km/h}$ , permet de dimensionner le premier rapport de la boîte de vitesse ; un décollage performant permet de définir le temps de montée en couple, etc.)

- Le comportement du véhicule relatif à l'état du GMP (la vitesse du véhicule atteinte pour un régime de  $1000 \text{ tr/mn}$  du moteur thermique et le rapport mini ou un rapport de première sur la boîte de vitesse « V1000min », la vitesse maxi atteinte par le véhicule pour un régime de  $1000 \text{ tr/mn}$  du moteur et un rapport maxi ou le dernier rapport de la boîte de vitesse « V1000maxi », etc.)
- Les accélérations réalisées pour différentes pentes, différentes charges (masse du véhicule) et différents modes de roulages (PlugIn, Mixte, etc.)
- Les accélérations cibles relatives au type de conducteur considéré dans les retex des constructeurs d'automobiles (sage, nerveux, sportif, etc.) en fonction du régime du moteur thermique et du régime de la machine électrique du système hybride (Figure 41).



**Figure 41.Exemples d'accélérations cibles pour le typage du conducteur**

Ces différentes prestations représentent des exigences de conception que le système doit être capable de satisfaire et font par la suite apparaître des contraintes à respecter tout au long du processus de conception.

#### b. Prestations relatives à l'agrément de conduite

Ce type de prestations traduit généralement le souhait ou bien le besoin du client cible. Elles sont relatives au ressenti que le conducteur aura dans des cas de vie précis en fonction du comportement du GMP et du véhicule, mais aussi de certaines exigences issues des tendances du marché :

- Le confort de conduite (Exemple : pas de rupture de couple au moment du passage des rapports de vitesse, vibrations limitées du GMP par rapport à la masse du véhicule, limitations des bruits sonores du GMP lors de la conduite, etc.)

- Des fonctions souhaitées par le client (Exemple : la fonction BOOST qui permet d'augmenter la puissance à la roue et par la suite la vitesse du véhicule, etc.)

Ces prestations traduisent aussi des exigences à prendre en compte lors de la conception du GMP hybride et intègrent des contraintes de conception (contraintes acoustiques, contraintes fonctionnelles, etc.) qu'il faut respecter.

### ***1.3. La fonction 'architecture'***

Cette fonction porte principalement sur la composition et l'architecture organique du système à concevoir. Elle intègre le type des technologies utilisées pour la conception du système et l'environnement dans lequel il se trouve. Pour une CDT hybride, l'environnement d'existence représente le volume qu'occuperait la CDT dans l'architecture du véhicule.

La définition de cet environnement permet de définir les limites dimensionnelles de la CDT hybride et sa décomposition systémique (ses composants et ses sous-composants).

Ainsi, nous retrouvons des contraintes dites d'implantation du système dans son espace alloué. Ces contraintes peuvent être :

- Des distances de proximités axiales et radiales entre les limites du volume alloué pour la CDT et l'environnement du véhicule
- Des distances d'entraxes entre les différents axes des arbres de la CDT (arbre primaire, arbre secondaire, pont différentiel, etc.)
- Des diamètres des pignons d'engrenages

La fonction architecture fait intervenir des experts de différents métiers :

- Experts liaison au sol qui interviennent pour vérifier les modifications possibles sur les trains des véhicules hybrides par rapport aux systèmes de suspension etc.
- Experts boîte de vitesse et transmissions
- Experts système de couplage (embrayage, convertisseur de couple, etc.)
- Experts moteur thermique

Chaque métier impose des contraintes de conception liées à son périmètre d'expertise que le système doit satisfaire lors du processus de conception.

### ***1.4. La fonction 'PRF : Prix de revient de fabrication'***

Cette fonction est relative aux coûts de fabrication du système souhaité. Elle intègre les coûts que l'entreprise doit dépenser pour fabriquer le composant :

- Le prix des composants et des pièces qui sont achetés chez des fournisseurs
- Pour les pièces réalisées partiellement ou totalement en interne de l'entreprise, il faut prendre en compte le coût de la main d'œuvre, de la matière ainsi que celui relatif à la logistique



- Les amortissements des investissements des moyens de production interne à l'entreprise.

Ainsi, les contraintes de conception issues de cette fonction sont des contraintes de coûts que les experts doivent intégrer lors du choix des technologies utilisées ou bien des processus de réalisation choisis.

### ***1.5.La fonction ‘SDF : Sureté de fonctionnement’***

Cette fonction porte principalement sur l'aptitude du système à fonctionner dans des conditions requises. Elle permet de placer un indice de confiance sur son fonctionnement et contient les éléments qui ont été définis d'après *Allain Villemeur* (Villemeur, 1988) :

- La disponibilité ; qui traduit l'aptitude du système à être en état de marche à un instant donné.
- La fiabilité ; traduit la durée de vie du système et représente son aptitude à fonctionner pendant un intervalle de temps donné
- La maintenabilité ; traduit l'aptitude du système à être maintenu ou à être remis en état de fonctionnement à un instant donné.
- La sécurité ; traduit la capacité du système à éviter de conduire à des accidents inacceptables
- La testabilité ; traduit l'aptitude du système à être déclaré défaillant en fonction de certaines limites atteintes de son fonctionnement
- La durabilité ; traduit la capacité du système à réaliser ses fonctions dans des conditions précises jusqu'à atteindre son état limite.

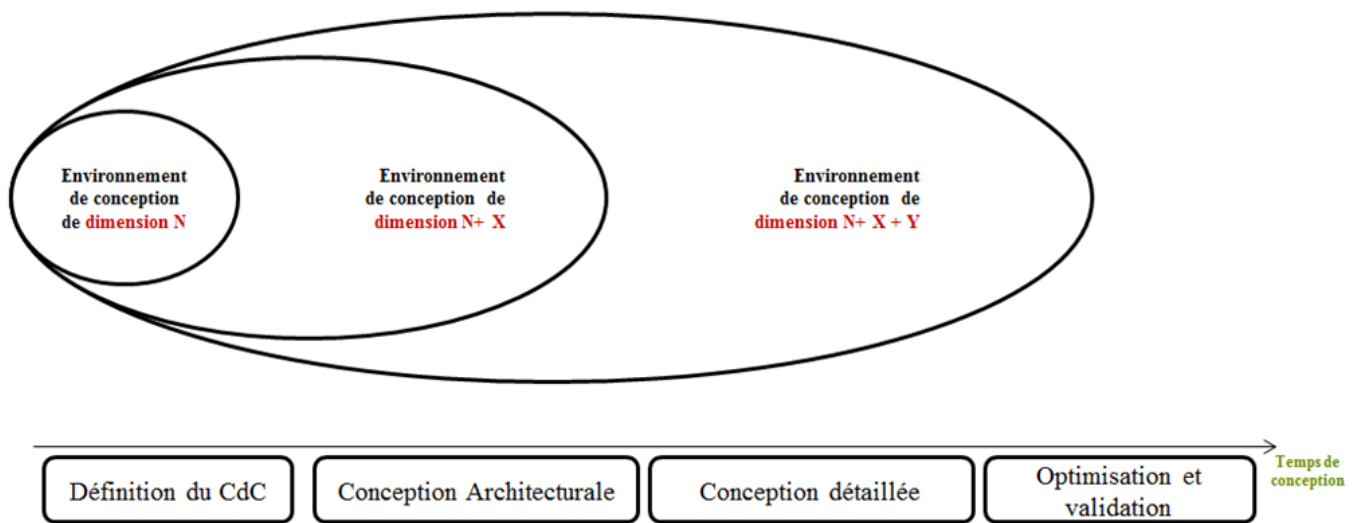
Ces éléments sont généralement interdépendants (par exemple, la disponibilité dépend de la maintenabilité et la fiabilité). La plupart du temps, ils sont définis grâce à des études prévisionnelles de sûreté de fonctionnement. Ces études regroupent les activités d'évaluation de la fiabilité, de la maintenabilité, de la disponibilité et de la sécurité du système au cours de son développement. Elles permettent à partir d'une comparaison par rapport aux objectifs ou dans l'absolu, d'identifier les actions de construction (ou d'amélioration) de la sûreté de fonctionnement du système souhaité.

Ce paragraphe nous a permis de présenter les différentes fonctions de conception que nous avons considérées dans le cadre de notre étude. Ces fonctions rendent le système à concevoir pluridisciplinaire du fait qu'elles requièrent l'expertise de différents métiers (conception, calcul et simulation, contrôle, cout, etc.).

Afin que la solution de conception finale soit considérée comme une solution optimale, elle doit satisfaire les exigences relatives aux différentes fonctions de conception tout le long du processus. Ces exigences sont généralement traduites à travers des contraintes de conception qui sont considérées par les différents experts métiers. Et de ce fait, les fonctions de conception ainsi que leurs contraintes relatives délimitent **les degrés de liberté** de notre environnement de conception.

## 2. Décomposition des niveaux systémiques de modélisation

Au cours du processus de conception d'un système complexe innovant tel que les chaînes de transmission hybrides, l'environnement de conception décrit par des degrés de libertés évolue d'une manière dynamique en parallèle avec l'évolution du système à concevoir. Cette évolution est due principalement à la suppression, l'apparition et/ou la modification des degrés de liberté définis au cours du processus de conception de par l'ajout d'une fonction de conception et/ou la suppression d'une autre, tout comme le changement des limites de tolérance relative à une fonction ou à une contrainte de conception, etc. (Figure 42).



**Figure 42. Evolution des dimensions de l'environnement de conception**

Dans le but de bien maîtriser l'évolution de cet environnement de conception et d'assurer la convergence vers une solution optimale, il est nécessaire de définir des niveaux systémiques de modélisation qui vont permettre de simplifier la mise en place de l'approche développée ainsi que la navigation libre dans l'environnement de conception.

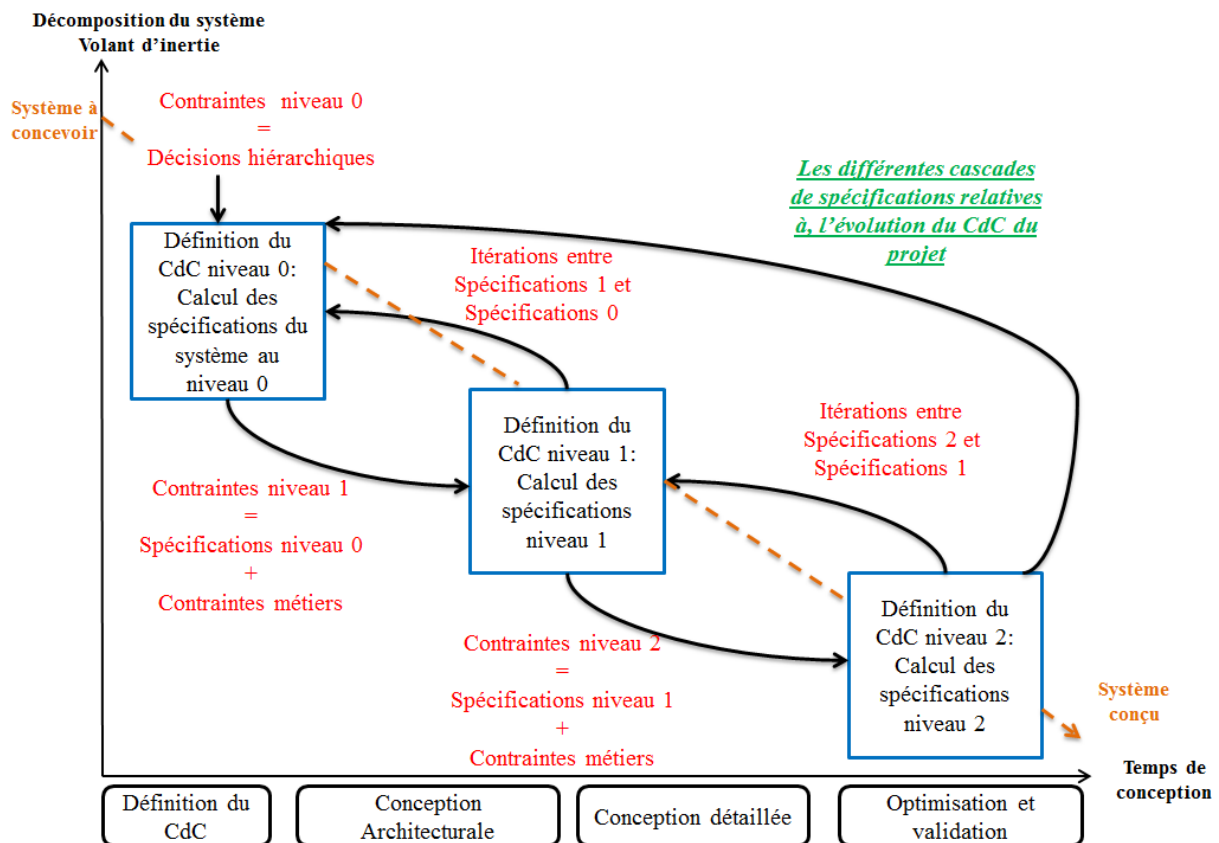
### 2.1. Définition des niveaux systémiques de modélisation considérées

Afin de réduire le nombre d'inconnus à un instant  $t$  donné du processus de conception, nous avons défini des niveaux systémiques de représentation qui vont nous permettre de bien maîtriser le nombre d'inconnues du problème de conception à résoudre à chaque étape du processus (Figure 43):

- **Modélisation du niveau systémique 0** ; il s'agit ici de définir les paramètres de fonctionnement macroscopiques du système à concevoir (par exemple l'ouverture globale de la boîte de vitesse, l'inertie du système de stockage, etc.). Le CdC est alors construit à partir de ces paramètres, et les fonctions de conception considérées à ce niveau sont généralement les fonctions générales relatives au fonctionnement global

du système (Exemple la consommation globale d'une CDT hybride, etc.) les contraintes considérées à ce niveau sont issues des prises de décisions hiérarchiques traduisant le souhait ou la volonté de l'entreprise pour concevoir un système précis (développer un véhicule hybride intégrant une technologie en rupture au moindre coût par exemple, etc.)

- **Modélisation du niveau systémique 1** ; ce niveau rentre un peu plus dans les détails par rapport à la définition des paramètres d'architecture du système à partir des types de technologies choisies. Il porte alors sur la définition des grandeurs dimensionnelles de l'architecture organique du système (Exemple : les entraxes de la boîte de vitesse, les rapports de réduction min/max, les proximités entre les différents axes, etc.), ainsi que les grandeurs fonctionnelles relatives aux fonctions de conception à satisfaire à ce niveau (Exemple : définition de la stratégie de commandes de la CDT). Les contraintes de conception considérées à ce niveau sont d'une part les spécifications du système définies au niveau 0 (taille de la batterie, énergie utile maximale du volant d'inertie, etc.) et d'autre part les contraintes issues des connaissances et de l'expertise métier.
- **Modélisation niveau systémique 2** ; ce niveau permet d'effectuer une définition plus détaillée des paramètres de l'architecture organique (Exemple : nombre de dents des pignons de la boîte de vitesse, dimensions des joints d'étanchéité, etc.). Tout comme le niveau 1, les contraintes considérées à ce niveau sont les spécifications issues du niveau précédent avec les contraintes métiers spécifiques.



**Figure 43. Projection des niveaux de modélisation dans l'espace de conception**

Les spécifications relatives à la définition du CdC à un niveau systémique donné sont prises en compte en tant que contraintes de conception pour la définition du CdC au niveau suivant et le calcul des spécifications du système (exemple : les spécifications niveau 0 sont des contraintes pour définir les spécifications niveau 1, etc.). **C'est précisément cette cascade d'évolution des spécifications du système à concevoir que nous prenons en compte lors de la conception du système souhaité et sur laquelle nous nous basons pour construire les espaces d'expertises métiers qui lui sont relatives.**

Ces niveaux nous permettent d'avoir une idée plus généralisée sur le nombre d'inconnues (les degrés de liberté) à résoudre à chaque phase du processus de conception en fonction de leur ordre d'apparition. Ces inconnues sont contenues dans des modèles de données ce qui permet d'avoir aussi une traçabilité sur les évolutions de la représentation du système dans les modèles d'expertises utilisés.

### **III. Approche de définition de l'espace technologique et fonctionnel : Construction du CdC et définition des spécifications du système MTI au niveau systémique 0**

Le CdC du système MTI contient les spécifications des différentes technologies choisies à partir d'une optimisation des fonctions de conception qui apparaissent à ce stade du projet et que le système doit satisfaire. Il vient en tant que support d'aide à la conception permettant

d'effectuer un choix optimisé par rapport aux grandeurs macroscopiques et aux principes physiques qui dimensionnent le système. Dans ce paragraphe nous proposons une démarche de conception qui permet de définir ce cahier des charges et de l'optimiser afin de mieux orienter les concepteurs vers des choix de technologies à considérer pour le système à concevoir. Ceci en permet alors de définir l'espace technologique et fonctionnel du système. Les fonctions de conception que nous considérerons à ce stade sont :

- La fonction de 'Consommation' : nous chercherons à avoir une consommation globale du moteur thermique inférieure à un certain seuil défini par le CdC du projet sur un cycle d'homologation (WLTC ou MVEG)
- La fonction 'Prestations et performances'; en considérant comme première prestation l'autonomie du véhicule pour faire un roulage en full hybride, c'est-à-dire la distance que le conducteur peut parcourir avec sa voiture sans avoir à utiliser le moteur thermique appelée « distance ZEV ». Ainsi, nous chercherons à augmenter cette valeur afin de répondre aux attentes des clients.
- La fonction 'PRF'; en essayant de réduire le coût du système en effectuant un choix précis des technologies qui ne soient pas coûteuses.

Nous avons choisi de présenter deux versions de la chaîne de transmission hybride, et de n'en développer qu'une seule au début du projet, pour des raisons de temps de conception :

- La version hybride mécanique MTI avec uniquement un volant d'inertie comme source d'énergie alternative
- La version eMTI qui reprend la version MTI comme transmission hybride mécanique à laquelle on accouple un système électrique (machine électrique avec une batterie) comme troisième source alternative au volant d'inertie et au moteur thermique.

**L'objectif de notre étude consiste à développer une approche de conception et de modélisation modulaire qui permet d'intégrer et/ou de supprimer certains composants du système. Les résultats que nous présenterons ont été validés sur le système MTI. Pour l'architecture eMTI, nous avons mené uniquement l'étude portée sur la définition et l'optimisation du CdC au niveau 0.**

Si nous reprenons la première modélisation de la CDT (cf. Figure 37), il est possible de recenser les principaux sous-systèmes inconnus qu'il nous faudrait modéliser et concevoir :

- Le volant d'inertie
- Le système de couplage
- Le système de transmission de puissance à variation continue
- Le système électrique

Pour pouvoir effectuer un choix optimal par rapport aux technologies à considérer pour chacun des composants, nous avons développé une approche de modélisation simplifiée qui permet de calculer d'une façon optimale les performances majeures de chaque sous-système sans pour autant rentrer dans les détails de conception, que nous ignorons à ce niveau de

modélisation. Ceci nous permet de définir les paramètres de conception macroscopiques et de vérifier la cohérence par rapport aux fonctions que nous cherchons à satisfaire.

En se basant sur une approche énergétique pour modéliser le système eMTI nous pouvons réduire le nombre de sous-systèmes à paramétrer uniquement aux sources alternatives :

- Le volant d'inertie que nous cherchons à concevoir est un organe permettant de stocker et de restituer l'énergie. Les technologies de ce type de système existantes diffèrent en fonction de la nature du matériau utilisé et des conditions de fonctionnement du volant. La grandeur caractéristique retenue est la quantité **d'énergie cinétique utile** que nous pouvons stocker et utiliser pour la propulsion du véhicule. Cette grandeur est exprimée en J et varie entre deux valeurs limites  $E_{CVI\_min}$  et  $E_{CVI\_max}$ . Elle est définie à une vitesse de rotation constante en considérant le volant indéformable, et elle est calculée en prenant en compte la rotation relative du volant par rapport au châssis :

$$E_{CVI\_utile} = \frac{1}{2} \omega_{VI}^2 I_{VI}$$

Avec :

$I_{VI}$  l'inertie du volant autour de son axe de rotation exprimée en kg.m<sup>2</sup>, et  $\omega_{VI}^2$  est le carré de la vitesse de rotation exprimée en (rad.s<sup>-1</sup>)<sup>2</sup>

Ainsi, ce système peut être représenté à ce niveau par la quantité d'énergie cinétique utile qui nous permet d'assurer les deux fonctions de conception.

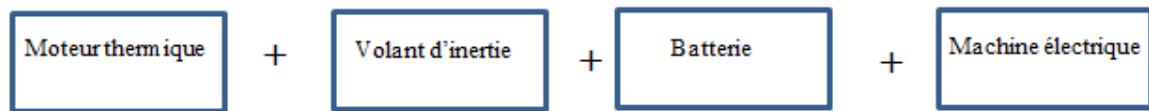
- Le système électrique ; est constitué d'un système de stockage et de restitution d'énergie représenté par une batterie ou un super condensateur, et une machine électrique permettant de faire la conversion électrique/mécanique, d'assurer la demande de couple à la roue et les conditions électriques (tensions, intensités etc.) qui sont nécessaires au fonctionnement du stockeur. Pour des raisons de performances en termes de capacité de stockage d'énergie, nous avons considéré uniquement les technologies des batteries. Ce type de système est caractérisé par une grandeur principale relative à **son état de charge SOC** (state of Charge) qui représente un pourcentage de la quantité d'énergie utile disponible dans la batterie à un instant t par rapport à sa charge maximale et se calcule de la manière suivante :

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + \frac{\int i(t)dt}{C}$$

Avec:

$i(t)$  le courant aux bornes de la batterie exprimé en (A), et C est la capacité de la batterie en (Ah) et représente la puissance qui peut être extraite de la batterie pendant 1 heure.

Quant à la machine électrique, elle est caractérisée par son couple maxi qu'elle est capable de délivrer, nous choisirons de la représenter d'un point de vue énergétique par sa puissance maximale (correspondant à son couple maxi)  $P_{MeL\_max}$  lors des phases de pic d'accélération ou de décélération du véhicule, étant donné que ça sera la valeur donnant la limite maxi d'utilisation de la machine électrique.

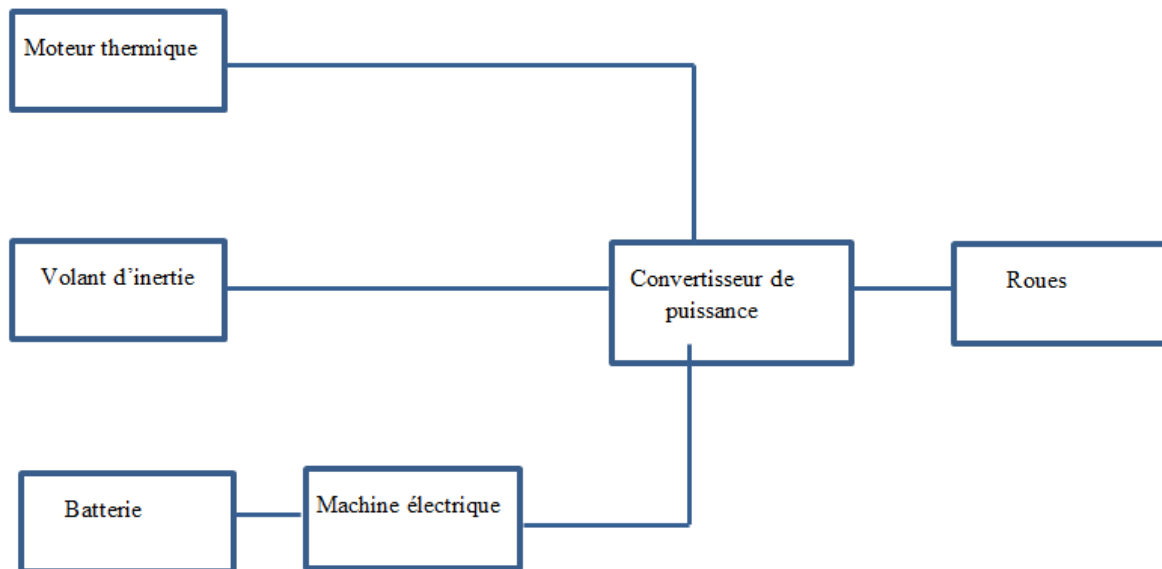


**Figure 44. Système à optimiser et à définir**

Pour conclure, nous cherchons dans cette étape à définir et optimiser les briques présentées par la (Figure 44). Les valeurs calculées doivent vérifier un certain niveau de contraintes par rapport à la fonction ‘Consommation’ représentée par la consommation du moteur thermique et la fonction ‘Prestations et performances’ représentée par la distance ZEV sur un cycle d’homologation WLTC.

### 1. Mise en équation du problème d’optimisation

Après avoir simplifié la modélisation du système à concevoir, nous nous proposons d’écrire le problème de conception d’une manière analytique afin de pouvoir appliquer notre approche d’optimisation et définir les grandeurs macroscopiques qui lui sont relatives.



**Figure 45. Modélisation du système MTI au Niveau 0**

En considérant le système présent comme quasi-statique (Figure 45), chaque sous-système peut être représenté par rapport à ses caractéristiques énergétiques définies dans le paragraphe précédent. En effet le moteur thermique, le volant d’inertie ainsi que le système électrique (batterie et machine électrique) ont pour principale fonction de fournir la puissance nécessaire au déplacement du véhicule. De ce fait, les inconnus du problème d’optimisation que nous

chercherons à calculer à ce niveau peuvent être réduits aux paramètres macroscopiques suivants:

- La puissance maximale de la machine électrique  $P_{Mel\_max}$
- L'état de charge utile maximum de la batterie :  $SOC_{max}$
- L'énergie cinétique utile maximale du volant d'inertie :  $E_{CVI\_utile\_max}$
- La puissance maximale du volant d'inertie :  $P_{VI\_max}$

L'objectif de cette phase se résume à définir les paramètres macroscopiques ci-dessous permettant de satisfaire les contraintes de conception qui se traduisent par:

- **C1:**  $Conso_{Mth} \leq 50 gr/km$
- **C2:**  $ZEV \geq 10 km$
- **C3:**  $SOC_{max} \leq 50 \%$
- **C4:**  $P_{Mel\_max} \leq 24 kW$

Le choix des limitations de SOC correspond à la valeur de la taille de la batterie la moins chère utilisée pour les véhicules hybrides et plus précisément à PSA. Quant à la puissance de la machine électrique, la valeur limite choisie correspond à la puissance maximale qu'elle est capable de délivrer afin d'assurer au moins les premières phases de roulage (Low et Médium) du cycle WLTC. Le choix effectué quant à la limitation de la consommation du moteur thermique ainsi que la distance ZEV, est fait à partir des demandes clients et des exigences du marché ciblé (marché européen et chinois). Ces choix traduisent les performances du système que nous cherchons à optimiser et peuvent être écrites sous forme de fonction objective à minimiser telle que :

$$f = (Conso_{Mth})^2 + \left(\frac{1}{ZEV}\right)^2$$

Ainsi, le problème d'optimisation du CdC du système MTI est résumé par le (Tableau 4) :

| Degrés de liberté                                                       | Contraintes                                                                                                                                        | Performances à optimiser                             |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| $P_{Mel\_max}$<br>$SOC_{max}$<br>$E_{CVI\_utile\_max}$<br>$P_{VI\_max}$ | <b>C1:</b> $Conso_{Mth} \leq 50 gr/km$<br><b>C2:</b> $ZEV \geq 10 km$<br><b>C3:</b> $SOC_{max} \leq 50 \%$<br><b>C4:</b> $P_{Mel\_max} \leq 24 kW$ | $f = (Conso_{Mth})^2 + \left(\frac{1}{ZEV}\right)^2$ |

**Tableau 4. Problème d'optimisation du CdC du système MTI**

La suite de ce paragraphe porte alors sur la présentation de la démarche que nous avons mise en place afin de résoudre ce problème de conception.

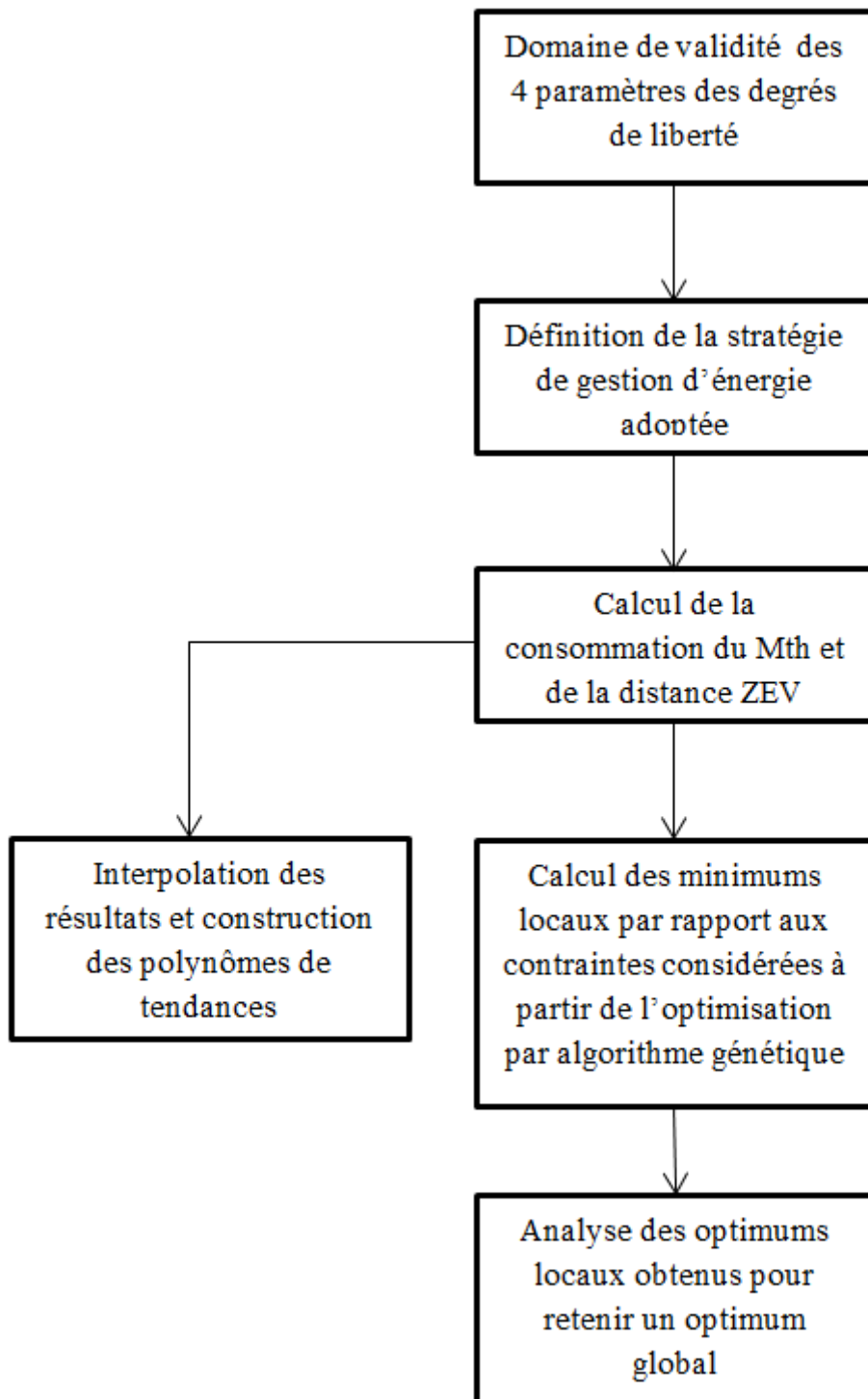


## 2. Présentation de l'approche d'optimisation au niveau systémique 0

Afin de pouvoir calculer et définir les paramètres macroscopiques du système eMTI, nous avons développé une approche d'optimisation qui permet d'évaluer les fonctions de conception par rapport à plusieurs possibilités de solutions envisageables et de calculer la solution optimale qui respecte au mieux les contraintes considérées. L'approche développée se base sur les principes de plans d'expériences (Linder, 2005), qui consiste à évaluer les performances d'un système à partir d'un échantillonnage donné. Le choix de cet échantillonnage s'effectue à travers la méthode du latin hypercube (McKay&al, 1979) qui permet de faire un choix ordonné de la famille des paramètres à évaluer à partir des domaines de validité du plan d'expériences choisi. Chaque échantillon est alors évalué par rapport aux performances recherchées ( $Conso_{Mth}$ , ZEV).

A ce calcul, nous ajoutons une approche d'optimisation basée sur les algorithmes génétiques (Goldberg, 1989) pour pouvoir calculer toutes les solutions issues du plan d'expériences et de l'échantillonnage effectué qui répondent au mieux aux contraintes de conception. Le choix de ce type d'algorithme d'optimisation a été effectué après avoir testé d'autres outils tels que les algorithmes par descente de gradient (Avriel, 2003) qui sont apparus limités par rapport au problème d'optimisation traité surtout d'un point de vue de convergence. Le choix de la fonction objective à minimiser s'effectue quant à lui par rapport aux fonctions de conception que nous cherchons à satisfaire et aux contraintes qui les représentent (C1 et C2).

Dans le but d'analyser et de comprendre le comportement du système à concevoir par rapport au plan d'expériences choisi, nous effectuons une interpolation linéaire qui permet de construire des polynômes décrivant les tendances de l'évolution des performances du système par rapport à la variation des paramètres calculés (Figure 46).



**Figure 46. Diagramme de l'approche d'optimisation du CdC développée**

Ainsi, le problème d'optimisation se résume à chercher les valeurs optimales des 4 inconnues représentant les degrés de liberté du système eMTI (Tableau 4) et permettant d'avoir le minimum de consommation du moteur thermique et le maximum de distance ZEV tout en respectant les contraintes mentionnées auparavant.

### 3. Stratégie de gestion d'énergie pour le problème d'optimisation

La consommation d'un moteur thermique quelle que soit sa nature (essence, diesel, etc.) est calculée à partir de sa consommation spécifique appelée CSE du moteur et de la puissance qu'il fournit.

Pour un moteur donné, la quantité de carburant  $q_{essence}(t)$  en g de carburant injecté à un instant  $t$  pour produire la puissance requise est calculée de la manière suivante :

$$q_{essence}(t) = CSE(t) \times P_{Mth}(t)$$

Cette valeur est ensuite pondérée par la distance parcourue pour avoir la quantité de grammes de carburant consommés par km (g/km) :  $(Conso_{Mth})$ .

Quand il s'agit de réduire la consommation en g/km d'un moteur thermique, il est nécessaire de réduire le besoin d'énergie et la demande de puissance qu'il doit délivrer pour assurer la demande de puissance à la roue tout en le faisant toujours fonctionner sur ses points de meilleur rendement.

Ainsi, il est possible pour nous d'adopter une approche basée sur l'équilibre énergétique entre les trois sources du système eMTI et la puissance consigne demandée à la roue ce qui nous simplifie notre stratégie de supervision.

L'équation d'équilibre énergétique d'un système quasi-statique tel que nous avons modélisé la CDT eMTI s'écrit alors :

$$P_{roue} = P_{Mth}\eta_{transmission} + P_{MeI}\eta_{Elec}\eta_{transmission} + P_{VI}\eta_{VI}\eta_{transmission}$$

Avec :

$\eta_{transmission}$  est le rendement de la transmission mécanique.

$\eta_{Elec}$  est le rendement global de la batterie et de la machine électrique.

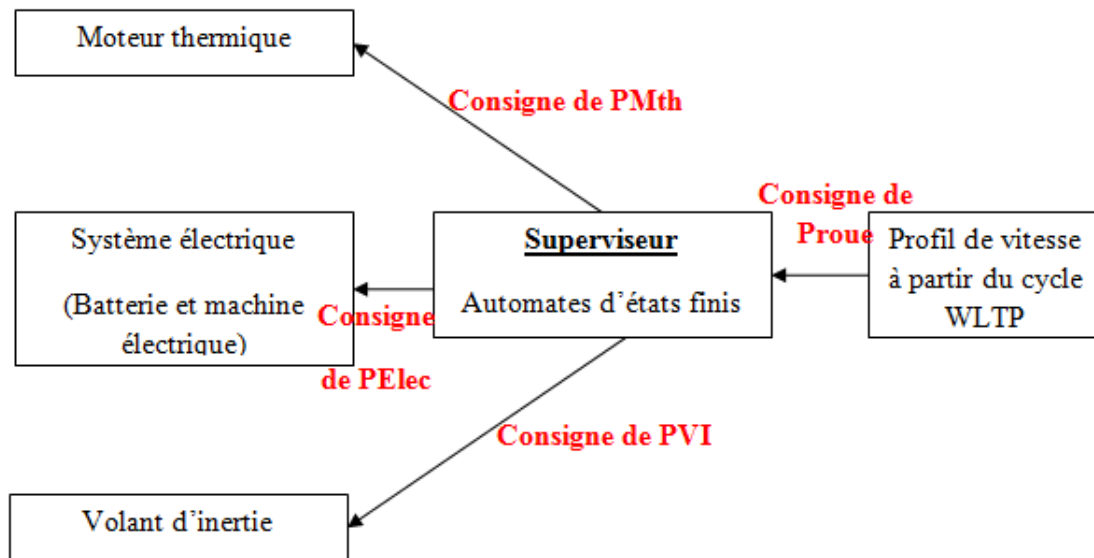
$\eta_{VI}$  est le rendement du volant d'inertie.

Comme notre objectif est de réduire la demande énergétique requise du moteur thermique, nous avons choisi une stratégie qui permet de favoriser l'utilisation des deux sources alternatives. Il se trouve que de par sa physique, l'énergie stockée dans le volant d'inertie doit être utilisée rapidement sinon elle sera perdue à cause de ces frottements. A l'inverse, la batterie est capable d'emmagasiner plus longtemps l'énergie. De ce fait, nous avons choisi d'utiliser le volant comme première source de propulsion tant que son énergie utile nous le permet.

Les modes de fonctionnement sont déterminés et classés en fonction de la source d'énergie utilisée en phase de propulsion du véhicule, et les conditions de passage d'un mode de fonctionnement vers un autre sont étroitement liées à l'état dans lequel se retrouve le véhicule

à chaque instant. Ces transitions sont gérées par un système électronique de supervision que nous avons intégré sous forme d'algorithme d'automate d'états finis (John&al, 2007).

En discrétisant nos modes de fonctionnement sous forme d'états finis du système, nous pouvons définir numériquement les conditions d'entrée/sortie d'un état vers un autre (Figure 47).



**Figure 47.Fonctionnement du superviseur**

Ce qui nous amène à construire deux automates :

- Un automate véhicule dans lequel nous retrouvons les différents états que peut avoir le véhicule lors de son fonctionnement.
- Un automate CDT dans lequel nous retrouvons les différents états relatifs au système eMTI.

Nous considérons alors 3 états relatifs au véhicule :

|                 |                                                                                                       |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Etat Véhicule 1 | Véhicule à l'arrêt (pas de demande de puissance à la roue)                                            |
| Etat Véhicule 2 | Véhicule en accélération (demande de puissance pour assurer le décollage et la propulsion)            |
| Etat Véhicule 3 | Véhicule en décélération (demande de puissance pour assurer le freinage et faire diminuer la vitesse) |

**Tableau 5-Automate véhicule**

Quant à la chaîne de transmission eMTI, les modes de fonctionnement sont :

|        |                                                                                                                               |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mode 1 | Lancement du volant d'inertie (quand le véhicule est à l'arrêt) par le système électrique                                     |
| Mode 2 | Lancement du volant d'inertie par le moteur thermique (quand le système électrique n'est pas capable d'effectuer cette tâche) |
| Mode 3 | Les trois sources énergétiques sont découplés et le système est                                                               |

|        |                                                                                                                                                                                       |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        | complètement ouvert (quand le véhicule est à l'arrêt et le volant d'inertie est chargé jusqu'à son $E_{cvi\_max}$ )                                                                   |
| Mode 4 | <b>Full Hybride Mécanique</b> : Accélération du véhicule à partir du volant d'inertie en le déchargeant.                                                                              |
| Mode 5 | <b>Full Hybride Electrique</b> : Accélération du véhicule à travers le système électrique (le volant d'inertie est alors complètement déchargé).                                      |
| Mode 6 | <b>Full Thermique</b> : Accélération du véhicule uniquement à partir du moteur thermique (quand le système électrique n'est plus en mesure d'assurer la puissance demandée à la roue) |
| Mode 7 | <b>Freinage Récupératif en full hybride mécanique</b> : Freinage du véhicule suite à la recharge du volant d'inertie.                                                                 |
| Mode 8 | <b>Freinage Récupératif en full hybride électrique</b> : Freinage du véhicule en rechargeant la batterie par la machine électrique.                                                   |
| Mode 9 | <b>Freinage dissipatif</b> : le véhicule est freiné à travers un système de freins classiques qui dissipe l'énergie.                                                                  |

**Tableau 6-Automate Modes de fonctionnement**

A partir de la consigne de puissance demandée à la roue, le superviseur nous renseigne sur l'état du véhicule ainsi que le mode de fonctionnement du système eMTI, et envoie les consignes de puissances respectives aux trois sources d'énergie. En considérant les niveaux d'énergie utiles existants dans le volant d'inertie et la batterie ainsi que la puissance maxi de la machine électrique tout en prenant en compte les différents rendements, il est possible de calculer la puissance réelle fournie à la roue.

#### **4. Simulation et construction du CdC au niveau systémique 0**

La simulation a été effectuée à l'aide d'un modèle fonctionnel de type schéma-bloc construit sous Matlab (Figure 48) :

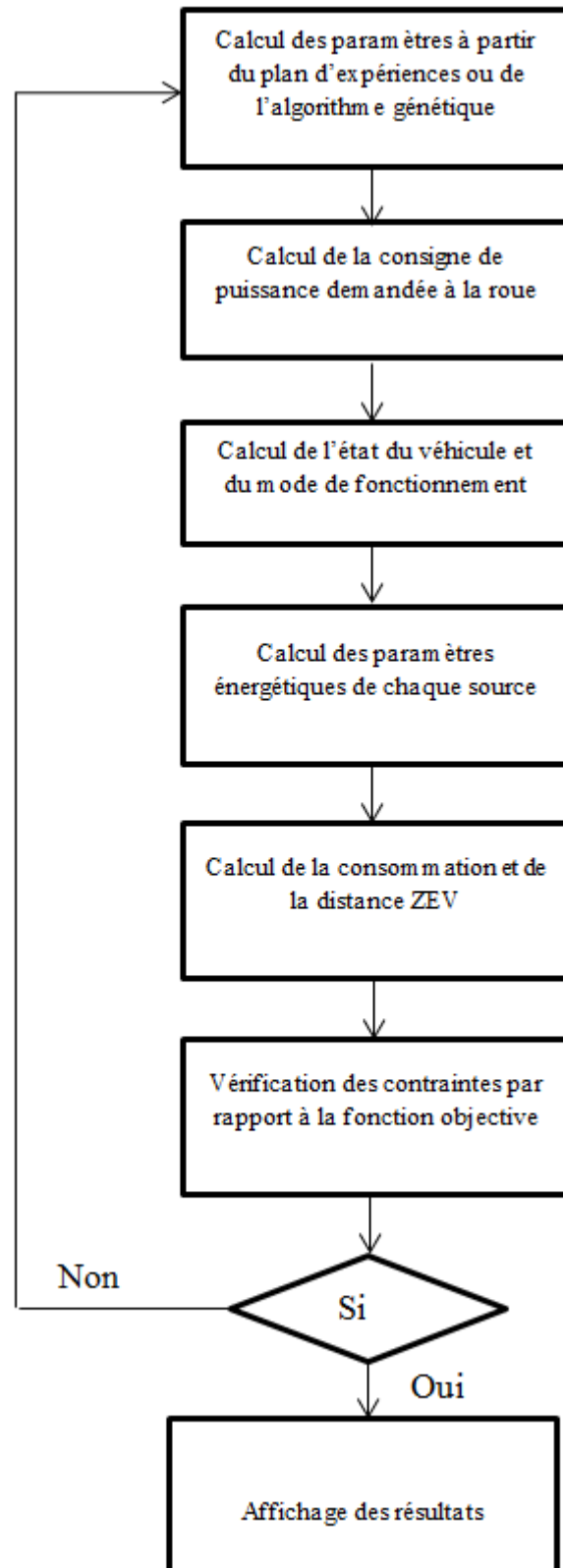


Figure 48. Organigramme du Modèle Matlab pour l'optimisation du CdC

Les données numériques qui ont été considérées pour cette application par rapport aux **domaines de validité des paramètres du plan d'expériences** sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} 14 \text{ kW} \leq P_{Mel\_max} \leq 40 \text{ kW} \\ 27\% \text{ kWh} \leq SOC_{max} \leq 83\% \text{ kWh} \\ 70 \text{ KJ} \leq E_{CVI\_utile\_max} \leq 100 \text{ kJ} \\ 8 \text{ kW} \leq P_{VI\_max} \leq 30 \text{ kW} \end{array} \right.$$

Ces valeurs sont choisies à partir de données existantes pour chaque composant, en considérant les cas favorables (les valeurs min) et les cas défavorables (les valeurs maxi). Par exemple la machine électrique la moins chère qui existe sur le marché a une puissance maxi en pic de 15 kW. Quant au volant d'inertie, ses limites ont été choisies par rapport à des valeurs acceptables d'un point de vue implantation et masse.

En comparant par rapport aux systèmes électriques développés au sein de PSA et en se basant sur le savoir-faire des experts métiers, les rendements respectifs considérés sont de l'ordre de :

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{transmission} = 0.9 \\ \eta_{Elec} = 0.82 \\ \eta_{VI} = 0.9 \end{array} \right.$$

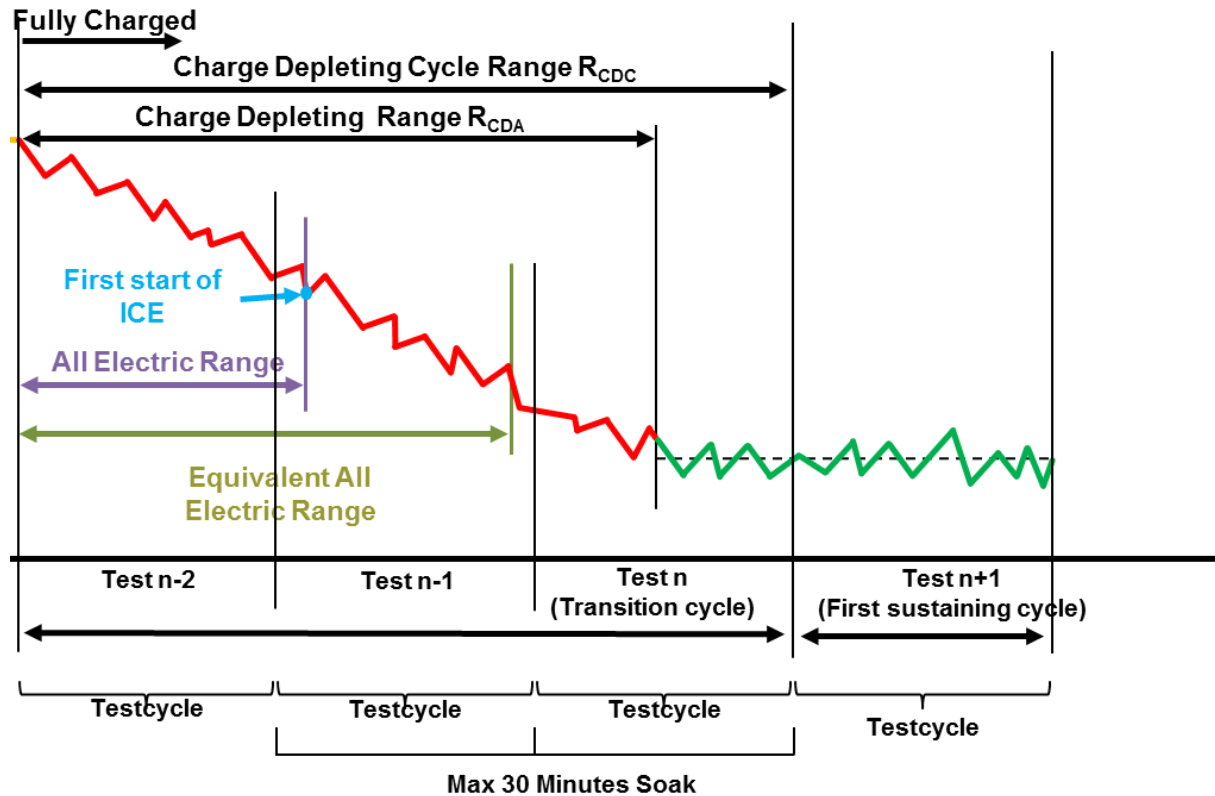
L'évaluation des performances du système par rapport aux fonctions de conception considérées, est effectuée à partir des procédures normalisées par les législations d'homologations pour les technologies hybrides (ECE, 2004). Trois calculs sur cycle WLTC sont alors effectués (Figure 49):

1. Une itération d'un nombre fini sur le cycle WLTC telle que la batterie soit chargée à son énergie maximale relative à son  $SOC_{max}$  au début de la simulation qui doit s'arrêter une fois que la batterie est complètement déchargée pour atteindre la valeur de son énergie minimale relative à son  $SOC_{min}$ . Ce cycle global joué est appelé « **Cycle Depleting** » et permet de statuer sur la durée nécessaire pour vider complètement la batterie.
2. Un cycle WLTC est par la suite simulé pour faire une transition à partir du cycle depleting. L'objectif de cette phase est d'arriver à définir une valeur du SOC de la batterie et d'  $E_{CVI}$  du volant d'inertie qui seront considérés pour faire le cycle du bilan batterie nulle « **Cycle Sustaining** ».
3. Un cycle WLTC correspondant au cycle sustaining est alors joué pour avoir un bilan batterie nulle qui s'exprime par :

$$SOC(t_0) = SOC(t_f)$$

$$E_{CVI}(t_0) = E_{CVI}(t_f)$$

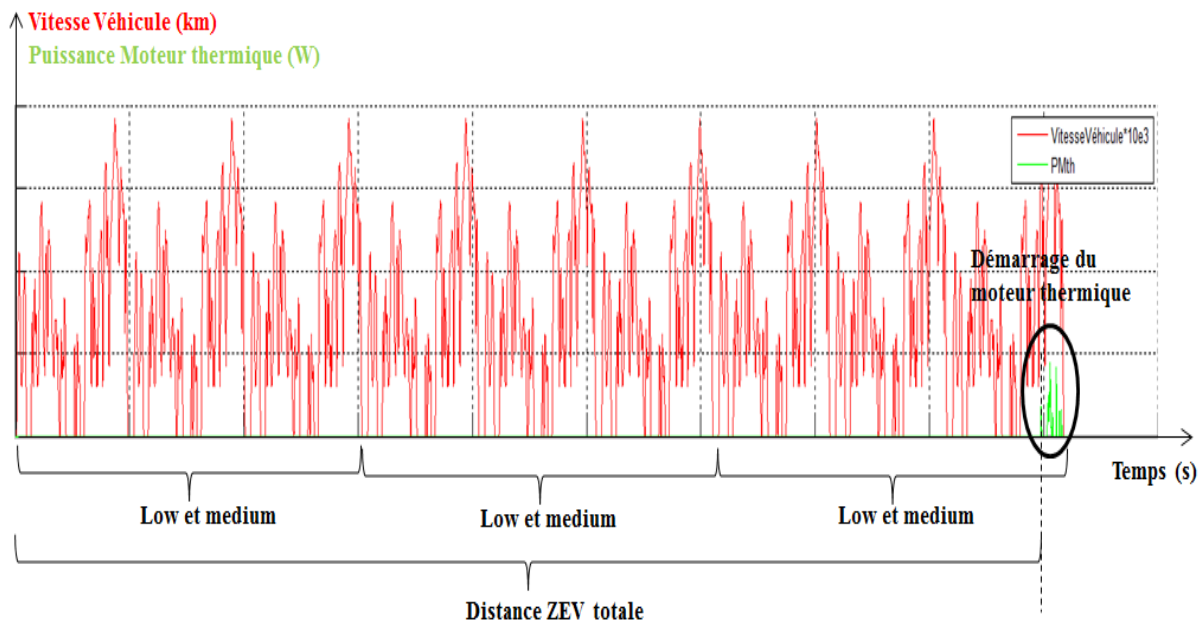
La consommation du moteur thermique est la somme de la consommation sur ces trois cycles.



**Figure 49. Procédure d'homologation de la consommation pour les véhicules hybrides (Document interne PSA)**

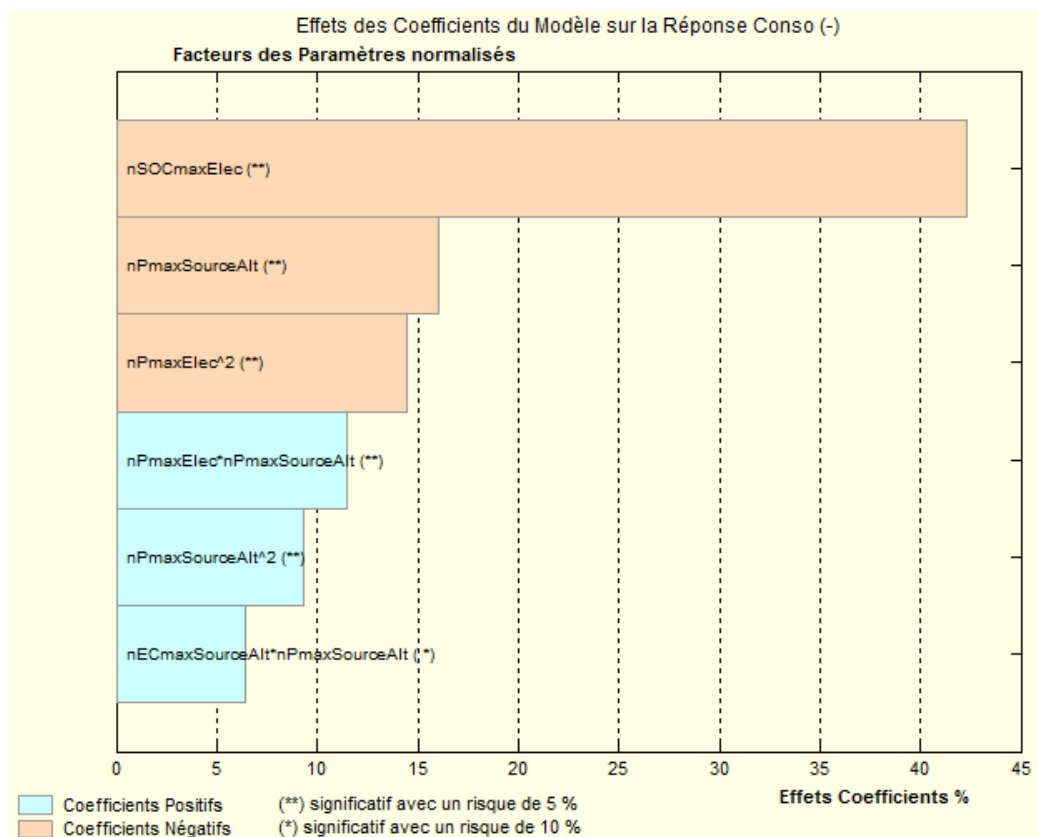
Quant à la distance ZEV, nous avons choisi de favoriser le mode full hybride (électrique et/ou mécanique) pour un roulage urbain en ville (Figure 50). Par la suite, nous simulons les parties du WLTC relatives à ce type de roulage (Low et Médium qui représentent les deux premières parties du cycle WLTC) autant de fois jusqu'à démarrer le moteur thermique pour la première fois. La distance ZEV est alors la distance totale parcourue jusqu'à cet instant.





**Figure 50. Calcul de la distance ZEV**

Les polynômes de tendances sont construits à partir de l'interpolation linéaire des paramètres que l'on cherche à calculer avec les performances de consommation et de ZEV (Figure 51).



**Figure 51. Exemple de niveaux d'influences des degrés de liberté sur la fonction consommation du système eMTI**

Ils permettent d'analyser le comportement de notre système par rapport à l'évolution de ces paramètres et ainsi de statuer sur les leviers que nous pouvons exploiter pour arriver à converger au mieux vers des solutions optimisées :

$$Conso_{Mth} = f(P_{Mel\_maxi}, SOC_{maxi}, E_{CVI\_utile\_maxi}, P_{VI\_maxi})$$

$$ZEV = f(P_{Mel\_maxi}, SOC_{maxi}, E_{CVI\_maxi}, P_{VI\_maxi})$$

#### 4.1. Analyses des résultats obtenus

Nous tenons à préciser que les différents calculs élaborés dans cette section ont été effectués pour le système eMTI mais aussi pour un système de GMP hybride électrique équivalent que nous appellerons HEV classique et qui n'intègre pas de volant d'inertie. Ceci afin de pouvoir comparer l'impact du rajout du volant d'inertie sur les objectives que nous cherchons à évaluer pour le système eMTI, c'est-à-dire la consommation du moteur thermique et la distance ZEV par rapport aux grandeurs considérées pour les degrés de liberté.

Les calculs effectués à l'aide des plans d'expériences, nous ont permis d'étudier et d'analyser le comportement du système eMTI vis-à-vis de l'évolution des degrés de liberté considérés ( $P_{Mel\_maxi}$ ,  $SOC_{maxi}$ ,  $E_{CVI\_maxi}$ ,  $P_{VI\_maxi}$ ). Les domaines de validité que nous avons choisi pour définir le plan d'expérience constituent la première limite de l'espace technologique et fonctionnel du système eMTI (Figure 52).

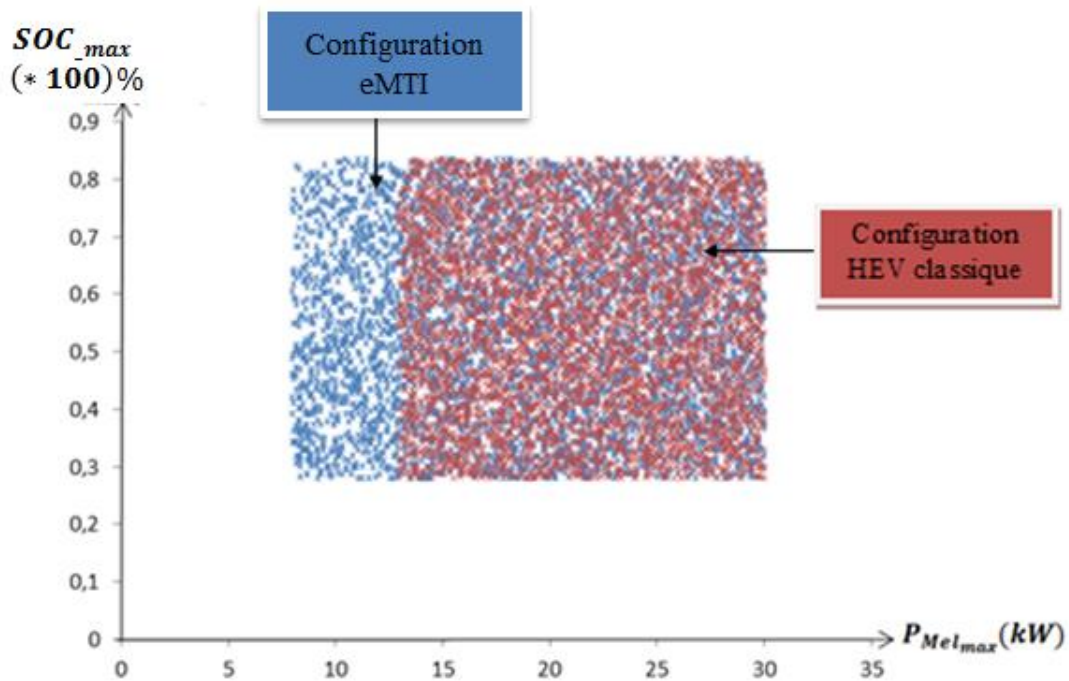
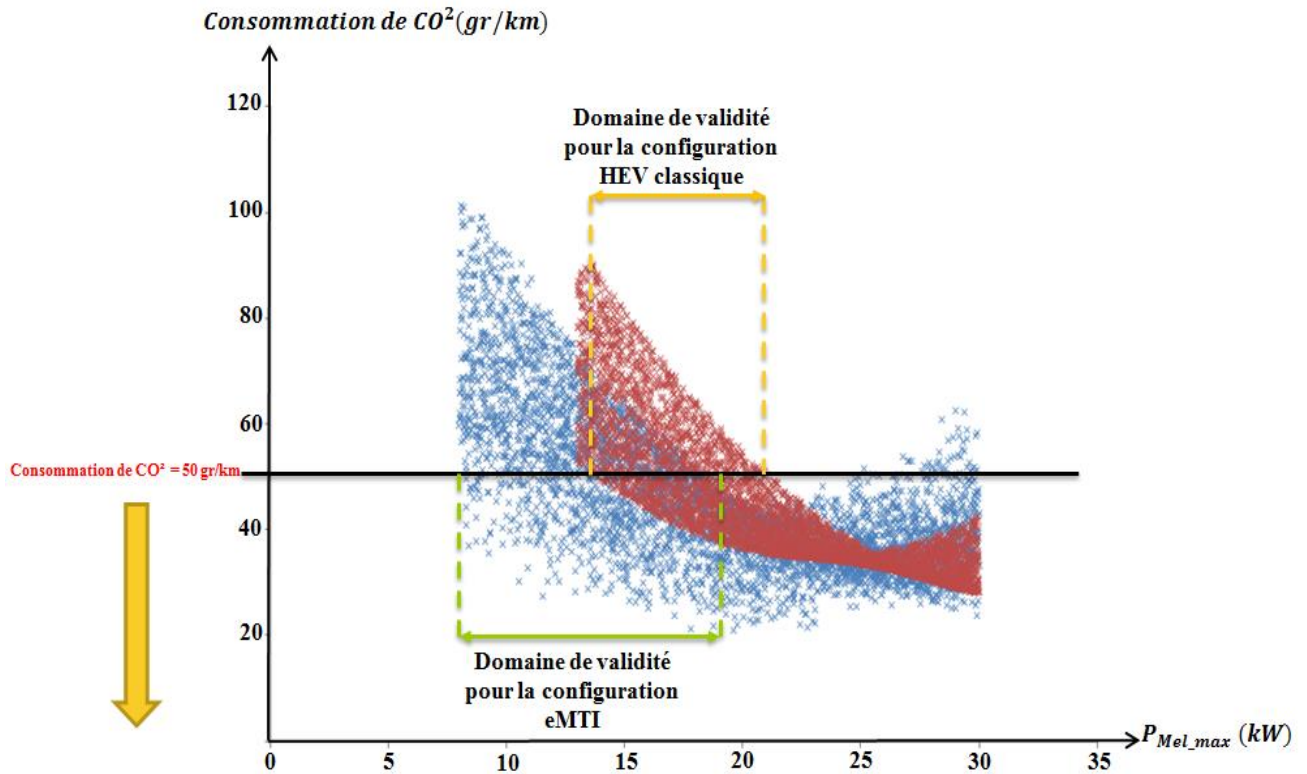


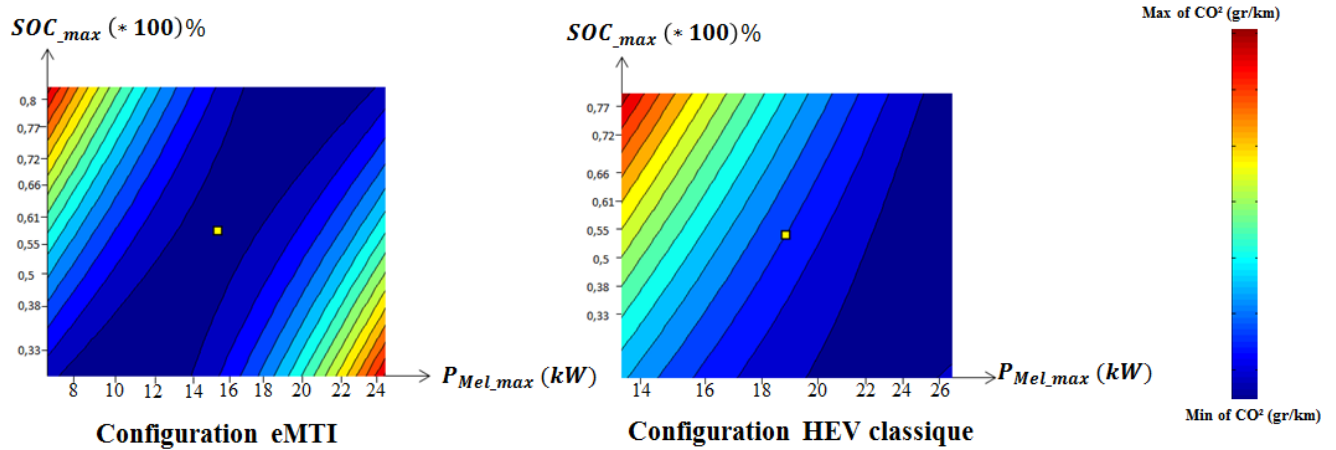
Figure 52. L'espace de solutions calculées à partir du plan d'expériences

L'espace technologique et fonctionnel considéré pour la configuration eMTI de la CDT hybride prend en compte des technologies de machine électrique ayant des puissances maximales en pic très faibles pouvant aller jusqu'à 8 kW, contrairement à l'espace technologique et fonctionnel relatif à la configuration HEV classique qui lui ne prend en compte que les machines électriques dont la puissance maximale en pic est de l'ordre de 15 kW au minimum. Ces résultats cependant n'assurent pas toutes les contraintes relatives aux objectifs de consommation du moteur thermique et la distance ZEV. Certaines des solutions calculées par le plan d'expériences respectent les contraintes considérées (Figure 53).



**Figure 53. Domaines de validité de l'espace technologique et fonctionnel de la machine électrique par rapport à la consommation du moteur thermique**

A partir de la construction des polynômes de tendances, nous analysons les tendances d'évolution des degrés de liberté considérés par rapport aux objectifs de consommation et de distance ZEV calculés pour le système eMTI. Ces polynômes nous permettent de tracer des courbes de Pareto en 3 dimensions (Figure 54).



**Figure 54. Evolution de la consommation du moteur thermique par rapport aux paramètres du système électrique**

Les domaines de validité des paramètres relatifs au système électrique (batterie et machine électrique) définis par le plan d'expériences sont retrouvés dans ces graphes de tendances. Nous remarquons qu'afin de réduire la consommation de CO<sup>2</sup> du système eMTI, une relation de dépendance entre le SOC de la batterie et la puissance maximale en pic de la machine électrique doit être optimisée.

$$P_{Mel\_max} = P_{batterie} + Pertes_{Mel} \text{ et } P_{batterie} = P_{batterie\_effective} + Pertes_{batterie}$$

$$E_{batterie} = \int P_{batterie\_effective} dt$$

$$SOC = \frac{E_{batterie}}{E_{batterie\_max}} * 100$$

Avec :

$Pertes_{Mel}$  sont les pertes de la machine électrique exprimées en kW.

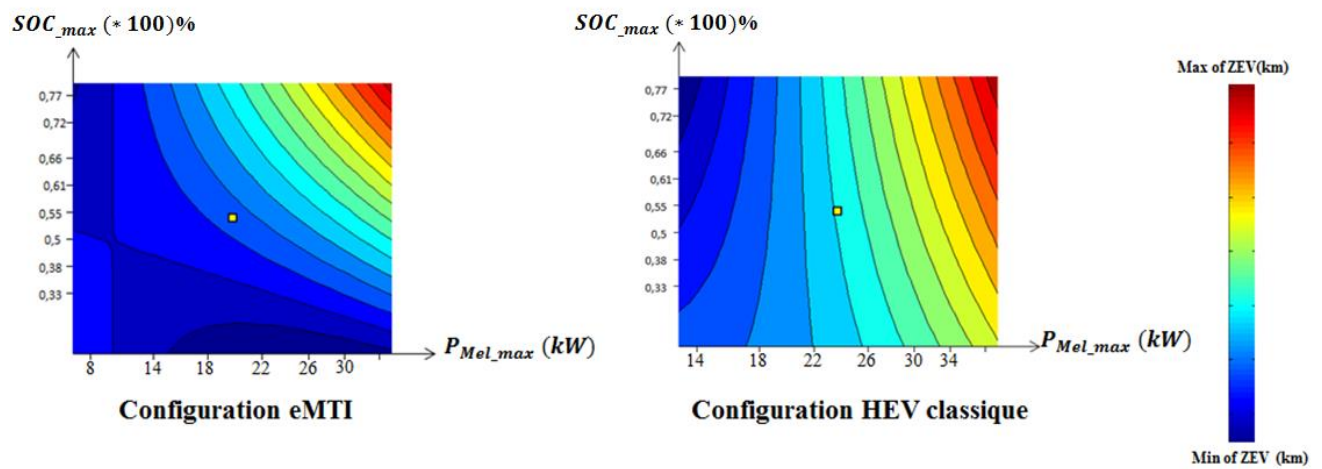
$Pertes_{batterie}$  sont les pertes de la batterie exprimées en kW

$P_{batterie\_effective}$  représente la puissance utile de la batterie qui sert soit de la recharger soit de la décharger et qui est aussi exprimée en kW.

$E_{batterie}$  représente la quantité d'énergie utile dans la batterie en MJ

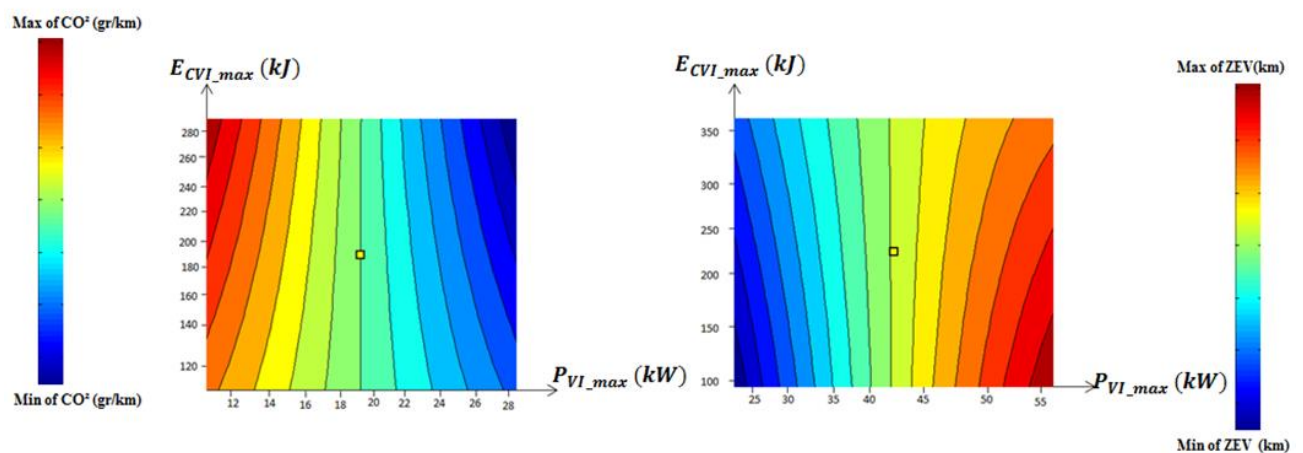
$E_{batterie}$  représente la quantité d'énergie maximale dans la batterie exprimée en MJ

La même analyse a été effectuée pour évaluer le comportement du système par rapport à la distance ZEV. En effet, nous constatons la présence de la même relation de dépendance entre la machine électrique et la batterie à travers l'augmentation de la puissance maximale en pic de celle-ci et l'augmentation de la taille de la batterie (Figure 55).



**Figure 55. Evolution de la distance ZEV par rapport aux paramètres du système électrique**

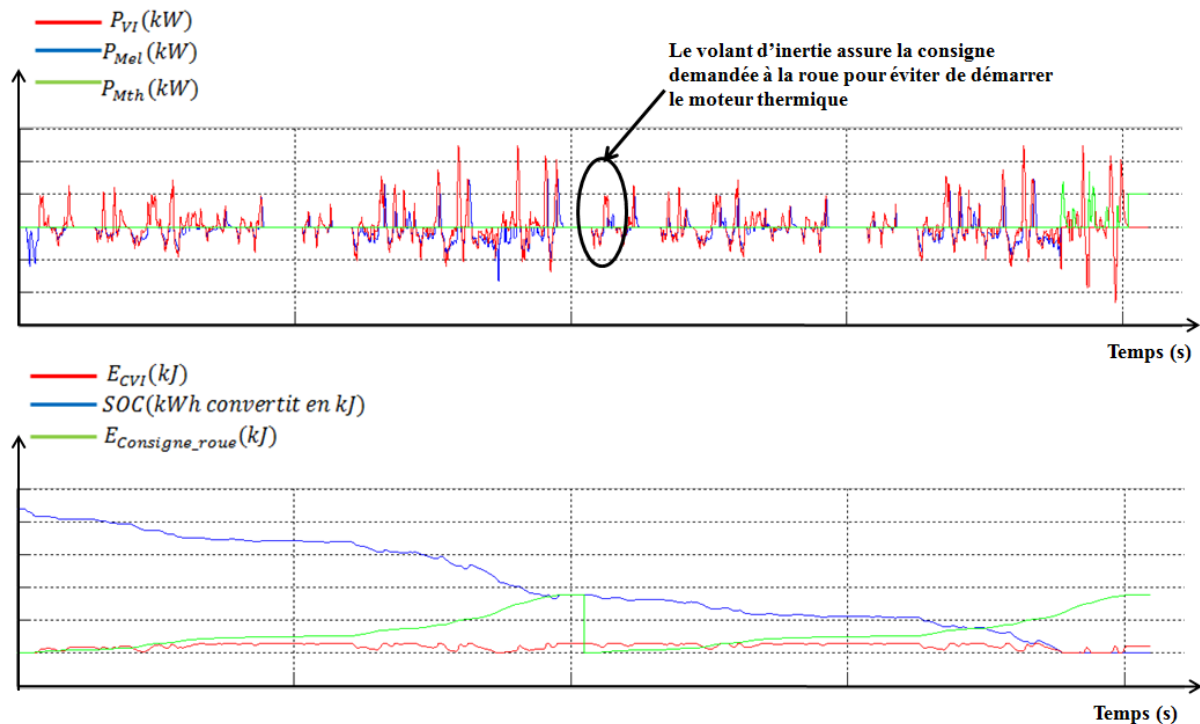
La puissance maximale en pic de la machine électrique doit permettre d'assurer la consigne de puissance demandée à la roue au rendement près. Si cette valeur est plus faible que la consigne demandée par le conducteur, le moteur thermique est allumé et le mode full hybride est désactivé même si la batterie contient assez d'énergie à cet instant. Pareillement, le niveau d'énergie emmagasinée dans la batterie doit permettre d'assurer toutes les phases de propulsion du véhicule. Ainsi, un compromis entre la valeur de la puissance maximale en pic  $P_{Mel\_max}$  de la machine électrique et l'état de charge maximum  $SOC$  doit être effectué pour atteindre l'objectif fixé sur la fonction consommation du moteur thermique et la distance ZEV.



**Figure 56. Evolution des objectifs (Consommation et distance ZEV) par rapport aux paramètres du volant d'inertie**

L'impact de la quantité d'énergie utile emmagasinée dans le volant est étroitement lié à sa puissance maxi. En effet, plus nous augmentons la puissance maxi du volant d'inertie plus on diminue la consommation du moteur thermique (Figure 56). Ce phénomène peut être expliqué par la capacité du volant à assurer la puissance demandée à la roue et aussi à sa densité d'énergie instantanée. Ainsi, nous pouvons conclure que pour réduire la taille du système électrique et favoriser l'utilisation du volant d'inertie comme source d'hybridation, il nous est nécessaire de réadapter notre stratégie de fonctionnement en intégrant une meilleure répartition de puissance entre les différents systèmes. L'impact du volant d'inertie sur la distance ZEV est négligeable par rapport au système électrique à cause de sa faible densité d'énergie.

Le volant d'inertie vient alors comme un support capable de délivrer un surplus d'énergie au système électrique d'une manière instantanée afin d'assurer la consigne de puissance demandée à la roue. Ceci nous évite alors de démarrer le moteur thermique et nous donne la possibilité de rouler plus longtemps en mode full hybride (Figure 57).



**Figure 57. Fonctionnement du système eMTI lors du roulage du véhicule**

A partir de ses premiers résultats de tendances, nous avons pu cerner le comportement physique du système que nous cherchons à concevoir et avoir une première idée sur les actions d'améliorations possibles pour arriver à assurer les objectifs de conception.

Ainsi, nous avons réadapté la stratégie de gestion d'énergie que nous avons considérée au début de notre étude, dans le but d'optimiser la répartition énergétique entre les trois sources et de réduire la taille du système électrique tout en garantissant les contraintes fixées sur les fonctions de consommation et de distance ZEV.



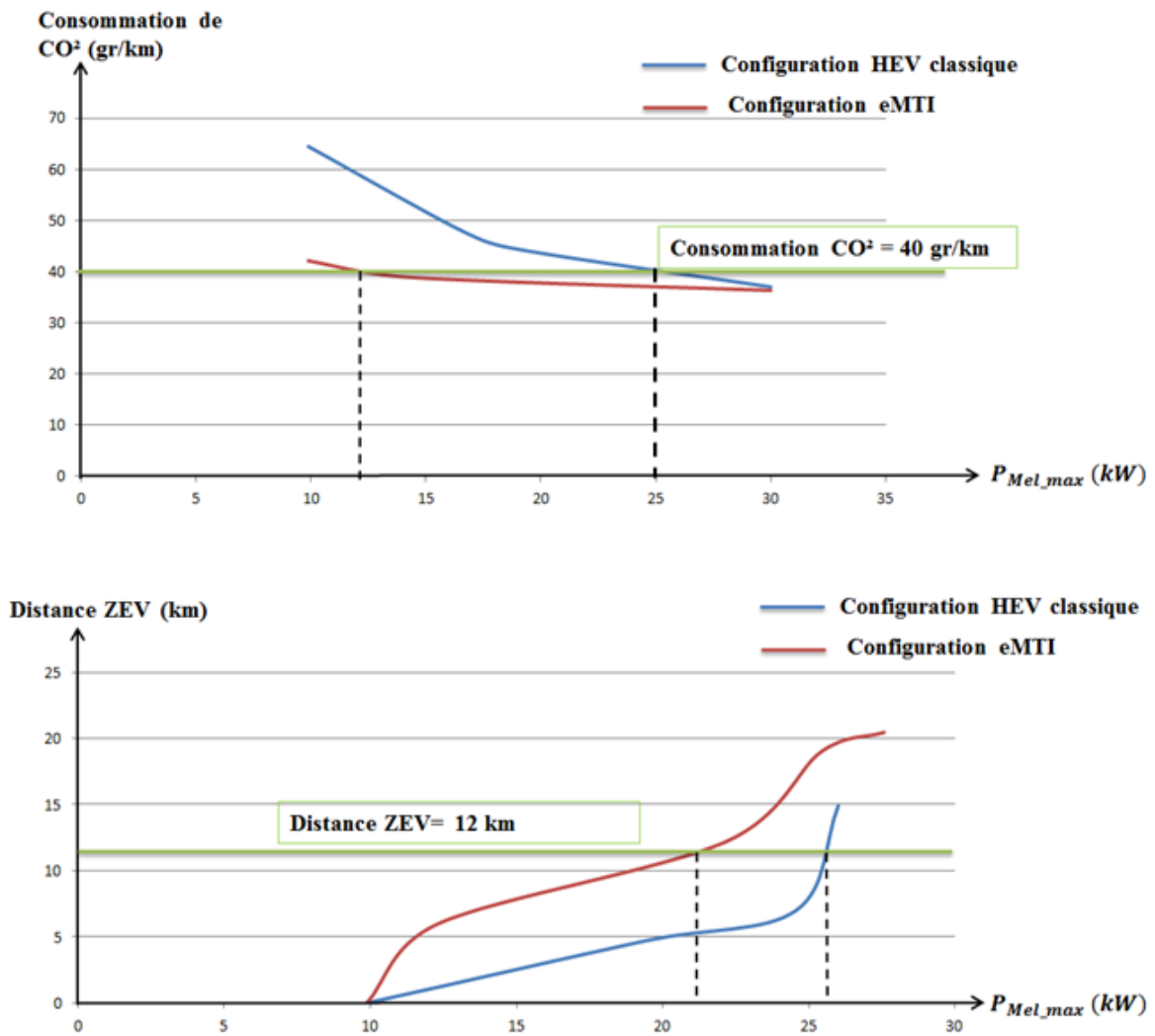
La nouvelle stratégie consiste alors à minimiser le besoin énergétique demandé au système électrique en limitant sa fonction à assurer uniquement la consigne de puissance demandée nécessaire pour vaincre les pertes du véhicule lors du roulage (liées aux résistances aérodynamiques, et au roulement du véhicule), la puissance nécessaire aux accélérations sera fournie par le volant d'inertie. Ainsi, les deux systèmes fonctionneront d'une manière simultanée pour assurer les deux fonctions énergétiques différentes (Tableau 7)

|        |                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mode 1 | Lancement du volant d'inertie (quand le véhicule est à l'arrêt) par le système électrique                                                                                                                                         |
| Mode 2 | Lancement du volant d'inertie par le moteur thermique (quand le système électrique n'est pas capable d'effectuer cette tâche)                                                                                                     |
| Mode 3 | Les trois sources énergétiques sont découplées et le système est complètement ouvert (quand le véhicule est à l'arrêt et le volant d'inertie est chargé jusqu'à son $E_{CVI\_max}$ )                                              |
| Mode 4 | <b>Full Hybride Electrique/Mécanique</b> : Accélération du véhicule à partir du volant d'inertie en le déchargeant, et compensation des pertes par le système électrique.                                                         |
| Mode 5 | <b>Full Hybride Mécanique</b> : toute la consigne de puissance pour déplacer le véhicule est assurée par le volant d'inertie en le déchargeant. (quand le système électrique n'est capable d'assurer la compensation des pertes). |
| Mode 6 | <b>Full Thermique</b> : Accélération du véhicule uniquement à partir du moteur thermique (quand le système électrique n'est plus en mesure d'assurer la puissance demandée à la roue)                                             |
| Mode 7 | <b>Freinage Récupératif en full hybride mécanique</b> : Freinage du véhicule suite à la recharge du volant d'inertie.                                                                                                             |
| Mode 8 | <b>Freinage Récupératif en full hybride électrique</b> : Freinage du véhicule en rechargeant la batterie par la machine électrique.                                                                                               |
| Mode 9 | <b>Freinage dissipatif</b> : le véhicule est décéléré à travers un système de freins qui dissipent l'énergie.                                                                                                                     |

**Tableau 7-Automate des modes de fonctionnement pour la stratégie optimisée**

A partir de ces conclusions, le modèle relatif à l'optimisation du CdC du système eMTI a alors été construit. Ce modèle intègre la nouvelle stratégie de gestion d'énergie et prend en compte les domaines de validité qui ont été définis à l'aide des analyses des graphes de tendances. La deuxième étape consiste alors à calculer les solutions optimales des différents paramètres du système qui permettent de converger vers des valeurs de consommation du moteur thermique et de la distance ZEV respectant les contraintes imposées. Cette optimisation est effectuée à l'aide d'un algorithme génétique et le modèle prend en compte les mêmes procédures d'évaluation de la consommation et de la distance ZEV mentionnées précédemment.

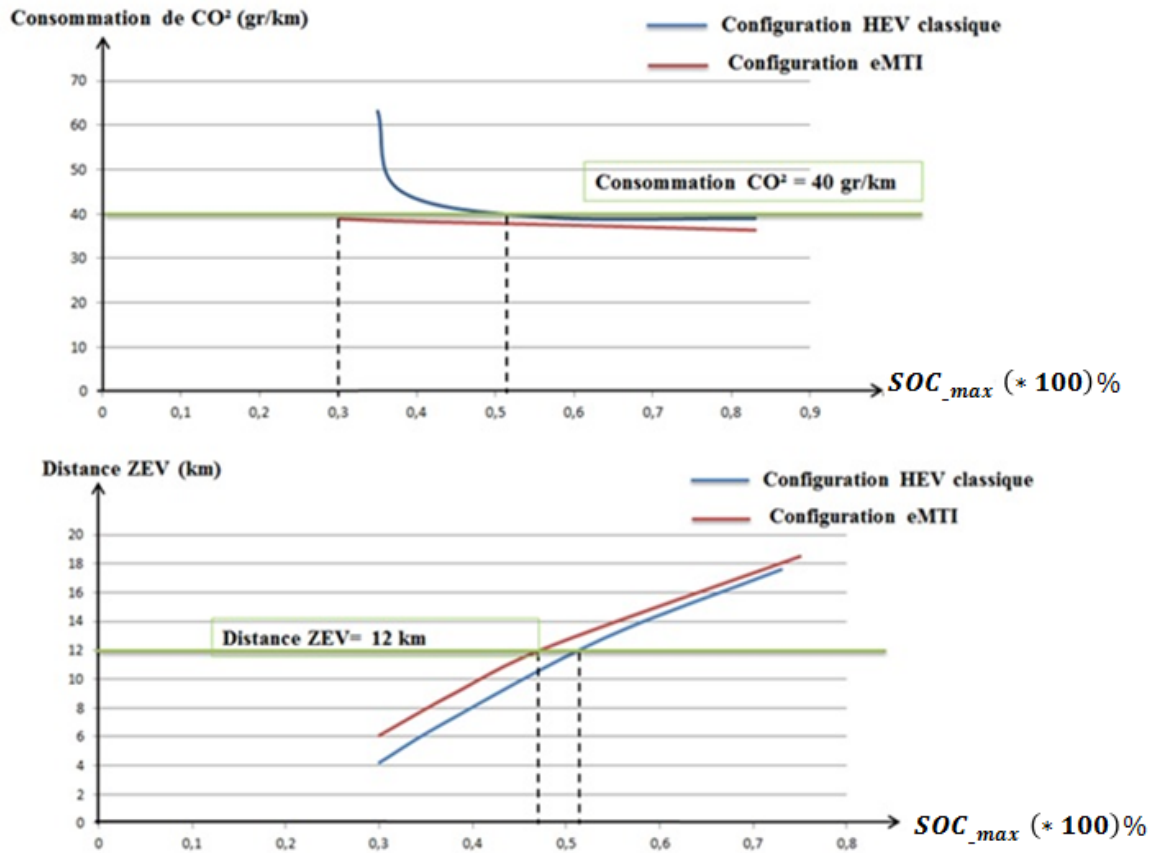
Les résultats obtenus à l'aide de l'optimisation par l'algorithme génétique sont par la suite représentés sous forme de graphes de Pareto pour les deux configurations des systèmes eMTI et HEV classique.



**Figure 58. Courbes de Pareto pour l'évaluation des solutions de la puissance de la machine électrique à iso consommation et iso distance ZEV**

La Figure 58 montre qu'il est possible d'obtenir une consommation de  $CO_2 = 40$  gr/km en utilisant une machine électrique ayant une puissance maximale de 12 kW seulement. Cependant, afin de pouvoir satisfaire la contrainte imposée sur la distance ZEV=12 km, la puissance maximale de machine électrique à considérer serait de l'ordre de 22 kW.





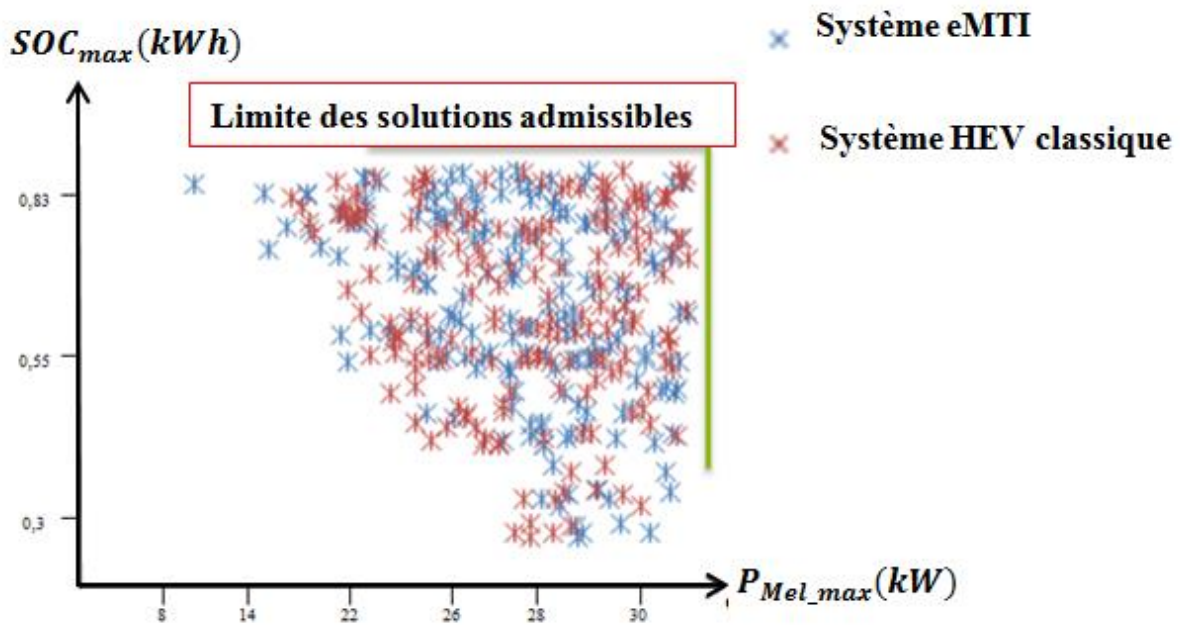
**Figure 59. Courbes de Pareto pour l'évaluation des solutions de SOC de la batterie à iso consommation et iso distance ZEV**

La Figure 59 montre que le SOC de la batterie n'évolue pas beaucoup entre les deux configurations eMTI et HEV classique par rapport à un fonctionnement à iso distance ZEV, et qu'il est possible de considérer les technologies de batterie ayant comme un état de charge maxi égale à 40% pour assurer les contraintes fixées sur les deux objectifs pour le système eMTI.

#### **4.2. Conclusions et définition de l'espace technologique et fonctionnel**

L'approche de conception que nous avons mise en place à ce stade permet de définir à partir des fonctions de conception considérées, les degrés de liberté du système nécessaires et suffisants pour construire le CdC du projet et définir les spécifications du système eMTI et MTI au niveau systémique 0. Grâce à l'analyse effectuée à l'aide des résultats obtenus par les plans d'expériences et les polynômes de tendances, nous avons pu développer une première stratégie de gestion d'énergie qui permet de décrire le comportement du système à concevoir. Ceci constitue alors une donnée d'entrée pour la définition et la modélisation de l'espace comportemental du système.

En intégrant un algorithme d'optimisation basé sur le principe des algorithmes génétiques, nous avons pu réduire le domaine de validité des paramètres du système eMTI et par la suite optimisé l'**espace de solutions technologique et fonctionnel** considéré au début de nos calculs (cf. Figure 52), à un espace formé uniquement de technologies qui vérifient les fonctions de conception à considérer (Figure 60)



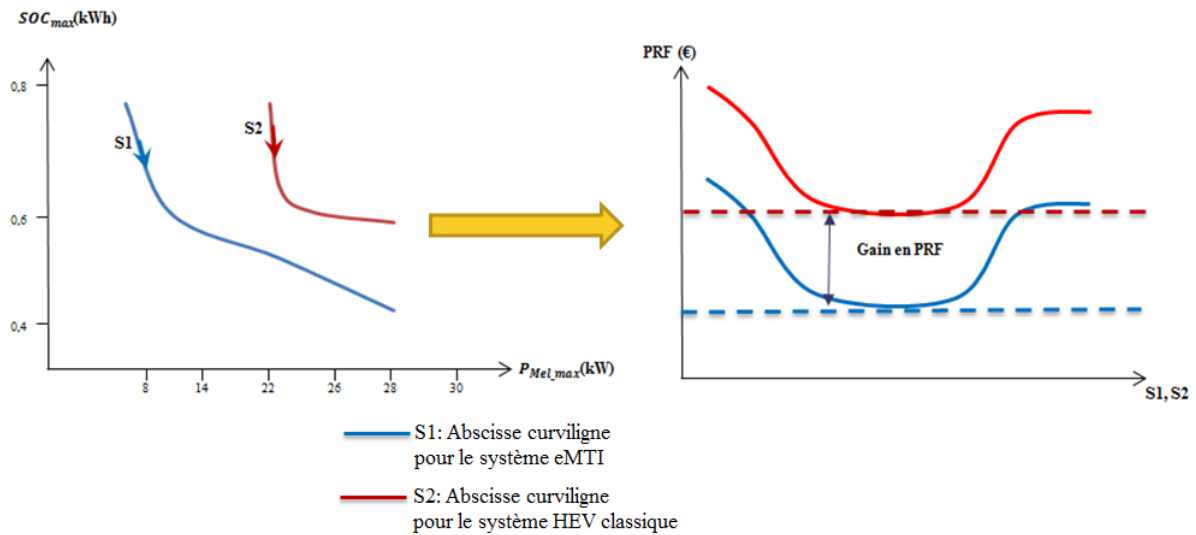
**Figure 60. Espace technologique optimisé**

Toutes les solutions représentées dans cet espace technologique et fonctionnel pour le système eMTI vérifient alors les contraintes respectives (Tableau 8) des fonctions de conception considérées.

| Contraintes                            |
|----------------------------------------|
| <b>C1:</b> $Conso_{Mth} \leq 50 gr/km$ |
| <b>C2:</b> $ZEV \geq 10 km$            |
| <b>C3:</b> $SOC_{maxi} \leq 70\% kWh$  |
| <b>C4:</b> $P_{Mel\_maxi} \leq 24 kW$  |

**Tableau 8. Les contraintes de conception considérées au niveau 0**

En intégrant la fonction PRF formant la dernière fonction de conception à satisfaire à ce niveau, le choix de l'optimum local à considérer pour la solution technologique du système eMTI peut alors être effectué.



**Figure 61. Courbe Pareto de comparaison de PRF pour le système eMTI et le système HEV classique**

En parcourant à partir des abscisses curvilignes des courbes de Pareto correspondantes aux solutions optimisées calculées à partir de l'optimisation à l'aide des algorithmes génétiques, il nous est possible de tracer les fonctions  $PRF = f(SOC_{max})$  et  $PRF = g(P_{Mel_{max}})$  (Figure 61). Le gain de PRF constaté nous oriente par la suite vers la technologie à choisir pour la solution optimale du système eMTI (Tableau 9) :

| PMel (kw) | SOC_maxi (kWh) | P_VI (KW) | ECVolant (kJ) |
|-----------|----------------|-----------|---------------|
| 24        | 0,44           | 25        | 90            |

**Tableau 9-Solution technologique optimale pour le système eMTI**

Cette configuration calculée à partir des différentes mutations effectuées dans l'algorithme génétique d'optimisation permet d'obtenir les performances suivantes (Tableau 10) :

|               | eMTI  | MTI      |
|---------------|-------|----------|
| Conso (gr/km) | 37,52 | 74.23 gr |
| ZEV (km)      | 11,59 | 0,3      |

**Tableau 10-Performances obtenues pour la solution optimale**

L'écart entre les performances des deux configurations eMTI et MTI du système est dû à l'apport énergétique du système électrique intégré dans la configuration eMTI qui permet de rapporter un surplus de puissance au volant d'inertie et de réduire l'utilisation du moteur thermique. Ceci permet de réduire la consommation, mais aussi d'augmenter l'autonomie en

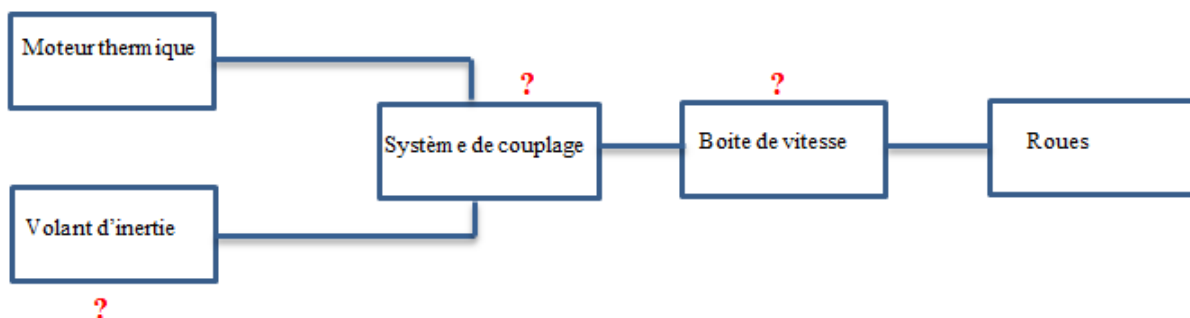
mode ZEV qui est principalement défini par le SOC de la batterie comme nous l'avons observé à partir des graphes de tendances.

Les valeurs définies pour les spécifications du système à ce niveau 0 seront considérées par la suite comme des contraintes que les concepteurs doivent respecter lors de la conception du système pour les niveaux systémiques 1 et 2.

#### IV. Approche de définition de l'espace structurel: Définition des spécifications et optimisation de l'architecture organique du système pour les niveaux systémiques 1 et 2

Après avoir défini l'espace technologique et fonctionnel du système, nous proposons dans cette partie de définir l'espace structurel représentant l'architecture organique du système MTI.

Nous rappelons que les résultats présentés dans cette partie ont été testés uniquement sur la version MTI par la suite le système électrique n'y apparaîtra pas. Ceci est dû au fait que PSA a choisi de développer le système MTI avant.



**Figure 62. Système MTI version hybride mécanique**

L'optimisation de l'architecture organique consiste à modéliser et déterminer les paramètres dimensionnels pour les différents composants qui nous sont inconnus (Figure 62). En nous basant sur les résultats obtenus suite au travail effectué pour la définition de l'espace technologique et fonctionnel, nous avons développé une approche de modélisation et d'optimisation qui permet de converger vers des solutions d'architecture organique respectant le cahier des charges, mais aussi les contraintes et les fonctions de conception qui apparaissent à ce niveau :

- La fonction 'Architecture' ou d'implantation ; relative au volume alloué pour le système MTI qui se trouve à l'avant du véhicule et à sa compatibilité avec les différentes plateformes de PSA. Cette fonction intègre les contraintes d'implantation, de proximités et de faisabilité.

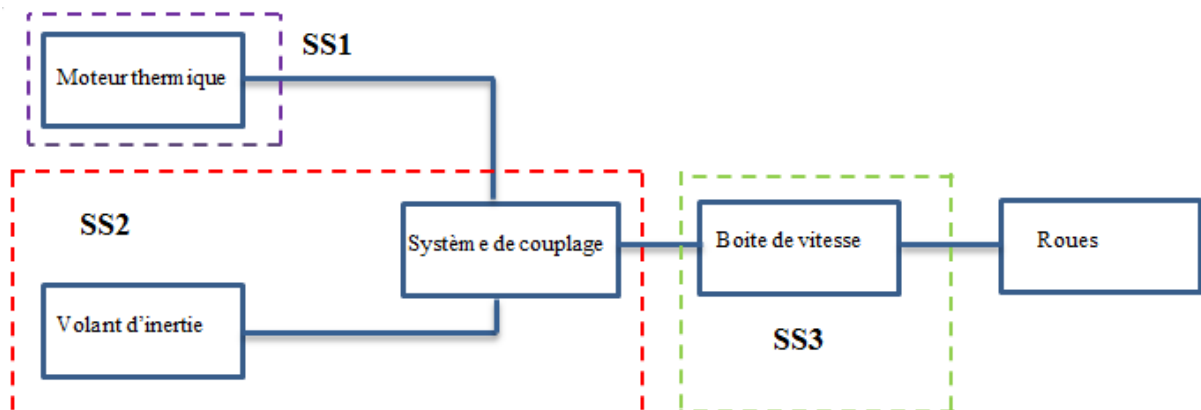
- La fonction ‘Prestations et performances’ ; le prototype du système MTI doit être capable d’assurer certaines prestations dynamiques (les accélérations du décollage du véhicule, V1000mini, V1000maxi, etc.), et des prestations d’agrément de conduites (passage de rapport de vitesse, les vibrations acoustiques, etc.)
- La fonction ‘PRF’ ; la solution d’architecture organique choisie doit permettre de réduire le coût et les investissements

Les paramètres dimensionnels que nous cherchons à définir relatifs aux composants sont :

- Pour le volant d’inertie : inertie du volant, les diamètres intérieurs et extérieurs, les régimes de rotation min/max, etc.)
- Boite de vitesse : V1000min, l’ouverture de la boite, les rapports de démultiplication min/max, etc.)
- Système de couplage embrayage : couple transmissible maxi, surface des pistons, surface de frictions définies par les diamètres intérieurs et extérieurs et le nombre des disques, etc.)

Dans le but de calculer tous ces éléments, nous avons mis en place une approche d’optimisation permettant d’évaluer différentes architectures et de faire un choix vers une configuration organique optimale qui satisfait les fonctions de conception.

Pour ce faire nous avons décidé de décomposer le système en trois **sous-systèmes SS1, SS2, et SS3** (Figure 63) :



**Figure 63.Décomposition systématique Niveau 1 de modélisation**

- **SS1** est le moteur thermique avec ses accessoires. Ce sous-système comme nous l’avons mentionné auparavant ne fera pas partie de notre étude de conception et il est considéré comme une donnée d’entrée fixe.
- **SS2** est le sous-système composé du volant d’inertie ainsi que du système de couplage de type double embrayage humide. Nous chercherons à déterminer les caractéristiques dimensionnelles de ce système ainsi que l’architecture organique optimale.
- **SS3** est le système composé par la transmission mécanique que nous chercherons à concevoir.

## 1. Mise en équation du problème de conception

### 1.1. Modélisation et optimisation du système SS2

Afin de vérifier les objectifs de consommation du système MTI définis à travers les travaux effectués pour la construction de l'espace fonctionnel et technologique, nous avons choisi de faire fonctionner le moteur thermique dans sa zone d'opti CSE. Pour le moteur pris en compte EB2 qui est un moteur à essence à 3 cylindres de PSA atmosphérique de cylindrée 1.2 l, cette contrainte se traduit par :

$$\omega_{Mth} \in [2\,000, 4\,000] \text{ tr/min}$$

Notre choix technologique, nous a amenés à positionner le volant d'inertie sur le même axe de rotation que le moteur thermique ainsi que la boîte de vitesse et ceci pour des raisons d'encombrement. Ainsi, le régime en sortie du module du volant d'inertie (au niveau de l'arbre primaire) doit être égal au régime du moteur thermique c'est-à-dire :

$$2\,000 \text{ tr/mn} \leq \omega_{VI\_Niveau\_AP} = \omega_{Mth} \leq 4\,000 \text{ tr/mn}$$

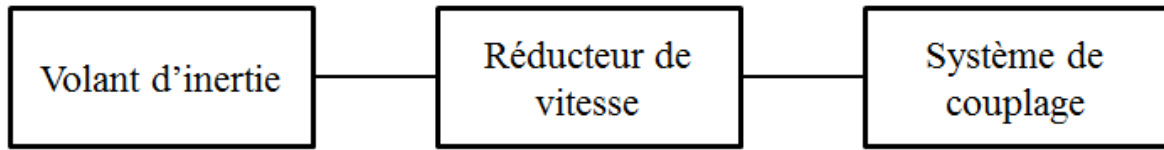
Avec :  $\omega_{VI\_Niveau\_AP}$  la vitesse du volant d'inertie mesurée au niveau de l'arbre primaire de la boîte de vitesse.

Or en considérant l'équation de l'énergie cinétique relative au volant d'inertie  $E_{CVI\_utile} = \frac{1}{2} \omega_{VI}^2 I_{VI}$  et la spécification relative à la quantité d'énergie utile que nous devons pouvoir stocker dans le volant afin d'atteindre les objectifs relatifs à la consommation et la distance ZEV (Tableau 9 et Tableau 10), il nous faut trouver un compromis entre les valeurs min/max de la vitesse de rotation du volant d'inertie et son inertie. En effet, les contraintes d'implantation et d'encombrement nous imposent une minimisation de la valeur d'inertie du volant tant dit que les contraintes issues du cahier des charges du projet nous imposent une certaine quantité d'énergie cible. Il nous faut alors augmenter la plage de variation de la vitesse de rotation du volant pour assurer ces contraintes et l'autoriser à tourner pour des régimes supérieurs à ceux imposés par sa coaxialité avec le moteur thermique et la boîte de vitesse. Ceci est alors effectué à l'aide d'une réduction de vitesse dont le rapport est une inconnue que nous allons définir :

$$2000 \times X \leq \omega_{VI} \leq 4000 \times X \text{ en tr/mn}$$

Avec :  $X$  le rapport de réduction entre le volant d'inertie et l'arbre primaire de la boîte de vitesse nécessaire pour avoir une vitesse de rotation entre [2000 ; 4000] tr/mn.

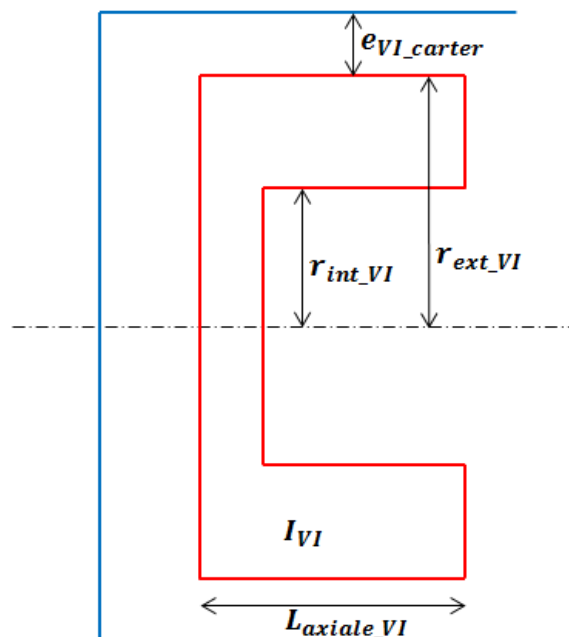
Le sous-système SS2 peut alors être représenté par la (Figure 64):



**Figure 64. Modélisation simplifiée du sous-système SS2**

Chaque sous-composant peut être représenté analytiquement à l'aide de certains paramètres qui de par sa physique sont suffisants pour le définir par rapport au niveau systémique considéré qui est le niveau 1:

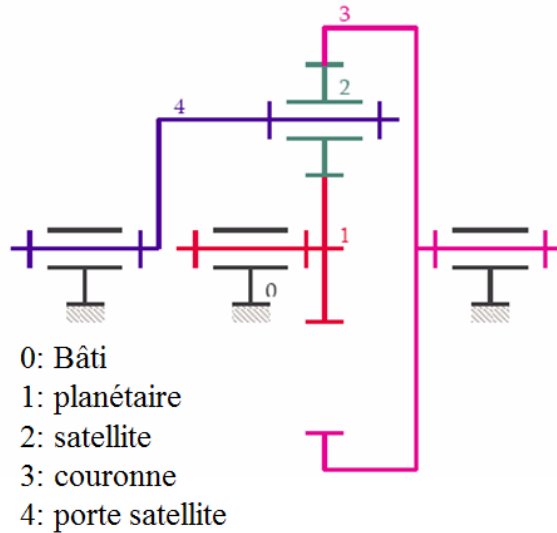
- Un **volant d'inertie** (Figure 65) est modélisé par son inertie, ses régimes de rotation minimum et maximum, sa largeur axiale, l'épaisseur à considérer entre lui et son carter en prenant en compte la possibilité de l'électrifier à travers une machine électrique, son rayon intérieur et son rayon extérieur. Le type du matériau ainsi que ses caractéristiques sont fixés pour un volant en acier. Ce choix est issu de la contrainte de PRF qui fait que nous sommes contraints d'utiliser le matériau le moins cher sur le marché pour ce type d'application.



**Figure 65. Coupe axiale d'un volant d'inertie cylindrique**

- Un système de **réduction de vitesse** est représenté par un rapport de réduction. Ce type de système est constitué d'un ensemble d'arbres autour desquels tournent des pignons. Ainsi, la définition de ce type de système se fait aussi par rapport aux différents diamètres primitifs de ses pignons. Nous avons choisi de retenir un système

de train épicycloïdal (Figure 66) de par le fait qu'il nous permet de disposer de deux entrées de vitesse et une sortie.



**Figure 66. Schéma cinématique d'un train épicycloïdal**

- Un **embrayage** est représenté par un diamètre intérieur et extérieur, un nombre de disques, un couple transmissible maximal et par un système d'actionnement caractérisé par des niveaux de pressions maximales et des diamètres intérieurs et extérieurs du piston d'actionnement.

A partir de cette représentation paramétrique du système, nous pouvons alors déduire les inconnues (degrés de liberté) du problème de conception que nous cherchons à calculer (Tableau 11) :

| Degrés de liberté (paramètres structuraux)                                  | Domaines d'existence dans l'environnement de conception |
|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 1. Inertie du volant exprimée en kg.m <sup>2</sup><br>$I_{VI}$              | $1 \leq I_{VI} \leq 5$                                  |
| 2. Le rayon intérieur du volant en mm<br>$r_{int\_VI}$                      | $90 \leq r_{int\_VI} \leq 150$                          |
| 3. Le rayon extérieur du volant en mm<br>$r_{ext\_VI}$                      | $100 \leq r_{ext\_VI} \leq 175$                         |
| 4. La largeur axiale du volant en mm<br>$L_{axial\_VI}$                     | $10 \leq L_{axial\_VI} \leq 200$                        |
| 5. La largeur axiale pour la partie machine électrique en mm $L_{elec\_VI}$ | $10 \leq L_{elec\_VI} \leq 50$                          |
| 6. Le régime de rotation mini du volant en tr/mn $\omega_{VI\_min}$         | $1000 \leq \omega_{VI\_min\_niveauAP} \leq 3000$        |
| 7. Le régime de rotation maxi du volant en tr/mn $\omega_{VI\_maxi}$        | $3500 \leq \omega_{VI\_maxi\_niveauAP} \leq 5000$       |
| 8. Le rapport de réduction du train épicycloïdal $R_{TE}$                   | $2 \leq R_{TE} \leq 3$                                  |
| 9. Le diamètre primitif de la couronne du train épicycloïdal en mm $d_{pC}$ | $10 \leq d_{pC} \leq 180$                               |



|                                                                                              |                                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 10. Le diamètre primitif du satellite du train épicycloïdal en mm $d_{ps}$                   | $10 \leq d_{ps} \leq 80$                     |
| 11. Le diamètre primitif du planétaire du train épicycloïdal en mm $d_{pp}$                  | $10 \leq d_{pp} \leq 100$                    |
| 12. Le diamètre intérieur de l'embrayage volant d'inertie en mm $d_{int\_Emb\_VI}$           | $10 \leq d_{int\_Emb\_VI} \leq 150$          |
| 13. Le diamètre extérieur de l'embrayage volant d'inertie en mm $d_{ext\_Emb\_VI}$           | $30 \leq d_{ext\_Emb\_VI} \leq 200$          |
| 14. Le nombre de disques de l'embrayage volant d'inertie $n_{Emb\_VI}$                       | $1 \leq n_{Emb\_VI} \leq 3$                  |
| 15. Le couple transmissible maxi de l'embrayage volant d'inertie en Nm $CT_{maxi\_Emb\_VI}$  | $70 \leq CT_{maxi\_Emb\_VI} \leq 150$        |
| 16. Le diamètre intérieur de l'embrayage moteur thermique en mm $d_{int\_Emb\_Mth}$          | $10 \leq d_{int\_Emb\_Mth} \leq 150$         |
| 17. Le diamètre extérieur de l'embrayage moteur thermique en mm $d_{ext\_Emb\_Mth}$          | $30 \leq d_{ext\_Emb\_Mth} \leq 200$         |
| 18. Le nombre de disques de l'embrayage moteur thermique $n_{Emb\_Mth}$                      | $1 \leq n_{Emb\_Mth} \leq 3$                 |
| 19. Le couple transmissible maxi de l'embrayage moteur thermique en Nm $CT_{maxi\_Emb\_Mth}$ | $100 \leq CT_{maxi\_Emb\_Mth} \leq 220$      |
| 20. Le diamètre intérieur du piston en mm $d_{int\_piston\_Emb\_Mth}$                        | $50 \leq d_{int\_piston\_Emb\_Mth} \leq 150$ |
| 21. Le diamètre extérieur du piston en mm $d_{ext\_piston\_Emb\_Mth}$                        | $70 \leq d_{ext\_piston\_Emb\_Mth} \leq 200$ |
| 22. Le diamètre intérieur du piston en mm $d_{int\_piston\_Emb\_VI}$                         | $50 \leq d_{int\_piston\_Emb\_VI} \leq 150$  |
| 23. Le diamètre extérieur du piston en mm $d_{ext\_piston\_Emb\_VI}$                         | $70 \leq d_{ext\_piston\_Emb\_VI} \leq 200$  |

**Tableau 11. Définition des inconnus du problème d'optimisation**

Les domaines d'existences relatives aux différents degrés de liberté du système SS2 considérés à ce stade sont issus principalement des règles métiers et du savoir-faire des concepteurs, mais aussi des différentes spécifications définies dans l'espace technologique et fonctionnel.

Les inconnues que nous avons listées pour modéliser le système sont soumises à des contraintes de conception qui sont principalement issues de l'environnement du véhicule considéré, des proximités internes, des performances et des données définies dans l'espace technologique, ainsi que des règles métiers du concepteur. Certaines des inconnues que nous cherchons à calculer sont reliées entre elles impliquant ainsi une possibilité de réduire le nombre de paramètres à calculer. Lors du développement de l'approche d'optimisation, nous avons choisi de les présenter indépendamment pour respecter la méthode de travail utilisé à PSA (Tableau 12)

| Système mécanique                     | Contraintes de conception considérées                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b><u>Volant d'inertie</u></b>        | <ul style="list-style-type: none"> <li><b><u>Les contraintes de performances</u></b></li> </ul> $C1 : \frac{1}{2} I_{VI} \omega_{VI\_min}^2 \leq E_{CVI\_min} (1 - 0.01)$ $C2 : \frac{1}{2} I_{VI} \omega_{VI\_max}^2 \leq E_{CVI\_max} (1 + 0.01)$ $C3 : \frac{1}{2} I_{VI} \omega_{VI\_min}^2 \geq E_{CVI\_min} (1 + 0.01)$ $C4 : \frac{1}{2} I_{VI} \omega_{VI\_max}^2 \geq E_{CVI\_max} (1 - 0.01)$ <ul style="list-style-type: none"> <li><b><u>Les contraintes de fonctionnement</u></b></li> </ul> <p>Ces contraintes correspondent aux critères de limite d'éclatement d'un disque en rotation et définissent implicitement une vitesse limite de rotation.</p> $C5 : \rho \frac{(R_{TE} \omega_{VI\_max})^2}{4} [r_{ext\_VI}^2 (3 + \mu) + r_{int\_VI}^2 (1 - \mu)] \leq \sigma_{maxi\_elastique}$ <ul style="list-style-type: none"> <li><b><u>Les contraintes d'implantation</u></b></li> </ul> <p>Ces contraintes correspondent aux critères d'implantation du GMP dans la plateforme véhicule considérée</p> $C6 : r_{ext\_VI}^2 \leq 270mm$ $C7 : r_{int\_VI} + 10mm \leq r_{ext\_VI}$ $C8 : r_{int\_VI}^2 \geq 240mm$ $C9 : (L_{elec\_VI} + L_{axial\_VI}) \leq 110mm$ $C10 : L_{elec\_VI} \leq 80mm$ $C11 : masse_{VI} \leq 20Kg$ |
| <b><u>Le système de réduction</u></b> | <ul style="list-style-type: none"> <li><b><u>Les contraintes d'implantation</u></b></li> </ul> $C12 : d_{pC} \leq (2 r_{int\_VI}) - 12mm$ $C13 : d_{pS} \geq 40mm$ $C14 : d_{pP} \geq 40mm$ $C15 : R_{TE} \omega_{VI\_max} \leq 10000tr/mn$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b><u>Le système de couplage</u></b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li><b><u>Les contraintes d'implantation</u></b></li> </ul> <p>Ces contraintes correspondent à des règles métiers relatives aux calculs des dentures des engrenages mécaniques. Les valeurs considérées correspondent à des hauteurs de dentures à prendre en compte.</p> $C16 : d_{ext\_Emb\_VI} \leq (d_{pC} - 3mm)$ $C17 : d_{ext\_Emb\_Mth} \leq (d_{int\_Emb\_VI} - 10mm)$ $C18 : d_{ext\_Emb\_VI} - d_{int\_Emb\_VI} \leq 10mm$ $C19 : d_{ext\_piston\_Emb} \leq (d_{int\_Emb\_VI} - 10mm)$ $C20 : d_{ext\_Emb\_Mth} - d_{int\_Emb\_Mth} \leq 10mm$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>C21 : <math>d_{int\_piston\_Emb} \geq 40mm</math><br/> C22 : <math>d_{ext\_piston\_Emb} - d_{int\_piston\_Emb} \geq 10mm</math></p> <p>• <b><u>Les contraintes de fonctionnement</u></b></p> <p>Ces contraintes correspondent à un critère de sécurité fixé à une marge de 2% sur le couple transmissible de l'embrayage par rapport à son couple maximal défini par le fournisseur.</p> <p>C23 : <math>CT_{maxi\_Emb\_VI} \leq (1.02CT_{maxi})</math><br/> C24 : <math>CT_{maxi\_Emb\_Mth} \leq (1.02CT_{maxi})</math><br/> C25 : <math>CT_{maxi\_Emb\_VI} \geq (0.98CT_{maxi})</math><br/> C26 : <math>CT_{maxi\_Emb\_Mth} \geq (0.98CT_{maxi})</math></p> |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**Tableau 12-les contraintes de conception considérées pour le système SS2**

En considérant les **26 contraintes** de conception que le système doit satisfaire, nous sommes amenés à définir et optimiser les **23 paramètres structurels qui correspondent aux degrés de liberté du système SS2 considérés à ce niveau systémique**, tout en cherchant à minimiser la masse du volant d'inertie. En effet, nous ne pouvons pas utiliser un volant lourd du fait de la complexité de l'environnement véhicule dans lequel nous travaillons qui nous contraint en termes de masse globale de la chaîne de transmission.

Le problème d'optimisation s'exprime alors par le calcul des **degrés de liberté du système SS2** (les inconnus du problème) qui respectent les **contraintes de conception** considérées et qui permettent de **minimiser la fonction objective** suivante :

$$f = (masse_{VI} - 20)^2$$

Nous chercherons alors à converger vers des valeurs de masse du volant d'inertie qui se rapprochent de 20 kg qui représente une valeur cible réaliste.

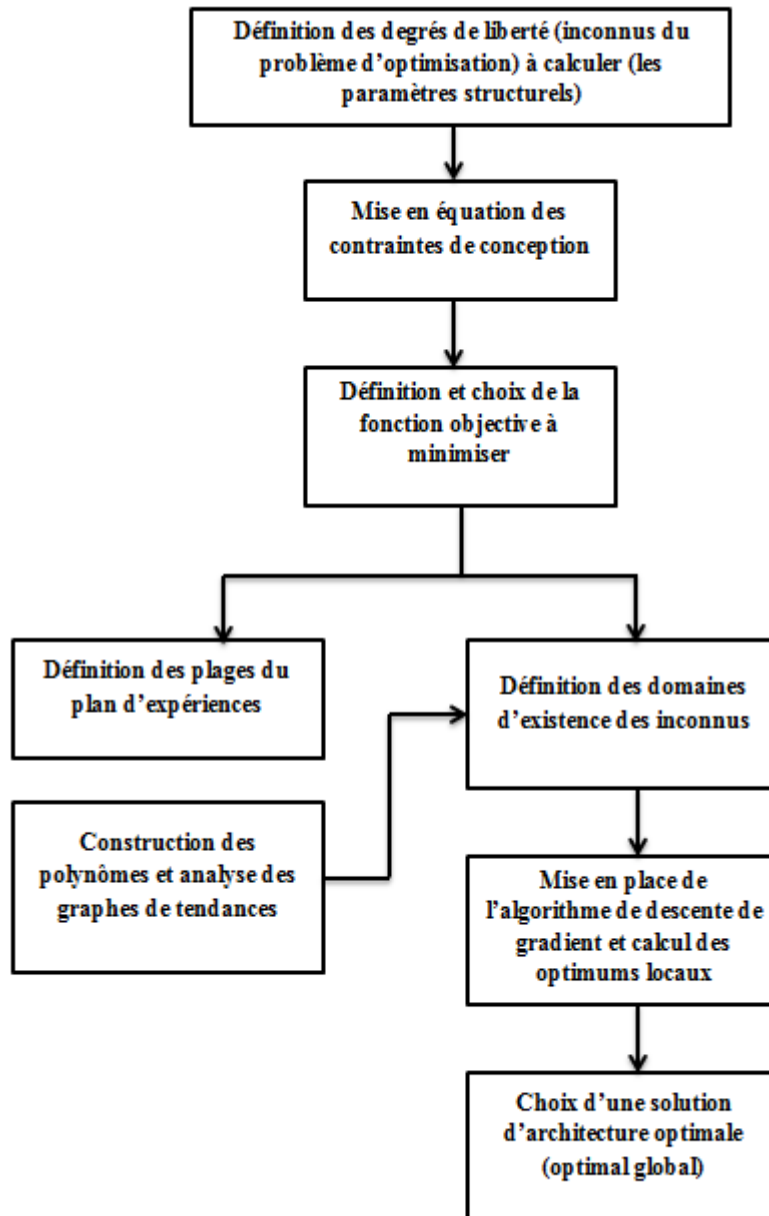
## **2. Approche d'optimisation de l'architecture structurelle**

Dans le but de définir et d'optimiser l'architecture organique du système, nous avons mis en place une démarche de conception (Figure 67) qui permet grâce à l'utilisation des approches d'optimisation mentionnées dans le paragraphe précédent (optimisation à l'aide des algorithmes de descente de gradient ou des algorithmes génétiques, études et analyses des tendances d'évolution des degrés de liberté du système à travers les plans d'expériences et les polynômes de tendances), d'évaluer plusieurs solutions de conception organique du système souhaité et de choisir celle correspondant à l'optimum global.

Cette démarche est similaire à celle effectuée pour l'optimisation du cahier des charges du projet de conception et consiste à étudier les tendances d'évolution des paramètres structurels que nous cherchons à calculer par rapport à la fonction objective considérée. Ces tendances vont par la suite nous orienter vers les améliorations possibles relatives aux dimensions de l'espace structurel et se traduisent par des réajustements des intervalles d'existence des degrés

de liberté (paramètres structurels), à partir desquels nous effectuons un calcul d'optimisation pour minimiser la fonction objective à l'aide d'un algorithme de descente de gradient.

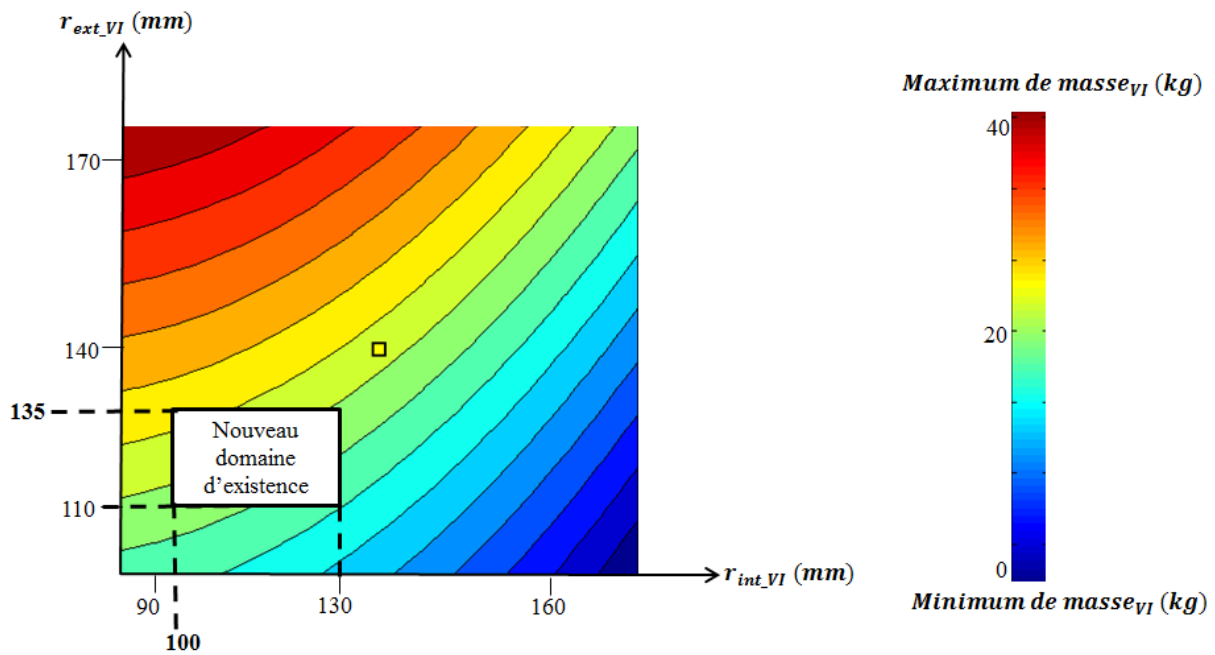
La solution retenue est par la suite intégrée dans un outil CAO permettant de modéliser l'architecture organique du système à concevoir.



**Figure 67. Approche d'optimisation de l'architecture mécanique et de définition de l'espace structurel**

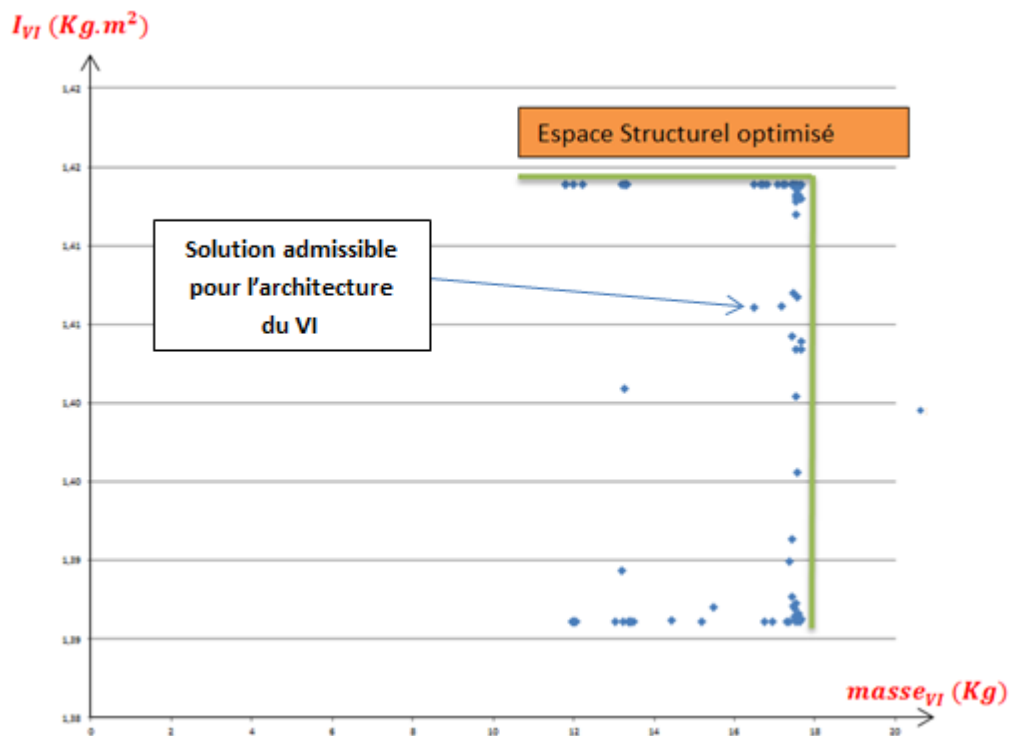
### 3. Simulation et conception de l'architecture structurelle du système

Les résultats obtenus par le plan d'expériences et les polynômes de tendances, nous oriente vers des reconsiderations des dimensions de l'espace structurel de conception considéré. En effet, comme le montre par exemple le graphe de tendances relatif aux paramètres structurels  $r_{int\_VI}$  et  $r_{ext\_VI}$  du volant d'inertie, si nous souhaitons converger vers des solutions d'architecture du volant telle que sa masse ne dépasse pas les 20 kg, il est suffisant de considérer les domaines d'existence présentés dans la Figure 68 par rapport aux paramètres  $r_{int\_VI}$  et  $r_{ext\_VI}$ . Ce qui réduit les dimensions de l'espace structurel relatif à ces deux degrés de liberté.



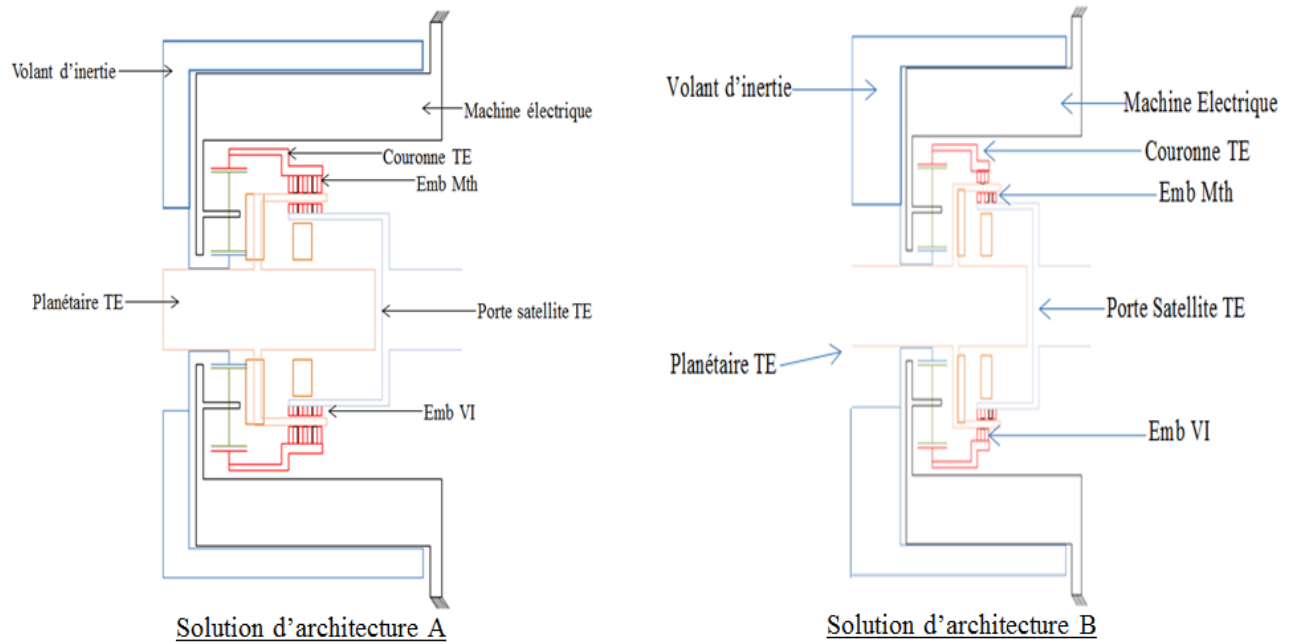
**Figure 68. Exemple de réduction des domaines d'existence des paramètres structurels du volant d'inertie**

Ces résultats permettent de définir l'espace structurel du système SS2 en intégrant des domaines d'existence relatifs aux degrés de liberté considérés qui respectent l'objectif de réduction de la masse du volant d'inertie (fonction objective du problème d'optimisation) (Figure 69).



**Figure 69. Définition de l'espace structurel du système volant d'inertie**

Ces résultats sont par la suite intégrés dans les domaines d'existences des degrés de liberté du système SS2 pour effectuer par la suite le calcul d'optimisation de la fonction objective considérée. Les résultats obtenus représentent différentes solutions d'architectures que nous avons analysées et comparées (Figure 70).



**Figure 70. Comparaisons entre les différentes solutions calculées**

Le choix de la solution retenue s'est basé sur le critère de la faisabilité issue du savoir-faire de l'expert métier par rapport aux différentes contraintes de conception que nous avons considérées. Le critère de PRF est assuré à travers la sélection d'une solution d'architecture organique faisant appel à des technologies qui sont déjà connues et existantes dans l'industrie dans le but de réduire les coûts.

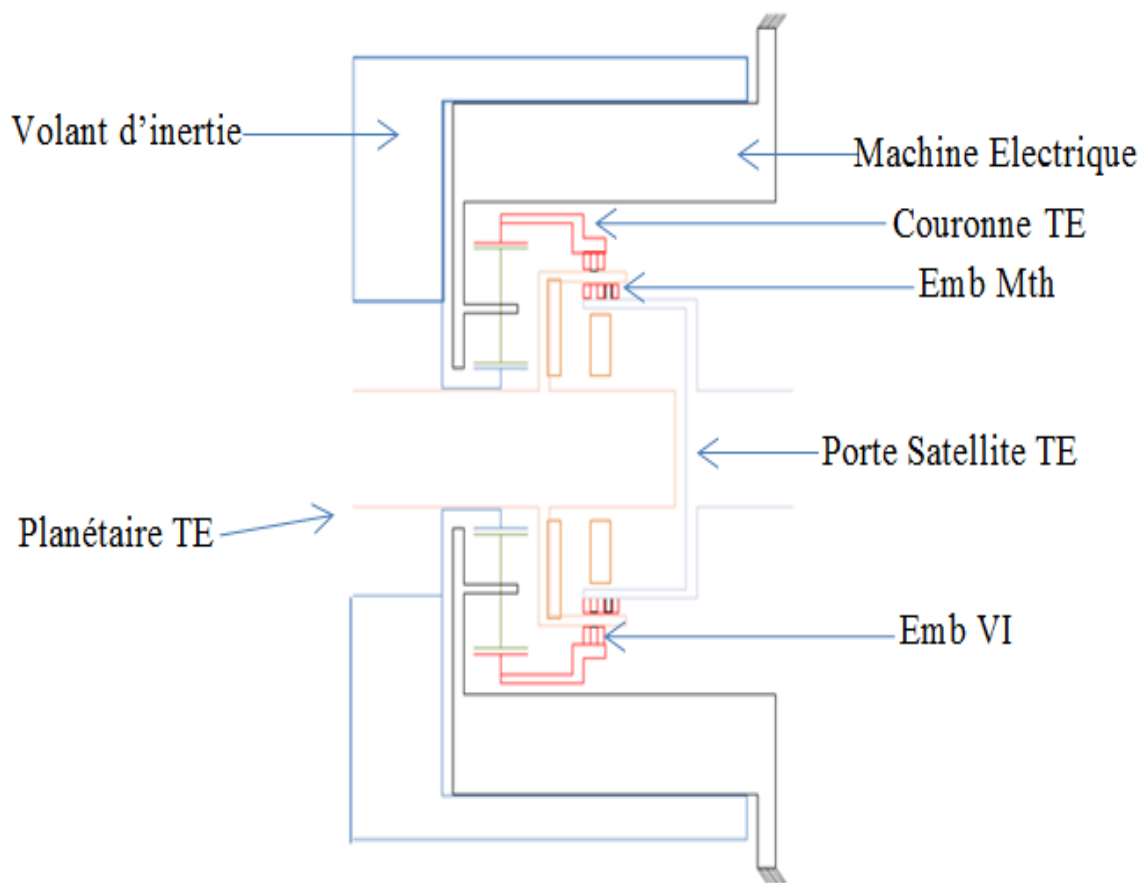
La solution que nous avons retenue pour le système SS2 est alors la suivante (Tableau 13):

|                                  |        |
|----------------------------------|--------|
| $R_{TE}$                         | 2,5    |
| $I_{VI}(kg.m^2)$                 | 1,41   |
| $\omega_{VI_{min}}(tr / mn)$     | 2000   |
| $\omega_{VI_{maxi}}(tr / mn)$    | 4000   |
| $r_{int\_VI}(mm)$                | 120    |
| $r_{ext_{VI}}(mm)$               | 135    |
| $d_{pP}(mm)$                     | 55,2   |
| $d_{pC}(mm)$                     | 138    |
| $d_{ext\_Emb_{Mth}}(mm)$         | 113,06 |
| $d_{int\_Emb_{Mth}}(mm)$         | 103,06 |
| $n_{Emb_{Mth}}$                  | 2      |
| $n_{Emb_{VI}}$                   | 1      |
| $d_{int\_piston\_Emb_{Mth}}(mm)$ | 50,01  |
| $d_{ext\_piston\_Emb_{Mth}}(mm)$ | 93,06  |
| $\sigma_{maxi\_elastique}$       | 150,16 |
| $d_{pS}(mm)$                     | 41,4   |
| $masse_{VI}(kg)$                 | 17,52  |

|                                 |        |
|---------------------------------|--------|
| $d_{ext\_Emb\_VI} (mm)$         | 135    |
| $d_{int\_Emb\_VI} (mm)$         | 123,06 |
| $L_{elec\_VI} (mm)$             | 85,07  |
| $L_{axial\_VI} (mm)$            | 24,92  |
| $d_{int\_piston\_Emb\_VI} (mm)$ | 50,01  |
| $d_{ext\_piston\_Emb\_VI} (mm)$ | 117,19 |

**Tableau 13-Paramètres de structures de la solution d'architecture retenue**

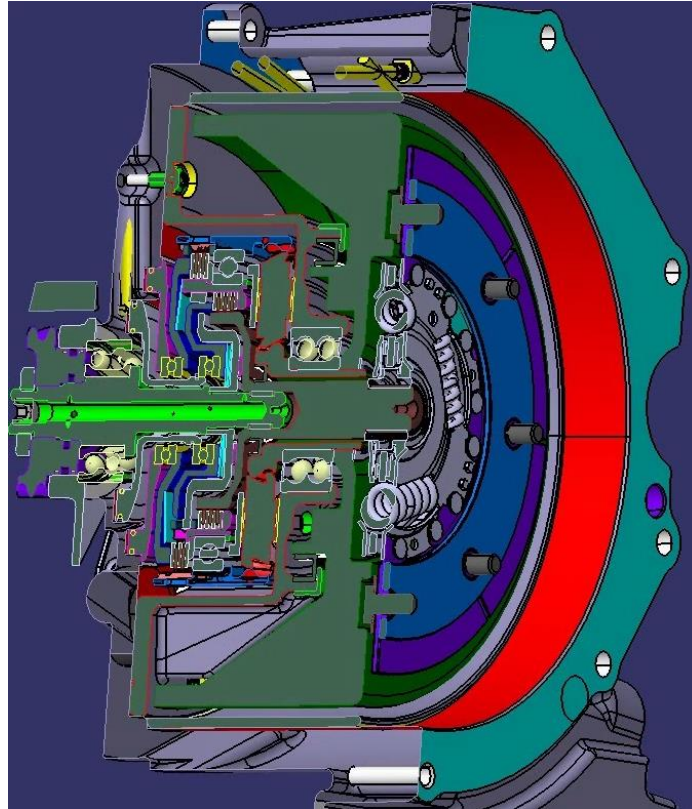
Le schéma cinématique et l'agencement des sous-systèmes de SS2 ont été présentés sous forme de graphiques paramétriques (Figure 71)



**Figure 71.Solution d'architecture optimale du système SS2**

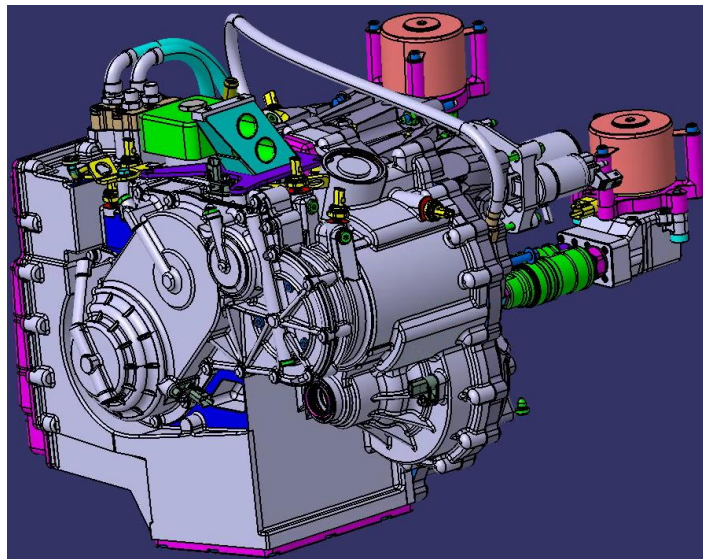
Ce graphique est par la suite repris comme référence pour le modèle CAO implémenté sous forme de volumes.





**Figure 72. Vue de coupe du système SS2 modélisé sous Catia**

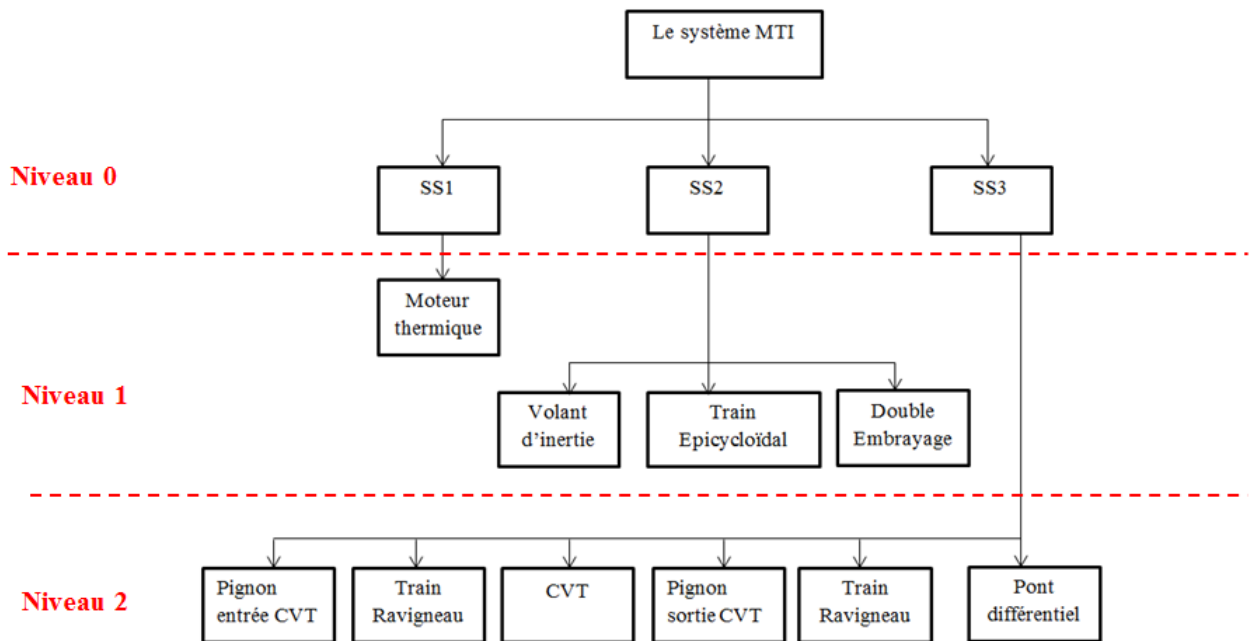
La définition et l'optimisation du système SS3 ont été effectuées à partir de la même approche, afin de définir les paramètres de structures de la transmission mécanique (Figure 73).



**Figure 73. Vue d'ensemble de l'architecture mécanique de la CDT MTI (système SS2 et SS3)**

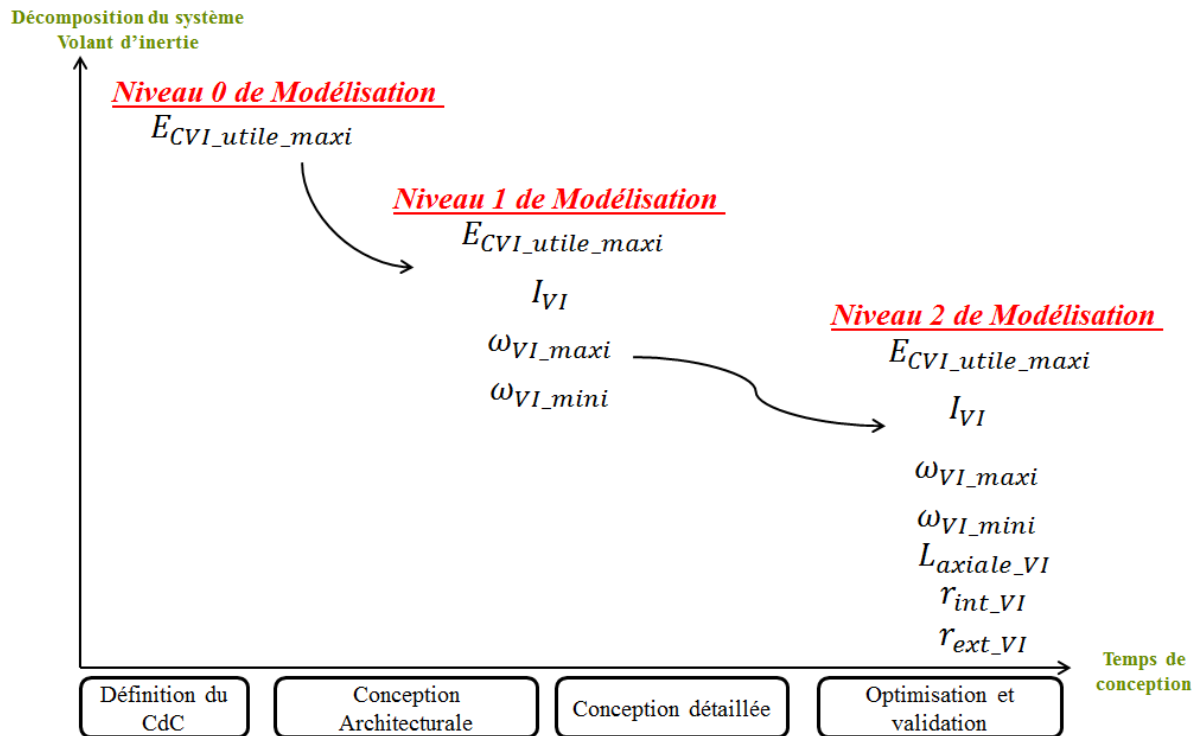
#### 4. Conclusions et présentation de l'espace structurel considéré pour le système MTI

La démarche de conception que nous avons présentée lors de ce paragraphe permet de définir les paramètres structurels relatifs à la conception d'un système concret. Cette démarche a été appliquée pour définir l'architecture organique du système MTI dans les niveaux systémiques 1 et 2 (Figure 74).



**Figure 74. Décomposition systémique de la CDT MTI de modélisation**

La représentation de chaque sous-système évolue au fur et à mesure que les niveaux systémiques de modélisation considérés changent. Lors du passage d'un niveau à un autre, de nouveaux paramètres caractéristiques du système apparaissent et s'ajoutent aux paramètres définis dans le niveau précédent comme le montre la (Figure 75) pour le système volant d'inertie par exemple.



**Figure 75. Evolution des paramètres descriptifs du volant d'inertie**

Le fait d'écrire analytiquement le problème de conception et d'utiliser des approches de calcul tels que les plans d'expériences et les polynômes de tendances, permet d'orienter les ingénieurs vers des domaines de conception plus réalistes et de réduire ainsi les dimensions de l'espace de conception dans lequel ils travaillent.

L'utilisation des algorithmes d'optimisation permet quant à elle de calculer plusieurs solutions optimisées par rapport au problème de conception et d'en déduire celle qui vérifie au mieux les fonctions de conception considérées.

Cette démarche permet ainsi de définir l'**espace structurel** et l'architecture organique relative à la mécanique interne du système MTI.

## V. Approche de définition de l'espace comportemental Définition des spécifications et optimisation énergétique pour le contrôle du système MTI aux niveaux 1 et 2:

Après avoir défini l'architecture organique et fonctionnelle du système MTI, nous nous intéressons dans ce paragraphe à la modélisation de son comportement dans son environnement véhicule. Ceci est effectué à partir de l'élaboration d'une stratégie de contrôle et de pilotage des différents organes du système afin de le faire fonctionner correctement et de pouvoir évaluer ses performances (consommation, distance ZEV, etc.)

A ce stade de la modélisation, les fonctions de conception que le système doit satisfaire sont celles déjà considérées dans l'espace technologique et structurel relatives aux différentes prestations requises :

- La fonction 'Prestations et performances' ; la stratégie de contrôle doit permettre d'assurer les différentes prestations dynamiques du véhicule avec la chaîne de transmission MTI, ainsi que les prestations liées à l'agrément de conduite, tout en respectant les contraintes considérées par rapport à la consommation du moteur thermique et l'autonomie en distance ZEV.
- La fonction 'SDF' ; dans le sens où la stratégie de contrôle doit prendre en compte les éventuels risques liés à un possible dysfonctionnement du système MTI afin de protéger l'utilisateur.

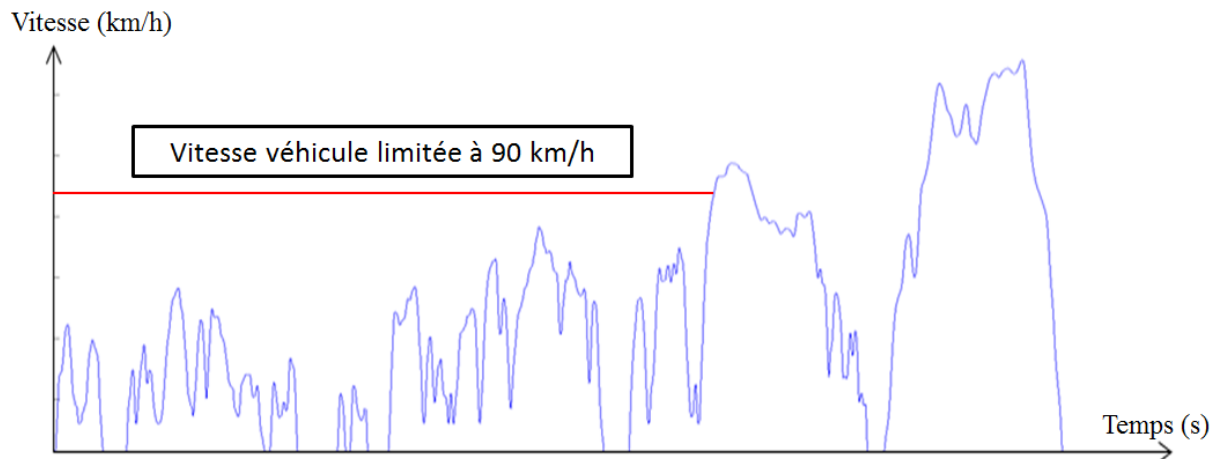
Cette étape se base principalement sur les lois physiques qui gouvernent le système MTI ainsi que ses composantes, et l'approche d'optimisation que nous avons utilisée pour définir la stratégie de contrôle fait aussi appel au principe d'équilibre énergétique entre ce que le système est capable de faire par rapport au besoin.

### **1. Mise en place de la stratégie énergétique et développement de la strate de contrôle pour le système MTI**

Etant donné que nous cherchons à minimiser la consommation du moteur thermique et maximiser la distance ZEV, nous souhaitons favoriser au mieux l'utilisation du volant d'inertie dans les phases de roulage car il possède un meilleur rendement comparé au moteur thermique. Il se trouve que l'utilisation du volant pendant les phases de fortes accélérations permanentes où le conducteur demande de fortes puissances sur une durée permanente le fait décharger rapidement.

$$\frac{dE_{CVI}}{dt} = P_{VI}$$

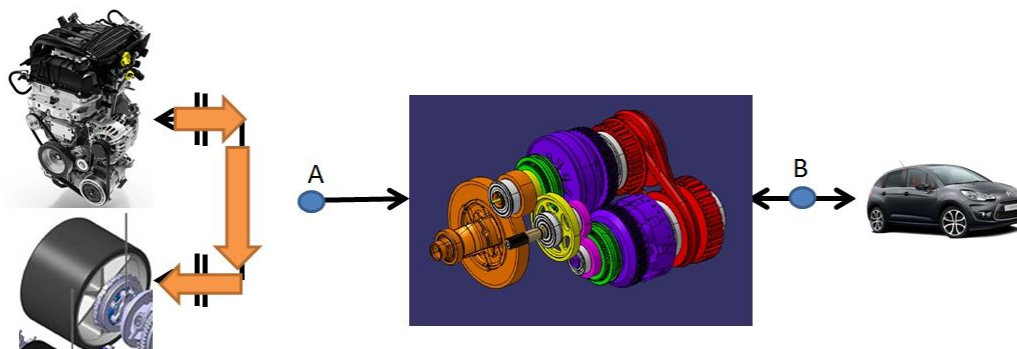
Pour éviter ce cas de fonctionnement, nous avons limité le mode hybride à une vitesse maximale de roulage qui est de 90 km/h, et nous avons autorisé uniquement la recharge par récupération dans ce cas de fonctionnement (Figure 76) :



**Figure 76. Limitation du roulage hybride à 90 km/h pour le cycle considéré WLTC**

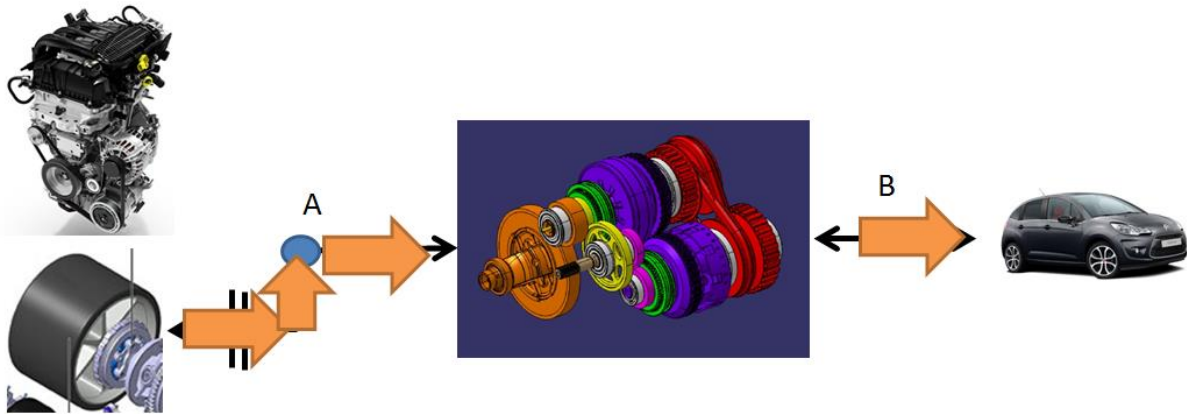
L'analyse des flux de transferts énergétiques, permet de comprendre et de recenser les différents cas de fonctionnement du système :

- Lorsque le moteur thermique est l'unique source d'énergie pour notre système et le véhicule est à l'arrêt : le moteur thermique permet de lancer et de recharger le volant jusqu'à son régime de rotation maxi (Figure 77).



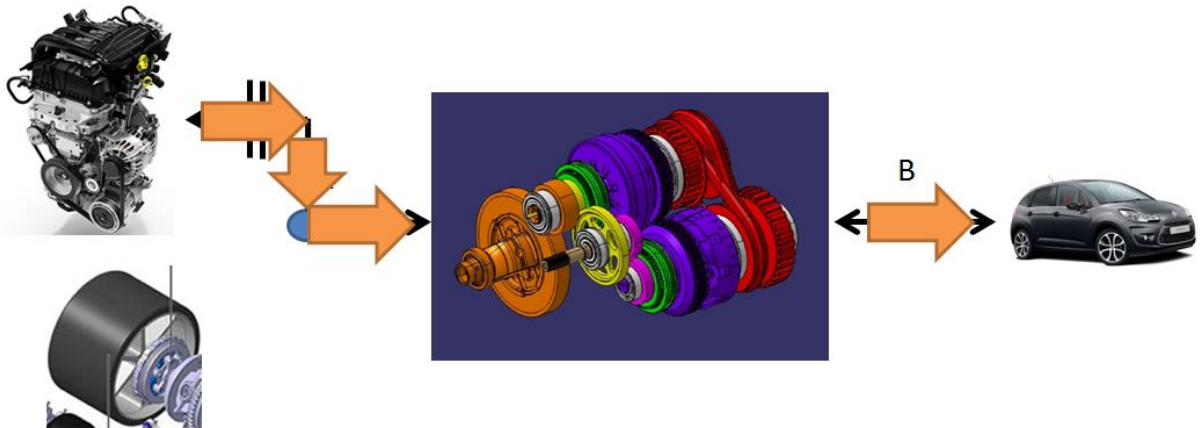
**Figure 77. Transfert d'énergie quand le véhicule est à l'arrêt**

- Lorsque le volant d'inertie est l'unique source d'énergie; il permet de fournir la puissance nécessaire pour le décollage et la propulsion du véhicule grâce à sa décharge c'est les modes de roulage en **full hybride mécanique** (Figure 78).



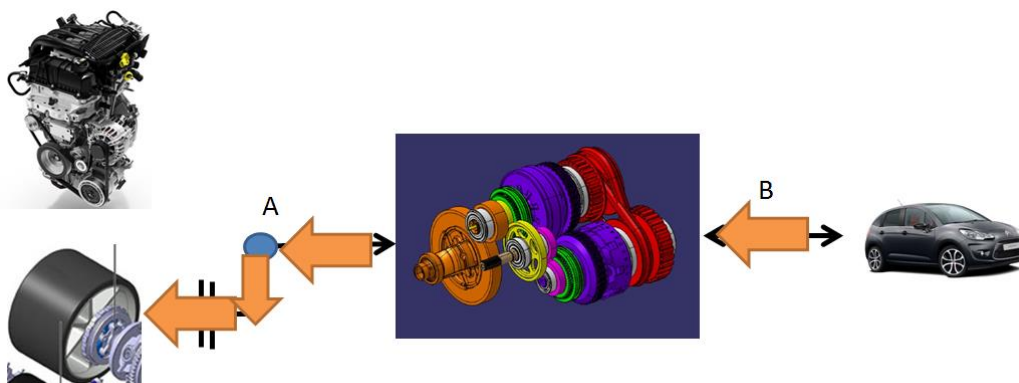
**Figure 78. Transfert d'énergie en roulage full hybride mécanique**

- Lorsque le moteur est l'unique source d'énergie pour le roulage du véhicule qui est en traction; toute la puissance demandée à la roue est issue du moteur thermique seul. Ceci correspond au cas du roulage en **full thermique** (Figure 79).



**Figure 79. Transfert d'énergie en roulage full thermique**

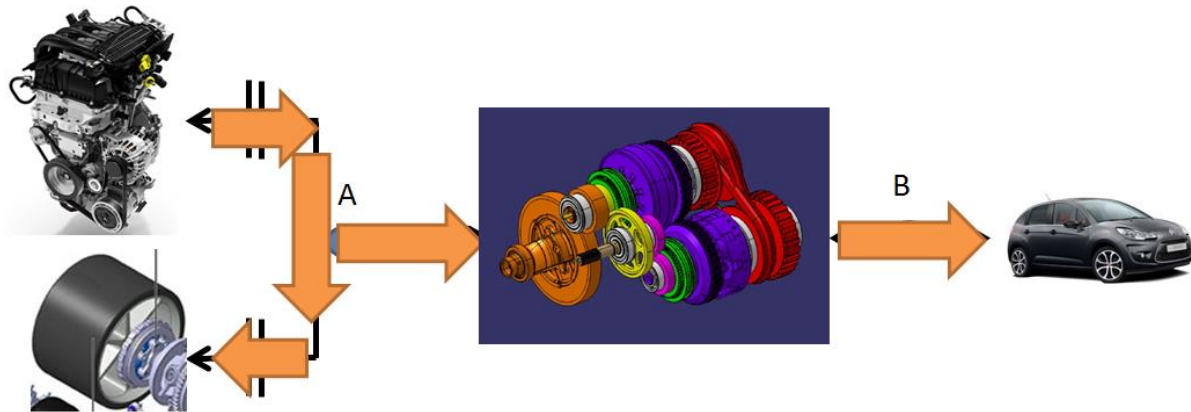
- Lorsque le véhicule est une source d'énergie ; A partir de sa décélération, il fournit de l'énergie pour charger le volant ce qui correspond au **freinage par récupération** (Figure 80).



**Figure 80. Transfert d'énergie en freinage par récupération**

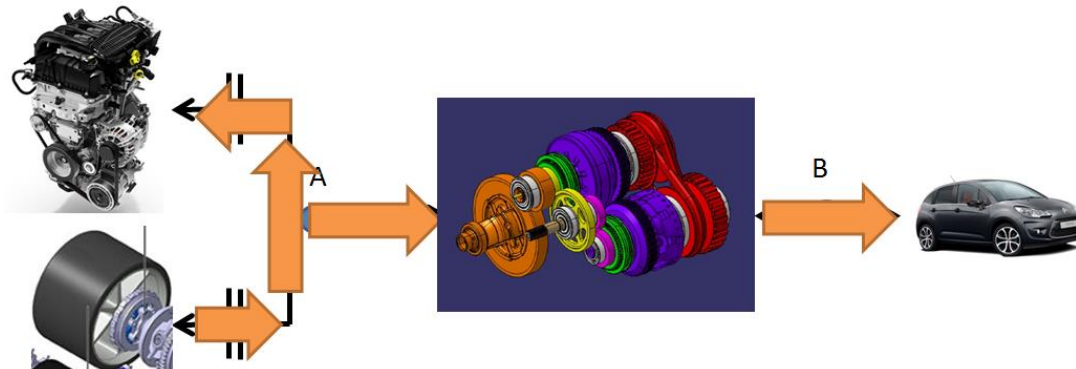


- Lorsque le moteur est l'unique source d'énergie, le véhicule est en traction et tous les embrayages sont fermés ; le moteur dans ce cas permet d'assurer la puissance demandée à la roue, mais aussi de charger le volant d'inertie jusqu'à son énergie maxi. Ceci correspond au **roulage mixte** étant donné que les deux sources d'énergie sont couplées (Figure 81).



**Figure 81. Transfert d'énergie en roulage Mixte**

- Lorsque le volant d'inertie est l'unique source d'énergie; il permet d'assurer la propulsion du véhicule, mais aussi de démarrer le moteur thermique (Figure 82).



**Figure 82. Transfert d'énergie pour le démarrage du Mth**

A partir de cette étude, il nous est possible de définir une stratégie de gestion d'énergie et de recenser par la suite les principaux modes de fonctionnement du système MTI (Tableau 14) :

|        |                                                                                                                    |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mode 1 | Lancement du volant d'inertie (quand le véhicule est à l'arrêt) par le moteur thermique                            |
| Mode 2 | Recharge du volant d'inertie par le moteur thermique jusqu'à son énergie maxi.                                     |
| Mode 3 | Les deux embrayages sont ouverts et le véhicule est à l'arrêt.                                                     |
| Mode 4 | <b>Décollage en Full thermique</b> : Décollage du véhicule à partir du moteur thermique.                           |
| Mode 5 | <b>Décollage en Full Hybride Mécanique</b> : Décollage du véhicule à partir du volant d'inertie en le déchargeant. |
| Mode 6 | <b>Propulsion en Full thermique</b> : Accélération du véhicule à travers le                                        |

|         |                                                                                                                                                                                                                       |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | moteur thermique.                                                                                                                                                                                                     |
| Mode 7  | <b>Propulsion en Full hybride Mécanique</b> : Accélération du véhicule à partir du volant d'inertie.                                                                                                                  |
| Mode 8  | <b>Démarrage du moteur thermique par le volant d'inertie</b> : le volant d'inertie continue à propulser le véhicule et permet de démarrer le Mth en même temps.                                                       |
| Mode 9  | <b>Propulsion en full thermique et recharge du volant d'inertie par le moteur thermique</b> : le moteur thermique fournit toute la puissance pour propulser le véhicule et recharge en même temps le volant d'inertie |
| Mode 10 | <b>Freinage Récupératif en full hybride mécanique</b> : Freinage du véhicule suite à la recharge du volant d'inertie.                                                                                                 |
| Mode 11 | <b>Freinage dissipatif</b> : le véhicule est décéléré à travers un système de freins qui dissipent l'énergie.                                                                                                         |

**Tableau 14-Les modes de fonctionnement du système MTI**

Chaque mode requiert des conditions de fonctionnement spécifiques et une stratégie de pilotage particulière. Nous avons pu développer une méthode de contrôle et de pilotage de notre système qui soit commune à tous les modes de fonctionnement : Quel que soit la source d'énergie, l'idée est d'appliquer le principe fondamental de la dynamique afin de déterminer l'accélération de l'arbre primaire pour établir la consigne d'accélération demandée à la roue.

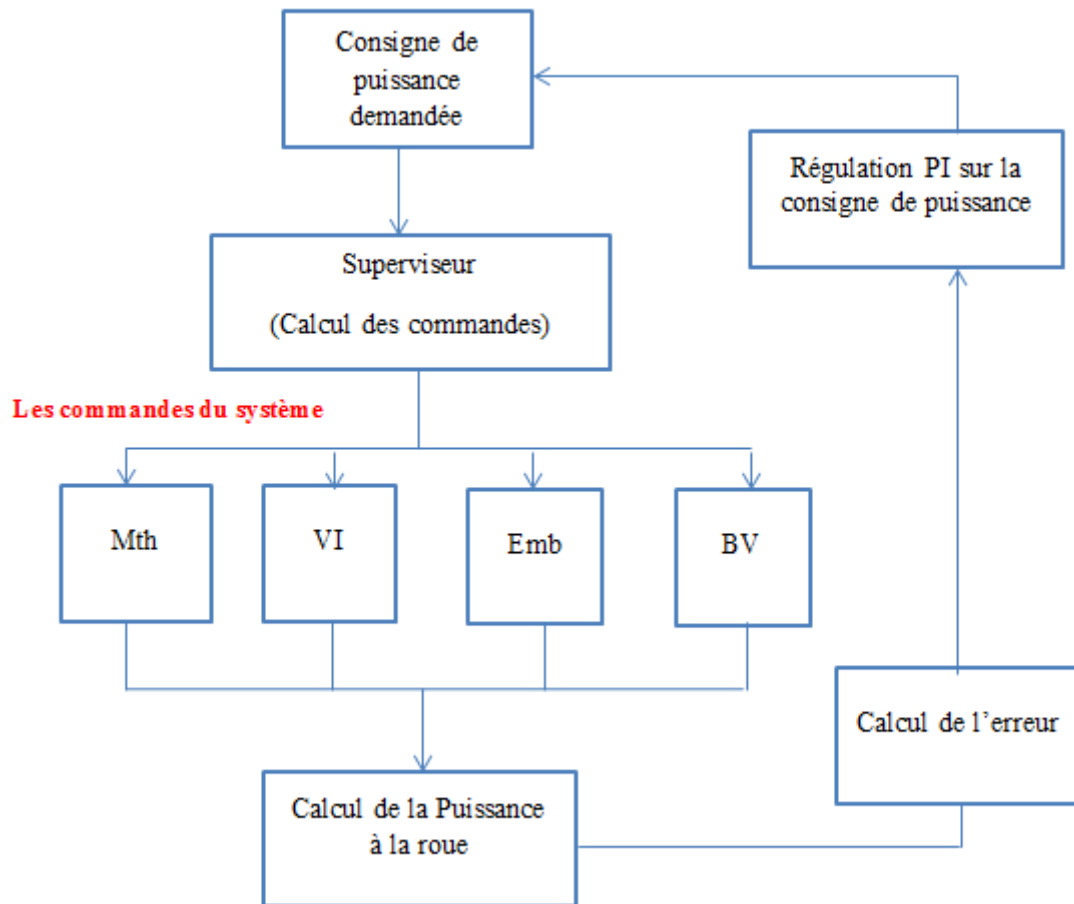
Du fait que le volant d'inertie est un élément de stockage d'énergie passif, ses cycles de charges et de décharges sont donnés par le rapport de réduction de la CVT. Les paramètres à commander pour chaque mode sont alors (Tableau 15) :

|         |                              |
|---------|------------------------------|
| Mode 1  | $C_{Mth}$                    |
| Mode 2  | $C_{Mth}$                    |
| Mode 3  | Aucun                        |
| Mode 4  | $CT_{Emb\_Mth} & R_{global}$ |
| Mode 5  | $CT_{Emb\_VI} & R_{global}$  |
| Mode 6  | $C_{Mth} & R_{global}$       |
| Mode 7  | $R_{global}$                 |
| Mode 8  | $CT_{Emb\_Mth} & R_{global}$ |
| Mode 9  | $C_{Mth} & R_{global}$       |
| Mode 10 | $R_{global}$                 |
| Mode 11 | $C_{frein} & R_{global}$     |

**Tableau 15-Paramètres de lois de commandes pour le système MTI**

La gestion des modes de fonctionnement ainsi que les conditions de passage d'un mode à un autre sont gérées par le même principe d'automates d'état finis que nous avons utilisé pour définir l'espace technologique et fonctionnel. Ces automates (Figure 83) sont aussi intégrés dans un système de supervision qui gère les commandes à envoyer à chaque organe à partir d'une interprétation de la volonté du conducteur (consigne de puissance demandée à la roue).





**Figure 83. Démarche de supervision et de calcul**

Le superviseur contient les automates d'états finis pour le système véhicule ainsi que celui de la CDT MTI, gère les conditions d'entrée/sortie d'un état à un autre et calcule les valeurs des paramètres des lois de commandes à envoyer au système (Figure 84). Ces conditions de passage (cf. Annexe A1) se basent sur l'état du véhicule, l'état du système défini au pas de temps précédent, le niveau d'énergie dans le volant et la consigne de puissance demandée à la roue. A partir de ces paramètres, le superviseur choisit le mode de fonctionnement à l'instant  $t$  et les paramètres des lois de commandes de chaque organe.

| Mode entrée |    |     |     |     |     |      |      |      |      |       |      |
|-------------|----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|-------|------|
| Mode sortie | 1  | 2   | 3   | 4   | 5   | 6    | 7    | 8    | 9    | 10    | 11   |
|             | 1  |     |     |     |     |      |      |      |      |       |      |
|             | 2  | 1-2 | 2   |     |     |      |      |      |      |       | 11-2 |
|             | 3  |     | 2-3 | 3   |     |      |      |      |      |       | 11-3 |
|             | 4  | 1-4 |     | 4   |     |      |      |      |      |       |      |
|             | 5  |     | 2-5 | 3-5 | 5   |      |      |      |      |       |      |
|             | 6  |     |     | 4-6 |     | 6    |      | 8-6  | 9-6  |       |      |
|             | 7  |     |     |     | 5-7 |      | 7    |      | 9-7  | 10-7  | 11-7 |
|             | 8  |     |     |     |     |      | 7-8  | 8    |      | 10-8  |      |
|             | 9  |     |     | 4-9 |     | 6-9  |      | 8-9  | 9    |       |      |
|             | 10 |     |     |     |     | 6-10 | 7-10 | 8-10 | 9-10 | 10    |      |
|             | 11 |     |     |     |     | 6-11 |      |      |      | 10-11 | 11   |

**Figure 84. Automate d'états finis des modes de fonctionnement**

Un système de régulation de signal formé d'un PI (proportionnel et intégrale) permet de diminuer l'écart entre la valeur de consigne de puissance à la roue et celle calculée, et d'ajuster les valeurs des paramètres de commandes pour réduire cet écart. Ce choix est basé sur la fiabilité de ce type de système de régulation qui est le plus utilisé dans les activités relatives au contrôle GMP.

La stratégie de gestion d'énergie développée à ce stade est basée sur des règles déterministes (défini dans le premier chapitre) grâce à l'intégration des machines d'états et permet de développer des lois de commandes à partir du suivi de la consigne de puissance demandée à la roue.

De par l'architecture organique que nous avons définie pour le système, le fait que le volant d'inertie se trouve entre le moteur thermique et la boîte de vitesse nous oblige à avoir le même régime de rotation entre les deux systèmes (le régime dont nous parlons pour le volant est celui mesuré en sortie du train épicycloïdal au niveau de l'arbre primaire de la boîte de vitesse) dans le cas où les deux embrayages (l'embrayage du volant d'inertie et l'embrayage du moteur) sont fermés. Ainsi, dans cette configuration le régime du moteur thermique est imposé par le régime de rotation du volant en prenant en compte la réduction considérée du train épicycloïdal. Ceci relie indirectement la consommation (étant donné la puissance est dépendante du régime et que la consommation est dépendante de la puissance) à la rotation du volant d'inertie et par la suite son état de charge.

Nous nous retrouvons alors face à un problème d'optimisation de fonctions multi-objectives dans lequel la possibilité de définir et d'optimiser une commande de répartition énergétique à l'aide des méthodes que nous avons présentées lors du premier chapitre devient complexe (recherche de commande optimale, etc.). Dans ce paragraphe, nous allons présenter une approche d'optimisation de la stratégie de gestion d'énergie qui permet définir les modes de fonctionnement du système MTI permettant d'assurer au mieux les fonctions de conception considérées tout en respectant les contraintes de consommation de distance ZEV calculés dans

le cahier des charges du projet lors de la définition de l'espace technologique et fonctionnel (Tableau 10). Les lois de commandes et de contrôle sont par la suite déduites à partir de cette stratégie optimisée.

## 2. Approche d'optimisation de la stratégie de gestion d'énergie du système MTI

A partir de l'analyse des flux énergétiques du système, nous avons développé une approche qui permet d'optimiser la répartition de puissance entre les deux sources d'énergie c'est-à-dire le moteur thermique et le volant d'inertie. Cette approche permet de favoriser l'utilisation du volant d'inertie sur toute la phase de roulage et d'utiliser le moteur thermique sur ses points de meilleurs rendements.

En considérant les trois phases de roulage (véhicule à l'arrêt, véhicule en propulsion et véhicule en décélération), nous cherchons à optimiser la répartition de la puissance demandée aux sources d'énergie (moteur thermique et volant d'inertie) pendant la phase d'accélération dans laquelle la consommation du moteur est calculée. Pour ce faire, nous nous sommes basées sur le même principe de l'équilibre d'énergie utilisé dans la partie d'optimisation du CdC :

$$P_{roue} = P_{Mth}\eta_{transmission} + P_{VI}\eta_{VI}\eta_{transmission}$$

Cette équation est utilisée à chaque instant  $t$  pour calculer la quantité d'énergie transférée entre le véhicule et les sources d'énergie.

En considérant le profil de vitesse du cycle WLTC, il est possible d'améliorer la valeur du rendement de recharge par récupération du volant d'inertie calculé comme suit :

$$\eta_{recharge\_par\_récupération} = \frac{dE_{CVI}}{dE_{C\_décélération}}$$

Cette valeur est obtenue à partir de la quantité d'énergie que le volant est capable de stocker par rapport à la quantité d'énergie disponible lors des phases de décélération. Afin d'améliorer cette valeur, nous devons nous assurer que lors du freinage du véhicule, le volant est capable de stocker le maximum de la quantité  $E_{C\_décélération}$ . Ceci s'effectue en fixant des contraintes énergétiques sur le système MTI:

- L'énergie cinétique du volant d'inertie doit toujours être égale à sa valeur minimale au moment où le conducteur commence la décélération du véhicule

$$E_{CVI}(t_{début\_décélération}) = E_{CVI\_min}$$

Afin de satisfaire cette contrainte, une gestion particulière des flux énergétiques dans la phase d'accélération du véhicule doit être réalisée.

Nous rappelons que les modes de roulage qui peuvent exister dans la phase d'accélération du véhicule sont (cf. paragraphe V.1) :

- Le mode full hybride mécanique (mode 7)
- Le mode full thermique (mode 6)
- Le mode mixte (mode 9)

L'approche que nous avons développée concerne uniquement le roulage en mode mixte du véhicule. Le problème d'optimisation que nous cherchons à résoudre consiste à **trouver un compromis énergétique permettant de réduire le temps d'utilisation du moteur thermique et le faire toujours fonctionner sur ses points de meilleurs rendements dans le mode mixte**. Le passage du mode full hybride mécanique vers le mode mixte s'effectue quand le moteur thermique est capable de fournir une puissance supérieure à la puissance consigne demandée à la roue moyennant les rendements relatifs. Le surplus de puissance sert à recharger le volant pendant ce mode.

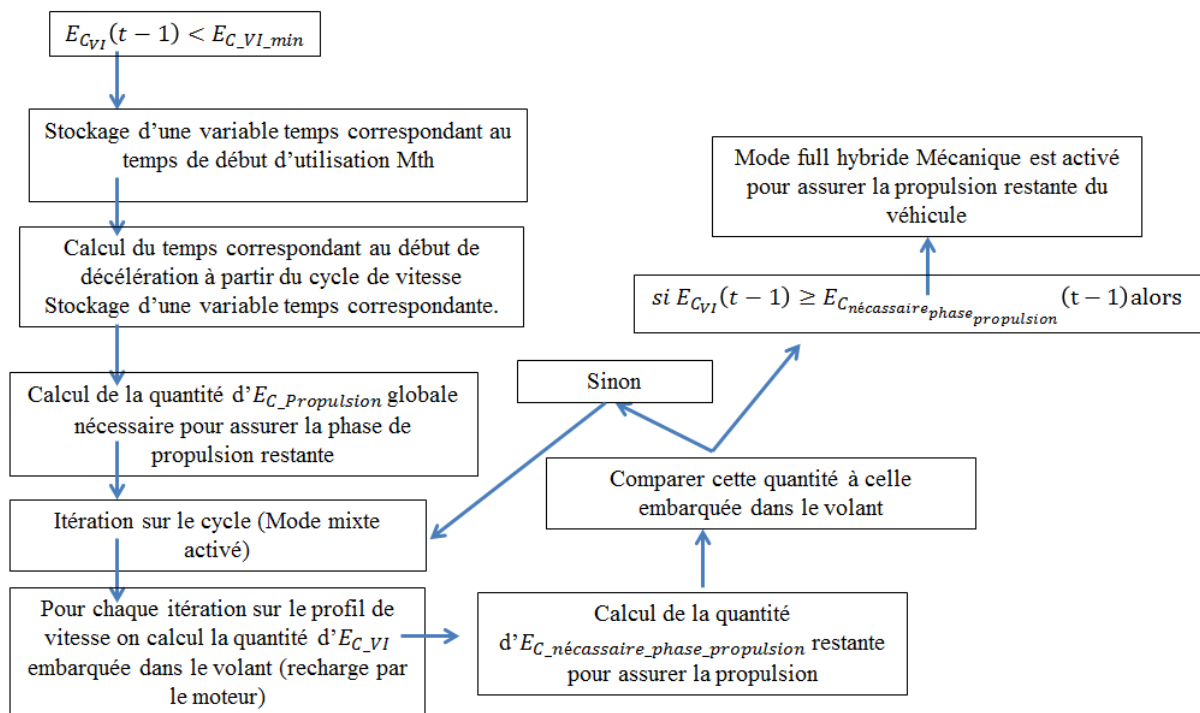
### *2.1.Stratégie de gestion d'énergie optimisée*

A partir du profil de vitesse du véhicule, il est possible de déterminer la vitesse correspondant au moment de début de décélération. Cette valeur est par la suite utilisée pour calculer la quantité d'énergie cinétique restante nécessaire à la propulsion du véhicule afin de pouvoir réaliser l'accélération complète jusqu'à l'instant  $t_{début\_décélération}$ .

Pour chaque pas de calcul, cette quantité d'énergie est comparée à celle emmagasinée dans le volant d'inertie qui est en train d'être rechargé à partir du surplus de puissance fournie par le moteur thermique. Le mode mixte (mode 9) est alors maintenu jusqu'à ce que l'énergie disponible dans le volant d'inertie devienne supérieure ou égale à celle nécessaire pour assurer la phase de propulsion restante (Figure 85).

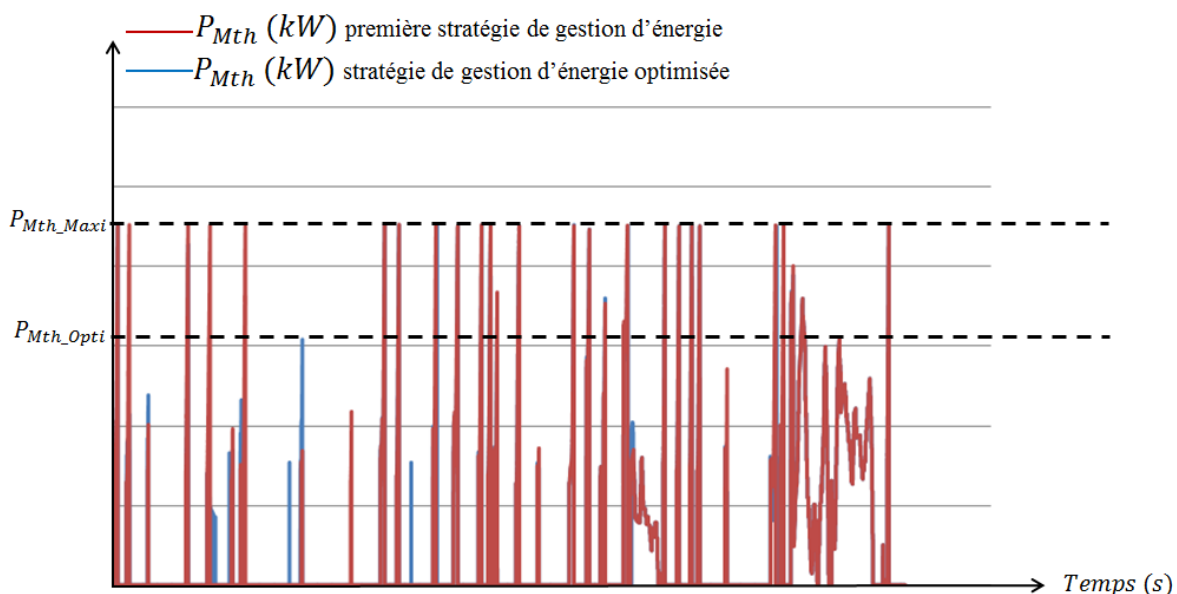
$$E_{C_{nécessaire_{phase_{propulsion}}}}(t) \leq dE_{CVI}(t) - E_{CVI\_min}$$

Dans ce cas, le mode full hybride mécanique est activé et le volant d'inertie prend en charge l'accélération du véhicule jusqu'à la phase de décélération. Le moteur thermique est alors arrêté via son embrayage qui est ouvert.



**Figure 85. Approche d'optimisation énergétique du système MTI**

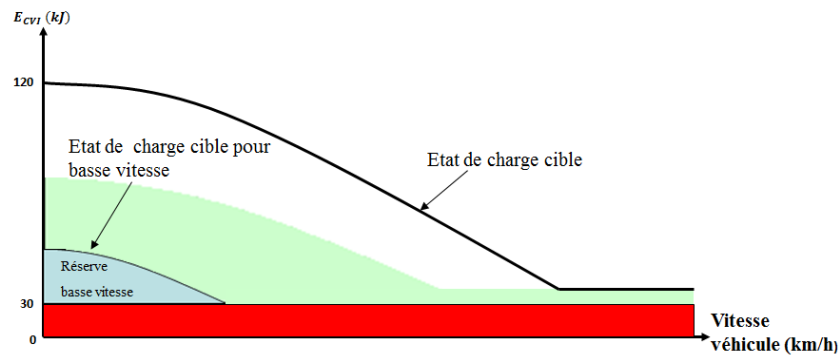
Cette approche permet de charger le volant d'inertie au juste besoin nécessaire et suffisant pour assurer la propulsion restante du véhicule, ce qui réduit le temps de fonctionnement du moteur thermique et le fait toujours fonctionner sur ces points de meilleurs rendements (Figure 86) et par la suite sa consommation.



**Figure 86. Fonctionnement du moteur thermique pour les deux stratégies de gestion d'énergie développées**

Elle est applicable sur tous types de CDT hybrides et contrairement à l'approche à l'aide du principe de Pontriaguine pour le calcul de la commande optimale qui est l'approche

d'optimisation énergétique communément utilisée pour les CDT hybrides électriques, elle permet de prendre en compte le fonctionnement dépendant des deux sources d'énergie du système MTI. Cependant, du fait qu'elle dépend du profil de vitesse elle doit être ajustée afin de pouvoir être intégrée dans un calculateur pour faire du contrôle en temps réel. Ces ajustements permettent d'appréhender les temps de début d'accélération sans être dépendant du profil de vitesse, mais plutôt à partir d'une description de l'énergie souhaitée du volant d'inertie en fonction de la vitesse véhicule par exemple (Figure 87).



**Figure 87. Profil d'énergie du volant d'inertie en fonction de la vitesse du véhicule**

### 3. Simulation et développement des lois de commandes

#### 3.1. Calcul des lois de commandes

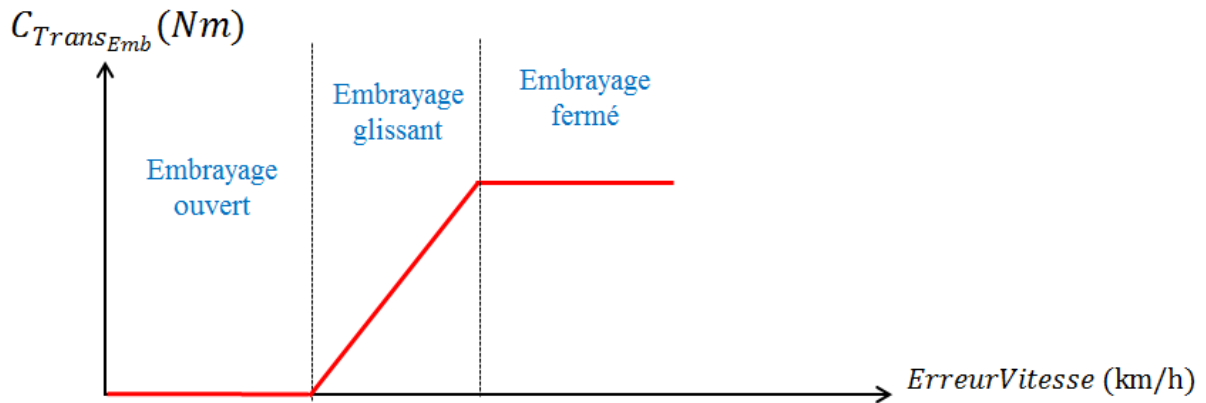
Afin de rendre l'approche indépendante des modes de fonctionnement, nous avons essayé de développer une relation de calcul qui permet de définir les paramètres de commandes du système quel que soit le mode de fonctionnement considéré.

Les trois systèmes de couplage qui existent entre les sources d'énergie et les roues du véhicule peuvent prendre trois états (Figure 88). Ils sont commandés par des couples transmissibles calculés d'une manière identique pour chacun d'eux et modélisé sous forme d'une rampe en fonction de l'erreur de vitesse :

$$CT_{Emb}(t) = Cste \times ErrVit(t)$$

Avec :

$ErrVit = CnsVit_{veh} - Vit_{veh}$  l'erreur calculée entre la consigne de vitesse du véhicule donnée par le profil du cycle WLTC et la vitesse du véhicule réelle calculée à partir des paramètres des lois de commandes envoyés au système.



**Figure 88. Les différents états des embrayages du système MTI**

A partir du mode de fonctionnement choisi ces embrayages peuvent être dans des états différents et gérés par des commandes différentes (Tableau 16) :

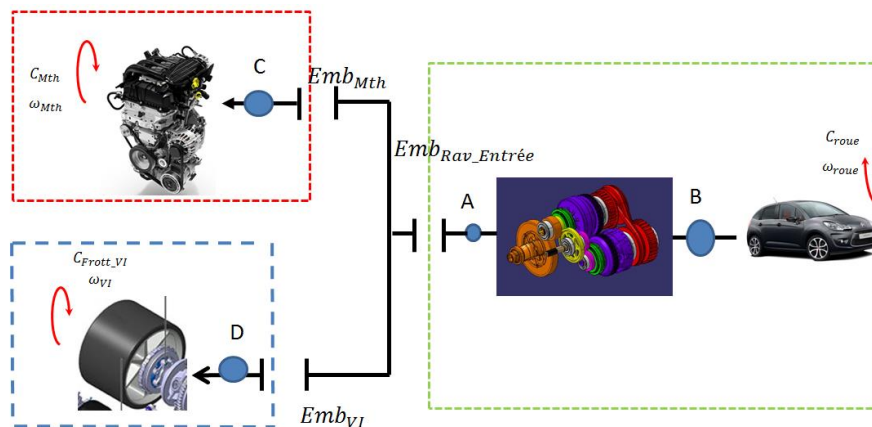
|         |                                                                                                                                                                                                               |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mode 1  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>CT_{Emb\_Mth}(t) = Cste \times ErrVit(t)</math></li> <li>• <math>CT_{Emb\_VI}(t) = cste</math></li> <li>• <math>CT_{Emb\_Rav\_ent}(t) = 0</math></li> </ul>    |
| Mode 2  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>CT_{Emb\_Mth}(t) = 0</math></li> <li>• <math>CT_{Emb\_VI}(t) = cste</math></li> <li>• <math>CT_{Emb\_Rav\_ent}(t) = 0</math></li> </ul>                        |
| Mode 3  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>CT_{Emb\_Mth}(t) = 0</math></li> <li>• <math>CT_{Emb\_VI}(t) = 0</math></li> <li>• <math>CT_{Emb\_Rav\_ent}(t) = 0</math></li> </ul>                           |
| Mode 4  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>CT_{Emb\_Mth}(t) = Cste \times ErrVit(t)</math></li> <li>• <math>CT_{Emb\_VI}(t) = 0</math></li> <li>• <math>CT_{Emb\_Rav\_ent}(t) = cste</math></li> </ul>    |
| Mode 5  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>CT_{Emb\_Mth}(t) = 0</math></li> <li>• <math>CT_{Emb\_VI}(t) = Cste \times ErrVit(t)</math></li> <li>• <math>CT_{Emb\_Rav\_ent}(t) = 0</math></li> </ul>       |
| Mode 6  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>CT_{Emb\_Mth}(t) = cste</math></li> <li>• <math>CT_{Emb\_VI}(t) = 0</math></li> <li>• <math>CT_{Emb\_Rav\_ent}(t) = cste</math></li> </ul>                     |
| Mode 7  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>CT_{Emb\_Mth}(t) = 0</math></li> <li>• <math>CT_{Emb\_VI}(t) = cste</math></li> <li>• <math>CT_{Emb\_Rav\_ent}(t) = cste</math></li> </ul>                     |
| Mode 8  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>CT_{Emb\_Mth}(t) = Cste \times ErrVit(t)</math></li> <li>• <math>CT_{Emb\_VI}(t) = cste</math></li> <li>• <math>CT_{Emb\_Rav\_ent}(t) = cste</math></li> </ul> |
| Mode 9  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>CT_{Emb\_Mth}(t) = cste</math></li> <li>• <math>CT_{Emb\_VI}(t) = cste</math></li> <li>• <math>CT_{Emb\_Rav\_ent}(t) = cste</math></li> </ul>                  |
| Mode 10 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>CT_{Emb\_Mth}(t) = 0</math></li> </ul>                                                                                                                         |

|         |                                                                                                                                                                                     |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>CT_{Emb\_VI}(t) = cste</math></li> <li>• <math>CT_{Emb\_Rav\_ent}(t) = cste</math></li> </ul>                                        |
| Mode 11 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>CT_{Emb\_Mth}(t) = 0</math></li> <li>• <math>CT_{Emb\_VI}(t) = 0</math></li> <li>• <math>CT_{Emb\_Rav\_ent}(t) = 0</math></li> </ul> |

**Tableau 16-Lois de commande des systèmes de couplages**

L'idée est de pouvoir piloter le système MTI à partir d'une seule loi de commande qui intègre les différents paramètres d'états et les commandes nécessaires. Cette loi est développée à partir de l'application du principe fondamental de la dynamique sur les systèmes suivants (Figure 89):

- Le moteur thermique et son embrayage (C)
- Le volant d'inertie avec son train épicycloïdal et son embrayage (D)
- La boîte de vitesse incluant l'embrayage du train ravigneau en entrée de la CVT (A)
- Le véhicule (B)



**Figure 89.Décomposition à partir des différents systèmes de couplage**

Les systèmes isolés sont définis à partir du mode de roulage considéré et l'état des embrayages du volant d'inertie, du moteur thermique et l'embrayage du train ravigneau qui se trouve en entrée de la boîte de vitesse.

La stratégie de pilotage du système MTI pour tous les modes de fonctionnement. Elle se base sur l'application du principe fondamental de la dynamique en entrée de la boîte de vitesse et en sortie du pont différentiel (au niveau des roues du véhicule) afin de déterminer la vitesse de rotation de l'arbre primaire  $\omega_{AP}$  qu'il faut avoir pour assurer la consigne de vitesse demandée à la roue.

En appliquant le PFD en sortie de la boîte de vitesse nous obtenons :

$$C_{SBV} + C_{LDR} = I_{Veh} \dot{\omega}_{roue}$$



Avec :

- $C_{LDR}$  est le couple représentatif des pertes du véhicule (les pertes aérodynamiques, la résistance au roulement, les effets gravitationnels).

En considérant les hypothèses de non glissements relatives aux engrenages mécaniques et l'évolution quasi-statique du système MTI, nous pouvons considérer les équations suivantes :

$$R_{global} = \frac{\omega_{roue}}{\omega_{AP}}$$

$$R_{global} = \frac{C_{AP}}{C_{SBV}} \eta_{transmission}$$

Avec :

- $\eta$  est le rendement de la transmission mécanique

La dérivée de ce rapport de réduction s'écrit alors :

$$\dot{R}_{global} = \frac{\dot{\omega}_{roue}\omega_{AP} - \omega_{roue}\dot{\omega}_{AP}}{\omega_{AP}^2}.$$

Cette grandeur représente la dynamique de changement de rapport de réduction qui nous donne le temps nécessaire pour passer d'une valeur de rapport  $R_{global}(t)$  vers  $R_{global}(t + 1)$ .

En exprimant la vitesse de rotation à la roue en fonction de la dérivée du rapport de réduction et de la vitesse de rotation de l'arbre primaire, et en intégrant cela dans l'équation du PFD (1) nous obtenons :

$$C_{SBV} + CLDR = I_{veh}(\dot{R}_{global}\omega_{AP} + \dot{\omega}_{AP}R_{global})$$

En exprimant le couple en sortie de la boîte de vitesse à l'aide du rapport de réduction et du couple de l'arbre primaire dans cette expression, nous obtenons :

$$\frac{C_{AP}}{R_{global}}\eta + CLDR = I_{veh}(\dot{R}_{global}\omega_{AP} + \dot{\omega}_{AP}R_{global})$$

En considérant par la suite :

$$\dot{\omega}_{AP}(t) = \frac{\omega_{AP}(t) - \omega_{AP}(t - 1)}{dt}$$

Et :

$$C_{AP} = I_{AP}\dot{\omega}_{AP}$$

Nous obtenons l'équation de mouvement du système qui exprime la vitesse de rotation de l'arbre primaire en fonction de la vitesse à la roue et de la dérivée du rapport de réduction :

$$\dot{\omega}_{AP} = \frac{I_{Veh} \dot{R}_{global} \omega_{AP}^{-1} - CLDR}{\frac{I_{AP}}{R_{global}} \eta - \dot{R}_{global} dt I_{Veh} - I_{Veh} R_{global}}$$

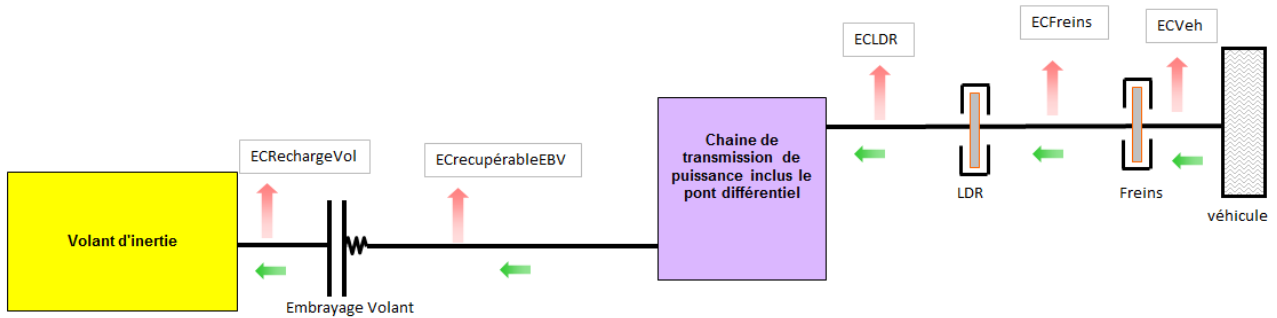
Ainsi, à partir d'un pilotage précis de la CVT via la dérivée de son rapport de réduction, nous pouvons calculer l'accélération de l'arbre primaire ainsi que les couples prélevés ou fournis au volant d'inertie. Et c'est précisément de cette façon que nous arrivons à commander le stockeur de manière à pouvoir assurer les différentes prestations requises telles que le décollage en mode full hybride, les accélérations pour les rapports longs et courts de la boîte de vitesse, etc.

Le moteur thermique est commandé par son couple  $C_{Mth}$  qui est déterminé à partir d'une interpolation linéaire dans la cartographie de  $C_{Mth\_opti} = f(P_{Mth\_Opti})$  ou bien

$C_{Mth\_maxi} = f(P_{Mth\_maxi})$  dans le cas où la puissance consigne demandée à la roue est supérieure à la puissance optimale que le moteur peut fournir pour un régime donné.

### 3.2.Simulation des stratégies de gestion d'énergie

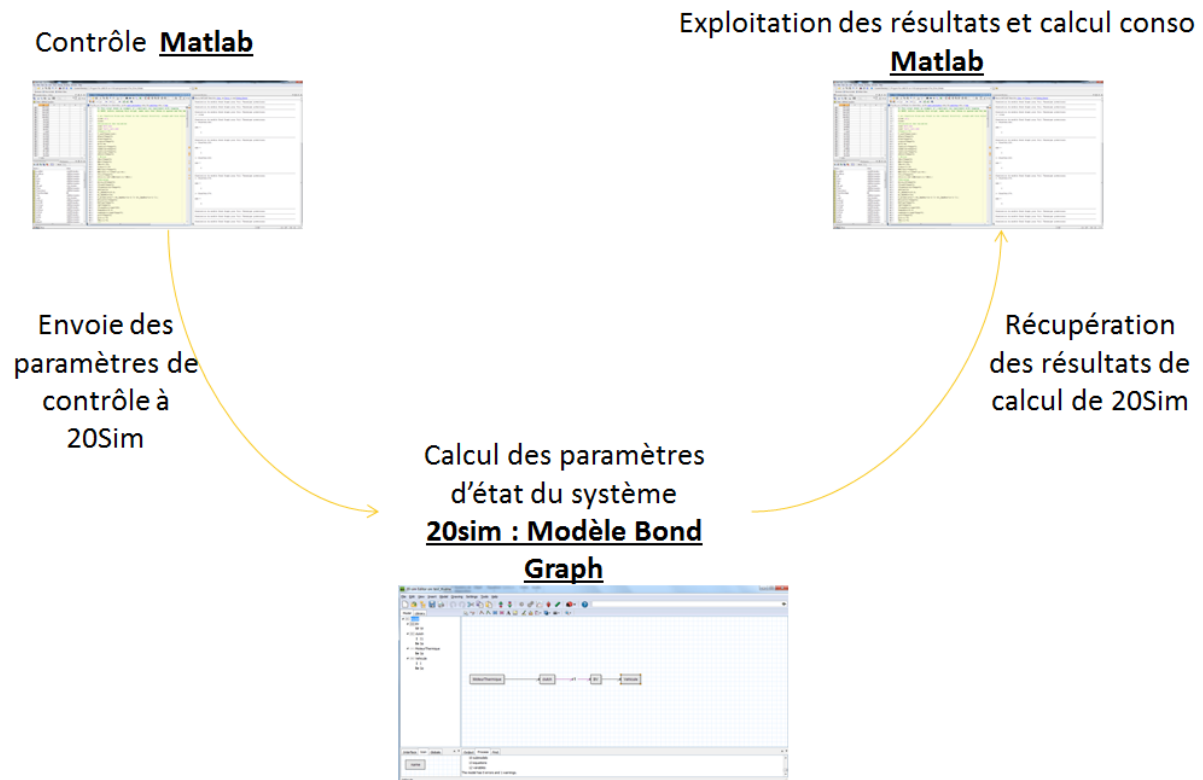
Pour simuler le comportement du système MTI par rapport aux différentes commandes calculées, nous avons utilisé des outils tels que Matlab pour faire la simulation numérique et le calcul et 20Sim pour la représentation Bond Graph. Du fait que notre approche d'optimisation énergétique se base sur le principe de transferts de flux énergétiques entre les différents composants (Figure 90), la modélisation par Bond Graph nous permet de représenter le système puis de déterminer ses équations physiques de façon automatique.



**Figure 90. Postes d'échanges d'énergie dans la branche hybride du système MTI**

L'idée consiste à exploiter la particularité de la représentation Bond Graph pour modéliser le système MTI. C'est-à-dire au lieu de définir ses équations de comportements, nous le modélisons sous 20sim par un formalisme Bond Graph (Figure 91).





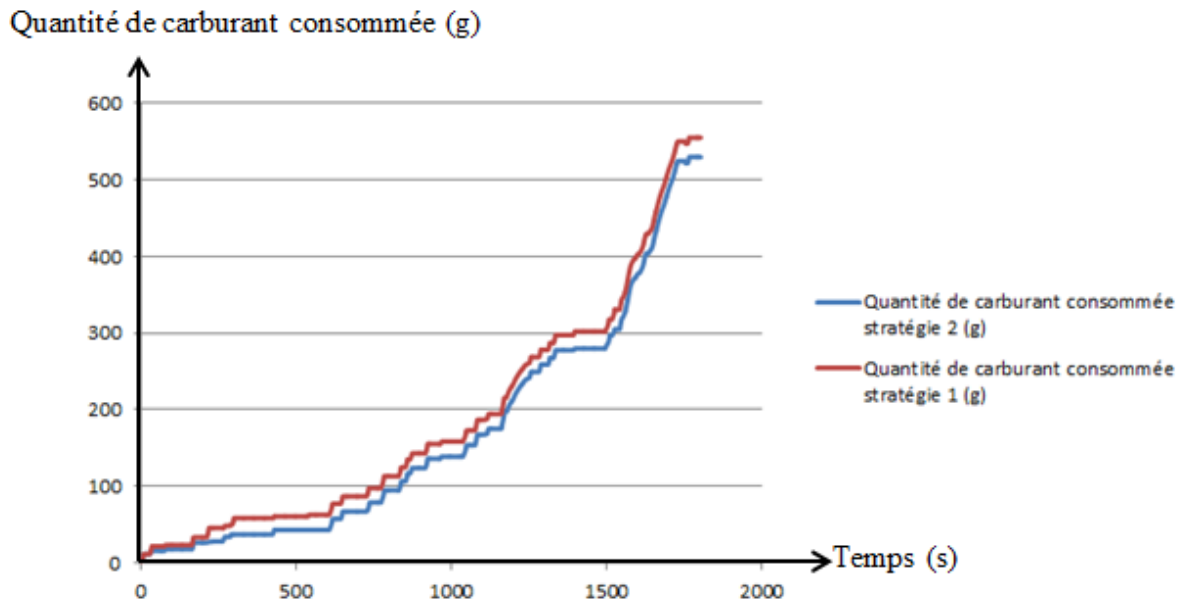
**Figure 92. Outils de simulation du comportement du système MTI**

L'interface de liaison entre les deux outils a été développée à partir d'un code spécifique qui permet l'échange, la lecture et l'extraction des informations souhaitées d'un modèle à un autre (Tableau 17) :

| Fonction                                                                   | Code correspondant                                                                                                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Chargement de la librairie 20Sim dans Matlab et connexion des deux modèles | <code>run ('../library/xxsim/xxsimAddToPath.m');</code><br><code>xxsimConnect();</code>                                                                                    |
| Connexion du modèle 20sim à simuler dans Matlab                            | <code>modelfile = fullfile(pwd, 'test_th.emx');</code><br><code>xxsimOpenModel( modelfile );</code>                                                                        |
| Connexion du script du modèle 20Sim                                        | <code>xxsimSetScriptMode(true);</code>                                                                                                                                     |
| Connexion au processeur de calcul 20sim dans Matlab                        | <code>xxsimProcessModel();</code>                                                                                                                                          |
| Envoie des paramètres de lois de commandes au modèle 20Sim                 | <code>xxsimSetParameters('MoteurThermique\Se\CMot',</code><br><code>Couple(i));</code><br><code>xxsimSetParameters('clutch\I1\alpha',</code><br><code>NMotOpti(i));</code> |
| Lancement de calcul sur 20Sim                                              | <code>xxsimRun;</code>                                                                                                                                                     |
| Récupération des résultats de calcul dans Matlab                           | <code>NMot(i)=xxsimGetValue('clutch.I1.p.f');</code>                                                                                                                       |

**Tableau 17-Interface de connexion développé entre les deux modèles**

Le fait de séparer le calcul des paramètres de lois de commandes et les paramètres d'états du système dans deux modèles différents a permis d'intégrer et tester plusieurs stratégies de contrôle dans un même modèle numérique Matlab et de pouvoir les comparer.



**Figure 93. Exemple de comparaison par rapport à la commande de la transmission mécanique en fonction du changement de la stratégie**

L'intérêt de ce type de simulation réside dans la possibilité d'évaluer et de comparer différentes stratégies de contrôle du système à concevoir dans un même modèle sans modifier le modèle de calcul de paramètres d'état élaboré sur 20sim.

L'approche d'optimisation énergétique est intégrée dans le modèle de contrôle numérique effectué sur Matlab. Cette approche (stratégie 2 dans la Figure 93) a été comparée par rapport à une stratégie énergétique de type impulsif (stratégie 1 dans la Figure 93) dans laquelle le mode mixte reste activé jusqu'à la phase de décélération. C'est-à-dire le moteur thermique au lieu de recharger le volant d'inertie au juste besoin énergétique nécessaire et suffisant, il continue à le recharger jusqu'à atteindre la valeur de  $E_{C_{VI\_max}}$  et tant que cette valeur n'a pas été atteinte le mode mixte reste activé et le moteur thermique assure la propulsion du véhicule et la recharge du volant d'inertie en même temps. Les résultats obtenus montrent un gain de l'ordre de 6 g/km sur la consommation du moteur thermique.

### ***3.3. Conclusion et définition de l'espace comportemental***

L'approche de modélisation et d'optimisation énergétique développée nous a permis de définir les paramètres de commande permettant de contrôler le comportement du système MTI et de gérer ses modes opérationnels afin d'arriver à tester les différents cas de

fonctionnement requis par les fonctions prestations et performances, définissant ainsi **l'espace comportemental**.

## **VI. Conclusion et présentation de l'environnement de conception du système technique**

Nous avons présenté tout au long de ce deuxième chapitre, les démarches de conception que nous avons développées afin de pouvoir définir les espaces métiers du système de CDT MTI.

En nous basant sur des approches d'optimisation présentées dans l'état de l'art (les algorithmes d'optimisation numériques, les méthodes d'optimisation de la stratégie de gestion d'énergie, les plans d'expériences, etc.), nous avons montré qu'il est possible de réduire les dimensions des espaces de conception d'un système concret à différents niveaux systémiques, tout en prenant en compte l'évolution des spécifications de conception. En effet, l'utilisation des plans d'expériences et des polynômes de tendance, permet d'orienter les ingénieurs vers des domaines d'existence réalistes des paramètres de conception considérés à ce niveau systémique (niveau systémique 0, 1 et 2). Ces domaines respectent alors les contraintes de conception considérées et assurent les fonctions requises pour le système à concevoir. Les résultats obtenus sont par la suite couplés à des approches d'optimisation à l'aide des algorithmes numériques (algorithme génétique, algorithme de descente de gradient, etc.) et des modèles énergétiques (optimisation de la stratégie de gestion d'énergie à partir des machines d'états et des principes de transfert de flux), permettant de définir une solution organique optimisée ainsi que les lois de commandes et de contrôle relatives à son fonctionnement dans l'environnement véhicule considéré.

Cependant, ces démarches de conception permettent certes de converger vers des solutions de conception optimales d'un point de vue local à l'espace métier considéré. En effet, chaque métier développe son modèle de validation en fonction de ses propres contraintes et propose par la suite la solution vers laquelle il a convergé aux autres experts. Plusieurs échanges et itérations sont alors amenées à avoir lieu afin de pouvoir coupler les solutions proposées et les assembler pour former le système final souhaité. Ce processus de convergence vers une solution de conception globale optimisée n'est pas évident à effectuer du fait que les solutions optimales calculées localement par chaque expert, sont issues de modèles de connaissances hétérogènes de par le caractère pluridisciplinaire du système.

C'est précisément cet aspect qui nous a conduits à mettre en place une approche basée sur le méta-modèle unifié PPO, permettant de faire collaborer les données des modèles d'expertises dès le début du projet et de vérifier pendant les différentes phases de conception si les contraintes d'expertises imposées sur le système à concevoir sont respectées ou non. Ceci permet de prendre en compte d'une façon continue les évolutions des espaces métiers et de permettre de prendre en compte rapidement la suppression et/ou la modification d'une donnée.

Le dernier chapitre de notre manuscrit est alors dédié à la présentation de cette approche de collaboration qui est illustrée par les résultats obtenus dans le cadre de son application lors de la conception du système de CDT MTI à PSA.

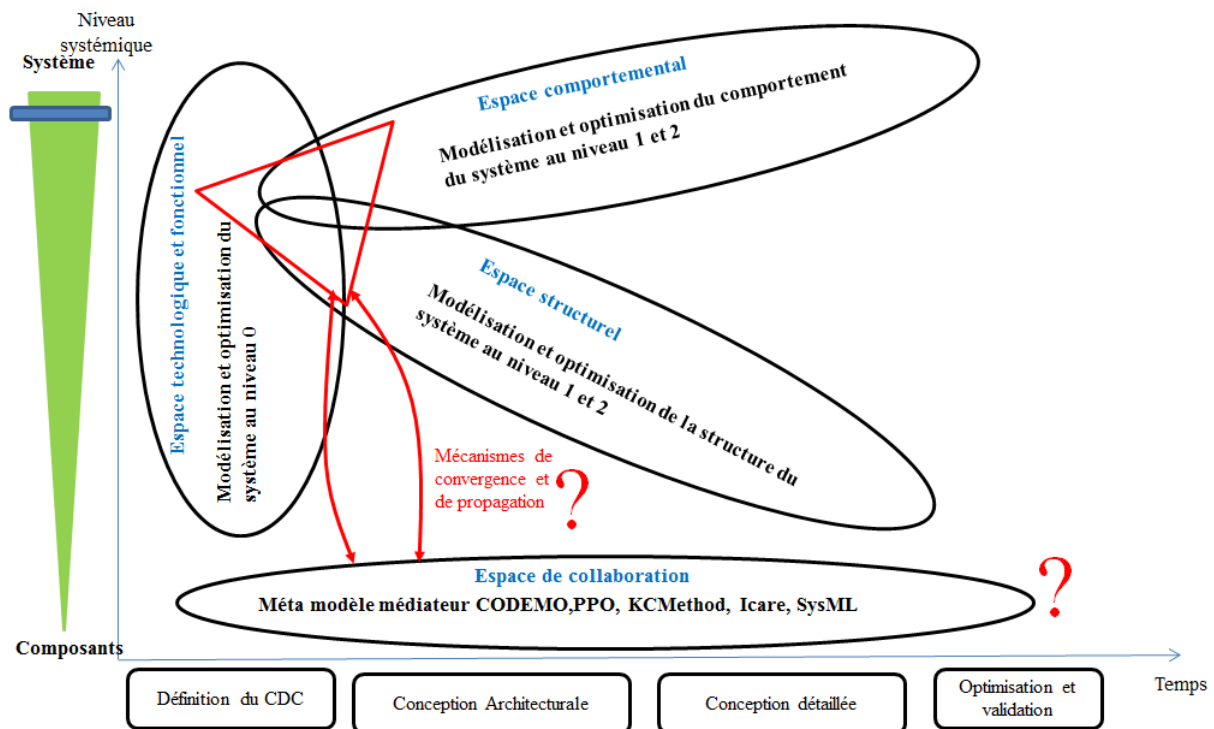
## **Chapitre 3 : Approche de modélisation des connaissances et de définition de l'espace collaboratif**



Nous avons présenté dans le chapitre 2 la démarche de conception et d'optimisation relative à la conception d'un système. Notre démarche a permis donc de définir les espaces d'expertises (technologique, structurel, et comportemental) et de développer les modèles de connaissances métiers qui leurs sont relatifs.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'évolution des spécifications relatives au système à concevoir en fonction des niveaux de modélisation considérés (niveau 0, 1 et 2), fait apparaître des données communes aux différents modèles métiers (par exemple : les sorties « output » du modèle d'optimisation des spécifications au niveau 0 représentent les données d'entrée « Input » pour le modèle d'optimisation des spécifications au niveau 1, etc.).

Par la suite, la convergence vers une solution de conception globale optimisée nécessite forcément la définition d'un espace de collaboration dans lequel une représentation des connaissances collaboratives est effectuée. A partir de cette représentation, il est alors possible de mettre en place un mécanisme de convergence à partir duquel le choix de la solution de conception finale est effectué (Figure 94).



**Figure 94. Environnement de conception du système MTI**

Ce dernier chapitre est dédié à la présentation de l'approche de modélisation des connaissances que nous avons mis en place afin de définir l'espace de collaboration du système MTI. Cette approche se base sur les concepts définis dans le chapitre 2 par rapport à la modélisation du système souhaité (décomposition systémique, représentation des fonctions de conception, représentation des espaces métiers, etc.) et consiste à présenter la

représentation de ses concepts à l'aide du méta-modèle unifié PPO implémenté dans l'environnement Eclipse Modeling Framework.

Notre proposition de modélisation des connaissances est par la suite enrichie grâce à l'expérimentation que nous avons effectuée pour coupler le méta-modèle PPO avec un propagateur de contraintes CSP développé sur Or-tool. Ceci a pour objectif de réduire la dimension de l'espace de collaboration considéré et de pouvoir converger vers une solution de conception qui représente un optimum global parmi les solutions calculés à partir du nouvel espace.

### **I. Définition de l'espace de collaboration : modélisation et représentation des connaissances hétérogènes collaboratives**

La représentation des connaissances de collaboration est étroitement liée à la prise en compte des différents concepts que nous avons définis dans le chapitre 2 pour la conception du système MTI. Ces concepts traduisent la décomposition en niveaux systémiques du système à concevoir, les fonctions de conception qu'il doit réaliser à chaque niveau, les contraintes de conception prises en compte lors du calcul des spécifications du système à chaque niveau et les relations reliant ses différents éléments dans l'environnement de conception. Ainsi, les connaissances de collaboration que nous considérons dans nos travaux ne sont autres que les formules de ses relations.

Dès lors que nous considérons l'environnement de conception dans lequel nous travaillons, **le système MTI est décrit par les trois espaces d'expertises** définis au chapitre 2 :

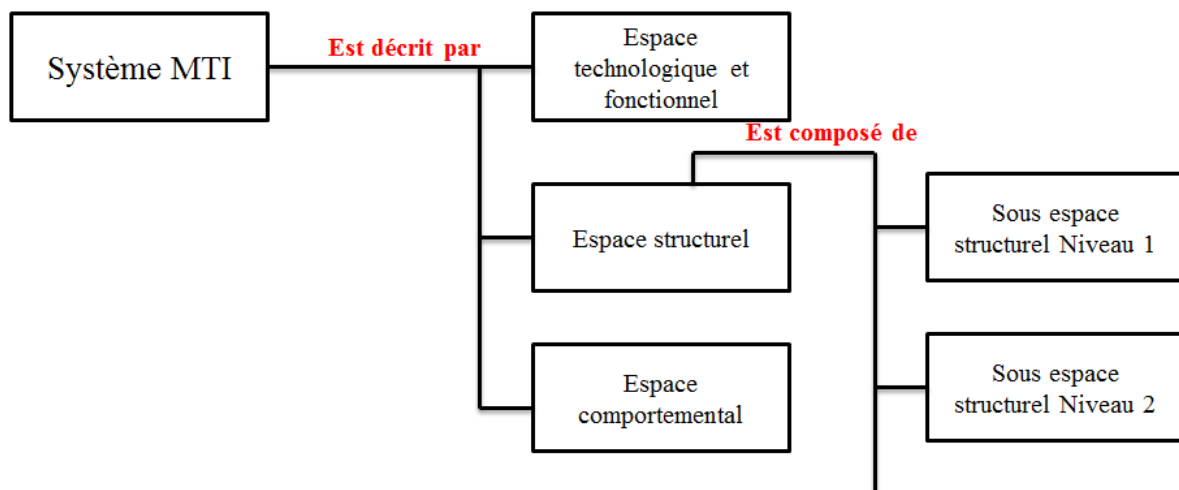
- L'espace technologique et fonctionnel permettant de décrire les technologies utilisées pour concevoir le système MTI. Celui-ci est représenté dans cet espace à partir des spécifications technologiques.
- L'espace structurel qui permet de décrire la structure et la mécanique interne du système MTI à travers les spécifications structurelles.
- L'espace comportemental dans lequel le système MTI est décrit à partir de son comportement dans son environnement. Ceci est fait à travers la définition des spécifications comportementales du système à concevoir.

Chacun de ses espaces d'expertises traduit une description ou une représentation particulière du système à concevoir afin de répondre aux trois interrogations auxquelles sont confrontés les concepteurs :

1. Quelle technologie considérée pour le système à concevoir ?
2. Quelle solution structurelle considérée pour avoir l'architecture du système ?
3. Comment faire fonctionner le système souhaité dans son environnement d'existence ?

Ces espaces contiennent les modèles d'expertises qui permettent de définir les données décrivant le système « les spécifications système » à chaque niveau systémique. En fonction du besoin, chaque espace d'expertise balaye les niveaux de décomposition systémiques (niveaux 0, 1 et 2) que nous avons considérés précédemment, en fonction de l'évolution des

degrés de liberté (les inconnus du problème de conception) d'un niveau à un autre. **Ainsi, chaque espace métier est composé de sous espaces métiers relatifs à chaque niveau systémique considéré (Figure 95) dans lequel nous retrouvons les données du système qui sont relatives au périmètre d'expertise concerné** (sous espace structurel niveau 1 qui représente 4 spécifications structurelles du volant d'inertie, sous espace structurel niveau 2 qui reprend les spécifications structurelles du niveau 1 pour le volant d'inertie et en y ajoutant d'autres (Figure 75), etc.).



**Figure 95. Description du système MTI et représentation de sa décomposition systémique dans l'environnement de conception**

Ainsi, les sous espaces d'expertises ne sont autres que le même espace d'expertise qui évolue (Figure 42) au cours du processus de conception avec l'évolution des données relatives à la représentation du niveau systémique du système MTI. Nous avons cependant choisi de les modéliser séparément dans le but de mettre en évidence cet aspect de décomposition systémique et de pouvoir représenter la cascade de spécifications qui existe lors du passage d'un niveau à un autre.

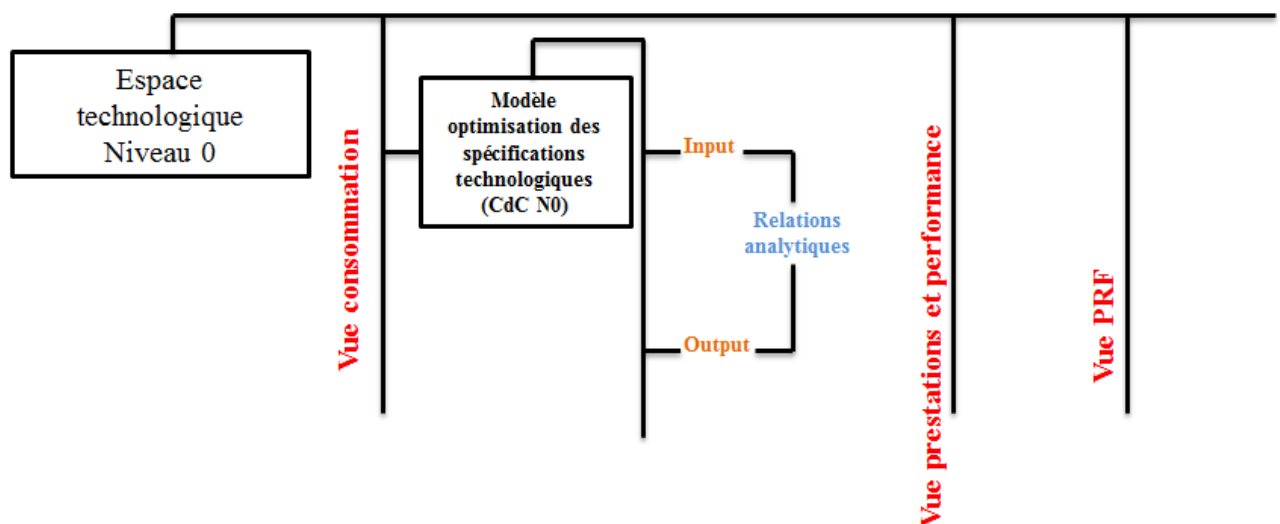
Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, la définition des espaces et/ou sous espaces d'expertises fait à partir de l'élaboration des modèles métiers. Chaque modèle élaboré permet de valider une ou plusieurs fonctions de conception et de calculer les spécifications relatives au système à concevoir. Ces modèles sont réalisés à partir des connaissances accumulées concernant le système en lui-même et le savoir-faire (règles métiers) des experts. Ainsi, les **données d'entrées « Input »** pour ses modèles sont les **contraintes de conception**, les **spécifications issues du niveau (n-1)** ; quant aux **données de sortie « Output »**, elles représentent les **spécifications relatives au niveau n**. La transformation des données **Input en données Output s'effectue grâce aux relations analytiques qui les relient** et qui représentent des principes physiques (principe fondamental de la dynamique, etc.) et des

règles mathématiques (interpolation linéaire dans des cartographies organes, relation d'égalité entre deux paramètres, etc.).

Les modèles métiers permettent alors d'évaluer l'aptitude du système souhaité à assurer et réaliser **les fonctions de conception requises** qui représentent des objectifs que le système doit être capable d'atteindre d'un point de vue métier :

- La fonction consommation traduit la capacité du système à atteindre un objectif de consommation du GMP MTI d'un point de vue expertise consommation du véhicule.
- La fonction prestations et performances représente les objectifs en termes de performances et de comportement du véhicule que le système MTI doit être capable de fournir d'un point de vue expertise agrément de conduite et prestations dynamiques du véhicule.
- La fonction architecture traduit la capacité du système à pouvoir être implanté dans une plateforme véhicule d'un point de vue expertise architecture sous capot et implantation
- La fonction SDF traduit la capacité du système à assurer ses fonctionnalités correctement
- La fonction PRF traduit la capacité de concevoir le système à faible coût

Ainsi, les fonctions de conception représentent les différentes vues de conception dans lesquelles le système MTI est évalué à travers les modèles métiers dans chaque espace et/ou sous espaces d'expertise (Figure 96).



**Figure 96. Exemple de représentation d'un espace métier du système MTI dans un niveau précis**

Il se trouve que le même modèle métier peut permettre parfois d'évaluer plus d'une fonction de conception (par exemple le modèle métier relatif à l'optimisation des spécifications du système au niveau 0 permet d'évaluer la fonction « consommation » à partir du calcul de la consommation du moteur thermique par rapport à la contrainte de conception qui lui est

imposée, et la fonction « prestations et performances » à partir du calcul de la distance ZEV par rapport au contrainte de conception qui lui relative).

Les modèles métiers gèrent des connaissances communes. Ces connaissances sont principalement dues à la cascade de spécifications transmises d'un niveau systémique vers un autre. En effet, pour un modèle métier, certaines de ses données « Input » sont issues des données « Output » provenant d'un autre modèle.

Ceci fait apparaitre alors, des contraintes de conception qui peuvent être traduites en relations analytiques reliant les Output d'un modèle X aux Input d'un modèle Y. Ainsi, ces relations intra-modèles avec les données communes constituent pour nous les éléments de l'espace de collaboration relatif au système MTI (Figure 97).

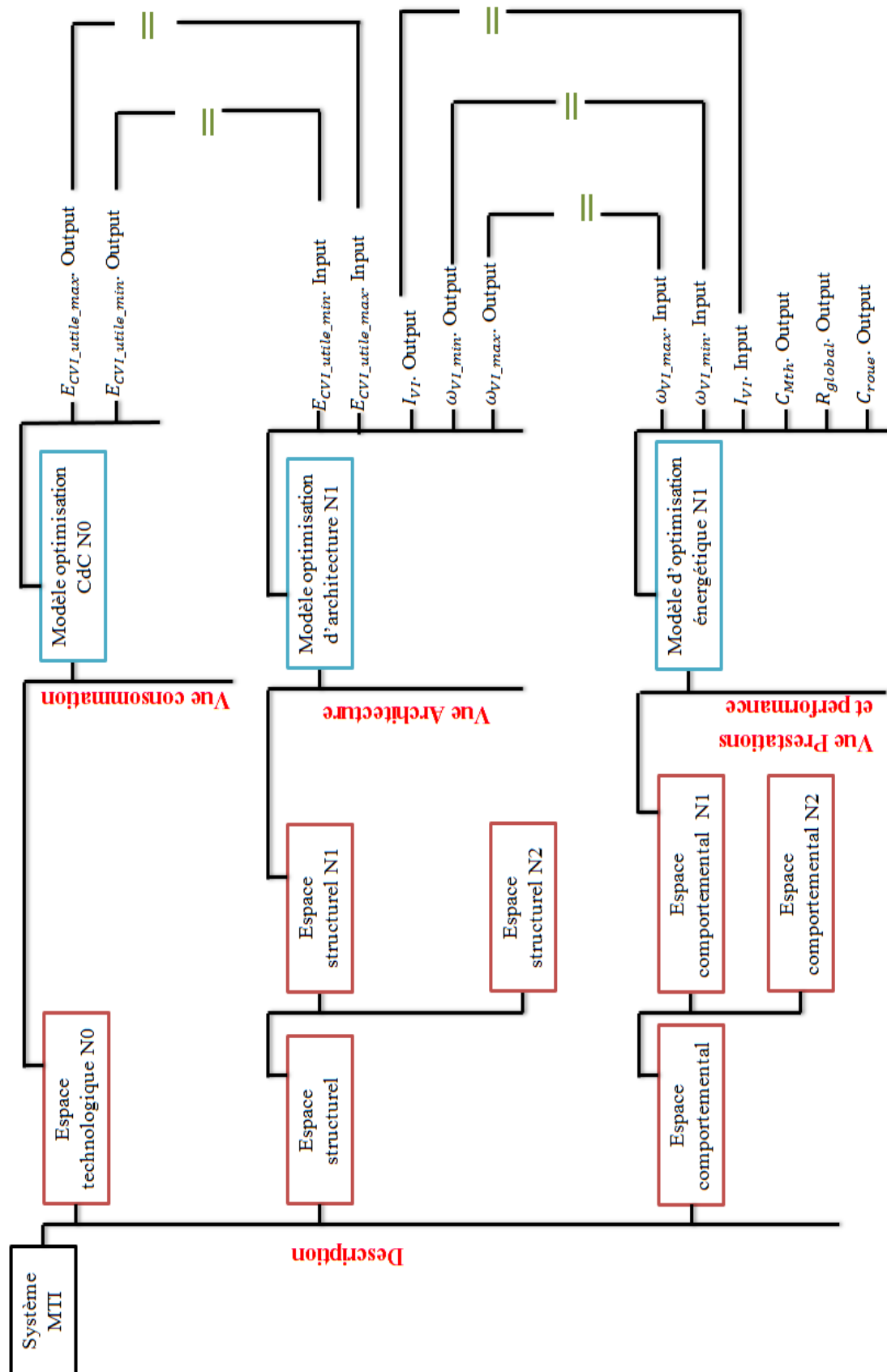


Figure 97. Modélisation multi-vues des connaissances collaboratives du système MTI

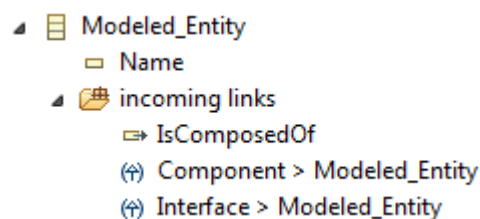
Contrairement aux espaces d'expertises qui permettent de décrire le système à concevoir, l'espace de collaboration décrit les connaissances nécessaires pour statuer sur la solution de conception finale : **les spécifications du système MTI représentées par les données collaboratives (ces données sont issues des travaux d'optimisation effectués dans les espaces métiers), doivent alors respecter toutes les contraintes renseignées dans l'espace de collaboration.**

## II. Mise en place du méta-modèle unifié PPO et implémentation sous Eclipse Modeling Framework

Dans le but de pouvoir gérer les connaissances collaboratives numériquement, nous avons implémenté l'approche de modélisation multi-vues que nous venons de présenter dans un méta-modèle unifié produit PPO.

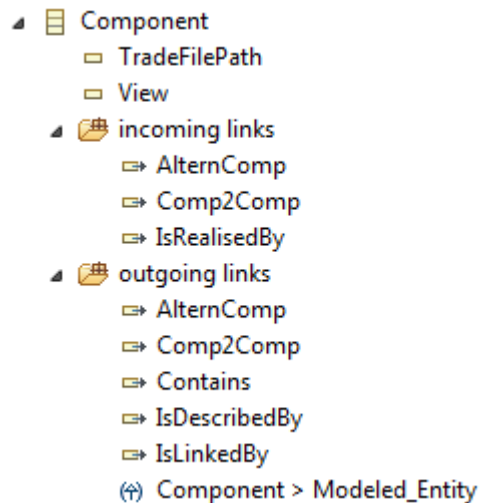
Ce méta-modèle présenté dans le chapitre 1 de ce manuscrit est un diagramme de classe UML basé sur :

- La classe « Modeled Entity » qui permet de modéliser les éléments qui composent le projet de conception « Design Project » et qui sont dans notre cas d'étude les modèles de données d'expertises (Figure 98).



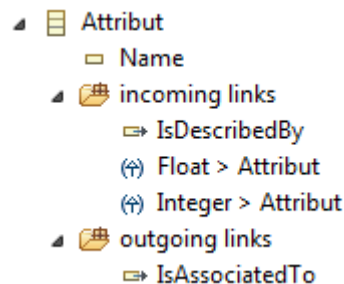
**Figure 98. Représentation des entités de modélisation**

- La classe « Component » (Figure 99) permettant de représenter les éléments qui composent une entité modélisée c'est-à-dire les composants d'un modèle de données d'expertises. Par exemple un modèle de calcul de consommation du système MTI est composé d'un composant volant d'inertie, un composant moteur thermique, un composant boîte de vitesse, etc. et chaque composant peut être aussi décomposé en sous-composant « Comp2Comp » (une boîte de vitesse est composée d'un train ravigneau, d'une transmission continuement variable, etc.), oui bien il peut être remplacé par une solution qui lui est alternative « AlternComp » (un moteur thermique essence EB2, un moteur thermique diesel DV, etc.). Ainsi, cette classe nous permet de retrouver la décomposition systémique du système de CDT MTI.



**Figure 99. Description des composants de modélisation**

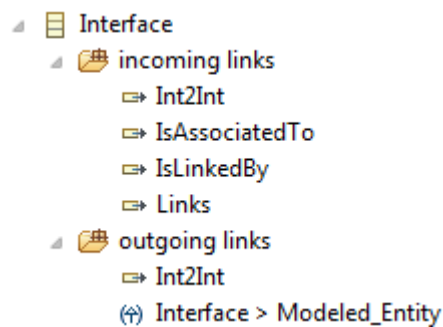
- La classe « Attribut », qui permet de structurer la description d’une entité ou d’un composant. Un attribut peut être de type réel, entier, booléen énuméré, chaîne de caractère ou même un nombre complexe. La liste des attributs n’est pas généralement figée au début du projet de conception. Dans la classe « Attribut », il est possible d’instancier le nom du paramètre et de faire apparaître à quel composant il appartient à travers la relation d’entrée « IsDescribedBy » qui apparaît aussi dans la classe « Component » comme une relation de sortie (Figure 99), et à quelle interface il est rattaché « IsAssociatedTo » (Figure 100). Ceci permet alors de structurer les données d’E/S des modèles métiers et d’assurer la décomposition systémique relative aux espaces d’expertises.



**Figure 100. Modélisation des données d'entrée/sortie des modèles métiers**

- La classe « Interface » permet de relier les données collaboratives (les attributs) aux relations décrivant les contraintes qu’il faut respecter (Figure 101).





**Figure 101. Description des interfaces de collaboration**

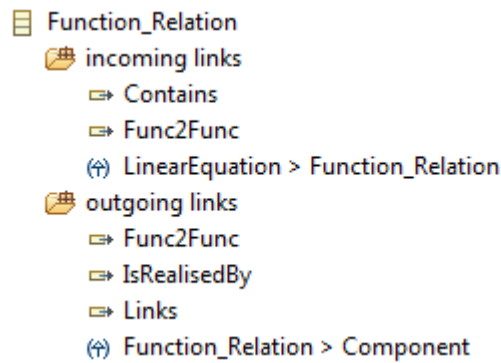
Ces diagrammes de classe relatifs au méta-modèle produit PPO, nous permettent de représenter certains des concepts de modélisation que nous avons retenus pour le système MTI (Tableau 18).

| Concepts de modélisation du système MTI                                                                                             | Classes du méta-modèle produit PPO   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| les modèles de données d'expertises                                                                                                 | Modeled Entity                       |
| les niveaux de décomposition systémique                                                                                             | Component<br>Comp2Comp<br>AlternComp |
| Les paramètres relatifs aux degrés de liberté et aux données du système et de ses composants : données E/S des modèles d'expertises | Attribut                             |
| Le lien d'un composant avec un autre composant ou avec un élément extérieur à l'environnement de conception                         | Interface                            |

**Tableau 18. Représentation des concepts de modélisation dans le méta-modèle produit PPO**

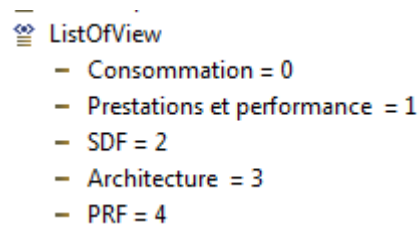
Cependant, afin de pouvoir représenter tous les concepts de modélisation relatifs au projet de conception du système MTI, nous avons effectué une extension du méta-modèle produit PPO en ajoutant des classes qui permettent de prendre en compte les espaces d'expertises qui le décrivent, les relations qui existent entre les données ainsi que les fonctions de conception par rapport auxquelles le système est évalué :

- La représentation des relations qui existent entre les modèles d'expertise, ils sont décrits par une classe « Function\_Relation » (Figure 102), dans laquelle nous retrouvons les expressions analytiques des relations et le composant (modèle métier) auquel ils sont rattachés.



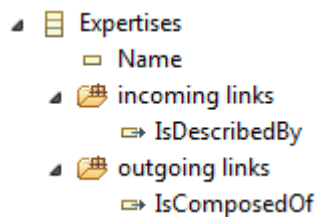
**Figure 102. Description des relations intra et inter-modèles**

- Les fonctions de conception sont représentées quant à elles à travers la classe « ListOfView », dans laquelle nous retrouvons les différentes fonctions considérées pour le système MTI (Figure 103).



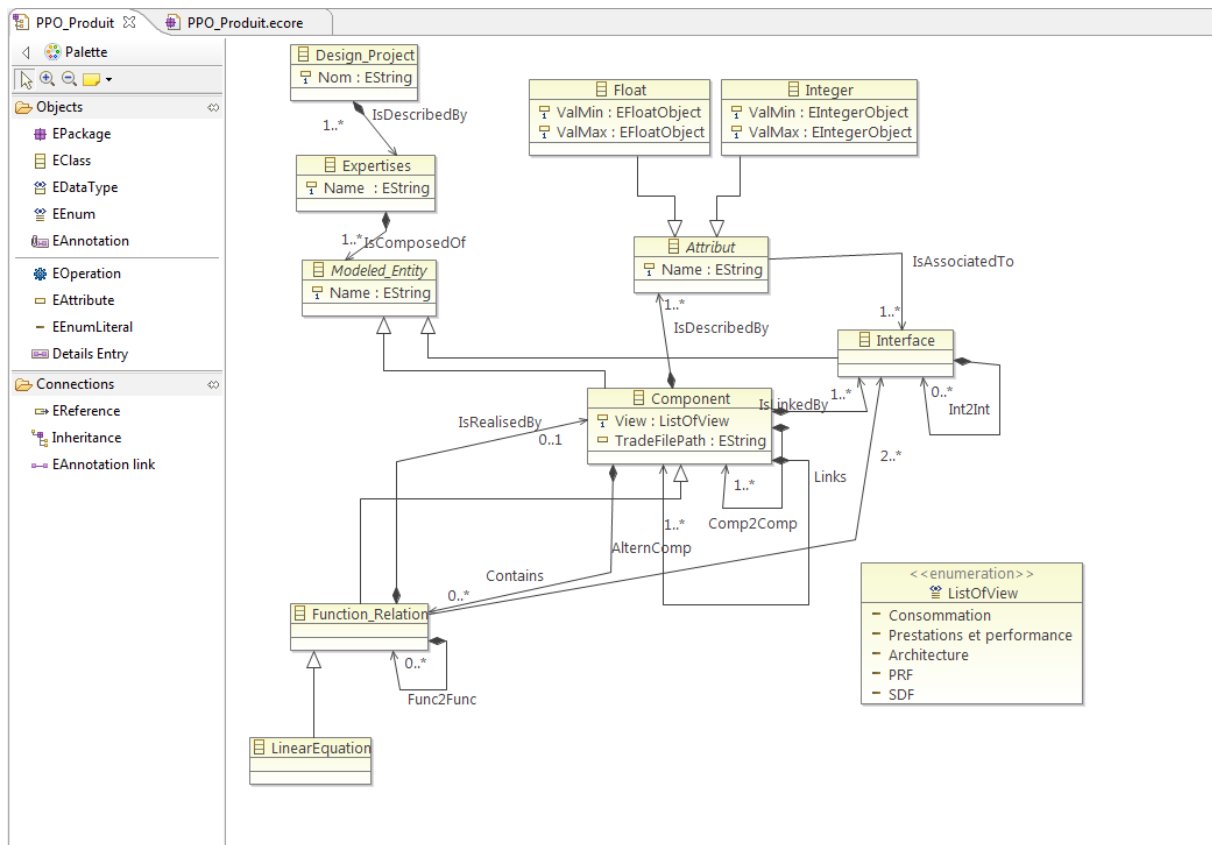
**Figure 103. Description des fonctions de conception à l'aide des vues**

- Les espaces d'expertises sont représentés par une classe « Expertises » dans laquelle nous retrouvons les différents métiers permettant de décrire le système MTI. En effet un système est décrit par une expertise technologique et fonctionnelle, une expertise structurelle et une expertise comportementale (Figure 104).



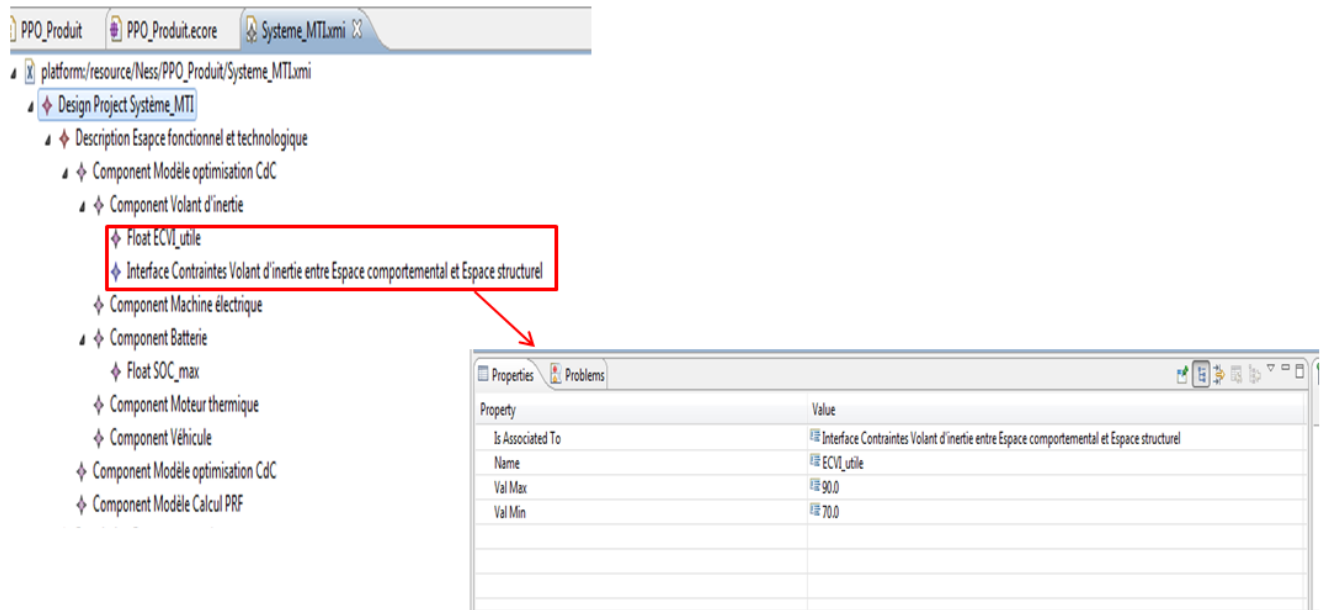
**Figure 104. Représentation des espaces d'expertises**

Ainsi, le méta-modèle unifié PPO final relatif au système MTI est construit tout en prenant en compte les différents concepts de modélisation. Ce méta-modèle permet alors de définir **l'espace de collaboration** (Figure 105).



**Figure 105. Méta-modèle unifié PPO relatif au système MTI**

Un fichier **xmi** est par la suite créé afin de pouvoir insérer les données relatives au système MTI à partir de la structure du méta-modèle PPO (Figure 106).

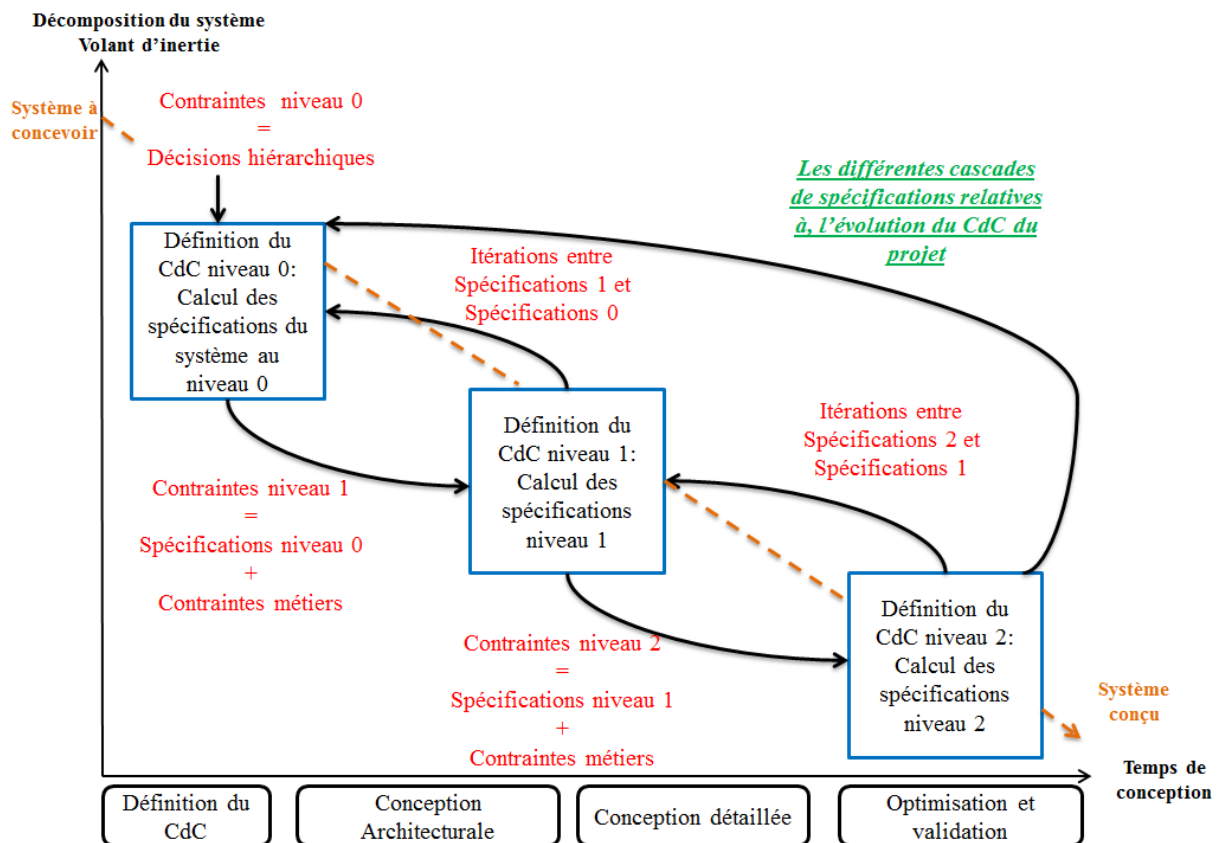


**Figure 106. Instanciation des données du système MTI dans le méta-modèle PPO**

### III. Optimisation dans l'espace de solutions admissibles global

A travers le méta-modèle unifié PPO, nous avons pu construire l'espace de collaboration relatif au système MTI. Les données communes aux modèles d'expertises ainsi que les relations de contraintes qui leurs sont appliquées sont facilement exploitables grâce à l'implémentation dans EMF.

Dans le but de pouvoir converger vers une solution de conception finale qui soit aussi optimale, il est nécessaire que les contraintes appliquées sur les données échangées entre les modèles d'expertises soient toutes respectées. Ceci est dû à la cascade de spécifications (Figure 107) qui existe entre les modèles métiers et qui relie les trois espaces d'expertises. Ainsi, l'objectif de cette partie de notre travail, est de proposer une approche qui permet de calculer à partir des spécifications communes aux différents espaces d'expertises les solutions de conception qui respectent les contraintes imposées par chaque expert métiers.



**Figure 107. Représentation de la cascade des spécifications au cours du cycle de conception du système MTI**

Ainsi, tout au long du processus de conception, la dimension de l'espace de collaboration sera réduite au fur et à mesure pour ne contenir à la fin que l'ensemble des solutions de conception admissibles. La solution finale sera alors choisie parmi ses solutions et en fonction d'un critère d'optimisation défini à partir de la volonté des concepteurs ou du chef de projet.

## 1. Développement du propagateur de contraintes CSP dans Or-Tool

A l'aide des concepts CSP et de l'outil de développement Or-Tool, nous avons mis en place un programme qui permet à partir d'un fichier donné d'extraire les informations nécessaires et de calculer le nombre de solutions qui respectent les contraintes imposées sur les données (Figure 108).

- # Design Pattern [6]
  - ◊ Component Mobile optimization CoC
  - ◊ Component Mobile Eredit
  - ◊ Component CoC
  - ◊ Interface Component Mobile Eredit entre Espace componentel et Espace structural
  - ◊ Component Machine électrique
  - ◊ Component Batterie
  - ◊ Real SOC me
  - ◊ Component Motor thermique
  - ◊ Component Vehicle
  - ◊ Component Mobile optimization CoC
  - ◊ Component Mobile Catalytic
- # Description Espace structural
  - ◊ Component Espace Structural Me
  - ◊ Component Mobile optimization Architecture Me
  - ◊ Component Espace Structural Mo
  - ◊ Component Mobile optimization Architecture Mo
  - ◊ Component Mobile CATIA
- # Description Espace componentel
  - ◊ Component Espace componentel Me
  - ◊ Component Mobile optimization EnergieMo Me
  - ◊ Component Espace componentel Mo
  - ◊ Component Mobile optimization EnergieMo Mo

```
// source(ligne, "RopeLine");  
if (strcmp(typeline, "variable")==0)  
  
    source(ligne, "Variable To X Y Z", Rho_min, Rho_max, Eta_min,  
            Omega_min et Omega_max); // voir l'algo dans le ".c"  
        letvar const a = solver.MakeIntVar(10, 20, "a");  
  
// }  
  
// Decision variables  
letvar+ const a = solver.MakeIntVar(10, 20, "A");  
letvar+ const b = solver.MakeIntVar(-20, 20, "B");  
letvar+ const c = solver.MakeIntVar(10, 17, "C");  
  
// we need to group variables in a vector  
std::vector<Solver.IntVar*> letters;  
letters.push_back(a);  
letters.push_back(b);  
letters.push_back(c);  
  
// Constraints  
solver.AddConstraint(solver.MakesQuality(x, b));  
solver.AddConstraint(solver.MakesQuality(x, c));  
  
Print(inputSP);  
  
/* autres types de contraintes  
Solveur.MinimizeExpression()  
MakeInteger  
MakeReal
```

The screenshot shows the Microsoft Excel application window. The spreadsheet contains the following data:

|    | A                                                                                    | B | C | D  |    |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------|---|---|----|----|
| 1  | Niveaux de modification 5 : les modules existants sont Matlab PE et Matlab Optic MOA |   |   |    |    |
| 2  | Données Matlab PE ensemble à Matlab Optic MOA                                        |   |   |    |    |
| 3  | Matlab PE Output                                                                     |   |   |    |    |
| 4  | 7                                                                                    | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 5  | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 6  | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 7  | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 8  | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 9  | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 10 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 11 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 12 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 13 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 14 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 15 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 16 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 17 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 18 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 19 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 20 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 21 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 22 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 23 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 24 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 25 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 26 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 27 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 28 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 29 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 30 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 31 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 32 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 33 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 34 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 35 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 36 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 37 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 38 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 39 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 40 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 41 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 42 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 43 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 44 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 45 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 46 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 47 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 48 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 49 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 50 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 51 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 52 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 53 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 54 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 55 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 56 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 57 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 58 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 59 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 60 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 61 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 62 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 63 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 64 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 65 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 66 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 67 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 68 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 69 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 70 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 71 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 72 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 73 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 74 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 75 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 76 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 77 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 78 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 79 | 1                                                                                    | 2 | 3 | 4  | 5  |
| 80 | 1                                                                                    |   |   |    |    |

Au fur et à mesure que les modèles métiers sont développés par les experts, le méta-modèle PPO est construit en intégrant les données relatives au système MTI. Pour chaque niveau systémique de modélisation, un calcul CSP est effectué afin de vérifier le respect des contraintes de conception des différents experts métiers ce qui permet de réduire l'espace de collaboration petit à petit. A la fin du cycle de conception, les solutions qui seront retenues dans cet espace doivent respecter les différentes contraintes métiers, et contiendront la solution finale optimisée à partir d'une fonction objective particulière.

Afin de tester et illustrer notre approche, nous avons décidé de l'appliquer sur le système MTI entre deux modèles métiers particuliers : le modèle optimisation architecture N2 qui est effectué sur Matlab et le modèle CAO réalisé sous CATIA V5. Notre choix est dû à notre souhait de tester le propagateur CSP sur deux modèles métiers qui sont réalisés à l'aide de deux outils différents et qui n'ont pas la même sémantique de développement (Matlab est outil analytique et CATIA est un outil de représentation graphique avec des bibliothèques particulières).

165

### Modèle optimisation architecture N2 (Matlab)

|                  |              |            |   |    |         |         |
|------------------|--------------|------------|---|----|---------|---------|
| Entraxe_AS1x     | Architecture | Matlab MOA | O | mm | -240    | -235    |
| Entraxe_AS1z     | Architecture | Matlab MOA | O | mm | 140     | 148,5   |
| Entraxe_AS2x     | Architecture | Matlab MOA | O | mm | -131,04 | -129,91 |
| Entraxe_AS2z     | Architecture | Matlab MOA | O | mm | 245,07  | 246,98  |
| Entraxe_AS3x     | Architecture | Matlab MOA | O | mm | -31,72  | -28,58  |
| Entraxe_AS3z     | Architecture | Matlab MOA | O | mm | 275,17  | 277,8   |
| Entraxe_AS4x     | Architecture | Matlab MOA | O | mm | 26,99   | 27      |
| Entraxe_AS4z     | Architecture | Matlab MOA | O | mm | 210,87  | 211,72  |
| Entraxe_APx      | Architecture | Matlab MOA | O | mm | -170,97 | -30,07  |
| Entraxe_APz      | Architecture | Matlab MOA | O | mm | 189,02  | 193,25  |
| Entraxe_CPx      | Architecture | Matlab MOA | O | mm | -14,77  | -12,002 |
| Entraxe_CPz      | Architecture | Matlab MOA | O | mm | 85,003  | 85,124  |
| PMR1             | Architecture | Matlab MOA | O | mm | 134,9   | 134,99  |
| PMR2             | Architecture | Matlab MOA | O | mm | 52,01   | 52,99   |
| PRR1             | Architecture | Matlab MOA | O | mm | 62,09   | 73,11   |
| PRR2             | Architecture | Matlab MOA | O | mm | 69,48   | 121,99  |
| Proximité_APAS1  | Architecture | Matlab MOA | O | mm | 80,96   | 80,96   |
| Proximité_AS2CP  | Architecture | Matlab MOA | O | mm | 170,37  | 205,82  |
| Proximité_AS1AS2 | Architecture | Matlab MOA | O | mm | 148     | 148     |
| Proximité_AS2AS3 | Architecture | Matlab MOA | O | mm | 104     | 106,67  |
| Proximité_AS3AS4 | Architecture | Matlab MOA | O | mm | 87      | 88,97   |
| Proximité_AS2AS4 | Architecture | Matlab MOA | O | mm | 140     | 166,69  |
| Proximité_AS4CP  | Architecture | Matlab MOA | O | mm | 132,59  | 132,59  |
| Proximité_APCP   | Architecture | Matlab MOA | O | mm | 190     | 190     |
| R                | Architecture | Matlab MOA | O | mm | 0,78    | 0,8     |

### Modèle CAO CATIA N2

|                  |              |                  |   |    |        |       |
|------------------|--------------|------------------|---|----|--------|-------|
| Proximité_APAS1  | Architecture | CATIA Archi Méca | O | mm | 81     | 82    |
| Proximité_AS2CP  | Architecture | CATIA Archi Méca | O | mm | 199,4  | 199,5 |
| Proximité_AS1AS2 | Architecture | CATIA Archi Méca | O | mm | 147    | 149   |
| Proximité_AS2AS3 | Architecture | CATIA Archi Méca | O | mm | 103    | 104   |
| Proximité_AS3AS4 | Architecture | CATIA Archi Méca | O | mm | 87     | 88    |
| Proximité_AS2AS4 | Architecture | CATIA Archi Méca | O | mm | 161    | 162   |
| Proximité_AS4CP  | Architecture | CATIA Archi Méca | O | mm | 132,64 | 133   |
| Proximité_APCP   | Architecture | CATIA Archi Méca | O | mm | 191    | 189   |
| Entraxe_AS1x     | Architecture | CATIA Archi Méca | O | mm | -237   | -234  |
| Entraxe_AS1z     | Architecture | CATIA Archi Méca | O | mm | -447   | -444  |
| Entraxe_AS2x     | Architecture | CATIA Archi Méca | O | mm | -132   | -130  |
| Entraxe_AS2z     | Architecture | CATIA Archi Méca | O | mm | 244    | 247   |
| Entraxe_AS3x     | Architecture | CATIA Archi Méca | O | mm | -48    | -46   |
| Entraxe_AS3z     | Architecture | CATIA Archi Méca | O | mm | 307    | 308   |
| Entraxe_AS4x     | Architecture | CATIA Archi Méca | O | mm | 27     | 28    |
| Entraxe_AS4z     | Architecture | CATIA Archi Méca | O | mm | 211    | 212   |
| Entraxe_APx      | Architecture | CATIA Archi Méca | O | mm | -171   | -168  |
| Entraxe_APz      | Architecture | CATIA Archi Méca | O | mm | 189    | 194   |
| Entraxe_CPx      | Architecture | CATIA Archi Méca | O | mm | -13    | -11   |
| Entraxe_CPz      | Architecture | CATIA Archi Méca | O | mm | 84     | 86    |

**Figure 109. Renseignement des données paramétriques communes aux modèle matlab MOA N2 et CATIA Archi Méca**

Les contraintes de propagation que nous cherchons à satisfaire sont aussi extraites du méta-modèle PPO par la même façon (Figure 110)

## Contraintes de propagation entre les deux modèles métiers

|                                                                |
|----------------------------------------------------------------|
| Entraxe_AS1x (Catia)= Entraxe_AS1x (Matlab Opti Archi Output)  |
| Entraxe_AS1z (Catia) = Entraxe_AS1z (Matlab Opti Archi Output) |
| Entraxe_AS2x (Catia) = Entraxe_AS2x (Matlab Opti Archi Output) |
| Entraxe_AS2z (Catia) = Entraxe_AS2z (Matlab Opti Archi Output) |
| Entraxe_AS3x (Catia) = Entraxe_AS3x (Matlab Opti Archi Output) |
| Entraxe_AS3z (Catia) = Entraxe_AS3z (Matlab Opti Archi Output) |
| Entraxe_AS4x (Catia) = Entraxe_AS4x (Matlab Opti Archi Output) |
| Entraxe_AS4z (Catia) = Entraxe_AS4z (Matlab Opti Archi Output) |
| Entraxe_APx (Catia) = Entraxe_APx (Matlab Opti Archi Output)   |
| Entraxe_APz (Catia) = Entraxe_APz (Matlab Opti Archi Output)   |
| Entraxe_CPx (Catia) = Entraxe_CPx (Matlab Opti Archi Output)   |
| Entraxe_CPz (Catia) = Entraxe_CPz (Matlab Opti Archi Output)   |

**Figure 110. Contraintes de propagation**

Afin d'appliquer cette approche, nous avons essayé d'augmenter le volume alloué pour l'intégration du système de chaîne de transmission hybride MTI sous le capot du véhicule de référence. Cet encombrement est représenté par un paramètre de calcul de l'entraxe entre l'arbre primaire de la boîte de vitesse et la couronne de pont. Ce paramètre de proximité est appelé dans la suite APCP et définit le premier degré de liberté d'architecture que les concepteurs doivent spécifier à partir des contraintes d'expertises en conception d'architecture organique.

Le paramètre APCP est calculé dans le modèle optimisation architecture N2 (Matlab) à partir de la relation suivante :

$$APCP = \sqrt{(APx - CPx)^2 + (APz - CPz)^2}$$

Tel que :

*APx* : entraxe de l'arbre primaire suivant l'axe x

*CPx* : entraxe de la couronne de pont suivant l'axe x

*APz* : entraxe de l'arbre primaire suivant l'axe z

*CPz* : entraxe de la couronne de pont suivant l'axe z

Tant dis que dans le modèle CAO CATIA N2, ce paramètre est choisi par le concepteur CAO à partir de son savoir-faire et du volume CAO qu'il manipule.

Ainsi, la valeur optimisée du paramètre APCP doit respecter les contraintes imposées dans les deux modèles (Matlab et CATIA). Et comme nous cherchons à augmenter le volume



d'implantation relatif au système MTI, il est nécessaire d'augmenter la valeur du paramètre APCP. La fonction objective à considérer devient alors :

$$f = \frac{1}{APCP}$$

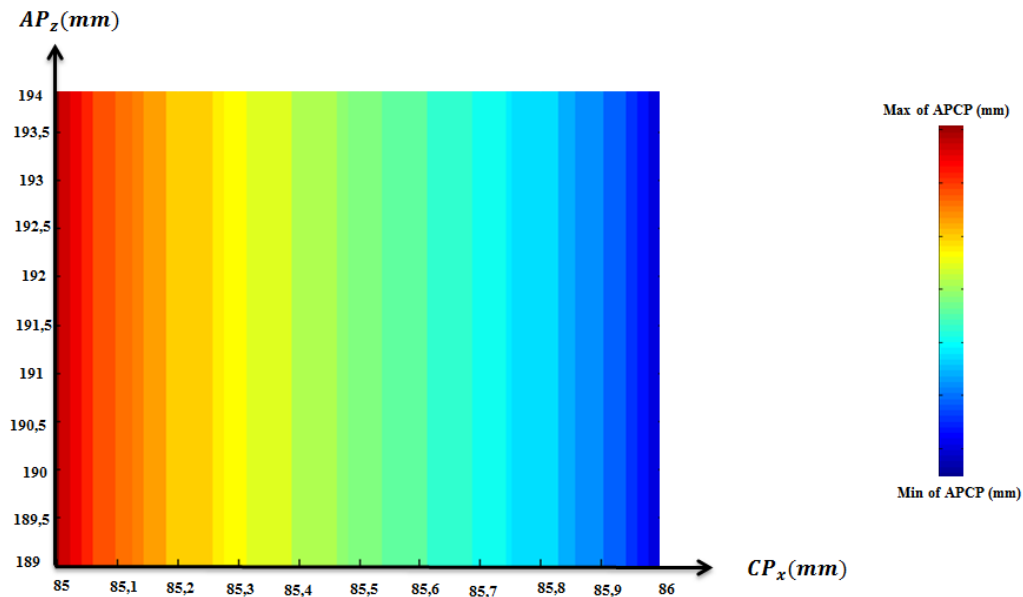
A partir de ces informations, le propagateur CSP développé sur Or-Tool calcul les solutions de conception relatives au paramètre APCP (données paramétriques) qui respectent les contraintes des deux modèles.

Ceci permet alors en comparant les domaines d'existence (début et après calcul du propagateur) relatifs aux données paramétriques de diminuer l'espace de solutions admissibles (Figure 111). En effet grâce au calcul effectué sur Or-tool, nous avons pu réduire le domaine d'existence des différents paramètres qui **influencent le calcul de la proximité APCP**. Ceci a permis alors de réduire le nombre de solutions admissibles à considérer pour APCP de 2,562,976 solutions au début à 108 solutions uniquement après le calcul CSP.

|                |    | Input Modèle optimisation architecture N2 (Matlab) |      | Input Modèle CAO CATIA N2               |      |
|----------------|----|----------------------------------------------------|------|-----------------------------------------|------|
| Entraxe_APx    | mm | -200                                               | -100 | -171                                    | -168 |
| Entraxe_APz    | mm | 160                                                | 220  | 189                                     | 194  |
| Entraxe_CPx    | mm | -15                                                | 0    | -13                                     | -11  |
| Entraxe_CPz    | mm | 85                                                 | 110  | 84                                      | 86   |
|                |    | Nombre de solutions avant le calcul CSP            |      | Nombre de solutions après le calcul CSP |      |
| Proximité_APCP | mm | 2562976                                            |      | 108                                     |      |

**Figure 111. Réduction de la taille de l'espace de solutions admissibles à partir du calcul CSP sur or-tool**

A partir de ces résultats, il est possible d'analyser l'influence des paramètres APx, CPx, APz, CPz sur le calcul de la proximité APCP. Nous remarquons alors que le paramètre qui influence le plus la grandeur à optimiser, est celui de CPx. Et que si nous souhaitons augmenter la valeur d'APCP, il nous faut augmenter celle de CPx (Figure 112).



**Figure 112. Evolution d'APCP en fonction de CPx et APz représentant ainsi l'espace de solutions admissibles**

La convergence vers la solution de conception finale s'effectue en considérant l'optimisation de la fonction objective que nous cherchons à minimiser. La solution retenue est alors celle qui assure au mieux ce calcul de minimisation.

Ainsi, nous retiendrons pour la solution finale les paramètres APx, CPx, APz, CPz, qui permettent d'avoir la proximité APCP la plus grande (**Tableau 19**).

| Solution | APx (mm) | CPx (mm) | APz (mm) | CPz (mm) | APCP (mm) |
|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| 35       | -170     | -11      | 194      | 85       | 192,774   |

**Tableau 19. Présentation de la solution de conception retenue**

#### **IV. Conclusion et présentation de l'environnement de conception du système technique MTI**

Nous avons pu présenter dans ce chapitre l'approche que nous avons développée pour définir l'espace de collaboration relatif au système d'étude MTI. Notre approche s'est basée sur une représentation multi-vue des connaissances d'expertises qui sont communes aux trois espaces métiers définis dans le chapitre 2. Cette représentation a été implémentée dans un méta-modèle PPO permettant de réaliser l'unification des connaissances hétérogènes sous une plateforme de développement EMF.

Au fur et à mesure que le système évolue ainsi que les modèles métiers qui le représentent, des modifications et des ajouts sont facilement implémentés dans le méta-modèle PPO afin de pouvoir gérer et structurer les connaissances de collaboration.

En travaillant sur les concepts de modélisation d'un système pluridisciplinaire, nous avons pu grâce aux adaptations effectuées sur le méta-modèle (ajout de classes Alternatives,

Description, etc.) représenter d'une façon flexible les connaissances communes qui représentent les données collaboratives échangées entre les experts métiers. Mais aussi de pouvoir les structurer dans une seule classe Interface.

Ce travail a facilité l'accès à ses données afin de pouvoir par la suite les extraire et les utiliser dans le modèle de propageur de contraintes pour calculer et optimiser l'environnement de conception.

Ainsi, l'ensemble des solutions admissibles est calculé et la convergence vers une solution de conception finale qui soit optimisée est rendu possible.

## Conclusion générale

Les travaux que nous avons présentés dans le cadre de ce mémoire de thèse ont permis de proposer une approche de conception qui permet de relever au mieux les différents verrous relatifs à la conception des systèmes complexes dans un contexte de conception innovante.

En cernant correctement notre problématique de recherche, nous avons pu grâce au travail effectué dans le chapitre 1, de présenter et analyser convenablement les différentes approches de modélisation existantes. Ces approches ont été classées en deux catégories en fonction de l'objet qu'elles permettent de représenter et de modéliser. Ceci nous a permis de prendre conscience rapidement des points de vue système : un point de vue métiers relatif à la modélisation et la définition des espaces d'expertises d'un système technique, et un point de vue connaissances qui lui porte sur les approches de modélisation des données d'expertises et du savoir-faire de l'Homme. Cette étude bibliographique nous a orienté par la suite vers une analyse de l'environnement de conception d'un système technique. A partir de cette analyse, nous avons pu définir nos champs de travail :

- **Les espaces d'expertises métiers:** l'espace technologique et fonctionnel, l'espace structurel et pour finir l'espace comportemental.
- **L'espace de collaboration**

Notre travail de recherche s'est porté par la suite sur la définition de ses différents espaces et la mise en place de moyens de modélisation et d'optimisation permettant de concevoir le système souhaité tout en prenant en compte l'aspect collaboratif des données.

Ainsi, le chapitre 1 relatif à l'état de l'art, a constitué pour nous un pilier important définissant notre plan de travail tout au long de cette thèse. En effet, il ne s'agissait pas pour nous de remettre en cause l'existant, mais plutôt de travailler avec et de l'utiliser convenablement afin de pouvoir répondre à notre problématique de recherche : « **Comment favoriser au mieux la convergence vers les solutions de conception optimales dans un contexte de conception innovante pour les systèmes complexes ?** ». Notre objectif était donc de pouvoir concevoir un système de CDT hybride innovant à partir d'une démarche de conception innovante et un temps précis (3 ans).

De par la nature complexe du système que nous cherchions à concevoir, nous avons rapidement pris conscience des évolutions de ses spécifications tout au long du processus de conception. Cette prise de conscience nous a conduit à définir les niveaux systémiques à partir des données représentatives du système, définissant ainsi les niveaux de modélisation et de représentation des données du système à concevoir.

Le fait de partir de la feuille blanche pour la conception du système de CDT hybride MTI, nous a poussé à réfléchir sur les moyens que nous pouvions utiliser afin d'optimiser le CdC d'un système concert. Ce travail que nous avons présenté dans la première partie du chapitre 2 nous a permis de choisir les technologies à considérer et de définir les spécifications du système MTI d'une manière optimale. Notre démarche a permis d'orienter les ingénieurs dans

leurs prises de décision et leurs choix sans omettre une technologie quelconque. En partant d'un champ de possibilités infini et en travaillant sur l'optimisation des dimensions de ce champ, il est possible à l'aide des outils tels que les plans d'expériences et les algorithmes génétiques de pouvoir définir un CdC relatif au projet de conception qui contient des spécifications optimisées. A travers les résultats que nous avons obtenu sur le système MTI, nous avons montré l'efficacité de cette méthode dont l'originalité réside dans la façon à travers laquelle nous abordons un problème de conception et non pas des moyens utilisés.

En définissant l'espace technologique et fonctionnel relatif à un système complexe de cette façon, les ingénieurs sauront quels fournisseurs solliciter ou bien combien faut-il dépenser pour concevoir leur système à partir de leurs besoins qui s'expriment dans les spécifications optimisées (par exemple : ayant défini la puissance maximale en pic dont nous aurons besoin pour la machine électrique, il est possible de faire le choix entre les fournisseurs à solliciter tels que Valeo, Bosch, etc. par rapport aux prix qu'ils proposent mais aussi par rapport aux machines électriques qu'ils ont).

La non connaissance relative à la composition de l'architecture interne du système MTI, nous a mené à réfléchir sur des méthodes permettant la définition de l'espace structurel. L'idée était de pouvoir définir les spécifications structurelles d'une manière optimale et de pouvoir développer le prototype du système le plus rapidement possible. Ce travail a nécessité une grande collaboration entre les experts métiers (expert système de couplage, expert boîte de vitesse, etc.) afin de pouvoir cerner le domaine d'existence des degrés de liberté du système MTI. Ainsi, nous avons développé une approche de modélisation et d'optimisation qui permet d'intégrer les contraintes métiers d'une façon analytique et de les transposer à un modèle CAO relatif à la solution retenue. Pareillement que dans la première partie du chapitre 2, nous avons essayé de travailler sur le champ de solutions de conception disponibles, pour le réduire au fur et à mesure et de converger vers une solution de conception acceptable et optimale.

Cette démarche basée aussi sur des outils existants (plans d'expérience, algorithmes de descente de gradient, modélisation CAO, etc.) a permis aux ingénieurs de diminuer le nombre d'itération relative aux choix des solutions d'architecture mécanique et de prendre en compte les niveaux systémiques mais aussi l'aspect pluridisciplinaire du système MTI. Notre proposition a permis de concevoir le système en une durée acceptable et de développer le prototype de la CDT MTI.

Quant à la définition de l'espace comportemental, l'approche d'optimisation des stratégies énergétiques développées a permis de définir les spécifications comportementales qui sont les lois de commandes appliquées sur le système MTI. Ce travail développé à partir de concepts existants tels que les machines d'états (les automates d'états finis) et les représentation à l'aide de l'outil Bond Graph, a permis de mettre en place des moyens de contrôle pour les GMP hybrides qui permettent de faire du contrôle temps réel et d'optimiser la répartition énergétique du système MTI tout en respectant les contraintes fonctionnelles. Notre valeur ajoutée dans cette partie a porté sur la mise en place de moyens de simulation qui permettent de tester plusieurs stratégies de gestion énergétique simultanément et de définir une stratégie optimisée qui peut être applicable sur toutes les chaînes de transmission hybrides

indépendamment de la configuration de l'architecture mécanique (c'est-à-dire l'emplacement des différents organes dans le véhicule).

Tout ce travail s'est effectué en parallèle avec le travail de définition de l'espace de collaboration. En effet, afin de pouvoir assurer le respect des contraintes pluridisciplinaires et gérer les connaissances métiers hétérogènes, nous avons pu à travers la mise en place d'une approche de modélisation basée sur les concepts d'IDM et le méta-modèle unifié PPO structurer les différentes données relatives à la conception du système MTI en prenant en compte les aspects systémiques et fonctionnels qui lui sont relatifs (décomposition systémique, fonctions de conception, spécifications, espace d'expertises, modèles métiers, etc.). A partir de ce moment, la convergence vers une solution de conception finale optimale est devenue principalement une problématique de calcul d'optimisation dans cet espace de collaboration. Ainsi, à l'aide des concepts CSP que nous avons intégré dans un outil de développement Or-Tool, nous avons pu calculer les différentes solutions admissibles et définir celle qui correspond au mieux aux exigences du projet (. De ce fait, notre approche a permis non seulement de capitaliser les connaissances relatives au projet de conception à travers leur représentation dans un méta-modèle spécifique, mais en plus d'assurer une convergence vers une solution de conception réaliste et optimisée globalement à partir des solutions qui sont optimisées localement dans les espaces d'expertises.



**Figure 113. Système de CDT hybride mécanique MTI de PSA**

Ainsi, nos travaux de thèse illustrés par les résultats que nous avons obtenus dans le cadre du projet MTI, ont permis de répondre à notre problématique de recherche et de concevoir le système souhaité.

Ceci en soit, a permis à des entreprises telles que PSA Peugeot Citroën de disposer de nouvelle démarche de conception pour leurs systèmes, qui leur permet de prendre en compte

les évolutions technologiques et de pouvoir réadapter facilement leurs moyens afin de favoriser l'innovation et la créativité dans leurs activités de développement de produits industriels.

Et c'est précisément ce que nous avons souhaité prouver à partir de ces travaux. Nous sommes en mesure aujourd'hui de partir de l'existant qui est largement suffisant pour couvrir les questions de conception relatives au système complexes pour innover dans nos sociétés industrielles. Cependant il est nécessaire voir même essentiel de le réadapter et de le faire évoluer à chaque fois afin qu'il puisse prendre en compte les différentes contraintes qui sont relatives à ce domaine. Ce travail nécessite une énorme collaboration entre le milieu scientifique et le milieu industriel qui dans la réalité des faits ne peuvent exister séparément **« Une science sans résultats concrets ne peut pas être légitime et une industrie sans science ne peut pas exister ».**

Ce travail de thèse a par la suite fait coopérer ces deux milieux, et nous sommes conscients que ceci n'est que le début d'un travail qui peut être largement enrichi. Le problème de conception des systèmes reste certainement l'un des plus complexes du fait qu'il est étroitement relié à la volonté du concepteur à inventer à nouveau et à innover. Les connaissances et les concepts requis sont très hétérogènes et l'expérience du concepteur reste un atout majeur traduisant sa capacité à remettre en question l'existant pour pouvoir l'adapter l'améliorer ou même l'utiliser différemment dans le but d'innover. Avec toute la modestie portée dans ce manuscrit, notre apport offre un ensemble d'outils méthodologiques permettant d'aborder un problème de conception d'un système concret et de converger vers une solution de conception finale qui correspond au mieux aux exigences requises par le concepteur. Toutefois, comme nous nous sommes employés à le souligner, nous ne pouvons pas considérer qu'il existe une meilleure et unique démarche de conception, mais chacune des démarches donne un éclairage particulier et peut être exploitée d'une façon adéquate. Le concepteur est alors incité à considérer son problème de conception, à comparer les idées et à aboutir à une solution réaliste et acceptable économiquement. Car comme nous l'avons vu tout au long de ce travail, un projet de conception est étroitement lié au degré de réussite de l'aspect collaboratif entre les différents experts et par la suite la maîtrise et la capitalisation des connaissances de collaboration. Ainsi, le travail présenté à travers cette thèse pourrait être éventuellement enrichi et améliorer afin de pouvoir dynamiser l'espace collaboratif d'un projet de conception en prenant en compte la phase de développement en série du système ainsi que la phase de production et de fabrication. Des réflexions sur la possibilité d'intégrer des indicateurs de performance et d'automatiser l'extraction des données des modèles d'expertises vers le méta-modèle unifié constitueront aussi des pistes de recherche très intéressantes à considérer.

Nous sommes alors conscients du chemin qui reste à faire d'un point de vue scientifique et industriel à ce sujet et de la nécessité d'avoir toujours une remise en question non seulement de nos démarches de conception, mais aussi de nos visions personnelles de notre intégrité et notre capacité d'adaptation dans une communauté, dans une société voir même dans un monde qui évolue constamment et comme l'a dit **Charles Darwin** : **« It's not the strongest or the most intelligent who survive, but those who can best manage change ».**

## **Bibliographies**

**AFNOR. 1990.** *AFNOR , Analyse de la valeur caractéristiques fondamentales.* 1990. Norme NF-X-50-152.

**AFNOR. 1991.** *AFNOR, Analyse de la valeur analyse fonctionnel, expression fonctionnelle du besoin et cahier des charges fonctionnel,.* s.l. : caractéristiques fondamentales, 1991. Norme NF-X-50-151.

**Albano&Suh. 1992.** *Albano L.D, Suh N.P, Axiomatic approach to structural design.* s.l. : Research in engineering design, 1992. ISBN 0-19-504345-6, Vol. 4, pp. 171-183.

**Avriel. 2003.** *Avriel M, Nonlinear Programming: Analysis and Methods.* s.l. : Dover Publishing, 2003. ISBN 0-486-43227-0.

**Axelrod&Cohen. 2000.** *Axelrod .R, Cohen M.D, Harnessing complexity.* s.l. : Basic Books, 2000. ISBN-13: 9780465005505.

**Badin. 2011.** *Badin J, Ingénierie hautement productive et collaborative à base de connaissances métier: vers une méthodologie et un méta-modèle de gestion des connaissances et configurations.* Belfort-Montbéliard : Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard-UTBM, 2011.

**Ben Beldi & al. 2014.** *Ben Beldi N, Dumouchel P E, COMMUTATION ENTRE UN CVT ET UN TRAIN EPHYCICLOIDAL AVEC VOLANT D'INERTIE .* Paris : s.n., 2014. Brevet National N°1460841 .

**Ben Beldi & al. 2014.** *Ben Beldi N, Dumouchel P E, MODE BOOST POUR UNE CHAÎNE DE TRACTION AVEC VOLANT D'INERTIE .* Paris : s.n., 2014. Brevet National N°1460601 .

**Ben Beldi & al. 2014.** *Ben Beldi N, Gauthier P, Roucoules L, Malburet F, Krysinski T, Unification of multiple models for complex system development, International conference of PLM .* Yokohama, Japan : Springer , 2014. ISBN 978-3-662-45937-9.

**Ben Beldi & al. 2013.** *Ben Beldi N, Malburet F, Roucoules L, Gauthier P, Fontaine D, VÉHICULE AUTOMOBILE COMPORTANT UNE CHAÎNE DE TRACTION HYBRIDE À MOTEUR THERMIQUE ET DISPOSITIF DE STOCKAGE D'ÉNERGIE, ET PROCÉDÉ D'UTILISATION POUR LE DÉMARRAGE DU MOTEUR THERMIQUE.* Paris : s.n., 2013. Brevet International N°1453671.

**Ben Beldi & al. 2014.** *Ben Beldi N, Malburet F, Roucoules L, Stratégie de commandes optimisée des CDT hybrides avec une capacité de stockage limitée.* Paris : s.n., 2014. Brevet National N°1550287.

**Ben Beldi & al. 2015.** *Ben Beldi N, Malburet F, Roucoules L, Gauthier P, Nouvelle Architecture hybride d'une chaîne de traction à volant d'inertie et CVT.* Paris : s.n., 2015. Brevet National N°1550942.

**Bytheway. 2007.** *Bytheway C, FAST Creativity&Innovation.* s.l. : Ed. J.Ross Publishing, 2007. ISBN 1-932159-66-5.

**Charpentier. 2014.** *Charpentier .F, Maitrise du processus de modélisation géométrique et physique en conception mécanique.* Bordeaux : Institut de Mécanique et d'Ingénierie, Université de Bordeaux, 2014.



- Chenouard. 2007.** *Chenouard R, Résolution par satisfaction de contraintes appliquée à l'aide à la décision en conception architecturale.* Paris : Thèse de Doctorat ENSAM, 2007.
- Combemale. 2008.** *Combemale .B, Approche de métamodélisation pour la simulation et la vérification de modèle-Application à l'ingénierie des procédés.* Toulouse : Thèse de doctorat Institut National Polytechnique de Toulouse, 2008.
- Cours\_Microlic.** <http://hp.microcllic.com/cours/crelation/index.php>. [En ligne]
- Dewulf&al. 2005.** *Dewulf W, Willems B, Duflou J.R, Estimating the environmental profile of early design concepts for an electric fruit juicer using the Eco-Pas methodology.* Grenoble, France : Life Cycle Engineering International Conference, 2005.
- Diaz & al. 2003.** *Diaz V.G, Lovelle J.M.C, Garcia-Bustelo B.C.P, Martinez O.S, Advances and applications in Model-Driven Engineering .* s.l. : IGI Global, 2003. ISBN 978-1-4666-4495-3.
- Dutant& Engel. 2005.** *Dutant .J, Engel .P, Philosophie de la connaissance: Croyances, connaissance, justification.* Paris : Vrin, 2005. ISBN 978-2-7116-1666.
- ECE. 2004.** *Economic and Social Council, Inland Transport Committee, .* s.l. : World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations 162nd session, 2004.
- engineering, Racecar. 2010.** <http://www.racecar-engineering.com/articles/f1/f1-kers-flybrid/>. [En ligne] 2010.
- Ermine. 2000.** *Ermine J.L, La gestion des connaissances, un levier stratégique pour les entreprises.* Toulouse : Revue d'intelligence économique , 2000. hal-00998829.
- Fichou. 2006.** *Fichou P, Un outil pour la modélisation et la simulation en CPGE.* Grenoble : Journées UPSTI, 2006.
- Freudenstein& al. 1979.** *FREUDENSTEIN F, MAKI E.R, The creation of mechanisms according to kinematic structure and function.* s.l. : Environement and Planning B, 1979. Volume 6, pages 375-391.
- Frey. 2010.** *Frey. E, Gomes. S, Yan. X.T, Numeric Chaining of Design Process information for mechatronic products.* Zurich : Mechatronics Conference, 2010.
- Friedenthal&al. 2009.** *Friedenthal S, Moore A, Steiner R, A pratical guide to SysML.* s.l. : the systems Modeling language MK/OMG Press, 2009. ISBN 978-0-12-378607-4.
- Garcia. 2015.** *Garcia. J, Développement d'une méthode d'évaluation de la performance environnementale des innovations incrémentales.* Paris : Thèse de doctorat, 2015.
- Genelot. 2001.** *Genelot .D, Manager dans la complexité.* s.l. : INSEP Consulting, 2001. ISBN-13: 978-2914006958.
- Gero. 1990.** *Gero J.S, Design prototypes: A knowledge representation schema for design.* s.l. : AI Magazine, 1990. ISBN 3-54055966-3 .
- Goldberg. 1989.** *Goldberg D, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning.* s.l. : Addison-Wesley Professional, 1989. ISBN 978-0201157673.

- Halin&al. 2005.** Halin G., Kubicki S., *Architecture dirigée par les modèles pour une représentation multi-vues du contexte de coopération*. s.l. : Proceedings of the 17th international conference on Francophone sur l'Interaction Homme-Machine, 2005.
- Hoeltzel& Chieng. 1990.** Hoeltzel D.A, Chieng W.H, *Knowledge based approaches for the creative synthesis of mechanisms*. s.l. : Computer Aided Design, 1990. doi:10.1016/0010-4485(90)90030-G .
- Horvat&Tobler. 1985.** Hrovat D, Tobler W, Tsangarides M.C, *Bond Graph modeling of dominant dynamics of automotive power trains*. Miami Beach, Etats Unis : ASME Winter Annual Meeting November 1985, 1985. pp. 293-301.
- Iraqi-Houssaini&al. 2011.** Iraqi-Houssaini M, Kleiner M, Roucoules L, *Mode-based (Mechanical) Product Design* . New Zealand : s.n., 2011.
- ISO-14258-1998. 1998.** ISO-14258-1998, *Systèmes d'automatisation industrielle-Concepts et règles pour modèles d'entreprise*. s.l. : International Standard Organization, 1998.
- Jalal. 2007.** Jalal N, *Optimisation énergétique en temps réel par modèles réduits d'une chaine de traction hybride avec prise en compte des transitoires thermiques*. s.l. : Thèse de doctorat, Université de Poitiers , 2007.
- John&al. 2007.** John E. H, Jeffrey D. U, *Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation*. s.l. : Addison-Wesley, 2007. ISBN 978-0-32146225-1.
- Kant. 1781.** Kant .E, *Critique de la raison pure*. Paris : Notes, 1781. ISBN : 9782070325757.
- Karlsson&al. 2006.** Karlsson R, Luttrupp C, *EcoDesign: what's happening? An overview of the subject area of EcoDesign and of the papers on this special issue*. s.l. : Journal of Cleaner Production, 2006. 14, 1291-1298.
- Karnopp&Rosenberg. 1990.** Karnopp D.C, Margolis D.L, Rosenberg R.C, *System Dynamics: a unified approach* . New York : Jhon Willey& Sons Inc, 1990. ISBN-13: 9780471621713.
- Kim et al. 2001.** Kim C.H., Weston R., Woo H.S., *Development of an integrated methodology for entreprise engineering* . s.l. : International Journal of Computer Integrated Manufacturing , 2001. Vol. 14, No. 4, pp. 473-488.
- Klein Meyer. 2008.** Klein Meyer J.S, *Contribution à la modélisation multi-physique des systèmes complexes dans un contexte de DFX. Application à la conception de micro-mécanismes*. Troyes : Thèse de l'Université de Technologie de Troyes, 2008.
- Krause&al. 2006.** Krause F.L, Kind C, *Simulation approaches to optimise the management of product development processes*. s.l. : Virtual Design and Automation (VIDA), 2006. ISBN 83-7143-2283.
- Labrousse&al. 2008.** Labrousse M, Bernard A, *FBS-PPRE: an Entreprise Knowledge Lifecycle Model, book chapter of Methods and Tools for Effective Knowledge Life-Cycle-Management*. s.l. : Ed. Springer Berlin Heidelberg, pp. 285-305, 2008. ISBN: 978-3-540-78430-2.

**Laffite. 2002.** *Laffite J, Aide à la conception et au dimensionnement énergétique et dynamique d'un système mécatronique par une méthode inverse-Application à une chaîne de traction automobile.* s.l. : Rapport interne PSA Peugeot Citroen, 2002. 94p.

—. **2004.** *Laffite. J, Aide à la conception et au dimensionnement énergétique et dynamique de systèmes mécatroniques par une approche Inverse: Application aux chaînes de transmission automobiles.* Lyon : Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2004.

**Le Moigne. 1978.** *Le Moigne . J.L, La théorie du système général: Théorie de la modélisation.* s.l. : Revue Française de sociologie, 1978. ISBN-10: 2130465153.

**Le Moigne. 1995.** *Le Moigne J.L, Les épistémologies constructivistes.* s.l. : PUF, 1995. ISBN : 978-2-13-060681-9.

**Le Moigne. 1999.** *Le Moigne J.L, MDSC.* 1999. ISBN-10: 210004382X.

**Lefebvre. 2003.** *Lefebvre D, Conception des lois de commande avancées au sein du contrôle du groupe Moto-propulseur, en vue de l'optimisation du confort de la réactivité du véhicule lors des phases transitoires.* Nantes : Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes, 2003.

**Linder. 2005.** *Linder R, Les plans d'expériences, un outil indispensable à l'expérimentateur.* s.l. : Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 2005. pp. 320.

**Mackworth. 1977.** *Mackworth A.K, Consistency in Networks of Relations.* Palo Alto CA : Artificial Intelligence, 1977. 8 (1), 99-118.

**McKay&al. 1979.** *McKay M.D, Beckman R.J, Conover W.J, "A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code".* s.l. : Technometrics (JSTOR Abstract) (American Statistical Association), 1979. ISSN 0040-1706.

**Micouin. 2006.** *Micouin. P, Propositions pour la définition et la mise en place de processus d'ingénierie de systèmes: Application au cas de la conception concourante dans le secteur de l'automobile.* Paris : thèse de doctorat, 2006.

**Millet&al. 2009.** *Millet D, Tchertchian N, Brissaud D, How to identify the most promising areas of environmental improvement at the early stage of the design process.* s.l. : International Journal of Design engineering, 2009. 299-319.

**Montanari. 1971.** *Montanari U, Networks of Constraints: Fundamental Properties and Applications to Picture Processing.* s.l. : Carnegie Mellon University, 1971. 7(2), 95-132.

**Monticolo. 2008.** *Monticolo .D, Une approche organisationnelle pour la conception d'un système de gestion des connaissances fondé sur le paradigme agent.* Belfort-Montbéliard : Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2008.

**Moore. 1966.** *Moore R.E, Interval Analysis.* s.l. : Prentice-Hall, Englewood Cliffs N.J, 1966. ISBN-13: 978-0898716696.

**Morin. 1991.** *Morin .E, La Méthode.* s.l. : Seuil, 1991. ISBN : 2020046342.

- Morin. 2008.** *Morin .E, L'esprit du temps.* Paris : Armin Colin, 2008. ISBN-13: 978-2200353568.
- Morin. 2005.** *Morin. E, Introduction à la pensée complexe.* s.l. : Essais, 2005. ISBN-10: 2757842005.
- MoteurNature. 2010.** <http://www.moteurnature.com/actu/2010/porsche-gt3R-hybride.php>. [En ligne] 2010.
- Ngwompo& al. 1996.** *Ngwompo R.F, Scavarda S, Thomasset D, Inversion of linear time-invariant SISO systems modelled by bond graph.* s.l. : Journal of the Franklin Institute, 1996. Vol. 333(B)n°2 mars, pp.157-174.
- Noel. 2008.** *Noel F, Roucoules L. The PPO design model with respect to digital entreprise technologies among product life cycle.* s.l. : Journal: International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2008. Vol. 21, pp. 139-145.
- OMG. 2008.** *OMG SysML tutorial .* 2008.
- Oosterman. 2001.** *Oosterman B.J, Improving Product Development Projects by Matching Product Architecture and Organization.* Netherlands : Thèse de doctorat, 2001. ISBN: 90-72591-99-2.
- Pahl&al. 1996.** *Pahl G, Beitz W, Engineering Design: a Systematic approach.* London : Springer, 1996. ISBN: 1846283183.
- Paytner. 1961.** *Paytner H.M, Analysis and design of engineering systems.* s.l. : Cambridge, MIT press, 1961. ISBN 0-262-16004-8.
- Picheral. 2006.** *Picheral L, Contribution à la conception préliminaire robuste en ingénierie de produit, thèse de l'université de Grenoble.* Grenoble : Thèse de doctorat, Université de Grenoble , 2006.
- Roucoules. 2007.** *Roucoules L, Contribution à l'intégration des activités collaboratives et métier en conception de produit.* Campiène : Mémoire de synthèse rédigé en vue d'obtenir l'Habilitation à Diriger des Recherches, 2007.
- Roucoules. 1999.** *Roucoules L, Méthodes et connaissances: Contribution au développement d'un environnement de conception intégrée.* Grenoble : Thèse de doctorat, Laboratoire Sols, Solides, Structures de grenoble (3S), INPG, 1999.
- Roucoules&al. 2006.** *Roucoules L, Lafon P, Knowledge Intensive Approach towards a multiple product modeling and geometry.* Alberta California : CIRP Design Seminar, 2006.
- Roucoules&Tichkiewitch. 2000.** *Roucoules L,Tichkiewitch S, CoDE: a Co-operative Design Environment. A new generation of CAD systems.* Grenoble , France : CERA, 2000.
- Rozenburg&al. 1995.** *Rozenburg N.F, Eeckels J, Product Design: fundamentals and methods.* s.l. : John wiley&Sons, 1995. ISBN 0 471 95465 9.
- Sadoun. 2013.** *Sadoun R, Intérêt d'une Source d'Energie Electrique Hybride pour véhicule électrique urbain – dimensionnement et tests de cyclage.* Lille : Ecole Centrale de Lille, 2013. N° d'ordre : 222.
- Scaravetti . 2004.** *Scaravetti D., Formalisation préalable d'un problème de conception pour l'aide à la décision en conception préliminaire.* Bordeaux, France : PhD Thesis, 2004.

- Snowden. 2002.** *Snowden .D, Complex acts of knowing paradox and descriptive self awareness.* s.l. : Journal of Knowledge Management, 2002. Vol. 6, No. 2, pp. 100-111.
- Stokes. 2001.** *Stokes M, Managing Engineering Knowledge; MOKA: Methodology for Knowledge Based Engineering Applications.* London : Ed. Professional Engineering Publishing, 2001. ISBN: 978-1-86058-295-0..
- Subramanian&Wang. 1993.** *Subramanian D,Wang C.S, Kinematic sythesis with configuration spaces.* USA : International Workshop On Qualitative Reasoning about physical systems, 1993.
- Sudarsan&al. 2005.** *Sudarsan R, Fenves S.J, A product information modeling framework for product lifecycle management.* s.l. : Computer-Aided Design, 2005. ISBN:0130212717.Vol. 37 (13), pp. 1399-1411.
- Suh. 2005.** *Suh .N, Complexity: Theory and applications.* Oxford : Oxford University Press, 2005. ISBN 10: 0195178769 .
- Suh. 1990.** *Suh .N, Principles of Design.* s.l. : New York and Oxford University Press, 1990. ISBN: 9780195043457.
- techno-car. 2011.** <http://techno-car.fr/premier-essai-du-systeme-kers-a-volant-dinertie-de-volvo/>. [En ligne] 2011.
- Tichkiewitch&al. 1995.** *Tichkiewitch S, Chapa E, Belloy P, Un modèle produit multi-vues pour la conception intégrée.* Montréal : Productivity in world without borders conference, 1995.
- Tomiyama. 1995.** *Tomiyama T, A design process model that unifies general design theory and empirical findings.* Boston USA : ASME 95-Design Engineering Technical Conferences, 1995.
- Villemeur. 1988.** *Villemeur A, Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels.* Paris : Collection de la direction des études et recherches d'Électricité de France, 1988. pp.744.
- wikipédia.** [http://fr.wikipedia.org/wiki/Porsche\\_911\\_GT3#Mod.C3.A8le\\_hybride](http://fr.wikipedia.org/wiki/Porsche_911_GT3#Mod.C3.A8le_hybride). [En ligne]
- Xie&al. 2005.** *Xie H, Henderson P, Kernahan M, Modelling and solving engineering product configuration problems by constraint satisfaction.* s.l. : International Journal of Production Research, 2005. 43 (20), 445-4469.
- Yvars. 2012.** *Yvars P.A, Millet D, Tchertchian N, Bénéfices et limites d'une approche CSP/ACV pour l'écoconception de systèmes complexes; application à une navette maritime à motorisation hybride.* s.l. : Hal, 2012. 00832425.
- Yvars&al. 2009.** *Yvars P.A, Lafon P, Zimmer L, Optimization of mechanical system: Contribution of constraint satisfaction method.* s.l. : International Conference on Computers & Industrial Engineering, 2009. 1379-1384.

## Annexes

### I. Conditions de passage des modes de fonctionnement de la CDT eMTI : A1

1-2 : Passage Mode 1 → Mode 2

$$\begin{aligned} N_{mot}(t-1) &= 2000 \text{ tr/mn} \\ \text{EtatVeh}(t) &= 1 \& N_{Volant}(t-1) \geq N_{mot}(t-1) \end{aligned}$$

1-4 : Passage Mode 1 → Mode 4

$$EC_{Volant}(t-1) < EC_{Volant\_min} \text{ et } \text{EtatVeh}(t) = 2$$

2-3 : Passage Mode 2 → Mode 3

$$EC_{Volant}(t-1) \geq EC_{Volant\_max} \text{ et } \text{EtatVeh}(t) = 1$$

2-5 : Passage Mode 2 → Mode 5

$$\text{EtatVeh}(t) = 2$$

3-5 : Passage Mode 3 → Mode 5

$$\text{EtatVeh}(t) = 2 \& N_{Volant}(t-1) \geq 2000 \text{ tr/mn}$$

3-5 : Passage Mode 3 → Mode 5

$$\text{EtatVeh}(t) = 2 \& N_{Mot}(t-1) = 2000 \text{ tr/mn}$$

4-6 : Passage Mode 4 → Mode 6

$$\begin{aligned} P_{MotOpti}(t) &\leq P_{Cns}(t) \text{ et } \text{EtatVeh}(t) = 3 \\ \text{Avec } P_{Cns}(t) &= P_{CnsAccel}(t) + P_{CnsLDR}(t) \end{aligned}$$

4-9 : Passage Mode 4 → Mode 9

$$\begin{aligned} P_{MotOpti}(t) &> P_{Cns}(t) \& \text{EtatVeh}(t) = 3 \\ \text{Avec } P_{Cns}(t) &= P_{CnsAccel}(t) + P_{CnsLDR}(t) \end{aligned}$$

5-7 : Passage Mode 5 → Mode 7

$$\text{EtatVeh}(t) = 3 \& EC_{Volant}(t-1) > EC_{Volant\_min}$$

6-9 : Passage Mode 6 → Mode 9

$$\begin{aligned} P_{MotOpti}(t) &> P_{Cns}(t) \text{ et } V_{itveh}(t-1) \leq 90 \\ \text{Avec } P_{Cns}(t) &= P_{CnsAccel}(t) + P_{CnsLDR}(t) \end{aligned}$$

6-10 : Passage Mode 6 → Mode 10

$$\text{EtatVeh}(t) = 4 \& EC_{Volant}(t-1) < EC_{Volant\_max} \& V_{itveh}(t-1) \leq 85 \text{ km/h}$$

6-11 : Passage Mode 6 → Mode 11

$$\text{EtatVeh}(t) = 4 \& V_{itveh}(t-1) > 90 \text{ km/h}$$

7-8 : Passage Mode 7 → Mode 8

$$\text{EtatVeh}(t) = 3 \& EC_{Volant}(t-1) < EC_{Volant\_min} \text{ ou } CnsV_{itveh}(t) > 90$$

7-10 : Passage Mode 7 → Mode 10

$$\text{EtatVeh}(t) = 4 \text{ et } EC_{Volant}(t-1) < EC_{Volant\_max}$$

7-11 : Passage Mode 7 → Mode 11

$$\text{EtatVeh}(t) = 5$$

|                                  |                                                                                                                                                                                         |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 8-6: Passage Mode 8 ➔ Mode 6     | <p><b>EtatVeh(t)=3 et PMotOpti(t)≤PCns(t) &amp; Vitveh(t-1)≤90 &amp; Nmot(t-1)≥400 tr/mn</b><br/> <b>Ou Vitveh(t-1) &gt;90</b><br/> <b>Avec PCns(t) = PCnsAccel(t) + PCnsLDR(t)</b></p> |
| 8-9: Passage Mode 8 ➔ Mode 9     | <p><b>EtatVeh(t)=3 &amp; PMotOpti(t)&gt;PCns(t) &amp; Vitveh(t-1)≤90 &amp; Nmot(t-1)≥400 tr/mn</b><br/> <b>Avec PCns(t) = PCnsAccel(t) + PCnsLDR(t)</b></p>                             |
| 8-10: Passage Mode 8 ➔ Mode 10   | <p><b>EtatVeh(t)=4 &amp; ECVolant(t-1)&lt;ECVolant_maxi</b></p>                                                                                                                         |
| 9-6: Passage Mode 9 ➔ Mode 6     | <p><b>EtatVeh(t)=3 et Vitveh(t-1)&gt;90</b><br/> <b>Ou EtatVeh(t)=3 &amp;</b></p>                                                                                                       |
| 9-7: Passage Mode 9 ➔ Mode 7     | <p><b>ECVolant(t-1)≥ECVolant_max et EtatVeh(t)=3 et Vitveh(t-1)≤90</b></p>                                                                                                              |
| 9-10: Passage Mode 9 ➔ Mode 10   | <p><b>EtatVeh(t)=4 et ECVolant(t-1)&lt;ECVolant_max</b></p>                                                                                                                             |
| 10-7: Passage Mode 10 ➔ Mode 7   | <p><b>EtatVeh(t)=3 et vitveh(t-1)≤90</b></p>                                                                                                                                            |
| 10-8: Passage Mode 10 ➔ Mode 8   | <p><b>EtatVeh(t)=3 et vitveh(t-1)&gt;90</b></p>                                                                                                                                         |
| 10-11: Passage Mode 10 ➔ Mode 11 | <p><b>EtatVeh(t)=4 et ECVolant(t-1)≥ECVolant_max</b></p>                                                                                                                                |
| 10-12: Passage Mode 10 ➔ Mode 12 | <p><b>EtatVeh(t)=5</b></p>                                                                                                                                                              |
| 11-7: Passage Mode 11 ➔ Mode 7   | <p><b>EtatVeh(t)=3</b></p>                                                                                                                                                              |
| 11-3: Passage Mode 11 ➔ Mode 12  | <p><b>EtatVeh(t)=5</b></p>                                                                                                                                                              |





## MODELISATION ET OPTIMISATION DES SYSTEMES COMPLEXES EN CONCEPTION INNOVANTE : APPLICATION AUX CHAINES DE TRANSMISSION HYBRIDES

**RESUME :** Dans un contexte industriel qui évolue rapidement et constamment, les constructeurs automobiles sont amenés à développer des produits qui soient en adéquation avec des demandes d'un marché international et qui respectent en même temps les contraintes réglementaires imposées. Les systèmes de chaîne de transmission hybrides rentrent donc dans cette volonté des constructeurs à vouloir proposer des produits véhicules performants, à faible coût et respectant les contraintes d'émission de gaz polluants. A travers le travail effectué dans cette thèse, nous proposons une démarche de conception permettant de modéliser un système technique complexe à différents niveaux systémiques au cours du cycle de conception, de l'optimiser localement à partir des expertises métiers, de modéliser les connaissances collaboratives qui sont échangées entre les modèles métiers et d'optimiser l'espace de conception afin de converger vers une solution de conception optimale dans un contexte d'innovation ou nous partons de la feuille blanche.

L'objectif de ce travail est de proposer une nouvelle façon d'aborder les problèmes de conception des systèmes complexes, qui s'adapte au contexte de conception innovante tout comme la conception routinière. Ceci afin de permettre aux entreprises telles que PSA Peugeot Citroën de pouvoir proposer des produits avec des technologies à forte rupture tout en réduisant leurs coûts et garantir leurs images de marque. Ce travail a été illustré et validé à travers les résultats obtenus dans le cadre du projet de conception de chaîne de transmission hybride MTI effectué au département d'innovation de PSA Peugeot Citroën.

**Mots clés :** Conception des systèmes complexes, modélisation multi-vues, ingénierie dirigée par les modèles, optimisation, chaîne de transmission hybride, modèles d'expertises. .

### MODELING AND OPTIMIZATION APPROACH FOR THE DESIGN OF COMPLEX SYSTEMS IN INNOVATION/ CASE STUDY APPLIED TO A HYBRID POWERTRAIN SYSTEM

**ABSTRACT:** In an industrial context that is continuously evolving and changing, automotive constructors find themselves obliged to develop their products by taking into account the requirements of an international market and the imposed regulations in this field. Hybrid powertrain systems fits into this constructor will to propose to customers efficient products that respects the regulation regarding gas emissions and presents a profitable low cost. Through the work done in this PhD, we propose a design approach that allow the modeling of a complex technical system in its different systemic levels during the design process, the local optimization done from professional expertise, the modeling of collaborative data exchanged between expert models and the optimization of the design space in order to converge towards an optimal design solution in innovative context. The aim of our work is to propose a new way of dealing with design problems related to complex systems that can be adapted to an innovative design context. This will allow companies such as PSA Peugeot Citroën to be able to diversify their products and integrated even the latest technology in it. This work has been illustrated and validated through the results obtained on the MTI project for the design of hybrid powertrain.

**Keywords :** complex system design, multi-views modeling, model based engineering, optimization, hybrid powertrain, expert models.

