



**HAL**  
open science

# Modélisation et simulation thermique de différentes architectures de chaîne de traction d'un véhicule hybride

Guillaume Baysset

► **To cite this version:**

Guillaume Baysset. Modélisation et simulation thermique de différentes architectures de chaîne de traction d'un véhicule hybride. Thermique [physics.class-ph]. École centrale de Nantes, 2022. Français. NNT : 2022ECDN0022 . tel-04041404

**HAL Id: tel-04041404**

**<https://theses.hal.science/tel-04041404>**

Submitted on 22 Mar 2023

**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.

# THESE DE DOCTORAT DE

L'ÉCOLE CENTRALE DE NANTES

ÉCOLE DOCTORALE N° 602

*Sciences pour l'Ingénieur*

Spécialité : *Energétique - Thermique - Combustion*

Par

**Guillaume BAYSSET**

## **Modélisation et simulation thermique de différentes architectures de chaîne de traction d'un véhicule hybride**

**Thèse présentée et soutenue au Centre Technique et d'Essais Renault à Lardy, le 03/06/2022**

**Unité de recherche :** UMR 6598, Laboratoire de recherche en Hydrodynamique, Énergétique et Environnement Atmosphérique (LHEEA)

### **Rapporteurs avant soutenance :**

Marija JANKOVIC      Professeure des universités, Centrale Supélec, Gif sur Yvette  
Michael DELIGANT      Maître de conférences HDR, ENSAM Paris

### **Composition du Jury :**

Président :	Pascal HIGELIN	Professeur des universités, Université d'Orléans
Examineur :	Alain LEFEBVRE	Expert simulation des systèmes fluides HDR, Renault SA
Dir. de thèse :	Pascal CHESSE	Professeur des universités, Ecole Centrale de Nantes
Co-dir. de thèse :	David CHALET	Professeur des universités, Ecole Centrale de Nantes

### **Invité :**

Eric LANDEL      Ingénieur de recherche, Renault SA



Ma thèse est un travail de collaboration entre l'école Centrale de Nantes et Renault. Elle s'est principalement déroulée sur le site Renault de Lardy en région Ile-de-France.

Je tiens à remercier particulièrement mes encadrants de thèse Pascal Chessé (ECN), David Chalet (ECN) et Alain Lefebvre (Renault) de m'avoir accompagné durant ces trois années. Le soutien ainsi que la confiance qu'ils m'ont porté a grandement participé à la réussite de ce projet.

Je remercie chaleureusement Jean-Baptiste Chancerelle (Renault), Martin Charrier (Renault) ainsi que Pierre-Emmanuel Dumouchel (DesslA) pour les nombreuses heures de discussions qui m'ont fortement inspirées pour mener à bien les travaux de cette thèse.

Je remercie également Thomas Gilormini, qui a débuté sa thèse le même jour que moi, dans la même école doctorale et même entreprise, pour les discussions que nous avons pu avoir afin d'avancer ensemble.

Enfin, je ne remercierai jamais assez ma famille et surtout ma femme pour le soutien immense qu'ils m'ont apporté durant ces trois années.



# Table des matières

---

Table des matières .....	1
Nomenclature .....	5
Chapitre 1 - Introduction.....	13
1.1 Contexte.....	13
1.1.1 Réchauffement climatique et législation .....	13
1.1.2 Cycles d'homologation .....	15
1.1.3 Tendances du marché de l'automobile .....	15
1.2 Electrification des véhicules .....	17
1.2.1 Systèmes véhicules hybrides .....	17
1.2.2 Systèmes de refroidissement.....	18
1.3 Processus de développement actuel .....	22
Chapitre 2 - Etat de l'art .....	25
2.1 Introduction .....	25
2.2 Développement de systèmes complexes .....	25
2.2.1 Approche ingénierie système .....	25
2.2.2 Approche MBSE .....	26
2.3 Introduction à la conception du système véhicule hybride .....	28
2.4 Introduction à la conception du sous système de refroidissement.....	29
2.5 Méthodes de génération d'architecture .....	30
2.5.1 Méthodes classiques .....	32
2.5.2 Méthodes assistées par ordinateur .....	34
2.6 Méthodes d'optimisation du dimensionnement.....	36

2.7	Méthodes d'optimisation du contrôle .....	40
2.8	Méthodes d'optimisation multicritère .....	45
2.9	Evaluation automatique d'architecture système .....	46
2.10	Modélisation et simulation énergétique pour système HEV et sous-système de refroidissement.....	51
Conclusions sur l'état de l'art.....		57
Chapitre 3 - Génération et optimisation énergétique automatique d'architectures de système HEV .....		
		59
3.1	Introduction .....	59
3.2	Représentation d'architecture organique de système HEV .....	62
3.3	Génération automatique d'architecture de système HEV .....	64
3.4	Analyse de la concurrence.....	68
3.5	Modélisation énergétique d'architecture de système HEV.....	70
3.5.1	Modélisation véhicule et transmissions mécaniques .....	70
3.5.2	Modèles de moteur thermique .....	71
3.5.3	Modèles de machine électrique et électronique de puissance.....	73
3.5.4	Modèles de batterie .....	77
3.6	Evaluation et optimisation automatique d'architectures de système HEV.....	80
3.6.1	Détection de modes réalisables et filtre .....	80
3.6.2	Optimisation LGE (DP) .....	83
3.7	Exemple d'application .....	86
3.8	Conclusion .....	91
Chapitre 4 - Génération automatique d'architectures de sous-système de refroidissement.....		
		93
4.1	Introduction .....	93
4.2	Outil <i>Studio</i> (SIEMENS).....	94
4.2.1	Présentation de l'outil <i>Studio</i> .....	94

4.2.2	Cas d'application sur véhicule conventionnel.....	96
4.3	Outil basé sur le concept d'arbre de décision.....	98
4.3.1	Représentation d'architecture de système de refroidissement.....	98
4.3.2	Génération automatique d'architectures de sous-système de refroidissement.....	99
4.3.3	Exemple d'application .....	115
4.4	Conclusion .....	118

## Chapitre 5 - Optimisation énergétique d'architectures de sous-système de refroidissement ..... 119

5.1	Introduction .....	119
5.2	Modélisation sous-système de refroidissement.....	120
5.2.1	Modélisation des composants primaires .....	120
5.2.2	Modélisation des composants secondaires.....	121
5.2.3	Modélisation dans GT-SUITE .....	127
5.3	Optimisation hydraulique .....	129
5.3.1	Calcul hydraulique .....	129
5.3.2	Calcul des coefficients de pondération.....	132
5.3.3	Optimisation hydraulique.....	134
5.3.4	Etude de différents algorithmes d'optimisation .....	137
5.3.5	Permutation de composants sur branche hydraulique .....	140
5.3.6	Ordonnancement de branchement .....	141
5.3.7	Positionnement de vanne(s) hydraulique(s) .....	145
5.3.8	Corrélation résultats optimisation hydraulique et outil métier Renault (AMESim).....	146
5.4	Optimisation 3D .....	149
5.5	Optimisation diamètres.....	151
5.6	Optimisation multicritères .....	152
5.7	Exemples d'applications .....	154

5.7.1	Application méthode d'optimisation globale sur projet Renault .....	155
5.7.2	Etude d'influence de permutation composants.....	157
5.7.3	Etude d'influence de l'ordonnement de branchement.....	158
5.7.4	Etude d'influence de l'architecture système HEV .....	159
5.7.5	Etude de sensibilité sur les exigences de refroidissement.....	161
5.8	Conclusion .....	163
Conclusion générale et perspectives .....		166
Annexe A Architectures parallèles « PX » .....		169
Annexe B Arbre de décision appliqué à la génération de numéros de téléphone .....		171
Annexe C Algorithme de détection de boucle hydraulique morte....		173
Annexe D Algorithme de positionnement de vanne(s) hydraulique(s)		175
Annexe E Méthode de prédiction d'échanges thermiques pour radiateur .....		177
Annexe F Méthode de prédiction de caractéristiques de pompe hydraulique centrifuge.....		183
Annexe G Plans d'expériences 4 variables à 2 niveaux .....		189
Bibliographie .....		191

---

## Nomenclature

$A$	$m^2$	Section de passage
$C_d$	-	Coefficient d'écoulement
$c_p$	$J/kg/K$	Chaleur massique à pression constante
$D_2$	$m$	Diamètre roue pompe
$f(.)$	-	Fonction détermination point d'arrivée DP
$F_a$	$N$	Force de résistance aérodynamique
$F_i$	$N$	Force d'inertie
$F_r$	$N$	Force de résistance au roulement
$g$	$m/s^2$	Accélération de la pesanteur standard
$G_a$	$kg/s/m^2$	Débit massique par unité de surface
$G_f$	$kg/s/m$	Débit massique par unité de longueur
$H$	$Pa$	Pression hydrostatique
$H_{radia.}$	$m$	Hauteur radiateur
$I_b$	$A$	Courant batterie
$I_{EM}$	$kg.m^2$	Moment d'inertie EM
$I_{ICE}$	$kg.m^2$	Moment d'inertie ICE
$L(.)$	-	Fonction coût
$m$	-	Nombre de branches
$\dot{m}$	$kg/s$	Débit massique
$\dot{m}_a$	$kg/s$	Débit massique air

$\dot{m}_{\text{carburant}}$	$kg/s$	Débit carburant
$\dot{m}_f$	$kg/s$	Débit massique fluide interne
$mode$	-	Mode HEV
$n$	-	Nombre de nœuds
$N$	-	Nombre total de pas de temps
$n_{br}$	-	Nombre de branches
$n_{br_{max}}$	-	Nombre de branches maximales
$n_c$	-	Nombre de connexions
$p$	-	Nombre de possibilités
$P$	$W$	Puissance thermique
$P_b$	$W$	Puissance électrique batterie
$P_{EM}$	$W$	Puissance électrique EM
$P_{hydraulic}$	$W$	Puissance hydraulique
$P_{Joule}$	$W$	Pertes Joule
$P_{thermique_{EM}}$	$W$	Pertes thermiques EM
$P_{thermique_{ICE}}$	$W$	Pertes thermiques ICE
$P_{thermique_{PEB}}$	$W$	Pertes thermiques PEB
$Q$	$J$	Chaleur
$Q_b$	$A.h$	Capacité batterie
$Q_{b_{Max}}$	$A.h$	Capacité maximale batterie

$Q_{refroid.\rightarrow clim.}$	$J$	Chaleur transférée du circuit de refroidissement vers le circuit de climatisation
$Q_v$	$m^3/s$	Débit volumique
$Re$	-	Nombre de Reynolds
$r_{int}$	$\Omega$	Résistance interne
$S$	$m^2$	Surface
$Se$	$m^2$	Perméabilité
$T_{ae}$	$K$	Température entrée d'air
$T_{as}$	$K$	Température sortie d'air
$T_{bat}$	$K$	Température batterie
$TCO$	$K$	Température d'eau de refroidissement
$T_{EM}$	$N.m$	Couple EM
$T_{EM_i}$	$N.m$	Couple inertiel EM
$T_{EM_{max}}$	$N.m$	Couple maximal EM
$T_{EM_{min}}$	$N.m$	Couple minimal EM
$T_f$	$K$	Température fluide
$T_{fluide}$	$K$	Température fluide
$T_{fluide_{in}}$	$K$	Température d'entrée fluide
$T_{fluide_{out}}$	$K$	Température de sortie fluide
$T_{fm}$	$K$	Température mélange fluide
$T_{gb}$	$N.m$	Couple GB

$T_{ICE}$	$Nm$	Couple ICE
$T_{ICE_i}$	$N.m$	Couple inertiel ICE
$T_{ICE_{max}}$	$N.m$	Couple maximal ICE
$T_{ICE_{min}}$	$N.m$	Couple minimal ICE
$T_{seuil}$	$K$	Température d'activation du chiller
$T_{tot}$	$N.m$	Couple total
$T_v$	$N.m$	Couple de la roue
$u$	-	Variable de contrôle
$U$	$W/K/m^2$	Coefficient d'échange thermique
$U_2$	$m/s$	Vitesse
$V(.)$	-	Fonction valeur DP
$V$	$m^3$	Volume
$V_a$	$m/s$	Vitesse d'air
$v_{oc}$	$V$	Source de tension à vide
$W$	$m$	Largeur radiateur
$W_c$	$m$	Largeur caractéristique
$x$	%	Etat de charge batterie
$\alpha$	-	Coefficient de pondération
$\beta_2$	$m$	Largeur pale pompe
$\delta K$	$W/K$	Conductance thermique
$\Delta P$	$Pa$	Pertes de charge

$\Delta P_{comp.}$	<i>Pa</i>	Pertes de charge
$\varepsilon$	%	Efficacité thermique
$\phi(.)$	-	Fonction pénalités
$\varnothing$	<i>m</i>	Diamètre
$\gamma$	-	Rapport de réduction GB
$\eta_b$	-	Rendement énergétique batterie
$\eta_{EM}$	-	Rendement énergétique EM
$\eta_{gb}$	-	Rendement mécanique GB
$\omega_{EM}$	<i>rad/s</i>	Vitesse de rotation EM
$\omega_{gb}$	<i>rad/s</i>	Vitesse de rotation GB
$\omega_{ICE}$	<i>rad/s</i>	Vitesse de rotation ICE
$\omega_v$	<i>rad/s</i>	Vitesse de rotation roue
$\dot{\omega}_{gb}$	<i>rad/s<sup>2</sup></i>	Accélérations angulaires GB
$\dot{\omega}_v$	<i>rad/s<sup>2</sup></i>	Accélérations angulaires roue
$\rho$	<i>kg/m<sup>3</sup></i>	Masse volumique eau
$\rho_a$	<i>kg/m<sup>3</sup></i>	Masse volumique air
ADEME	-	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
Aj	-	Ajutage
BDD	-	Block definition diagrams
BP	-	By-pass

BT	-	Basse température
CAD	-	Computer aided design
CAFE	-	Corporate average fuel economy
CAH	-	Classification ascendante hiérarchique
CD	-	Charge depleting
CDC	-	Cahier des charges
COBYLA	-	Constrained optimization by linear approximation
COP	-	Conference of parties
DBSCAN	-	Density-based spatial clustering of applications with noise
DIRECT	-	Dividing rectangles
DP	-	Dynamic programming
ECMS	-	Equivalent consumption minimization strategy
ECN	-	Ecole Centrale de Nantes
EGR	-	Exhaust gas recirculation
EM	-	Electrical machine
FD	-	Final drive
FDM	-	Finite difference method
GB	-	Gearbox
GES	-	Gaz à effet de serre
GMP	-	Groupe motopropulseur
HEV	-	Hybrid electric vehicle

HT	-	Haute température
IBBA	-	Interval Branch & Bound Algorithm
IBD	-	Internal block diagrams
ICE	-	Internal combustion engine
IFP	-	Institut français du pétrole
LGE	-	Loi de gestion d'énergie
MBSE	-	Model-based systems engineering
MIC	-	Model identity card
MPC	-	Model predictive control
NEDC	-	New european driving cycle
NTU	-	Number of transfer units
PEB	-	Power electronic bloc
PHEV	-	Plug-in hybrid electric vehicle
PI	-	Proportionnel, intégral
PID	-	Proportionnel, intégral, dérivé
PMP	-	Principe du minimum de Pontryagin
QP	-	Quadratic Programming
RDE	-	Real driving emissions
SOC	-	State of charge
SQP	-	Sequential Quadratic Programming
SUV	-	Sports utility vehicle

SysML	-	Systems modeling language
UBT	-	Ultra basse température
UE	-	Union européenne
WLTC	-	Worldwide harmonised light vehicle test cycles
WLTP	-	Worldwide harmonised light vehicle test procedures

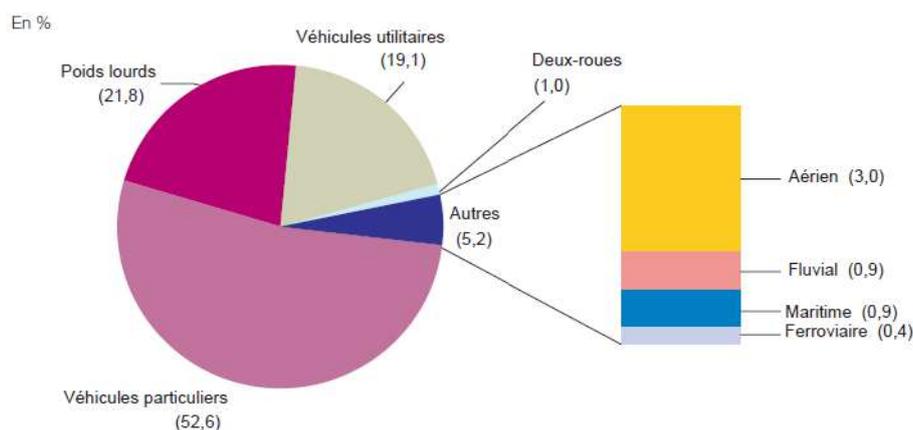
# Chapitre 1- Introduction

## 1.1 Contexte

### 1.1.1 Réchauffement climatique et législation

Afin de lutter contre le réchauffement climatique, la COP 21 qui a eu lieu à Paris en 2015 a permis de fixer deux objectifs principaux : limiter le réchauffement climatique à 2°Celsius maximum d'ici la fin du siècle et par rapport à l'ère préindustrielle; protéger les populations subissant les conséquences du réchauffement climatique. Afin de respecter le premier objectif des mesures doivent être prises pour limiter les émissions de gaz à effet de serre. Aujourd'hui les émissions de CO<sub>2</sub> ne cessent d'augmenter.

Le secteur des transports routiers est très émetteur de gaz à effet de serre (GES), en France ce secteur émet 30% des émissions totales [1]. La *Figure 1* représente les répartitions d'émissions de GES du secteur des transports en fonction du mode de transport. Le secteur routier, à lui seul, est responsable de 96% des émissions totales, et est également responsable de la pollution atmosphérique (particules fines) mais aussi des nuisances sonores en régions urbaines.



Source : Citepa, juin 2015

1. Émission de GES par tonne-km de marchandises transportées.
2. Émission de GES par km-voyageur transporté.
3. Comprend uniquement les transports à l'intérieur de la métropole.

Figure 1 : Répartition des émissions de GES des transports dans l'UE [2]

En France en 2017, les émissions de GES ont augmenté par rapport à 2016, et dépassent de +10,6% les objectifs fixés au secteur du transport [3].

Face à ces émissions polluantes, les normes Euro (définies par l'UE) imposent aux constructeurs automobiles des critères de plus en plus contraignants fixant le seuil d'émissions polluantes (HC, CO, Nox, particules) et de CO<sub>2</sub> dont l'unité est le gramme par km et par véhicule vendu. Ces engagements de réduction de CO<sub>2</sub> formulés par les normes Euro, sont également suivis par les autres pays hors de l'UE, avec des niveaux variables mais convergeant vers un niveau comparable en 2025. Ces engagements sont formulés dans les réglementations CAFE et sont représentés sur la *Figure 2*.

Depuis 2021, les constructeurs n'atteignant pas ces objectifs en zone Europe, sont pénalisés et doivent s'acquitter d'amendes s'élevant à 95 euros par véhicule et par gramme excédentaire.

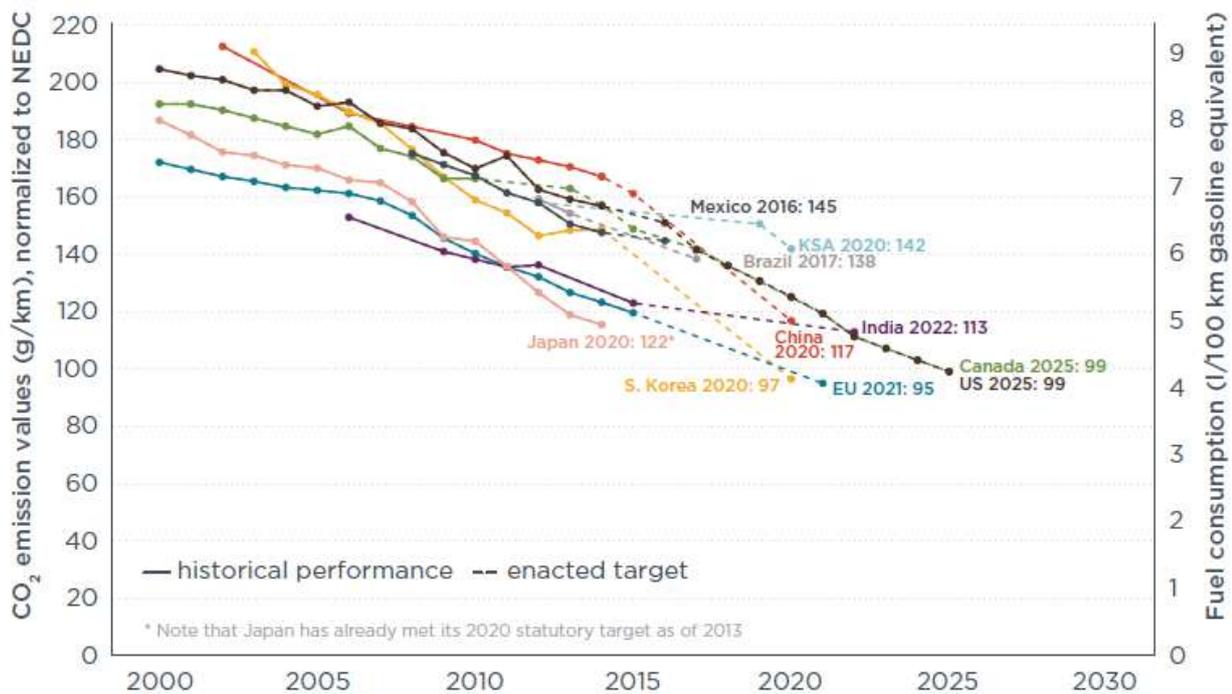


Figure 2 : Evolutions des objectifs des émissions de CO<sub>2</sub> des flottes de véhicules et comparaison par pays [4]

### 1.1.2 Cycles d'homologation

Pour respecter les normes en vigueur, les véhicules sont testés sur des cycles, pendant lesquels les émissions à l'échappement, la consommation en carburant et l'autonomie pour les véhicules « zéro émissions » sont mesurés. Depuis le 1<sup>er</sup> septembre 2017 l'homologation des nouveaux véhicules se fait avec des essais plus proches de la conduite réelle [5]. Le cycle RDE sur route et WLTP en laboratoire remplacent le cycle NEDC. Contrairement au cycle NEDC, qui était davantage constitué de roulages en ville, le cycle WLTP est développé à partir de données de conduites plus réalistes. Le cycle comprend des accélérations plus franches et une vitesse maximale de 131 km.h<sup>-1</sup>. Comme constaté sur la *Figure 3* le temps de conduite est divisé en part égale entre urbain, extra urbain et autoroute.

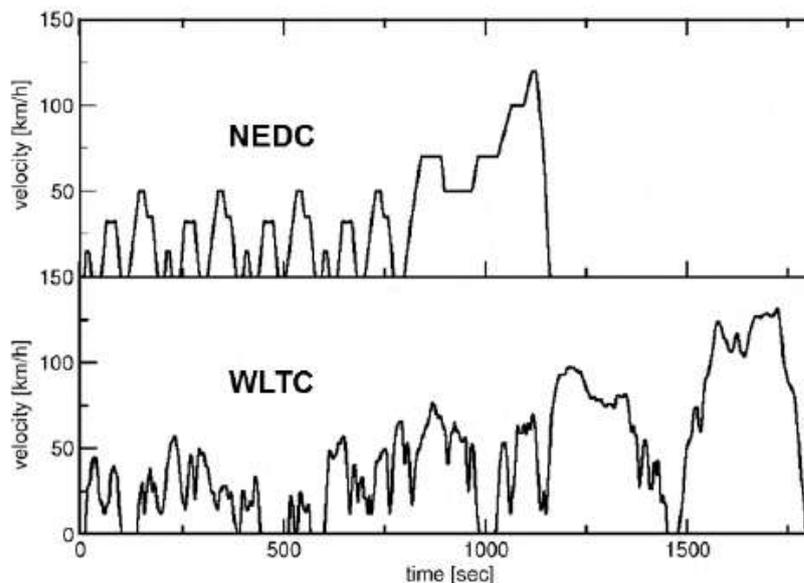


Figure 3 : Profils de vitesses des cycles de conduite NEDC et WLTC [6]

### 1.1.3 Tendances du marché de l'automobile

Les constructeurs doivent prendre en compte les nouvelles exigences formulées par les réglementations CAFE dans leurs processus de développement de nouveaux véhicules. Il existe plusieurs leviers afin de réduire la consommation et les émissions polluantes des véhicules. La réduction du poids du véhicule, l'amélioration de l'aérodynamique, l'optimisation des pneumatiques, l'optimisation des moteurs à combustion interne et boîtes de vitesses, le développement de différents niveaux

d'électrification sont les leviers principaux. L'étude sur le développement d'un véhicule hybride rechargeable [7], montre que l'hybridation est le levier permettant des réductions sur la consommation et les émissions les plus significatives.

Une étude réalisée par l'IFP et l'ADEME [8] montre la tendance vers l'électrification segment par segment. Les résultats montrent que les motorisations essence et diesel vont être fortement concurrencées d'ici 2030 sur leurs coûts totaux de possession mais aussi sur leur impact environnemental. L'étude se base sur le mix énergétique français, sur 10 architectures de groupes moto-propulseurs (GMP) et sur une évolution estimée des caractéristiques des véhicules (aérodynamique, frottement pneumatique, etc....) et des prix à l'horizon 2030. Pour le déplacement de personnes une des solutions actuelles afin de réduire les GES est le transport en commun électrique ou hybride. Puis viennent les architectures de véhicules hybrides rechargeables (PHEV), devant en termes de parts de marché les véhicules électriques et les transports en commun diesel. Les émissions de CO<sub>2</sub> devraient être limitées à 50 g.km<sup>-1</sup>d'ici 2030.

Une autre étude s'est intéressée à la prévision de la part de marché des différents types de propulsion pour les véhicules particuliers. La *Figure 4* résume cette répartition en Europe et montre une augmentation nette de la part de véhicules électrifiés.

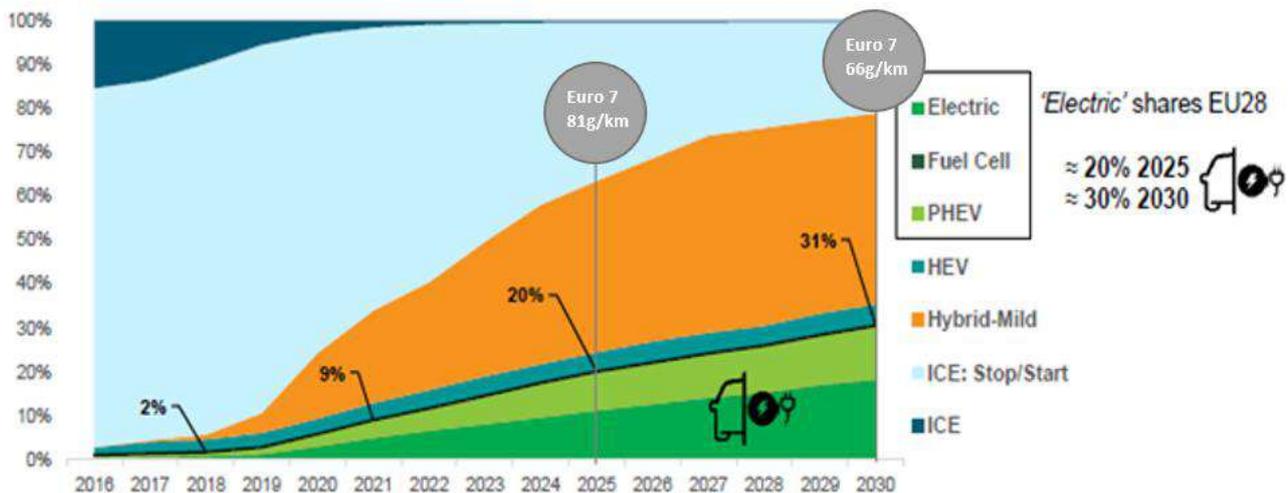


Figure 4 : Parts de marché en Europe des différentes solutions de propulsion [9]

## 1.2 Electrification des véhicules

### 1.2.1 Systèmes véhicules hybrides

Un véhicule hybride utilise deux sources d'énergies distinctes, généralement l'énergie thermique et électrique. Les intérêts principaux de l'hybridation d'un véhicule sont : la possibilité de récupérer l'énergie cinétique lors des phases de décélération et de freinage (cette énergie est dissipée sous forme de chaleur sur les véhicules thermiques conventionnels), et bénéficier de l'apparition de degrés de liberté sur le contrôle des organes de puissances grâce à l'ajout d'une seconde source d'énergie, pour faire fonctionner le moteur thermique sur des points de fonctionnements de rendements élevés.

Il existe différents taux d'hybridation (représentant le ratio des puissances des différentes sources d'énergie) et différentes architectures de véhicule hybride permettant de réaliser différentes fonctionnalités (du « start and stop » au roulage en mode électrique).

Les tendances montrent qu'il n'y a pas d'architecture de véhicule hybride dominante qui a été identifiée. En effet l'étude de Yang *et al* [4] montre que chaque architecture de chaîne de traction hybride possède des caractéristiques spécifiques en termes de masse, volume, coût, complexité, rendement énergétique, conduite dynamique et confort pour le client. Les auteurs concluent sur la probabilité de voir apparaître différents concepts de véhicule hybride sur le futur marché de l'automobile. Une autre étude menée par Gindele [10] confirme qu'il n'existe pas de solution universelle, chaque application possède des prestations clients différentes, comme la performance, les coûts, le rendement énergétique, le volume utile. L'objectif est de trouver le meilleur système possible parmi toutes les solutions possibles répondant au cahier des charges du constructeur automobile.

En début de thèse une analyse de la concurrence a été menée pour évaluer la diversité d'architectures de chaîne de traction HEV existante sur le marché actuel de l'automobile. Cette analyse de la concurrence est résumée sur la *Figure 5*. La pluralité d'architectures est expliquée par le degré de liberté sur le positionnement de ou des machines électriques dans la chaîne de traction. De plus le choix de la quantité d'énergie embarquée dans la batterie augmente cette diversité.

Un constructeur automobile doit donc faire face aux options de solutions possibles, allant d'un véhicule faiblement électrifié, à un véhicule hybride rechargeable ou électrique pour toutes les catégories de performances, du segment A au SUV. Il est important de pouvoir gérer cette diversité et adapter les processus de développement de ce type de véhicule.

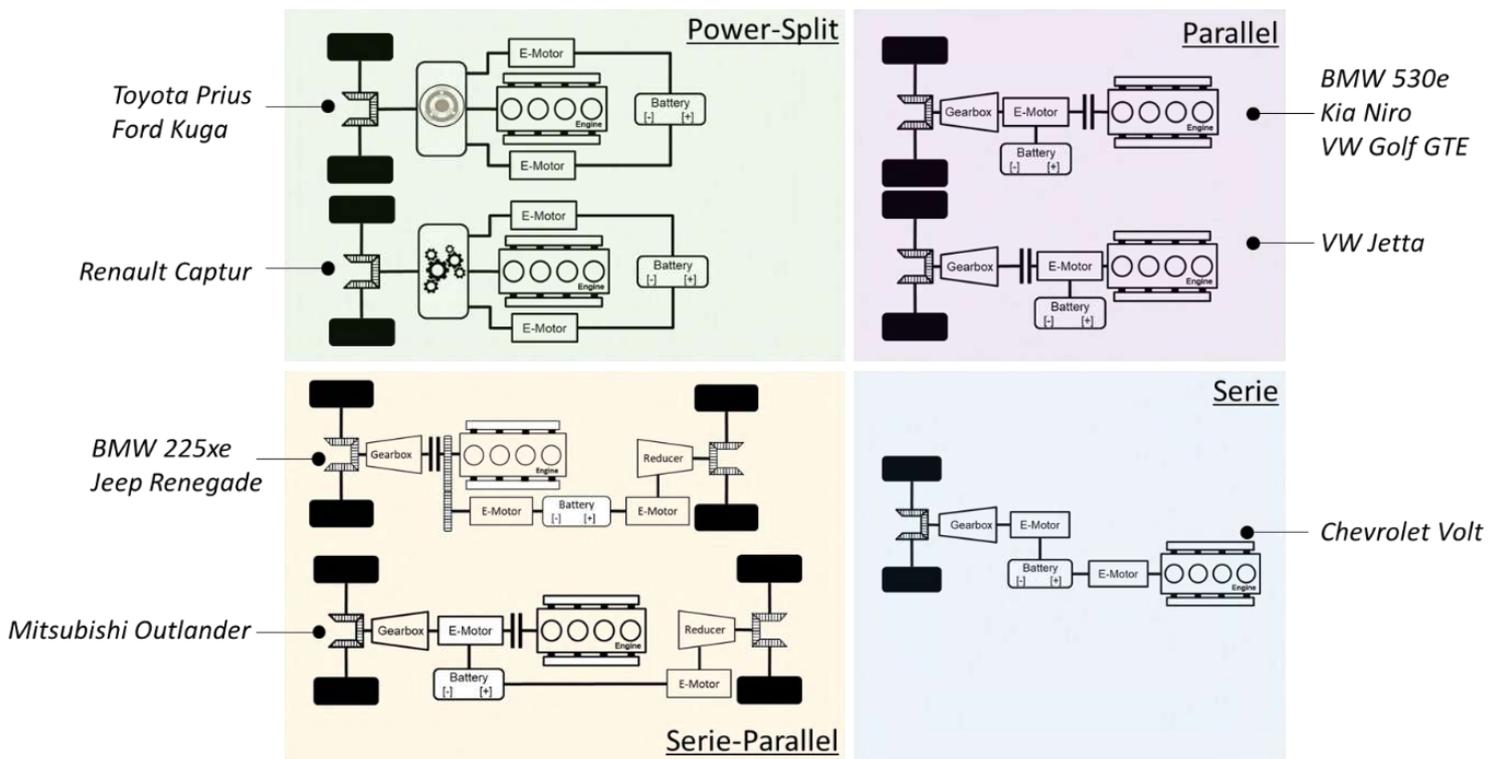


Figure 5 : Analyse de la concurrence (réalisée chez Renault) de chaînes de traction HEV

## 1.2.2 Systèmes de refroidissement

Les systèmes de refroidissement d'un véhicule jouent plusieurs rôles très importants, comme détaillé dans les travaux de Saab [11]. Ils sont en partie responsables des points suivants:

- le bon fonctionnement des autres organes de puissance (via le refroidissement de ces composants)

- la réduction de la consommation et l'augmentation des performances (via le refroidissement de l'air suralimenté et l'échangeur thermique lié à l'huile)
- la participation au respect des normes (via le refroidissement de l'EGR)
- le confort de l'habitacle (via l'aérotherme)

Un véhicule hybride possède des sources de chaleur supplémentaires par rapport à un véhicule conventionnel. Ces sources de chaleur sont par exemple un moteur électrique, une batterie, etc. De plus ces composants fonctionnent sur des plages de température spécifiques et leurs phases de fonctionnement sur un cycle donné ne sont pas forcément synchronisées. D'après Park [12], afin de prendre en compte ces exigences supplémentaires, le système de refroidissement d'un véhicule hybride nécessite plus de capteurs, contrôleurs, actionneurs et boucles de refroidissement.

L'objectif principal d'un circuit de refroidissement est de réguler et limiter la température du liquide de refroidissement afin de maîtriser la température des éléments à refroidir. Le système de refroidissement capte la chaleur au travers du liquide de refroidissement et les transporte au niveau du radiateur où ils sont évacués vers l'environnement extérieur. L'architecture du circuit hydraulique transportant la chaleur définit la répartition du débit d'eau au sein des différentes branches du circuit de refroidissement.

Conjointement à l'analyse de la concurrence sur les chaînes de tractions HEV réalisée, une seconde analyse de la concurrence a été menée sur les circuits de refroidissement de ces véhicules hybrides. Les *Figure 5* et *Figure 6* permettent d'apprécier l'importante variété de solutions existantes sur le marché actuel de l'automobile. Chaque solution est caractérisée par son nombre de boucles de circuit de refroidissement. Une boucle est définie par sa topologie et son mode de refroidissement (e.g. air, huile, réfrigérant). De plus, le niveau d'électrification du véhicule peut jouer sur la solution de refroidissement retenue (voir l'exemple de la Toyota Prius).

Il résulte de cette analyse qu'il n'y a pas d'architecture de circuit de refroidissement universelle, mais une diversité d'architectures. Cependant il est possible de dégager des tendances d'un point de vue macroscopique :

- Afin d'assurer une certaine autonomie en mode tout électrique et des phases demandant une forte charge, la solution de refroidissement par liquide s'impose pour les batteries. Cette observation est confirmée par l'étude [13].

- Aucun constructeur automobile ne mutualise tous les composants au sein d'une et même boucle de refroidissement. En effet étant données les températures de fonctionnement différentes de chaque organe de puissance et de leur mode d'opération, il est préférable de les séparer dans diverses boucles de refroidissement.

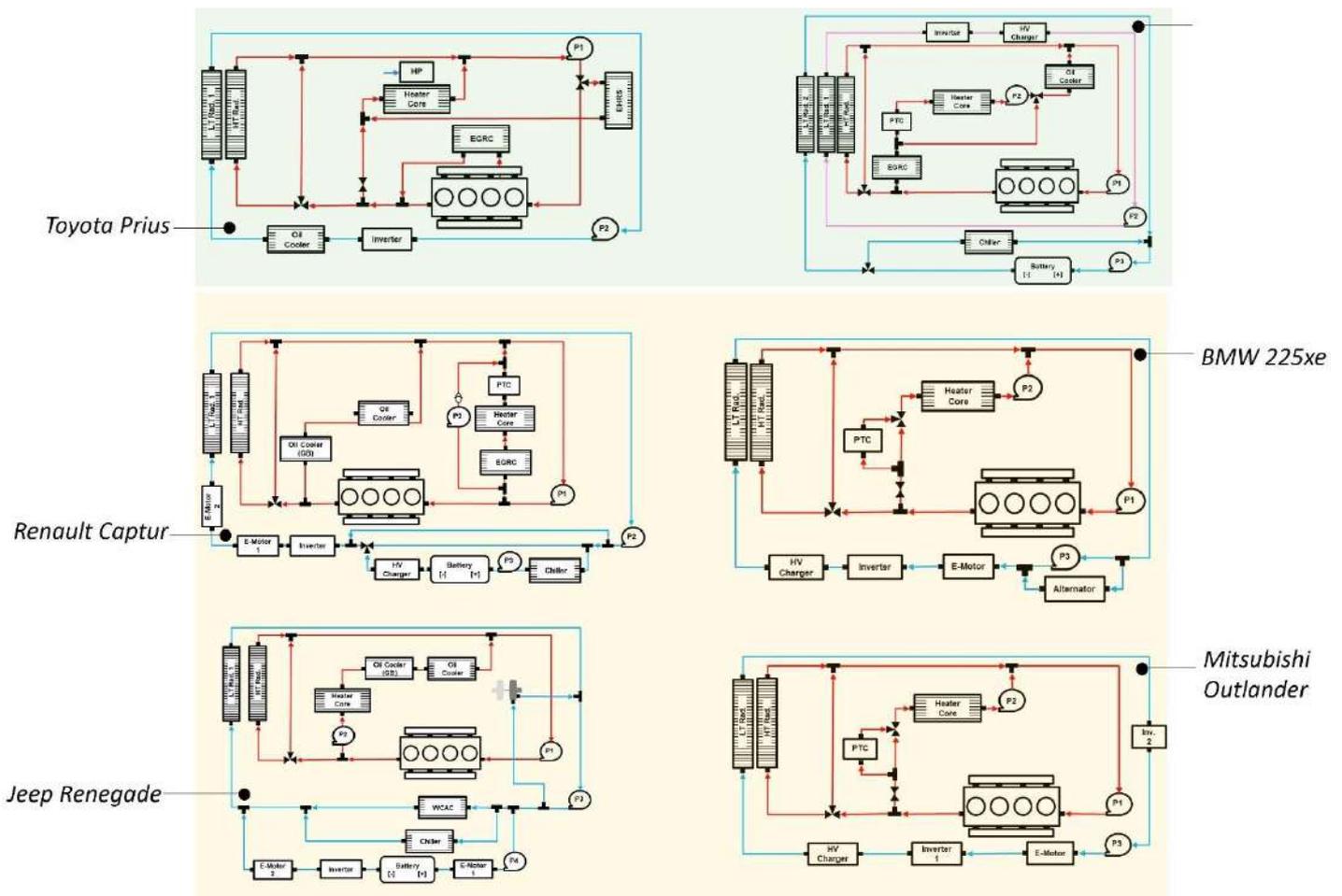


Figure 6 : Analyse de la concurrence (réalisée chez Renault) de circuit de refroidissement des architectures HEV type Power-Split et Série-Parallèle

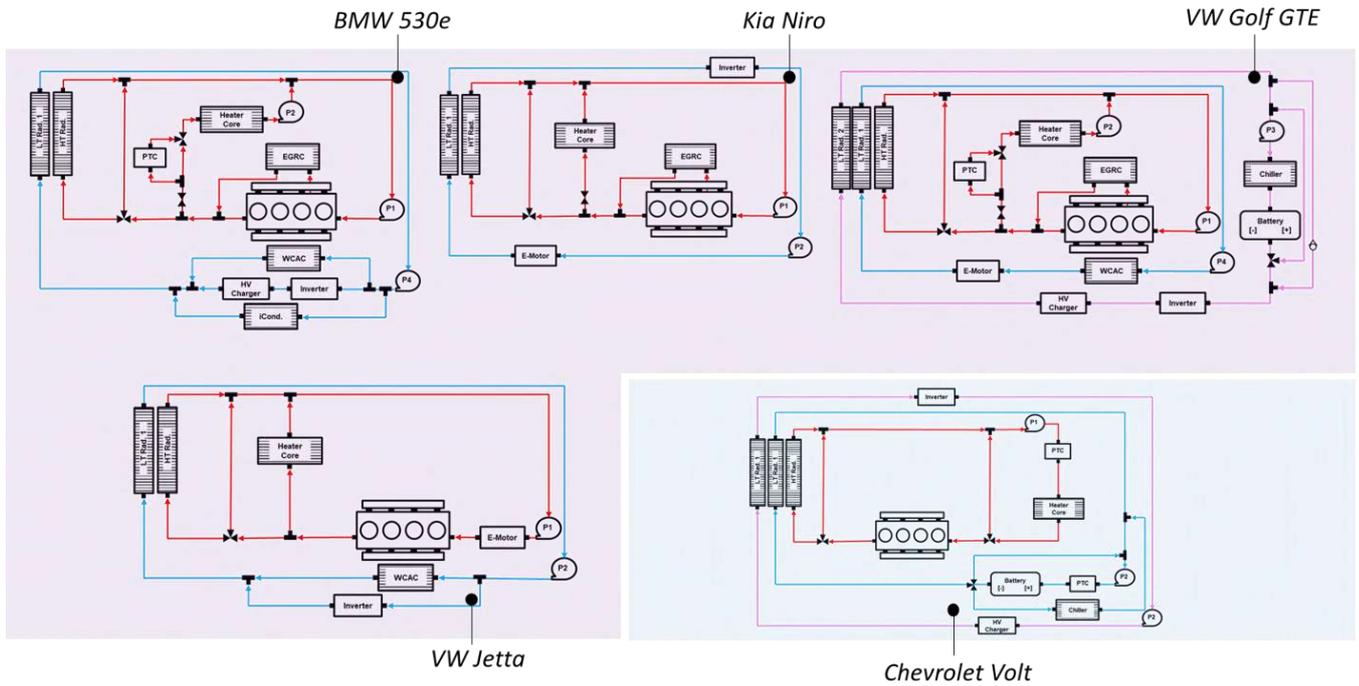


Figure 7 : Analyse de la concurrence (réalisée chez Renault) de circuit de refroidissement des architectures HEV type Parallèle et Série

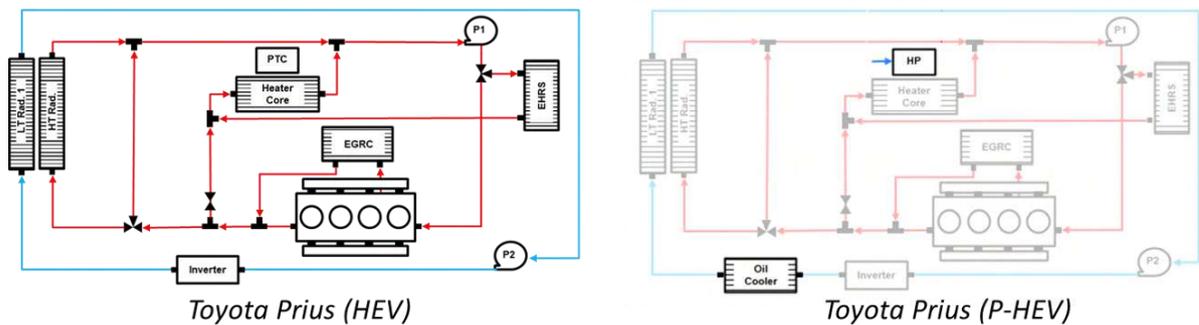


Figure 8 : Différences entre les circuits de refroidissement de la Toyota Prius en version HEV et PHEV

### **1.3 Processus de développement actuel**

Aujourd'hui, les processus de développement des systèmes relevés dans la littérature, ne permettent pas d'évaluer un panel important d'architectures possibles de véhicules hybrides lors des phases amont de développement. En effet, les délais de développement imposés obligent les ingénieurs à se concentrer sur l'évaluation d'environ deux à trois solutions possibles. Généralement une première solution se base sur le savoir-faire de l'entreprise, une seconde reprend des technologies des constructeurs concurrents et enfin une dernière solution intègre des idées innovantes du département de la recherche et de l'innovation. Ces processus dans le contexte actuel de développement rapide ne garantissent pas toujours d'aboutir à une solution optimale par rapport à un cahier des charges fixé en début de projet.

Cette thèse vise, en partie, à développer des méthodes et outils d'aide à la décision pour aider les ingénieurs lors des phases amont de développement d'architectures de véhicules hybrides et de leurs systèmes de refroidissement. Comme illustré dans la *Figure 9* ces outils ont pour objectif de rechercher l'ensemble des solutions possibles d'architectures systèmes répondant au cahier des charges. Ces méthodes utilisent des outils de génération exhaustive d'architectures systèmes, de simulation énergétique (pour objectiver chaque solution) et enfin d'évaluation/classement des solutions par rapport à des critères généraux (performance énergétique, coût de la solution, etc.) et au cahier des charges préalablement définis. La recherche d'architectures système est dite exhaustive dans l'espace des solutions délimitée par les hypothèses prises. A titre d'exemple, dans cette thèse la recherche d'architectures de circuit de refroidissement est limitée à l'espace des solutions contenant un seul radiateur par boucle de refroidissement (haute température, basse température et ultra basse température).

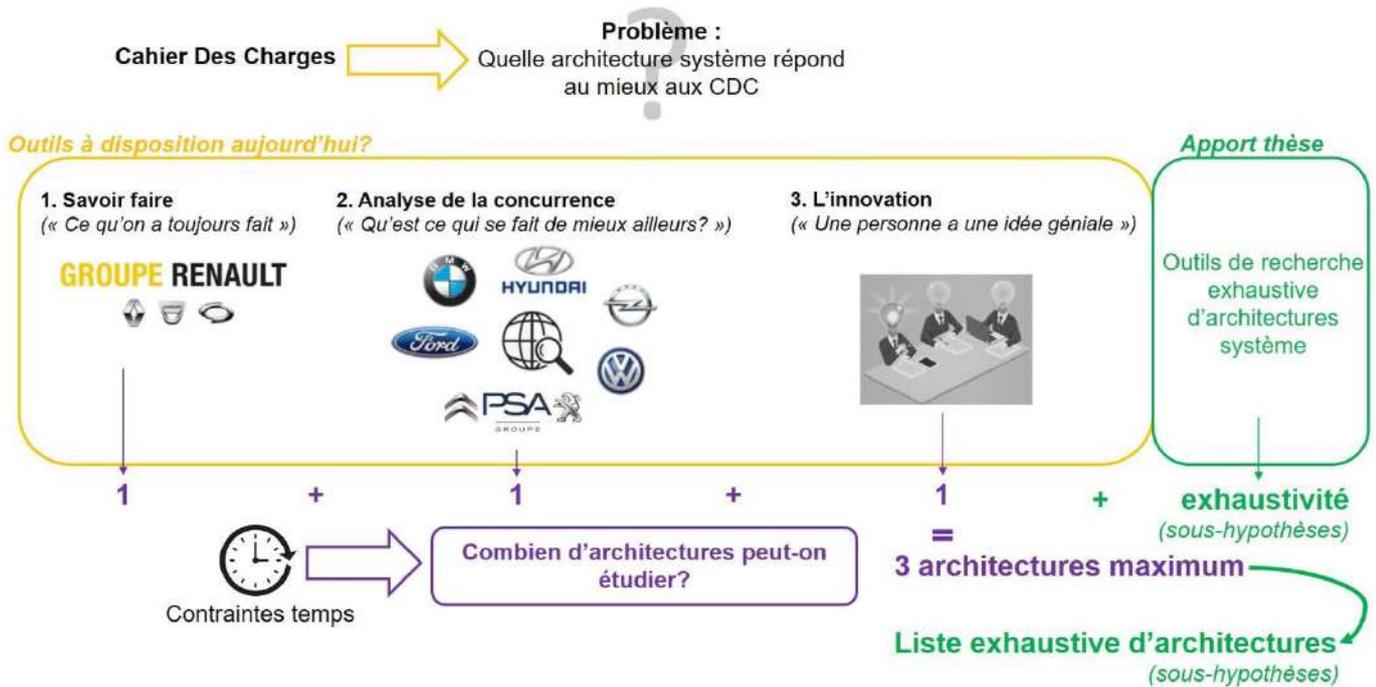


Figure 9 : Objectif de la thèse par rapport au processus actuel de recherche d'architectures système standard

Dans le cadre des objectifs présentés, le Chapitre 2 présentera un état de l'art sur les méthodes de génération et optimisation énergétique d'architectures de système basées sur une approche d'ingénierie système. Puis le Chapitre 3 mettra en évidence une méthode automatique de génération et optimisation énergétique d'architectures organiques de systèmes HEV. Le Chapitre 4 présentera une méthode de génération automatique d'architectures organiques de sous-système de refroidissement. Enfin le dernier Chapitre 5 mettra en avant une méthode automatique d'optimisation énergétique d'architectures de circuit de refroidissement.



# Chapitre 2 - Etat de l'art

## 2.1 Introduction

Ce second chapitre présente une étude bibliographique sur les méthodes de génération et d'optimisation énergétique d'architectures de systèmes. Tout d'abord une introduction à l'approche système et aux outils MBSE est présentée. Ces deux outils sont utilisés dans l'industrie pour faciliter la conception de systèmes complexes, tels que les systèmes de chaîne de traction hybride et leurs sous-systèmes de refroidissement. Ensuite, une revue de la littérature sur les méthodes de génération d'architectures organiques pour ces deux derniers systèmes est présentée. Enfin, les méthodes généralement utilisées pour supporter l'optimisation du dimensionnement et du contrôle des composants d'une architecture système sont détaillées.

## 2.2 Développement de systèmes complexes

### 2.2.1 Approche ingénierie système

L'ingénierie système permet de décomposer un système en sous-systèmes afin d'en réduire sa complexité. C'est une méthodologie s'appliquant aux systèmes complexes, permettant de piloter toute la chaîne de conception d'un produit, de la collecte des besoins des parties prenantes jusqu'à l'intégration. Le développement d'un produit est structuré à l'aide de différentes méthodes le long de son cycle de vie, une méthode très largement répandue est le processus du cycle en V. Ce processus est défini par Jean-Pierre Meinadier dans le document [14] et est représenté en *Figure 10*. Il est composé de deux branches, une descendante, pendant laquelle la conception du produit est détaillée jusqu'à sa réalisation. La branche montante vise à valider le produit. Tout au long du processus la documentation sur le système est enrichie, et à chaque étape de la partie descendante, les exigences permettant de passer à l'étape suivante et les tests permettant de vérifier l'étape actuelle sont définies.

La conception d'un système consiste à décomposer les fonctions hauts niveaux et à les relier à des composants physiques, qui sont ensuite rassemblés pour former le système complet afin de respecter les performances, les coûts et les délais. Le processus de composition est la synthèse.

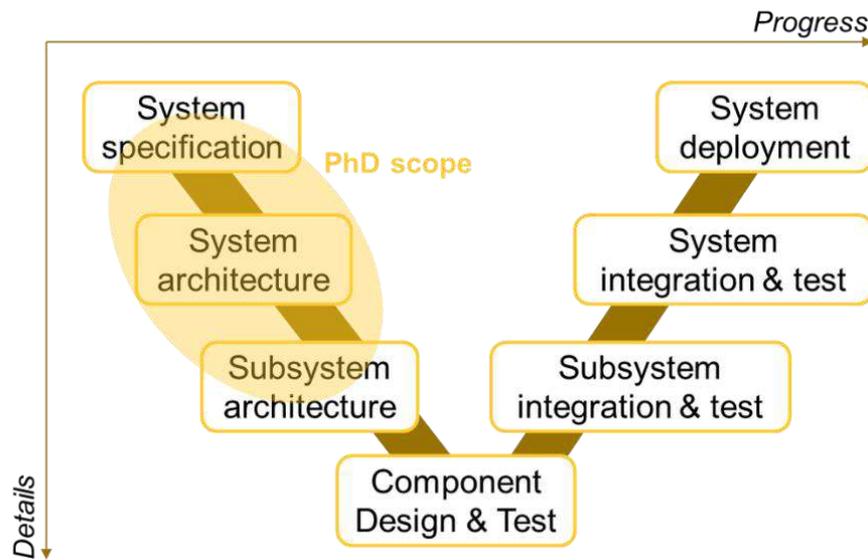


Figure 10 : Définition d’un cycle en V utilisé en ingénierie des systèmes

Une attention particulière doit être apportée aux choix faits dès le début du processus de développement du produit (dont l’architecture système), en effet entre 70% et 80% du coût total du système est attribué dès les phases de conception [15].

Ce type de processus de développement consiste donc à transformer des informations. Les objectifs des parties prenantes sont itérativement convertis en exigences et en description complète du système. Les entrées sorties de chaque transformation sont généralement basées sur des documents (approche basée sur documents). La sortie finale du processus est une large collection de documents servant de support aux différentes séquences du cycle de vie du produit. Cette approche n’est pas adaptée à la complexité grandissante des produits [16]. En effet les transferts de données durant les étapes de conception et intégration entre les différentes équipes se font en naviguant dans les documents. Les données sont ensuite extraites et traduites dans les formats adaptés à chaque discipline sollicitée par la conception du système. Une solution plus adaptée à la résolution de problème complexe d’ingénierie système est une approche basée sur des modèles (MBSE) [17].

### 2.2.2 Approche MBSE

La conception de système complexe fait intervenir plusieurs disciplines (thermique, mécanique, etc.), chacune utilisant leurs propres outils et méthodes. Afin de gérer cette complexité, qui s’ajoute à la complexité propre du système à concevoir, il est

nécessaire de faire évoluer les processus d’ingénierie permettant de partager, gérer et capitaliser les données tout au long du cycle de vie d’un produit [18]. L’approche MBSE (Model Based System Engineering) permet de formaliser et structurer le processus de développement d’un système, en s’appuyant sur la création et l’exploitation de modèles multidisciplinaires comme moyen d’échange d’informations. Les modèles sont utilisés pour spécifier la structure attendue du système ainsi que ses fonctions et comportement attendus.

L’approche MBSE permet de relier étroitement la modélisation descriptive des systèmes aux simulations. Les ingénieurs peuvent ainsi gérer et intégrer des critères de décision dans les phases de développement d’un système. Un exemple d’application de l’approche MBSE sur la conception préliminaire d’une chaîne de traction électrique est donné par Yang *et al* [19]. D’après les auteurs, le couplage entre la modélisation système (dédiée à spécifier un problème et définir des alternatives à évaluer) et la simulation multiphysique du système (dédiée à évaluer les alternatives et sélectionner la meilleure) permet d’améliorer les processus de prises de décisions dans les phases amont de projet. Au niveau système, la simulation a besoin d’informations provenant du niveau composant, traduisant les spécifications et choix technologiques [18]. Ces informations ne sont pas toujours disponibles, ce qui pousse à faire des hypothèses pour vérifier les systèmes et des itérations avec les experts de chaque domaine impliqué.

Avec une approche basée sur des modèles, le partage d’informations et de connaissances importantes sur le système se fait de manière plus simple, et permet de stocker les données dans une localisation centrale (serveur) accessible à tous, dans un langage compréhensible par tous.

L’approche MBSE est largement utilisée dans le secteur de l’automobile. Mahapatra *et al* montrent que ce type d’approche permet de faciliter l’évaluation de différentes architectures systèmes en simulant le comportement physique dans un unique environnement de modélisation et simulation [20]. Ucarol *et al* utilisent une approche de conception basée sur des modèles pour comparer trois différentes architectures de système HEV (conventionnelle, série et parallèle) [21]. Les résultats montrent que le choix de l’architecture optimale dépend fortement du contexte. La meilleure architecture pour une utilisation en zone urbaine est l’architecture hybride série. Pour un contexte d’utilisation extra-urbain l’architecture parallèle est plus efficace. Enfin Cao, dans sa thèse, [22] a développé un modèle de simulation de système HEV intégrant le sous-système de refroidissement. Ce modèle a pour vocation de supporter

les tâches de développement du système global et de son contrôle. Il est utilisé dans la thèse de Cao pour étudier l’influence des spécifications des composants et des stratégies de contrôle du sous-système de refroidissement (i.e. niveaux de températures de contrôle et commande pompe).

## 2.3 Introduction à la conception du système véhicule hybride

Le système véhicule hybride doit permettre de répondre aux exigences système formulées dans les phases amont de projet tout en minimisant des objectifs. Parmi les exigences nous pouvons citer : une cible de vitesse maximale ; une cible d’accélération minimale et des prestations client. Concernant les objectifs à minimiser, les efforts sont généralement portés sur l’optimisation de la consommation, des émissions de polluants sur cycle d’homologation ainsi que du coût global du système.

L’espace des variables caractérisant le système HEV peut se décomposer en trois niveaux : architecture, composant et contrôle. Le problème de conception à résoudre consiste à identifier le jeu de variables dans chaque niveau permettant de satisfaire à l’ensemble des exigences système et minimisant les objectifs. Les interactions entre ces différents niveaux de conception sont représentées sur la *Figure 11*.

Le choix des variables au niveau architecture porte sur la liste des composants caractérisant le système (nombre de machines électriques, nombre de boîtes de vitesses, nombre d’embrayages, etc.) et sur la topologie (agencement des composants). Comme mentionné dans le Chapitre 1, l’espace des solutions possibles d’architectures de systèmes HEV est large. Chaque solution possède ses propres caractéristiques en termes de performance, de coût, de masse, de prestation client, etc. **Une difficulté pour les constructeurs automobiles est d’identifier quelle architecture de système HEV répond au mieux aux exigences formulées en amont de projet.**

Au niveau composant, l’objectif est de dimensionner les composants définissant le système HEV à partir d’un cahier des charges, définissant certaines exigences que le véhicule hybride doit satisfaire (i.e. vitesse maximale, accélération minimale de 0 à 100 km.h<sup>-1</sup>, etc.). Le dimensionnement de ces composants se fait généralement sur une architecture de système HEV figée. Les variables mises en jeu sont par exemple la taille des machines électriques, du moteur thermique et de la batterie, les ratios de rapport de boîte de vitesses, etc.

Enfin, au niveau contrôle, le sous-problème d’optimisation consiste à définir une loi de gestion d’énergie (LGE) des différents organes de puissance du système HEV. En effet l’ajout d’une seconde source d’énergie sur une chaîne de traction hybride introduit des degrés de liberté sur la façon de répartir la puissance demandée par le conducteur sur un profil de roulage. Ces degrés de liberté dépendent du type d’architecture. Par exemple, une architecture de type parallèle aura un seul degré de liberté, le couple du moteur thermique ou celui du moteur électrique, car les vitesses de rotation sont fixées par celles des roues. La détermination du ou des degrés de liberté est faite par un algorithme pour LGE (Loi de Gestion d’Energie), dont le rôle est de gérer l’énergie du groupe moto-propulseur sous des contraintes. Ces contraintes sont liées à la physique des actionneurs (respect des caractéristiques des organes de puissance) et d’ordre opérationnel (éviter les arrêts / démarrages trop fréquents du moteur à combustion interne).

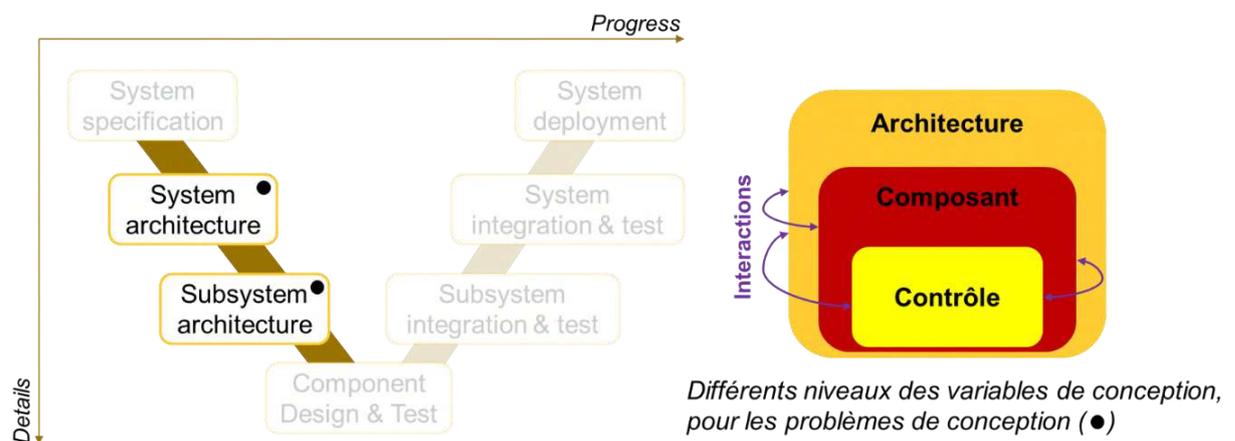


Figure 11 : Définition de l’espace des variables de conception

## 2.4 Introduction à la conception du sous système de refroidissement

Dans une approche système, les exigences du sous-système de refroidissement découlent du niveau du système véhicule hybride. Les choix des variables de conception au niveau du système HEV fixent les exigences de refroidissement que doit satisfaire le sous-système de refroidissement. Sur un profil de roulage considéré dimensionnant, la puissance développée par chaque composant de la chaîne de traction HEV permet de calculer les pertes thermiques occasionnées. Une partie de ces pertes thermiques est introduite dans le circuit d’eau. Le rôle du système de

refroidissement est d’évacuer ces pertes tout en respectant une cible de température d’eau maximale à ne pas dépasser.

L’espace des variables de conception définissant le sous-système de refroidissement d’un véhicule hybride peut également se décomposer selon les trois niveaux présentés sur la *Figure 11*. Le sous-système de refroidissement d’un véhicule hybride est plus complexe que celui d’un véhicule conventionnel. En effet sur une chaîne de traction hybride il y’a plusieurs composants additionnels possédant chacun sa température optimale de fonctionnement. De plus ces composants sont amenés à fonctionner indépendamment du moteur thermique. Cette complexité grandissante issue de l’hybridation du système HEV élargit l’espace des solutions possibles, tout comme le système HEV (montré en Chapitre 1). Chacune des solutions possibles possède ses propres caractéristiques en termes de performance, rendement énergétique, coût et facilité d’intégration. Généralement les objectifs à minimiser lors de la conception du sous-système de refroidissement sont la consommation énergétique sur cycle et le coût, sous des contraintes d’intégration.

L’architecture du sous-système de refroidissement est définie par l’agencement des différents composants entre eux (i.e. sa topologie) ainsi que par le nombre de boucles indépendantes de circuits de refroidissement. Chaque boucle fonctionne à un niveau spécifique de température du fluide de refroidissement.

L’objectif principal au niveau composant du système de refroidissement est de définir les caractéristiques attendues des échangeurs thermiques, pompes hydrauliques et ventilateurs [23]. Les différents échangeurs thermiques et les pompes hydrauliques de l’architecture du système de refroidissement doivent être dimensionnés afin de satisfaire aux exigences de refroidissement.

Enfin, le contrôle des actionneurs du sous-système de refroidissement (principalement les pompes hydrauliques et les vannes) joue un rôle important dans le respect des exigences à satisfaire mais également dans l’optimisation des objectifs.

## **2.5 Méthodes de génération d’architecture**

Dans la littérature il est souvent question de figer l’architecture et d’étudier séparément soit le dimensionnement des composants soit le contrôle. Or l’efficacité de la topologie d’un véhicule hybride dépend fortement de ses conditions d’utilisation. Un véhicule hybride série est efficace en zone urbaine mais peu efficace en zone extra-

urbaine en raison de sa chaîne de rendement qui devient défavorable. Pour réduire d’avantage la consommation il est donc intéressant de faire également varier l’architecture. Des études montrent qu’avec une simple variation de configuration, des gains de consommation sont constatés. En effet, Zhou présente un processus de modélisation automatique de trains épicycloïdaux avec embrayages pour rechercher exhaustivement à travers toutes les configurations possibles [24]. L’étude montre qu’un simple ajout d’embrayages à l’architecture de la Prius 2010 permet de réduire la consommation d’un PHEV fonctionnant en mode « charge depleting » (CD).

Torregrosa *et al* ont réalisé une étude concernant l’influence de configurations possibles sur une architecture donnée en jouant sur l’état de deux vannes permettant de modifier la topologie de l’architecture à chaque instant d’un cycle (NEDC) [25]. Le contrôle des vannes permet un pilotage de la quantité d’eau circulant dans le circuit et les débits dans chaque branche. Les résultats constatés par simulation numérique sur cycle NEDC sont des réductions du temps de montée en température (22.3%), de la consommation de carburant (1.62%) et des émissions de CO et HC (12% et 16%).

Dutta *et al* comparent sept architectures différentes de circuit de refroidissement pour une boucle basse température comprenant les composants électriques d’un véhicule HEV (moteur électrique, électronique de puissance) [26]. Les auteurs partent des exigences pour évaluer les sept concepts. Un écart entre la plus performante et la moins efficace est de 23% de puissance électrique.

Il existe deux stratégies de conception d’un système [27]: une stratégie basée sur l’expérience et une stratégie basée sur l’innovation. La première consiste à réutiliser des architectures de systèmes déjà existantes ; elle permet notamment de diminuer les coûts de développements, les risques et les délais. Cependant elle est très limitée sur les possibilités d’innovation. En effet, elle n’explore qu’une partie restreinte de l’espace des solutions. La seconde est une stratégie opposée, elle fait l’abstraction des architectures existantes et cherche à explorer une grande partie de l’espace des solutions.

Le dimensionnement de chaque composant de la chaîne de traction amène à un optimum local ; cependant une fois assemblé l’optimum global n’est pas forcément garanti. Un optimum global peut être trouvé en faisant varier systématiquement les paramètres des composants de la chaîne de traction. Cette méthode peut aboutir à près de 20 millions de configurations de paramètres de l’architecture définie [28]. Cependant, comme décrit par Miller [29], la capacité du cerveau humain possède ses

propres limites en terme de traitement de l’information. D’après Miller, il est raisonnable de traiter jusqu’à neuf concepts différents. **Si l’architecture est générée automatiquement, cette méthode permet de trouver des concepts de chaînes de traction plus efficaces.**

La topologie de l’architecture d’un système à concevoir peut avoir plus d’influence sur les objectifs à minimiser et le respect des exigences à satisfaire que le contrôle et le dimensionnement de ses composants [30].

### 2.5.1 Méthodes classiques

Généralement le choix de l’architecture d’un système HEV est basé sur l’expérience du constructeur automobile et de l’analyse de la concurrence [31]. Les composants disponibles ainsi que l’application visée influencent également le choix de l’architecture.

Zhang *et al* définissent manuellement trois architectures différentes de système HEV sur la base de la Toyota Prius et Chevy Volt [32]. Seul le nombre d’embrayages dans le système de trains épicycloïdaux est utilisé pour générer ces alternatives. Les résultats montrent des gains notables de coût et de consommation de carburant.

Park, dans sa thèse, construit manuellement trois architectures différentes de circuit de refroidissement pour un véhicule hybride type série [12]. Ces architectures sont construites sur la base de règles. En effet les composants sont mutualisés sur les boucles de refroidissement en fonction de leur température et de leur phase de fonctionnement. Similairement, Dutta *et al* génèrent manuellement sept circuits de refroidissement topologiquement différents [26].

Dans la suite de ce paragraphe, la méthode de recherche d’architectures de sous-systèmes de refroidissement utilisée chez Renault est détaillée. Cette méthode est fortement basée sur l’expérience de l’entreprise et l’analyse de la concurrence.

L’étape de conception préliminaire débute par l’identification et la définition des principaux paramètres des composants du système. Puis une première topologie du circuit de refroidissement est définie avec estimation des caractéristiques géométriques et des besoins de débit d’eau des composants. La méthode de construction du premier circuit de refroidissement est illustrée sur la *Figure 12*. Les phases chaudes et froides correspondent à un état thermique du moteur à combustion interne respectivement chaud et froid. Comme illustré sur la *Figure 13*, un actionneur

(généralement un thermostat à cire) permet de modifier la configuration de l’architecture du circuit de refroidissement afin d’évacuer la chaleur via le radiateur. En phase froide l’eau de refroidissement ne circule pas dans le radiateur afin d’assurer une montée en température du moteur thermique. Pendant cette phase, le thermostat est en position fermée. En phase chaude, le thermostat s’ouvre pour assurer un débit d’eau dans la branche du radiateur et évacuer la chaleur produites par le moteur thermique vers l’environnement extérieur. Le thermostat permet de stabiliser la température de fonctionnement du moteur thermique.

Le respect des exigences de refroidissement en termes de débits d’eau et de pression est vérifié par calcul via des modèles hydraulique et thermo-hydrauliques sous AMESim [33] puis par essais. Des itérations sur la topologie et sur des optimisations locales des pertes de charges (ajout d’ajutages) de l’architecture sont réalisés jusqu’à convergence vers le respect de l’ensemble des exigences système.

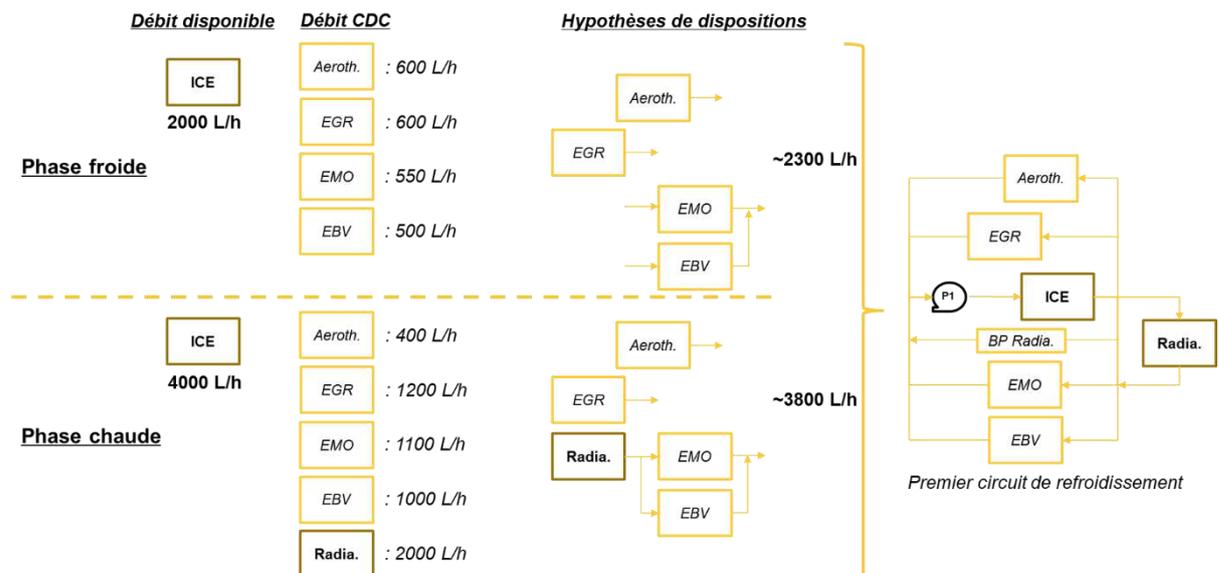


Figure 12 : Méthode de génération d’architectures de circuits de refroidissement utilisée chez Renault

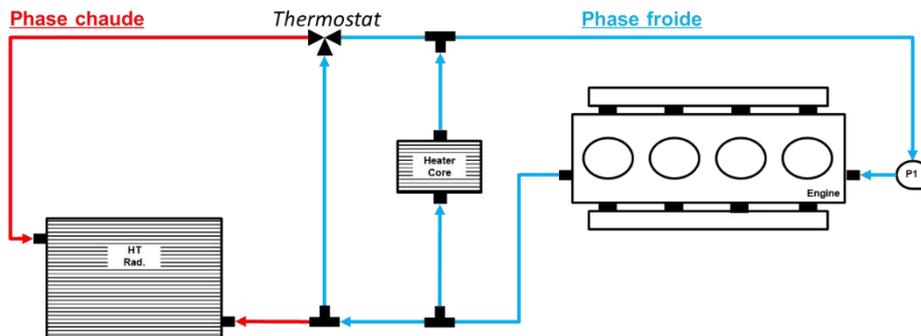


Figure 13 : Exemple de circuit de refroidissement

## 2.5.2 Méthodes assistées par ordinateur

Le principe de ce type de méthodologie est d'utiliser la puissance informatique pour générer des architectures topologiquement différentes pour un système donné. Ces méthodes commencent à être utilisées dans l'exploration automatique de solutions pour le problème de conception de systèmes HEV.

Silvas propose une méthode de génération automatique d'architectures de système HEV à partir de jeux de composants et de critères de sélection [34]. Le jeu de critères permet de vérifier si une architecture générée est faisable. Une architecture de système HEV est tout d'abord considérée comme faisable si elle contient au moins une source d'énergie thermique et une source d'énergie électrique. Les architectures doivent également être capables de réaliser un certain nombre de modes hybrides (récupération d'énergie, roulage en électrique, etc.) et il doit exister un chemin de puissance entre une source d'énergie (thermique et/ou électrique) et les roues. Cet ensemble de critères est ensuite transformé en contraintes et le problème de génération de topologies faisables est formulé en un problème de satisfaction de contraintes. Chaque architecture générée est ensuite traduite en un graphe via Matlab pour faciliter la visualisation. Vanhuysse propose une méthodologie également basée sur des contraintes pour générer automatiquement des architectures de véhicule hybride [35]. Cependant, le problème de satisfaction de contraintes est automatiquement formulé à partir d'un modèle descriptif du système. Ce modèle descriptif comporte la décomposition hiérarchique du système ainsi que des caractéristiques sur les ports des composants (notamment des informations sur les types des ports, traduisant des compatibilités de connexion entre les différents composants). La méthode développée par Vanhuysse est plus généralisable et a abouti à un logiciel commercialisé par Siemens : *Simcenter Studio*. Dans le cadre de la

présente thèse, ce logiciel a été testé sur le sous-système de refroidissement (détails dans le Chapitre 4).

Certains auteurs présentent une méthodologie générant automatiquement tous les graphes représentant les solutions possibles d’architectures de système HEV est développée [36] [37]. Ces graphes sont générés en cherchant toutes les connexions possibles entre deux nœuds. Dans les deux études, un filtre est défini en aval du processus de génération des graphes pour ne conserver que les solutions admissibles. Bayrak définit des contraintes permettant d’éliminer les solutions non admissibles, par exemple les graphes dans lesquels un nœud est connecté à lui-même seront écartés [36]. Kabalan utilise une liste de modes hybrides que doivent réaliser chaque solution générée pour vérifier le critère de faisabilité des architectures de système HEV [37].

Piechotka *et al* ont construit des architectures de systèmes HEV sont construites à partir d’une liste de composants, caractérisés uniquement par leurs ports d’entrée et de sortie (représentation type boîte noire) [38]. Deux composants peuvent être reliés entre eux si et seulement si leurs interfaces sont compatibles. Chaque lien possible est sauvegardé en tant que nouvelle solution et sert de point de départ à l’étape suivante dans le processus de génération d’architecture HEV. Ce processus se termine quand le chemin atteint une source d’énergie. Chaque chemin allant des roues à une source d’énergie représente une architecture.

Enfin, Masfaraud *et al* [39] et Dumouchel *et al* [40] utilisent la notion d’arbre de décision couplé à une base de données de règles pour générer des solutions admissibles d’architectures de système HEV. La *Figure 14* illustre le processus d’exploration d’un arbre de décision pour générer l’ensemble des solutions possibles de graphes à 3 nœuds et 2 branches. Chaque étape de l’exploration de l’arbre représente le positionnement d’une branche entre deux nœuds. Masfaraud *et al*, en explorant l’arbre de décision, cherchent toutes les possibilités pour positionner  $m$  branches sur  $n$  nœuds d’un graphe. Il existe  $\binom{n}{2}$  possibilités de positionner une branche entre deux nœuds. Ce processus est répété pour chaque branche, le nombre de graphes possibles est donné par l’équation suivante :

$$p = m \binom{n}{2} \quad (\text{Équation 1})$$

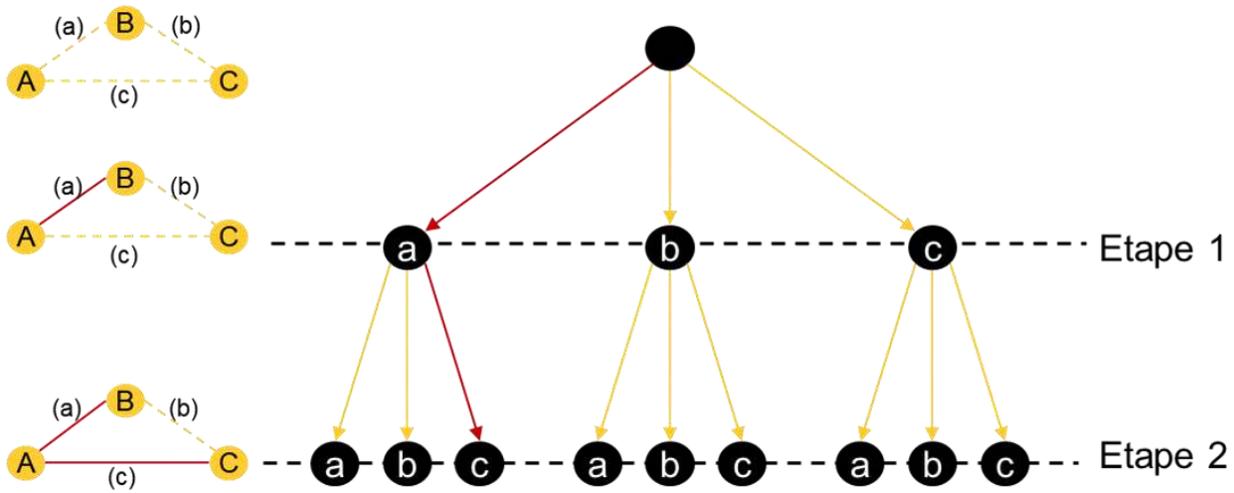


Figure 14 : Exemple d’arbre de décision appliqué à la recherche de tous les graphes à 3 nœuds et 2 branches

Les méthodes d’automatisation de génération d’architectures consistent à explorer l’espace des solutions possibles à un problème de conception de système. Ensuite, comme décrit sur la Figure 11 un problème d’optimisation sur plusieurs niveaux doit être défini afin de tirer le potentiel maximum de chaque alternative générée en vue de les comparer et d’identifier la plus prometteuse.

Wei *et al* notent une absence de méthode de génération d’architectures pour le sous-système de refroidissement de système HEV dans la littérature [31].

## 2.6 Méthodes d’optimisation du dimensionnement

Ce paragraphe s’intéresse aux méthodes d’optimisation pour résoudre les problèmes de dimensionnement optimal. Ces problèmes d’optimisation cherchent à définir le choix des variables optimales au niveau composant. Les méthodes permettant de résoudre ce type de problème sont multiples et peuvent être séparées entre deux catégories, représentées sur la Figure 15.

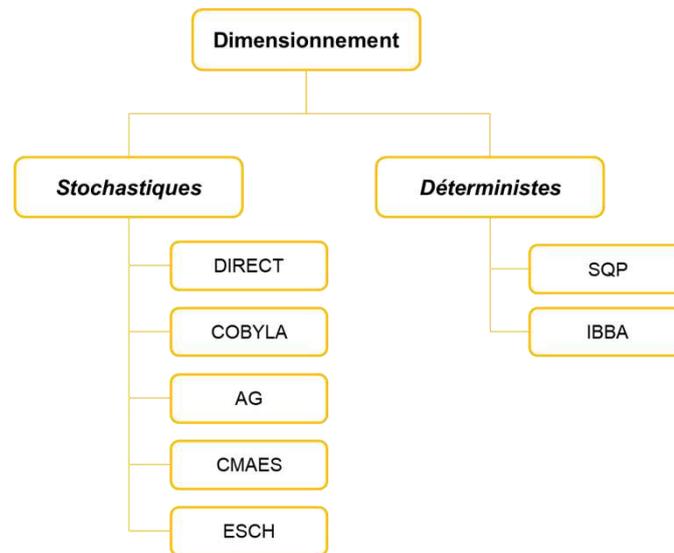


Figure 15 : Méthodes d'optimisation pour problèmes de dimensionnement optimal

- Méthodes déterministes : ces méthodes utilisent des informations relatives aux modèles (par exemple les dérivées des fonctions objectifs et/ou les contraintes) pour orienter sa recherche vers la ou les solution(s) optimale(s). Elles ont l'avantage d'être relativement plus rapides que les méthodes dites stochastiques, cependant une attention particulière doit être apportée au choix du point de départ. Les méthodes déterministes peuvent être globale ou locale.
  - Méthodes déterministes locales : ces méthodes recherchent des optima locaux, c'est-à-dire que la fonction objective est optimale dans un voisinage proche de ces points. Ces méthodes peuvent aboutir à un optimum global, mais sont fortement sensibles au point de départ de la recherche de solution. Un exemple de ce type de méthode est l'optimisation quadratique successive (SQP ; Sequential Quadratic Programming), cette méthode itérative utilise les dérivées pour s'orienter [41]. A chaque itération une direction de recherche de solution dans l'espace de recherche est déterminée en résolvant un sous-problème de type programme quadratique (QP ; Quadratic Programming, est caractérisé par une fonction objectif quadratique et des contraintes linéaires). La solution obtenue est alors utilisée comme point de départ pour une nouvelle itération.

- Méthodes déterministes globale : contrairement aux méthodes dites d’optimisation locale, ces méthodes permettent d’identifier un optimum global dans l’espace de recherche. Parmi ces méthodes on peut citer l’algorithme par séparation et évaluation progressive (IBBA ; Interval Branch & Bound Algorithm). Cette méthode est basée sur le calcul par intervalles, le domaine de recherche est successivement décomposé en intervalles [42]. Les intervalles ne contenant pas la solution optimale globale est éliminé au fur et à mesure du processus d’optimisation. La fonction objectif ainsi que les contraintes doivent être exprimées analytiquement afin d’être réécrites en arithmétique d’intervalle. Cette méthode nécessite de reformuler les équations pour prendre en compte les intervalles.
- Méthodes stochastiques : ces méthodes d’optimisation n’utilisent pas d’informations provenant des modèles. Elles sont adaptées aux problèmes d’optimisation pour lesquels les méthodes d’optimisation classiques déterministes ne fonctionnent pas. Elles sont très souvent inspirées des lois de la nature et s’appuient sur des mécanismes aléatoires qui peuvent fournir des résultats différents d’une simulation à une autre (contrairement aux méthodes déterministes). Ces méthodes ont l’avantage de pouvoir être utilisées sur des modèles de simulation numérique de type boîtes noires (l’expression mathématique de la fonction objectif en fonction des variables d’optimisation n’est pas connue). Cependant il est nécessaire de définir un certain nombre de paramètre ainsi qu’un critère d’arrêt. Les méthodes stochastiques peuvent être également locales ou globales.
  - Méthodes stochastiques locales : un exemple de ce type de méthode est l’algorithme COBYLA [43]. A chaque itération, cet algorithme construit une approximation linéaire de la fonction objectif et des contraintes sur la base d’un simplex. Le candidat est ensuite évalué et le processus d’optimisation cherche à améliorer l’approximation linéaire de la fonction objectif. L’algorithme prend fin quand la solution ne peut plus être améliorée.
  - Méthodes stochastiques globales : les algorithmes DIRECT (Dividing RECTangles) et évolutionnaires sont des exemples de ce type de méthode [43]. Le principe de base de ces algorithmes évolutionnaires repose sur la modélisation de la sélection naturelle. Son fonctionnement

se fait en quatre étapes : génération (création d’une population aléatoire), évaluation (comparaison des individus), sélection (uniquement les meilleurs individus sont conservés) et croisement/mutation (on fait évoluer les meilleurs individus en les reproduisant). Les algorithmes génétiques et les stratégies d’évolution font partie de cette famille d’algorithmes évolutionnaires. La principale différence entre ces deux derniers algorithmes réside dans la définition et représentation des populations d’individus. Dans les stratégies d’évolution les individus sont représentés par une chaîne de nombres (traditionnellement des 0 et 1). Mais à la différence des algorithmes génétiques, la population d’individus contient également un paramètre (par exemple le taux de mutation). A chaque génération une valeur aléatoire est ajoutée à la mutation des individus. Cette valeur aléatoire suit généralement une gaussienne dont la déviation standard diminue au fur et à mesure que l’on s’approche de solutions intéressantes. L’algorithme DIRECT subdivise en rectangles l’espace des variables d’optimisation. La fonction objectif est évaluée au centre de chaque rectangle. A chaque itération l’algorithme détermine les potentiels rectangles où peut se situer la solution optimale, ces rectangles sont à nouveau subdivisés. Le processus prend fin lorsque la limite d’itération a été atteinte.

Les méthodes énumératives font également partie de cette famille de méthode d’optimisation. Elles sont adaptées aux problèmes d’optimisation pour lesquels l’espace des variables d’optimisation est discrétisé. Elles permettent une résolution généralement exacte, qui se paie par un temps de calcul souvent conséquent. La méthode dite de force brute est la plus connue, elle consiste à évaluer de manière exhaustive toutes les solutions possibles du problème [44]. Pour des espaces de décision larges, il est souhaitable de pouvoir identifier les solutions possédant une forte probabilité d’être candidate, afin d’éviter d’évaluer l’ensemble.

Les méthodes d’optimisation appliquées à la recherche de dimensionnement optimale au niveau composant d’un système HEV sont largement utilisées dans la littérature. Assanis *et al* dans [45] utilisent l’algorithme SQP pour rechercher les tailles optimales pour les composants batterie, moteur électrique et moteur à combustion interne afin d’optimiser la consommation du système HEV et le temps d’accélération de 0 à 100

km.h<sup>-1</sup>. Pour identifier un optimum global à ce problème d’optimisation, les auteurs génèrent une multitude de point de départ pour l’algorithme SQP via un plan d’expérience. Mangun *et al* cherchent à optimiser seulement la consommation de carburant en jouant sur les même variables d’optimisation [46]. Le processus d’optimisation est basé sur un algorithme génétique. Afin de se rapprocher vers un optimum global les auteurs effectuent une analyse d’influence sur différents paramètres de l’algorithme génétique (par exemple la population des individus). Enfin Gao *et al* définissent un problème d’optimisation similaire pour optimiser la consommation de carburant sous des contraintes de performances (i.e. vitesse maximale, accélération minimale, etc.) [47]. Les auteurs comparent différents algorithmes d’optimisation pour résoudre ce problème d’optimisation (notamment des algorithmes évolutionnaires et l’algorithme DIRECT). L’algorithme DIRECT apparait comme étant efficace pour résoudre ce type de problème d’optimisation.

Souza-Antunes *et al* dans [48] utilisent un algorithme génétique pour optimiser les pertes de charge au sein d’un réseau hydraulique d’eau potable. Les variables d’optimisation sont les diamètres des tuyaux hydrauliques. Des gains de consommation d’énergie et de coûts sont annoncés.

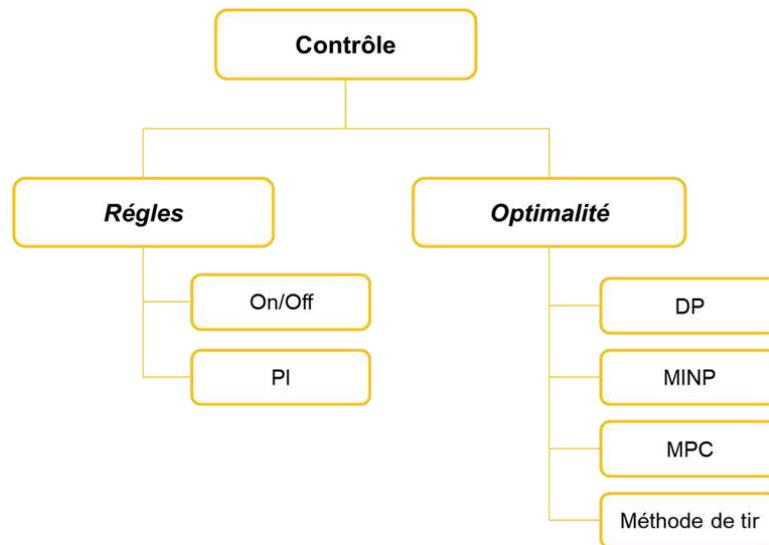
Park *et al* démarrent un processus d’optimisation de la taille de pompe hydraulique et radiateur pour minimiser la consommation d’un véhicule hybride par la définition d’un plan d’expérience [49]. Ce plan d’expérience a pour objectif de se rapprocher des valeurs optimales pour les variables d’optimisation définies. Ensuite l’algorithme SQP est utilisé pour affiner la convergence vers l’optimum global sous des contraintes de performance et d’intégration.

Tao *et al* proposent une méthode d’optimisation de la géométrie d’un radiateur pour un camion militaire hybride série sous contraintes thermiques [50]. L’algorithme d’optimisation cherche à minimiser la taille de l’échangeur thermique sous des contraintes d’exigences thermiques. En effet, le radiateur dimensionné doit être capable d’évacuer la chaleur produite par les composants de la chaine de traction hybride sur les points de dimensionnement choisis.

## **2.7 Méthodes d’optimisation du contrôle**

Pour une architecture et un dimensionnement des composants d’un système donné, il reste un niveau d’optimisation pour effectuer une optimisation globale du système. Ce niveau est le contrôle des composants constituant l’architecture du système. Les

méthodes d’optimisation pour résoudre les problèmes de contrôle optimal peuvent être séparées entre deux catégories, représentées sur la *Figure 16* : celles basées sur des règles (qui aboutissent souvent à une solution sous-optimale) et celles basées sur la recherche de solution optimale.



*Figure 16 : Méthodes d'optimisation pour problèmes de contrôle optimal*

Étant donné que les trajectoires des données d'entrée peuvent être vues comme une infinité de points, la dimension d'un problème de contrôle optimal est infinie. La plupart des cas réel n'ont qu'une solution numérique approchée. En effet, dériver une solution analytique de ce type de problème n'est possible que très rarement.

- Les méthodes basées sur des règles : comme leur nom l'indique ces méthodes sont basées sur des règles prédéfinies permettant de gérer le contrôle des actionneurs d'un système. Ces stratégies sont les moins coûteuses à mettre en place, elles consistent généralement à définir des seuils permettant de piloter les actionneurs [51]. Cependant l'architecture du système et le dimensionnement des composants influencent les valeurs optimales des seuils utilisés. Il est souvent nécessaire de recalibrer les seuils après un changement d'architecture du système. Les stratégies basées sur des règles ne garantissent pas une convergence vers un optimum minimal global ; la solution est souvent sous-optimale. Une autre méthode permettant de définir un contrôle des organes est un régulateur PID (proportionnel, intégral, dérivé). Ce type

d’algorithme cherche à suivre une consigne de commande [52]. A chaque instant la différence entre la consigne et la mesure de la commande permet de corriger la trajectoire.

- Les méthodes optimales : ces méthodes ont pour vocation de résoudre les problèmes de commandes optimales. Il existe différentes stratégies utilisées par ces méthodes : les méthodes utilisant le principe d’optimalité de Bellman, les méthodes utilisant le principe du minimum de Pontriaguine (PMP), les méthodes directes et les méthodes applicable en temps réel :
  - Les méthodes basées sur le principe d’optimalité de Bellman : « Une suite de décisions est optimale si, quels que soit l’état et la décision initiale considérée sur la trajectoire qui lui est associée, la suite de décisions ultérieures est optimale vis-à-vis de l’état résultant de la première décision. »[53]. La méthode de programmation dynamique (DP ; Dynamic Programing) est une approche basée sur le principe d’optimalité de Bellman. Elle permet de simplifier un problème complexe en le divisant en sous-problème plus simple à résoudre de manière récursive. L’avantage de cette méthode est qu’elle garantit l’optimalité de la solution trouvée, son inconvénient majeur est le temps de calcul pour les problèmes de dimensions importantes. Elle est souvent utilisée comme référence pour comparer d’autres contrôles [54].
  - Les méthodes basées sur le PMP (également nommées les méthodes indirectes) reformulent le problème en éliminant les variables de contrôle. Le problème est transformé en utilisant une fonction hamiltonienne avec l’introduction de multiplicateurs de Lagrange [55]. Pour un cycle de vitesse donné, l’ajustement itératif de l’unique variable multiplicateur de Lagrange permet de trouver le vecteur de commande optimal sur tout le parcours, c’est-à-dire les variables de contrôle optimaux pour chaque instant  $t$  du cycle. Le PMP donne le meilleur contrôle possible pour amener un système dynamique d’un état à un autre en prenant en compte un jeu de contraintes sur les variables de contrôle et d’états. Il définit la condition à respecter pour trouver le minimum de la fonction objectif.
  - Les méthodes directes consistent à discrétiser les variables d’états et les variables de contrôle afin de se ramener à un problème d’optimisation

non-linéaire classique en dimension finie. Le contrôle est supposé être constant sur les intervalles de temps discrétisés. Le terme vient du fait qu’il n’y a pas de transformation du problème. Les méthodes de tirs sont des méthodes directes.

- o Les méthodes applicables en temps réel : les techniques d’optimisation globales listées ci-dessus ne sont pas applicables pour des analyses en temps réel. Les méthodes mathématiques utilisant une approche basée sur des modèles prédictifs peuvent être appliquées en temps réel. A partir de la dynamique présente du système, les commandes futures sont prédites en résolvant le problème de commande optimale sur un horizon spécifique. Le cœur d’une stratégie MPC (Model Predictive Control) est le modèle dynamique du système, qui est utilisé pour prédire l’état futur du système. La performance de ce type de contrôle dépend fortement de la fenêtre de prédiction. Une autre approche pour définir une méthode d’optimisation applicable en temps réel est de réduire le critère global à une optimisation instantanée d’une fonction coût qui ne dépend que de l’état présent du système. Pour les problèmes de commande optimal de système HEV la méthode consiste à minimiser à chaque instant  $t$  la fonction coût en se basant sur des hypothèses sur les points de fonctionnement futurs. Cette méthode porte le nom de stratégie de minimisation de consommation équivalente (ECMS ; Equivalent Consumption Minimization Strategy). La notion de consommation équivalente consiste à ramener la consommation de la batterie à une consommation équivalente de carburant en définissant un facteur d’équivalence. La batterie est considérée comme un réservoir auxiliaire réversible. La solution obtenue est très sensible au facteur d’équivalence choisi et peut aboutir à une solution sous-optimale [54].

La programmation dynamique est largement utilisée dans la littérature pour résoudre les problèmes de commande optimale appliqués à la gestion d’énergie d’un système HEV. En effet malgré son inconvénient concernant les temps de calcul, elle a l’avantage de garantir l’optimalité de la solution trouvée. Mion applique le DP pour déterminer la répartition optimale d’énergie sur un véhicule HEV parallèle [56]. Le PMP peut également garantir l’optimalité de la solution trouvée pour le problème de gestion d’énergie sur système HEV. Namwook *et al* appliquent le PMP sur le système hybride de Toyota et mettent en évidence les hypothèses mathématiques à prendre en compte

pour garantir l’optimalité de la solution [57]. Cependant, le facteur d’équivalence doit être calibré en fonction du cycle étudié pour garantir une solution optimale.

Concernant les applications en temps réel, Kural *et al* présentent une méthode basée sur l’approche ECMS et une prédiction des conditions de roulage futures [58]. Elle permet d’anticiper la topologie d’un roulage en prédéterminant les stratégies optimales (i.e. récupérer de l’énergie au freinage, précharger la batterie, etc.). Zhang *et al* présentent une méthode d’optimisation de loi d’énergie pour un véhicule PHEV basée sur une stratégie MPC [59]. Premièrement, les vitesses du véhicule sont prédites sur un horizon fini, ensuite l’algorithme recherche la répartition optimale d’énergie entre source thermique et électrique sur cet horizon donné. Les auteurs montrent que les résultats obtenus avec la méthode MPC s’approche fortement de l’optimisation globale basée sur l’algorithme DP.

Développer un système de gestion de la thermique pour véhicule hybride efficace permet de réduire la consommation globale du véhicule. En effet, définir un contrôle des actionneurs d’un sous-système de refroidissement basé sur des règles en fonction des modes de fonctionnement du véhicule, permet une amélioration de 31.7% de la consommation d’énergie par rapport à une stratégie type thermostat on/off [60]. Gräber *et al* définissent un problème d’optimisation de la consommation d’énergie du sous-système de refroidissement d’un véhicule conventionnel [61]. Les variables d’optimisation sont les commandes de la pompe hydraulique, du ventilateur et l’état d’ouverture d’une vanne. Les auteurs comparent la méthode de tir à un régulateur type PI pour résoudre ce problème d’optimisation. La méthode par tir permet de réaliser des gains de 19% par rapport à un contrôle basé sur un PI. Tao *et al* comparent trois types de contrôle pour résoudre ce même problème d’optimisation : un contrôle optimal, un régulateur PI et un contrôle type thermostat on/off [62]. Le contrôle optimal permet une réduction de 14% d’énergie par rapport aux deux autres méthodes testées. Zhang *et al* proposent une méthodologie basée sur le DP pour minimiser la consommation de carburant d’un véhicule sous contrainte de refroidissement de la batterie [63]. Une approche similaire est présentée par Mion *et al* [64], basée sur une stratégie ECMS modifiée pour prendre en compte un système de post-traitement et un système de récupération d’énergie thermique à l’échappement. A l’image du facteur équivalent de l’énergie électrique de la batterie, cette étude introduit une notion d’équivalent en carburant des flux thermiques. Une comparaison est faite entre une stratégie basée sur des règles (i.e. batterie doit se recharger quand le catalyseur

est froid afin d'augmenter la température moteur) et la stratégie optimale. La stratégie basée sur des règles donne des résultats très proches de la stratégie optimale.

Khodabakhshian *et al* comparent une approche MPC à un contrôle par retour d'état et à l'algorithme DP sur véhicule conventionnel [65]. L'objectif du contrôle est de réguler la température du moteur thermique tout en minimisant la consommation du véhicule. La méthode MPC fournit des résultats très proches de l'algorithme DP cependant elle devient incompatible pour des calculs en temps réel pour des horizons de prédiction trop importants.

### **2.8 Méthodes d'optimisation multicritère**

Les problèmes d'optimisation multicritère (ou encore appelés multi-objectif) consistent à chercher une solution optimale par rapport à plusieurs objectifs souvent contradictoires. La notion de contradiction signifie qu'il n'est pas possible d'améliorer un objectif sans dégrader un autre. Des méthodes d'aide à la décision permettent de faciliter le choix d'alternatives présentant les meilleurs compromis entre les différents objectifs à minimiser (ou maximiser). Ces méthodes peuvent permettre de comparer les alternatives soit dans l'espace de conception (défini par les variables de conception ou d'optimisation) ou bien dans l'espace des fonctions objectifs. Le premier est défini par le domaine de variation des paramètres ou variables caractérisant les solutions du problème de conception de système. Les critères de décision, ou encore les fonctions objectifs, définissent l'espace des fonctions objectifs.

Dans sa thèse, Rivallain [66] classe les méthodes permettant de gérer les problèmes d'optimisation multicritère en deux catégories :

- les méthodes basées sur les préférences : elles visent à transformer le problème d'optimisation multicritère en un problème d'optimisation monocritère. Elles ont besoin d'information préférentielle sur les critères en amont de la phase de recherche de solutions. Afin d'obtenir une solution optimale de qualité il est nécessaire de maîtriser l'influence des préférences sur les résultats.
- les méthodes basées sur la génération de solutions : elles permettent d'identifier un ensemble de solutions non-dominées. Le choix de la solution optimale est ensuite laissé aux décideurs. Ces techniques ne nécessitent pas de formuler des hypothèses sur l'importance relative des critères les uns par rapport aux autres.

Vijayagopal *et al* formulent un problème d’optimisation du coût et de la consommation de carburant d’une architecture de système HEV [67]. La méthode d’optimisation multicritère présentée génère un ensemble de solutions non dominée au sens de Pareto. Les solutions intéressantes en termes de compromis sur les deux critères choisis se situent sur le front de Pareto. Les relations de dominance au sens de Pareto sont largement utilisées dans la littérature pour résoudre ce type de problème d’optimisation. En effet le front de Pareto aide à comprendre les compromis accessibles entre les critères et permet d’aider la prise de décision sur le choix de la solution optimale. Masfaraud *et al* présentent une méthode d’optimisation multi-objectifs de boîtes de vitesses [39]. Les deux objectifs à minimiser sont la longueur de la boîte de vitesses (traduisant la compacité de la solution) et le coût. L’ensemble de solutions optimales est identifié via un front Pareto. Dans sa thèse [37], Kabalan formule également un problème multi-objectifs en prenant en compte un critère de compacité en plus des critères classiques de coût et de consommation énergétique. Le critère de compacité est formulé via un calcul donnant le volume en fonction de la puissance des machines électriques, du moteur thermique et de la batterie.

Enfin un exemple d’utilisation de méthode basée sur les préférences pour résoudre un problème d’optimisation multi-objectifs de système HEV est montré par Piechottka *et al* [38]. Ils définissent des coefficients de pondération pour les trois critères suivants : rendement énergétique, performance et confort. Ces coefficients sont basés sur la connaissance d’experts sur le système à concevoir et le marché de l’automobile.

## **2.9 Evaluation automatique d’architecture système**

Au cours d’un processus de conception de système, l’étape d’évaluation d’une architecture système permet de s’assurer que les exigences soient bien respectées. Dans une approche système basée sur des outils MBSE, une attention particulière doit être portée sur l’utilisation des différentes représentations et modèles utilisés pour gérer la conception d’un système. La nature des représentations des systèmes et des modèles évoluent au passage du monde système vers le monde de la simulation. Une clé de la réussite de cette opération est le maintien de la cohérence entre les modèles et les représentations. Sirin [18] définit un nouveau métier (architecte modèle) pour faire le lien entre les deux points de vue. Son objectif est d’exprimer au mieux les souhaits de l’architecte système, qui sont purement liés à la conception du produit. De plus, le concept de MIC (Model Identity Card) est développé afin de faciliter les échanges de données entre des acteurs du processus de modélisation et simulation

pour réduire les ambiguïtés. La MIC est un formalisme permettant de spécifier un modèle en caractérisant ses interfaces. La MIC ne contient que partiellement la définition des éléments constituant le modèle de simulation (interface et paramètres). Il ne comprend pas tous les éléments constituant le modèle (par exemple les variables internes ne sont pas spécifiées). Deux composants électriques d’une librairie ne peuvent pas être différenciés par une comparaison d’interfaces.

Fontaine [68] a permis de développer des mécanismes basés sur le concept de la MIC pour automatiser partiellement le processus de modélisation et de simulation. Pour cela l’auteur a enrichi la structure de la MIC en ajoutant des informations qui peuvent être trouvées dans l’architecture de simulation (par exemple les connexions entre les différents sous-modèles). Les mécanismes développés permettent de générer automatiquement des modèles de simulation à partir d’une architecture système, dans laquelle chaque bloc système est défini par ce concept de MIC enrichi. De plus une librairie de modèles de simulation indexés par leurs MIC enrichis permet de peupler automatiquement le squelette du modèle de simulation.

Il existe deux approches pour évaluer des architectures système : une première basée sur la géométrie et une seconde sur la simulation du comportement physique [69].

- Basée sur la géométrie : ces méthodes permettent d’enrichir les modèles système avec des caractéristiques géométriques tôt dans les phases de conception du système. Ces données géométriques peuvent être utilisées dans le processus de développement pour définir des critères traduisant par exemple la difficulté d’implantation et la complexité de la solution. Ce type d’évaluation d’architecture système ne prend en compte que les aspects géométriques des composants d’un système.
- Basée sur la simulation : les approches d’évaluation basées sur la simulation utilisent des caractéristiques géométriques et physiques des composants pour évaluer le comportement physique de l’architecture système étudiée. Généralement ces méthodes permettent de définir des critères de performance et énergétique.

Dans un processus de génération automatique d’architectures système, l’évaluation des alternatives doit également être automatisée. En effet, comme discuté précédemment ces processus appliqués aux systèmes complexes peuvent générer des milliers d’architectures système différentes. Il serait impossible de construire manuellement les modèles permettant d’évaluer cet ensemble de solutions.

D’après Goos [70], il existe peu de méthodes dans la littérature permettant d’évaluer automatiquement des topologies de système HEV. Il présente une méthode de création automatique de modèle causal à partir d’une architecture de système HEV donnée. L’architecture système est construite à partir d’une librairie d’objets représentant les composants du système HEV. Ces objets contiennent toutes les informations permettant de s’assurer de la compatibilité de connexion avec les autres composants de la librairie. Lorsque deux composants sont connectés entre eux ils définissent alors une ou plusieurs équations. Par exemple pour une connexion mécanique entre un moteur à combustion interne (ICE) et une machine électrique (EM), les équations suivantes sont générées :

$$\omega_{ICE} - \omega_{EM} = 0 \quad (\text{Équation 2})$$

$$T_{ICE} + T_{EM} = 0 \quad (\text{Équation 3})$$

Les équations propres aux composants sont également contenues dans chaque objet. Par exemple l’objet moteur à combustion interne contient une méthode permettant de calculer la consommation de carburant en fonction du régime et du couple. La première étape de la méthode de création automatique de modèle de simulation consiste à récupérer toutes les équations à partir de l’architecture du système pour former un modèle acausal. Puis un algorithme est chargé de transformer le modèle acausal en modèle causal. Les équations sont automatiquement classées en fonction de leur nombre de variables, comme illustré sur la *Figure 17*. Ces équations sont résolues une par une. Lors de la résolution d’une équation, les variables de l’équation suivantes sont déterminées.

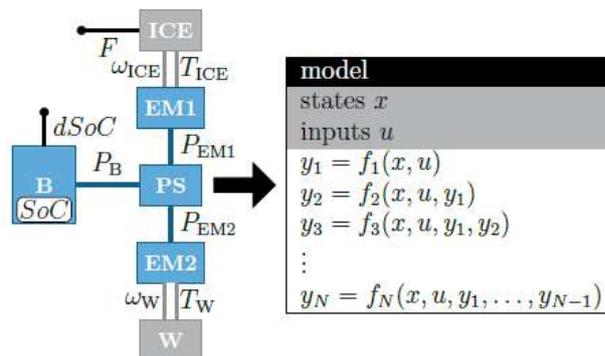


Figure 17 : Création d’un modèle causal à partir d’une architecture de système HEV [70]

Masfaraud *et al* présentent une méthode de génération automatique de modèles mathématiques et 3D pour évaluer respectivement le comportement cinématique et la géométrie de boîtes de vitesses [39]. La méthode est basée sur une approche orientée objet. L’objet représentant un concept de boîte de vitesses encapsule diverses informations et représentations. La représentation sous forme de graphe donne un aperçu de l’agencement des composants de la boîte de vitesses (engrenages et arbres). Un objet engrenage donne une équation linéaire reliant la vitesse de rotation des arbres qu’il connecte. La connaissance de l’ensemble des engrenages constituant une boîte de vitesses permet d’assembler les équations cinématiques. La résolution du système d’équations linéaires pour une vitesse d’entrée moteur fixée permet de vérifier si la boîte de vitesses est cinématiquement réalisable. Sur la base de l’architecture organique de boîte de vitesses représentée par un graphe une modélisation 3d est automatiquement réalisée. Le résultat de cette modélisation 3d est un ensemble d’agencements possibles évitant les collisions et optimisant la compacité de la solution. Sur la Figure 18 il est représenté un graphe caractérisant l’architecture organique d’une boîte de vitesses à 5 rapports et deux agencements possibles modélisés en filaire. Sur la Figure 19 une modélisation 3D d’un agencement possible est illustrée.

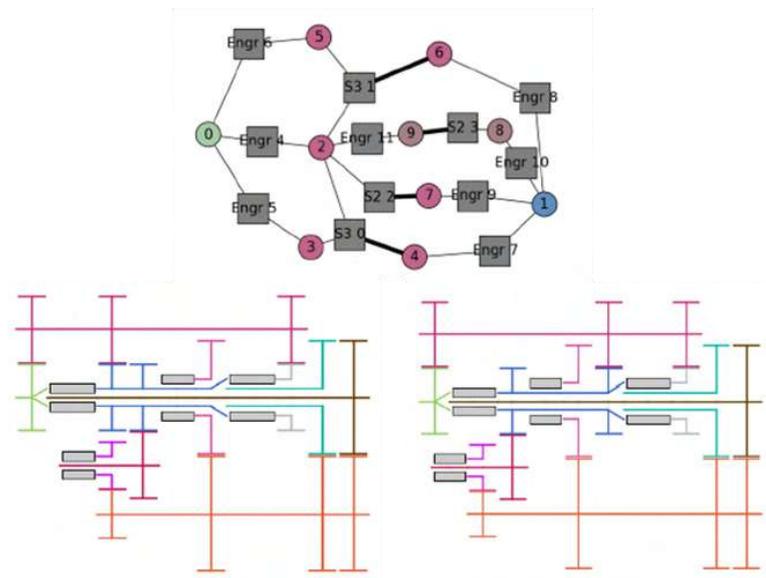


Figure 18 : Graphe représentant une boîte de vitesses à 5 rapports et deux modèles filaires d’agencements possibles [39]

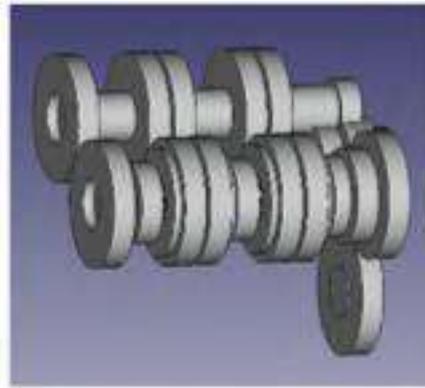


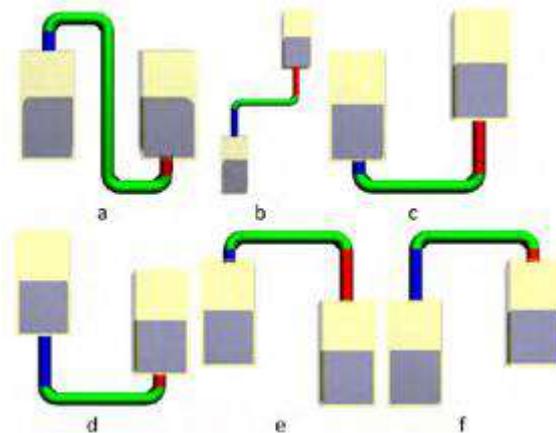
Figure 19 : Modèle 3D de boîte de vitesses généré automatiquement [39]

Bayrak développe une approche d'évaluation automatique d'architectures de système HEV basée sur la théorie des graphes [71]. Dans un premier temps des graphes non orientés représentant des architectures de système HEV sont générés. Puis ces graphes générés sont convertis en graphes de liaisons pour pouvoir extraire les équations cinématiques. De la même façon, Vanhuyse [35] utilise le logiciel de simulation AMESim basé sur la théorie des graphes de liaisons pour évaluer automatiquement chaque architecture de système HEV générée. La méthode proposée par Wijkniet *et al* construit automatiquement dans un environnement un environnement un modèle dynamique à partir de la description des topologies générées de système HEV [30].

Une autre méthode est présentée par Van Harselaar *et al* pour évaluer automatiquement le comportement physique d'architectures de système HEV générées [72]. Cette méthode est basée sur un modèle générique incluant une liste de modes possibles. Chaque mode est représenté par un jeu d'équations cinématiques et dynamiques. Une phase de pré-traitement des architectures générées permet de détecter les modes réalisables par chaque architecture.

Aucune méthode d'évaluation automatique du comportement physique du sous-système de refroidissement d'un véhicule HEV n'a été identifiée dans la littérature. Seul l'aspect géométrique est traité. Sierla *et al* présentent une méthode de tracé automatique de réseaux hydrauliques entre deux réservoirs [73]. Cette méthode est basée sur la définition d'un catalogue de composants (coude 90°, tuyaux droits horizontaux et verticaux) et sur un langage orienté objets. Chaque composant possède ses propres méthodes permettant d'être translaté ou tourné selon les trois dimensions de l'espace et un attribut définissant sa longueur. Les deux réservoirs à connecter sont

eux définis par leurs ports d’entrée et sortie ainsi que leurs directions. Le tracé 3D est réalisé à partir des composants du catalogue. L’application des méthodes définies dans chaque composant ainsi que la définition de leur attribut « longueur » permet de relier les deux réservoirs. Des exemples d’applications de cette méthode sont présentés en *Figure 22*.



*Figure 20 : Exemple de réseaux hydrauliques tracés automatiquement entre deux réservoirs [73]*

Stanczak *et al* ont également développé une méthode pour tracer automatiquement en 3D des réseaux hydrauliques [74]. Cette méthode est basée sur la génération d’un graphe définissant les orientations possibles pour une combinaison de coudes donnés. Les combinaisons valides sont retenues et une optimisation sur les longueurs est effectuée pour relier une entrée à une sortie.

## **2.10 Modélisation et simulation énergétique pour système HEV et sous-système de refroidissement**

La modélisation et la simulation numérique sont largement utilisés lors des différentes phases de conception d’un système. En effet, la simulation numérique permet de réduire les coûts et les temps de développement en limitant le nombre d’essais et de prototypes.

El-Hajj [75] classe les différentes utilisations possibles de la simulation numérique lors d’un projet de conception de système en trois niveaux selon les objectifs attendus :

1. Le premier niveau utilise la simulation numérique pour aider au passage d’exigences système en spécifications technologiques.
2. Au second niveau, la simulation numérique permet en amont de projet d’orienter les recherches et les choix de concepts et technologies. L’utilisation au haut niveau système permet de tester et comparer plusieurs concepts lors des phases de conception, en utilisant différents niveaux d’abstraction pour les modèles des composants (selon les informations disponibles).
3. Enfin au troisième niveau la simulation numérique est utilisée pour le développement des sous-systèmes et composants afin de consolider les choix techniques et vérifier la robustesse des lois de commande et de contrôle.

Concernant le système HEV, il existe deux approches différentes de modélisation [76] : « backward » ou « forward ». Le choix dépend des objectifs de la modélisation. L’approche « forward » est une modélisation causale, c’est-à-dire que l’on part de la cause (gestion de l’énergie) pour simuler l’effet (vitesse véhicule) en respectant le flux de puissance dans le système. Elle nécessite un modèle conducteur et superviseur chargé de traduire l’enfoncement de la pédale d’accélération ou freinage en commande pour les différents composants. L’erreur entre la vitesse réelle et la consigne (due aux limitations des composants et à l’erreur d’interprétation de la commande par le modèle conducteur) est corrigée au pas de temps suivant. Cette méthode est souvent utilisée pour développer des lois de gestion d’énergie. Elle est également utilisée pour des modèles qui intègrent de la dynamique (par exemple de la thermique) afin d’évaluer les performances dynamiques du système, ou les influences des cycles sur la réduction de la consommation [77]. L’approche « backward », à l’inverse, est une description acausale. Le principe repose sur la simulation de l’objectif (cycle de conduite) pour calculer la cause (énergie requise). Cela permet d’anticiper l’énergie requise pour déplacer le véhicule. Cette méthode est plutôt utilisée pour réaliser des évaluations énergétiques (calcul de consommation et émissions) ou dimensionnement de composants. L’approche « backward » combinée à une optimisation globale de la gestion de l’énergie est souvent utilisée pour comparer différentes architectures de véhicules hybrides [78].

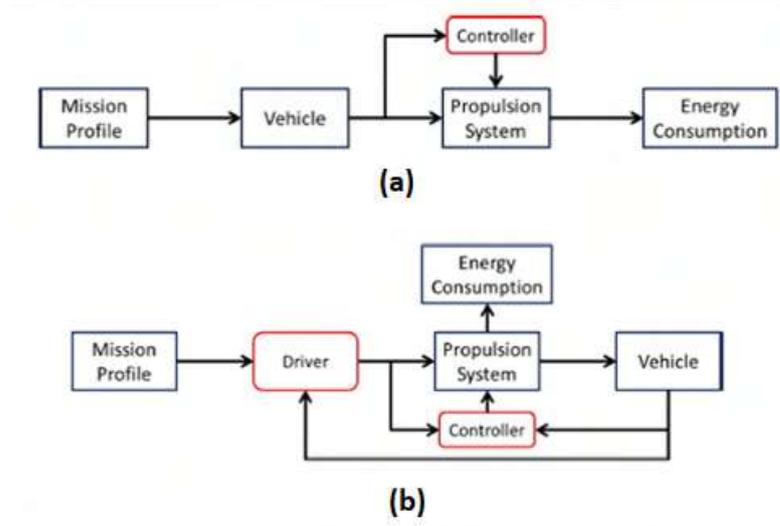


Figure 21 : Approches « backward » (a) et « forward » (b) appliquées sur un système HEV [79]

L’objectif d’un modèle énergétique étant d’évaluer la consommation et les émissions, les modèles utilisés pour décrire le comportement de systèmes de chaîne de traction sont souvent simplifiés (quasi-statique, c’est-à-dire que les effets dynamiques, comme le temps de réponse du turbocompresseur sont négligés) par rapport à un modèle prenant en compte des effets dynamiques. La modélisation statique des composants est souvent utilisée pour des études « haut niveau » hors ligne. Paykani *et al* présentent un modèle analytique 0-d d’un système de chaîne de traction HEV type parallèle [77]. L’objectif de l’utilisation de la simulation numérique dans cette étude est de comparer des taux d’hybridation du système HEV. Souffran [80] utilise également des modèles simples pour modéliser le comportement d’un système HEV, les composants sont cartographiés. Le point de fonctionnement de la batterie est déterminé par son état de charge. La puissance de sortie des machines électriques et du moteur à combustion interne sont déterminées en fonction des couples et des vitesses de rotation. La boîte de vitesses est modélisée simplement par deux équations reliant d’une part les couples d’entrée et sortie et d’autre part les vitesses d’entrée et sortie en fonction du rapport choisi. Ce type de modélisation simplifiée est largement répandu dans la littérature [78][81][82].

Le système thermique de refroidissement d’un véhicule hybride dépend fortement des points de fonctionnement des différents composants. En effet la dissipation de chaleur de ces composants est liée à leur mode d’utilisation. Les modèles énergétiques et les

modèles thermiques doivent donc être couplés. Dubouil indique que les montées en température des composants sont obtenues par association de modèles thermodynamiques et thermo-hydrauliques [83]. Le couplage des deux modèles se fait au niveau des ports des modèles, par exemple le modèle du moteur thermique donne la quantité d’énergie thermique à évacuer via le circuit de refroidissement. Les modèles au niveau chaîne de traction sont cartographiés. Le moteur thermique est modélisé thermiquement par une approche nodale (en deux blocs : culasse et carter), pour étudier l’impact de l’hybridation d’un véhicule sur la thermique moteur. Le sous-système de refroidissement est modélisé par un réseau hydraulique de tuyaux dans lequel circule un débit d’eau imposé par la pompe hydraulique. Les composants principaux sont le radiateur, le thermostat et la pompe. Le thermostat est modélisé par une vanne pilotée par un contrôle basé sur des règles (i.e. ouverture à partir d’une température d’eau supérieure à 90°C). Le radiateur est modélisé par une source de chaleur négative régulée par un PID afin de maintenir la température autour de 90°C. La pompe est une pompe mécanique. Park [12] décrit les modèles et sous-modèles pour chaque composant d’un circuit de refroidissement de véhicule hybride afin de calculer pour chacun d’eux les pertes de charges, les débits et les transferts thermiques. Les composants du système HEV sont cartographiés pour fournir la quantité de chaleur générée en fonction du point de fonctionnement. Le radiateur est modélisé via une approche d’éléments finis en 2D (FDM) et les échangeurs eau/huile sont modélisés à l’aide de la méthode efficacité-NTU. Les pompes mécaniques et électriques sont cartographiées (courbes caractéristiques en fonction du régime de rotation). Le modèle de circuit de refroidissement proposé dans cette thèse ne prend pas en compte la modélisation des pertes de charges régulières et singulières au sein des tuyaux hydrauliques. Un exemple de prise en compte de ces pertes de charges dans une modélisation numérique de système de refroidissement est proposée par Stellato *et al* [84]. La *Figure 22* illustre la définition d’un modèle hydraulique de perte de charge régulière et singulière de réseau hydraulique obtenu à partir d’une discrétisation d’une géométrie CAD.

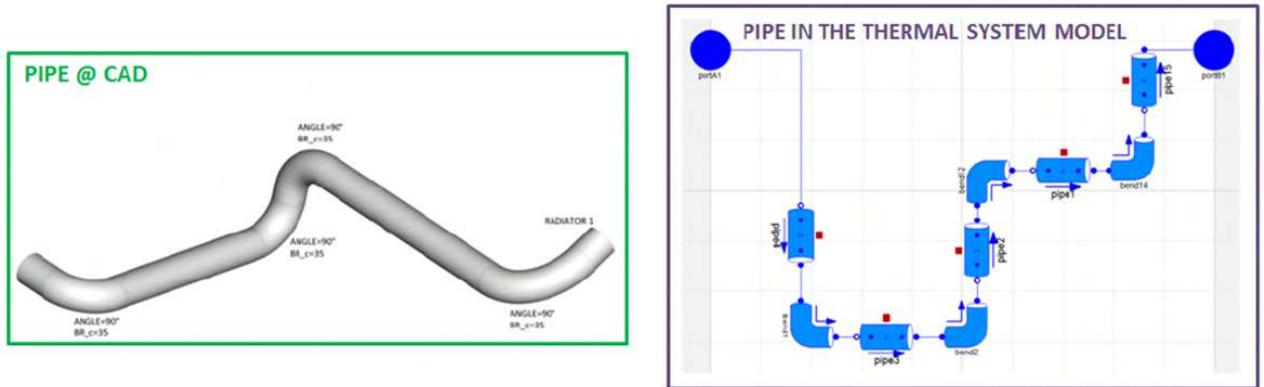


Figure 22 : Modélisation pour simulation numérique de tuyaux d'un circuit de refroidissement [84]

Similairement, Saab [11] s’est intéressé à la modélisation des composants d’un circuit de refroidissement de véhicule conventionnel (cependant nous retrouvons généralement les mêmes composants). La stratégie de modélisation suit une approche système, le modèle complet est divisé en sous-modèles (partie moteur et partie circuit de refroidissement). Les échangeurs sont modélisés principalement à l’aide de cartographie donnant la puissance thermique en fonction des débits.

Salah *et al* modélise analytiquement le comportement d’un circuit de refroidissement de véhicule conventionnel pour évaluer un contrôle [85]. Le système d’équations relie les températures d’eau et des composants, les débits dans les différentes branches du circuit et les puissances thermiques évacuée ou injectée par les composants.

Dans la littérature certaines études énergétiques sur véhicule hybride prenant en compte l’impact de la thermique des différents organes de puissance sont présentées, comme la modélisation thermique d’architectures de véhicule hybride série-parallèle pour des calculs énergétiques [86][60]. Une méthode similaire est utilisée sur une application de camion hybride par Ackerl *et al* [87], le logiciel de simulation de la dynamique longitudinale calcule la puissance de propulsion qui détermine les chargements thermiques des composants.

Philippine *et al* décrivent un modèle global permettant l’optimisation de la consommation d’un circuit de refroidissement de camion basé sur un algorithme DP [88]. Les interactions entre les différents sous-modèles sont illustrés sur la Figure 23. Une simplification du modèle analytique a été menée en réduisant le nombre de variables d’état et de contrôle. Le modèle final comporte seulement deux équations

de bilan d’énergie reliant les températures d’eau en sortie moteur et dans le radiateur aux flux thermiques échangés au niveau du moteur et du radiateur. Les flux thermiques échangés sont donnés en fonction de coefficients d’échanges thermiques dans le moteur et le radiateur. Ces coefficients d’échanges thermiques dépendent des débits d’eau et d’air circulant respectivement dans le circuit de refroidissement et au niveau du radiateur. Les variables d’états définissant le contrôle de la pompe et du fan sont les températures d’eau radiateur et moteur. Le contrôle optimal obtenu à partir de l’algorithme DP permet des gains jusqu’à 89% de consommation de la pompe et du fan.

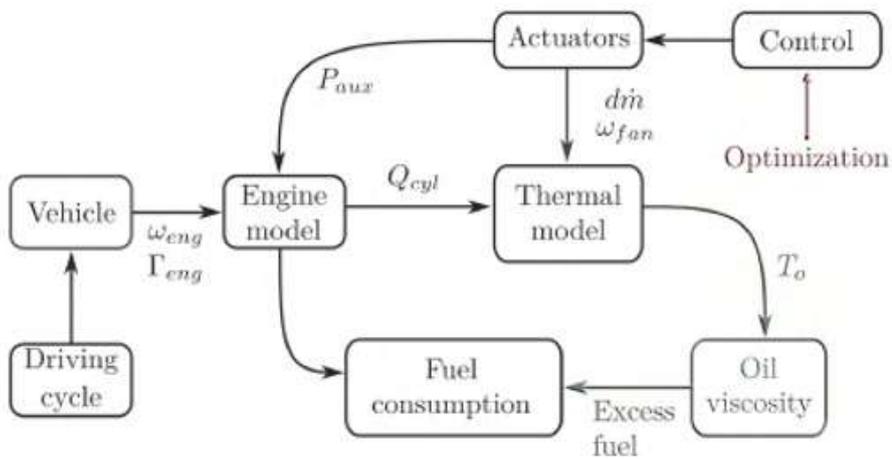


Figure 23 : Interactions des sous-modèles d'un modèle global de prédiction de consommation énergétique avec prise en compte de la thermique moteur [88]

## Conclusions sur l’état de l’art

Des méthodes d’optimisation globale de systèmes HEV ont été développées par Piechottka *et al* [38], Danzer *et al* [89] et Sturm *et al* [90]. Ces méthodes sont basées sur une approche système, elles partent des exigences à satisfaire pour générer dans un premier temps l’ensemble des architectures de systèmes HEV possibles. Chaque solution générée est ensuite automatiquement évaluée et optimisée via des modèles de simulation numériques construits automatiquement. Il n’existe cependant pas à ce jour de telle méthode appliquée au problème de conception de sous-système de refroidissement de véhicule. Ce manque dans la littérature est mentionné par Wei *et al* [31]. En effet d’après les auteurs, aucune méthode d’optimisation globale sur les trois niveaux présentés sur la *Figure 11* (architecture, composant et contrôle) n’a encore été développée.

Compte tenu des lacunes relevées dans l’étude bibliographique, cette thèse propose une méthode d’optimisation globale du système HEV et du sous-système de refroidissement. Le Chapitre 3 mettra en évidence une méthode automatique de génération et d’optimisation énergétique d’architectures organiques de systèmes HEV. Puis le Chapitre 4 présentera une méthode de génération automatique d’architectures organiques de sous-système de refroidissement. Enfin le dernier Chapitre 5 mettra en avant une méthode automatique d’optimisation énergétique d’architectures de circuit de refroidissement.



# Chapitre 3- Génération et optimisation énergétique automatique d'architectures de système HEV

## 3.1 Introduction

La méthode d'optimisation globale du système HEV et du sous-système de refroidissement développée dans le cadre de cette thèse est illustrée sur la *Figure 24*. Elle est basée sur une approche système, les exigences système sont utilisées comme données d'entrée aux algorithmes de génération d'architectures système. Des outils de construction automatique de modèles de simulation permettent d'évaluer et d'optimiser chaque solution générée. Les exigences du haut niveau système HEV sont alors déclinées au niveau du sous-système de refroidissement. La méthode proposée permet de comparer un grand nombre d'alternatives d'architectures système lors des phases amont du processus de développement et de conception. Cette méthode est utilisée comme un outil d'aide à la décision.

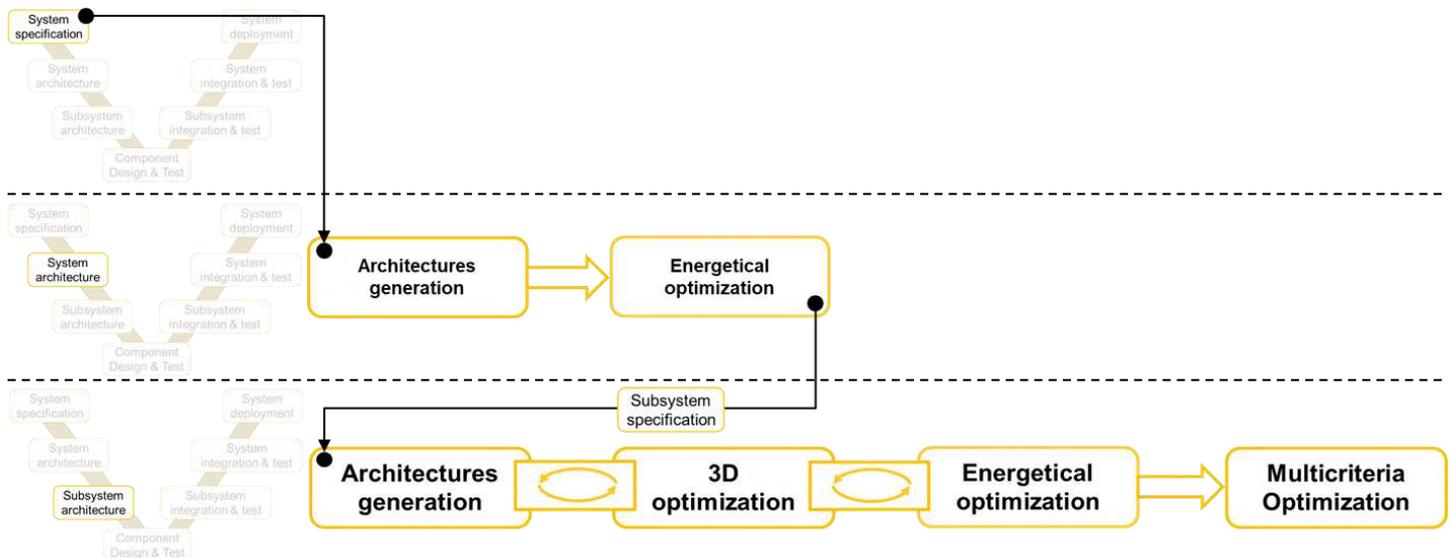


Figure 24 : Méthode globale d'optimisation d'architectures système

Pour des choix d’architecture système en début de processus de développement et conception, peu d’outils commercialisés sont disponibles pour générer, optimiser et évaluer automatiquement un grand nombre d’alternatives. Les principaux outils identifiés dans le cadre de la thèse pour répondre à ce besoin sont présentés dans la *Table 1*. Le logiciel *System Composer* développé par MATHWORKS est basé, tout comme *Studio*, sur une approche MBSE. Le fonctionnement de l’outil *System Composer* est présenté dans [91]. Les systèmes sont modélisés à l’aide de composants, de ports et de connecteurs. Les interfaces sont spécifiées au niveau des ports (types, unités et structure des données) et permettent de vérifier la compatibilité des ports. L’interface caractérise ce qui passe au travers des ports, les connecteurs informent sur les connexions internes du système. La création d’architecture d’un système sous *System Composer* se fait manuellement par l’utilisateur. Dans l’objectif d’automatiser ce processus, il est nécessaire de développer un script en s’appuyant sur des méthodes présentées dans le Chapitre 2 permettant d’identifier un ensemble d’architectures possibles du système étudié. Chaque composant défini sous *System Composer* peut être lié à un modèle de simulation. Cependant l’outil ne supporte que des modèles Simulink. Afin de pouvoir utiliser d’autres modèles provenant d’autres logiciels de simulation (i.e. AMESim) il est nécessaire de les convertir en S-fonction et les importer sous Simulink. Le logiciel *Studio* est présenté en détails dans le Chapitre 4. Les deux outils commercialisés par SIEMENS et MATHWORKS ont comme principal intérêt industriel la facilité liée à la maintenance de l’outil. **Cependant le contrôle sur le fonctionnement de l’outil et la difficulté d’introduire de nouvelles contraintes système spécifiques pour la génération d’architectures système rendent la solution basée sur le langage Python plus adaptée.** De plus la plupart des packages Python sont en *open source* et ne nécessitent donc pas de licence d’utilisation. La méthode globale d’optimisation d’architecture système présentée dans cette thèse est principalement basée sur des outils développés à l’aide du langage Python.

Outil	Contrôle sur l’outil	Facilité à définir des contraintes	Interface outils de simulation	Coût licence	Maintenabilité
Studio (SIEMENS)	+	+	+++	+	+++
System Composer (MATHWORKS)	+	+	-	+	+++
Python (Open Source)	+++	+++	++	+++	+

Table 1 : Comparaison outils disponibles pour générer, optimiser et évaluer automatiquement des architectures système

La nature combinatoire du problème de conception de système de chaîne de traction HEV demande d’énumérer et identifier les architectures faisables pour trouver une solution optimale à un cahier des charges donné. Ce chapitre présente une méthodologie automatique de génération et d’optimisation énergétique d’architectures de chaîne de traction HEV.

La méthode proposée est basée sur une approche orientée objet (type MBSE) permettant de définir le système et structurer le savoir. Les connaissances liées au système sont encapsulées dans des objets, définis par un ensemble d’attributs et de méthodes. L’application d’algorithmes aux objets permet d’effectuer des tâches automatisées du processus de conception de système.

Dans la suite de ce chapitre une représentation d’architecture organique de système HEV est tout d’abord proposée. Sur la base de cette représentation, une méthode de résolution du problème de recherche d’architectures organiques de systèmes HEV possibles est présentée. Comme illustré sur la *Figure 25*, cette méthode de recherche d’architectures organiques de systèmes possibles est basée sur un concept **d’arbre de décisions**. Pour des raisons de simplicité, dans le cadre de cette thèse, seul le contrôle est optimisé pour chaque solution d’architecture organique de système HEV générée. Concernant le dimensionnement des composants, l’hypothèse de composants figés est prise.

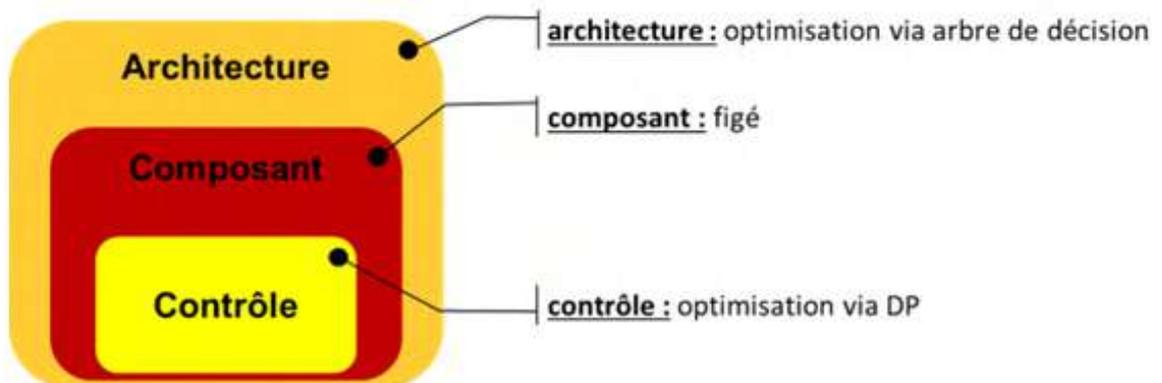


Figure 25 : Stratégies d’optimisation des différents niveaux de conception du système HEV

## 3.2 Représentation d'architecture organique de système HEV

Pour explorer automatiquement l'espace des solutions possibles d'architecture organique de système HEV, celles-ci doivent être dans un premier temps définies et représentées selon un formalisme. Dans la littérature la théorie des graphes est largement utilisée pour représenter des solutions à ce type de problème [34], [37], [39]. La principale différence entre les représentations identifiées dans la littérature est la façon dont le composant boîte de vitesses est représentée. Selon le type de représentation choisie, le composant boîte de vitesse est représenté avec plus ou moins de détails selon les objectifs attendus. Une boîte de vitesses est représentée par un graphe dont les nœuds sont définis par des sets d'engrenages et de synchroniseurs [36]. Les détails présents dans cette représentation permettent d'évaluer des critères de compacité et de coûts liés aux solutions générées. Les études menées par Silvas [34], Kabalan [37] et Masfaraud *et al* [39] visent à générer un ensemble d'architectures organique de véhicule HEV définies par un graphe, la boîte de vitesse est alors représentée par un simple nœud du graphe.

La représentation d'architectures organiques de système HEV proposée est illustrée sur la Figure 26. Une solution est représentée sous forme de graphe. Un graphe est constitué de nœuds et de liaisons entre eux. Dans la représentation proposée, les nœuds définissent les composants d'une architecture de système HEV et les liaisons correspondent aux connexions mécaniques entre ces composants. Deux familles de composants ont été définies : les composants powertrain et les composants mécaniques. La première famille rassemble les machines électriques et thermiques. Les composants mécaniques sont les boîtes de vitesses, les transmissions finales, les embrayages et les connecteurs. Le type de composant connecteur, permet de relier une machine électrique ou thermique à un arbre mécanique. Des exemples de connexions mécaniques représentables par un composant type connecteur sont illustrés sur la Figure 27. Deux types de connexions mécaniques entre une machine électrique et un arbre mécanique sont présentés, le premier est réalisé via des engrenages et le second via une courroie. Ce type de connexion est utilisé pour effectuer en partie les architectures HEV parallèles « PX » [92].

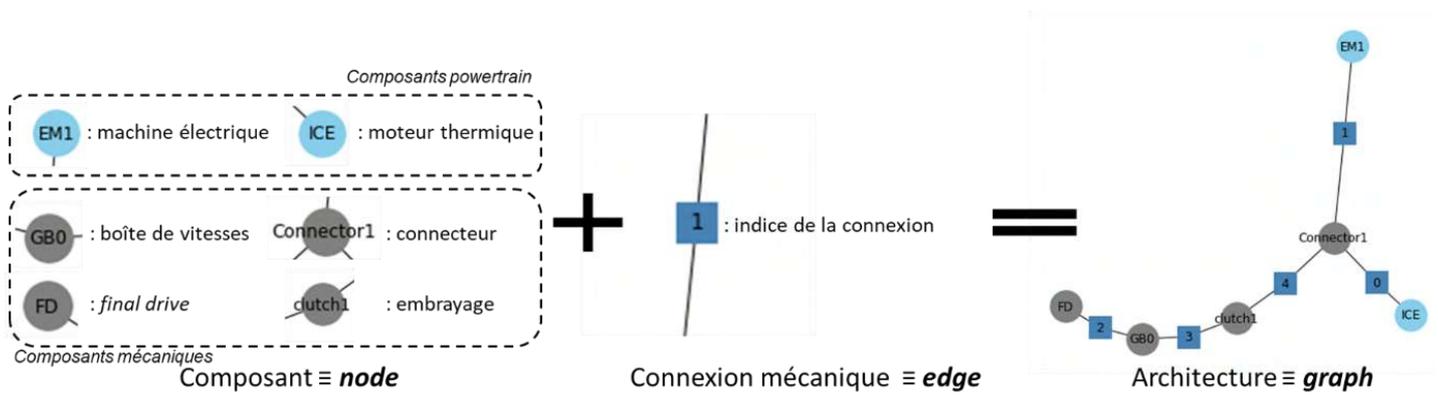


Figure 26 : Représentation proposée d’architectures de système HEV basée sur la théorie des graphes

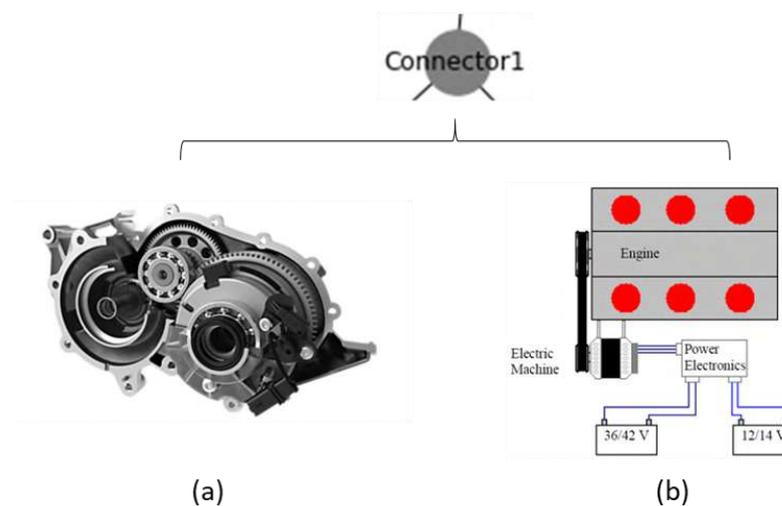


Figure 27 : Connexion machine électrique via engrenages (a) [93] ; connexion machine électrique via courroie (b) [94]

La Table 2 définit le nombre de ports de chaque composant du système HEV. Une connexion mécanique est utilisée pour relier deux ports de deux composants entre eux. L’ensemble des connexions définit le graphe représentant une solution particulière d’architecture organique de système HEV. Sur l’exemple donné en Figure 26, le graphe est défini par les connexions suivantes :

- n°0 : connecte ICE à connector1

- n°1 : connecte *EM1* à *connector1*
- n°2 : connecte *GB0* à *FD*
- n°3 : connecte *clutch1* à *GB0*
- n°4 : connecte *clutch1* à *connector1*

Composant	Nombre de ports
Moteur ( <i>ICE</i> )	1
Machine électrique ( <i>EM</i> )	1
Boîte de vitesse ( <i>GB</i> )	2
Embrayage ( <i>clutch</i> )	2
Transmission finale ( <i>FD</i> )	1
Connecteur mécanique ( <i>connector</i> )	3

Table 2 : Définition du nombre de ports des différents composants

### 3.3 Génération automatique d’architecture de système HEV

Sur la base de la représentation des solutions à partir de graphes, un outil de génération automatique d’architectures organiques a été développé et est détaillé dans ce paragraphe. Cet outil est basé sur un concept d’arbre de décision non statistique mais génératif. En effet les données sont générées au fur et à mesure de l’exploration de l’arbre de décision, et ne sont pas disponible au début du processus. Comme décrit dans l’Annexe B, la première étape dans l’utilisation d’un arbre de décision génératif est de définir une représentation mathématique des solutions à générer.

La *Figure 28* présente le processus de génération d’architectures organiques de système HEV basée sur le concept d’arbre de décision. La première étape du processus de génération des solutions est la déclaration des composants. Le nombre

de connexions mécaniques entre les composants est directement déterminé par la liste de composants renseignée. Sur l'exemple de la *Figure 28* le jeu de composants comporte 10 ports à connecter, 5 connexions mécaniques sont donc nécessaires pour relier l'ensemble des composants entre eux. La représentation mathématique de solutions d'architecture de système HEV à générer se fait sous forme vectorielle. Un exemple de vecteur représentant une solution particulière (décrite dans la *Table 3*) est présenté sur la *Figure 29*. Les dimensions du vecteur correspondent au nombre de composants. Les coordonnées du vecteur représentent les indices des connexions mécaniques appliquées aux différents composants. La première coordonnée renseigne sur l'indice de la connexion mécanique (i.e. la connexion mécanique n°1) reliant le premier composant (i.e. *EM1*)

L'arbre de décision consiste à explorer l'ensemble des possibilités de définir le nombre fixé de connexions mécaniques appliquées aux composants. La *Table 3* résume l'ensemble des possibilités de définir les 5 connexions mécaniques de l'exemple présenté sur la *Figure 28*. Dans cet exemple les connexions mécaniques sont représentées par un indice de 0 à 4. La solution mise en valeur dans la *Table 3* définit les connexions suivantes :

- n°0 : connecte *ICE* à *connector1*
- n°1 : connecte *EM1* à *connector1*
- n°2 : connecte *GB0* à *FD*
- n°3 : connecte *clutch1* à *GB0*
- n°4 : connecte *clutch1* à *connector1*

L'exemple illustré en *Table 3* génère 125 000 solutions possibles. Parmi cet ensemble de solutions un grand nombre ne constituent pas une solution d'architecture organique de système HEV valide. Par exemple la *Figure 30* représente une solution non valide comportant une boucle mécanique. Dans un processus de génération automatique d'architectures de systèmes, la définition de contraintes permet d'éviter de générer des solutions non valides. Gadeyne *et al* dans [95] définissent un ensemble de contraintes pour aboutir à des architectures de systèmes HEV faisables et cohérentes, par exemple l'interdiction de connecter un embrayage directement à la transmission finale. De la même manière, un ensemble de contraintes ont été

implémentées dans l’algorithme de génération d’architecture organique de système HEV basé sur un arbre de décision. Ces contraintes sont les suivantes :

- pas de présence de boucle mécanique
- une boîte de vitesses ne peut pas être connectée à deux embrayages
- deux embrayages ne peuvent pas être connectés en série
- la transmission finale ne doit pas être connectée directement à une source mécanique
- une solution est représentée par un maximum de deux sous-graphes (pour les cas d’architectures de véhicule hybride série)
- une solution comporte au moins un chemin entre la transmission finale et une source mécanique

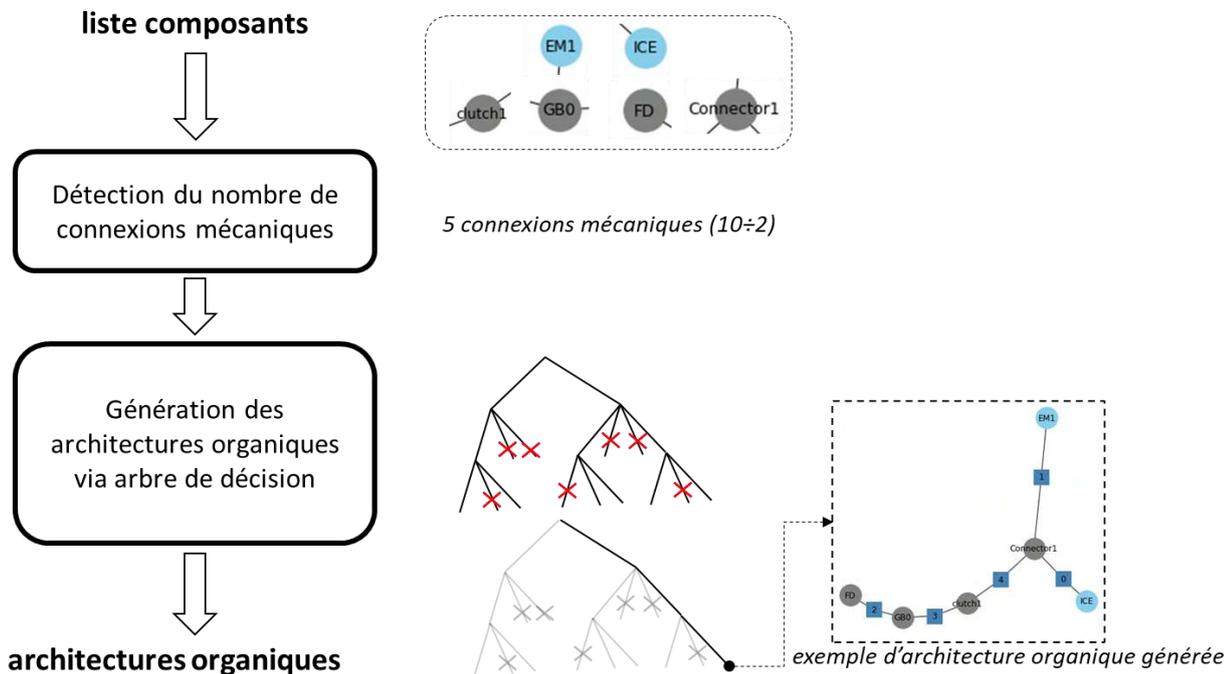


Figure 28 : Processus de génération d’architectures organiques de système HEV basée sur un concept d’arbre de décision

1 connexion			2 connexions		3 connexions
EM1	ICE	FD	GBO	clutch1	Connector1
0	0	0	(0, 1)	(0, 1)	(0, 1, 2)
1	1	1	(0, 2)	(0, 2)	(0, 1, 3)
2	2	2	(0, 3)	(0, 3)	(0, 1, 4)
3	3	3	(0, 4)	(0, 4)	(0, 2, 3)
4	4	4	(1, 2)	(1, 2)	(0, 2, 4)
			(1, 3)	(1, 3)	(0, 3, 4)
			(1, 4)	(1, 4)	(1, 2, 3)
			(2, 3)	(2, 3)	(1, 2, 4)
			(2, 4)	(2, 4)	(1, 3, 4)
			(3, 4)	(3, 4)	(2, 3, 4)

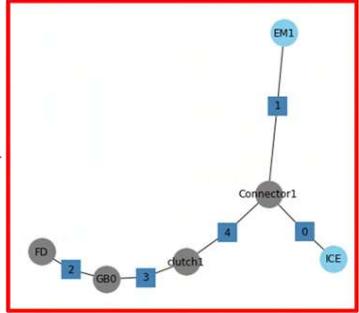


Table 3 : Exemple de combinaison possible des connexions mécaniques

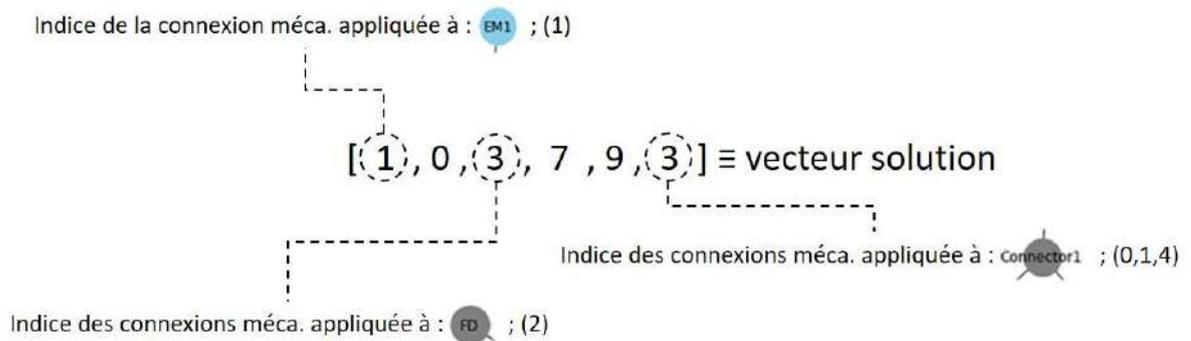


Figure 29 : Représentation du vecteur solution utilisée dans le concept d’arbre de décision appliqué à la génération d’architectures organiques de système HEV

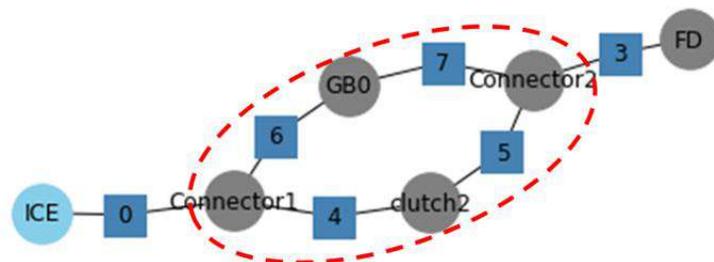


Figure 30 : Solution d’architecture organique de système HEV avec boucle mécanique

Afin de générer la diversité d'architectures de système HEV mise en valeur dans le Chapitre 1, des sous-ensembles de composants sont définis à partir de la liste globale de composants renseignée. La liste globale utilisée dans ce travail de thèse est la suivante :

- 1 moteur thermique
- 2 machines électriques
- 2 embrayages
- 1 transmission finale
- 1 boîte de vitesses (classique)
- 2 connecteurs 3 ports

Toutes les combinaisons d'au moins 4 composants parmi les 9 composants de la liste globale sont générées. Un filtre est ensuite effectué sur cet ensemble de combinaisons possibles pour ne conserver que les combinaisons qui peuvent aboutir à des solutions d'architectures de chaînes de traction HEV. Les combinaisons ne comportant pas de transmission finale sont par exemple directement écartées. Les sous-ensembles valides générés permettent à l'outil de génération d'architectures organiques de système HEV d'assurer une certaine diversité de solutions qui sont générées. Des architectures avec une ou deux machines électriques sont par exemple générées.

### **3.4 Analyse de la concurrence**

Une analyse de la concurrence à l'aide de l'outil de génération d'architectures organiques de systèmes HEV est présentée dans ce paragraphe. La *Figure 31* montre une bonne corrélation entre les architectures générées par la méthode présentée dans ce chapitre et celles issues de l'analyse de la concurrence présentée dans le Chapitre 1. En effet l'ensemble des architectures de système HEV est retrouvé à l'exception des architectures type power-split. Ces dernières architectures ne sont pas prises en compte dans ce travail pour des raisons de simplicité. Cependant la représentation proposée et l'outil de génération peut être adapté afin de générer ces architectures complexes. La *Figure 32* illustre comment l'architecture Renault E-tech [96] serait représentée. Le comportement de la boîte de vitesses E-tech peut être modélisée par deux boîtes de vitesses fictives, permettant d'assurer l'ensemble des modes hybrides réalisables.

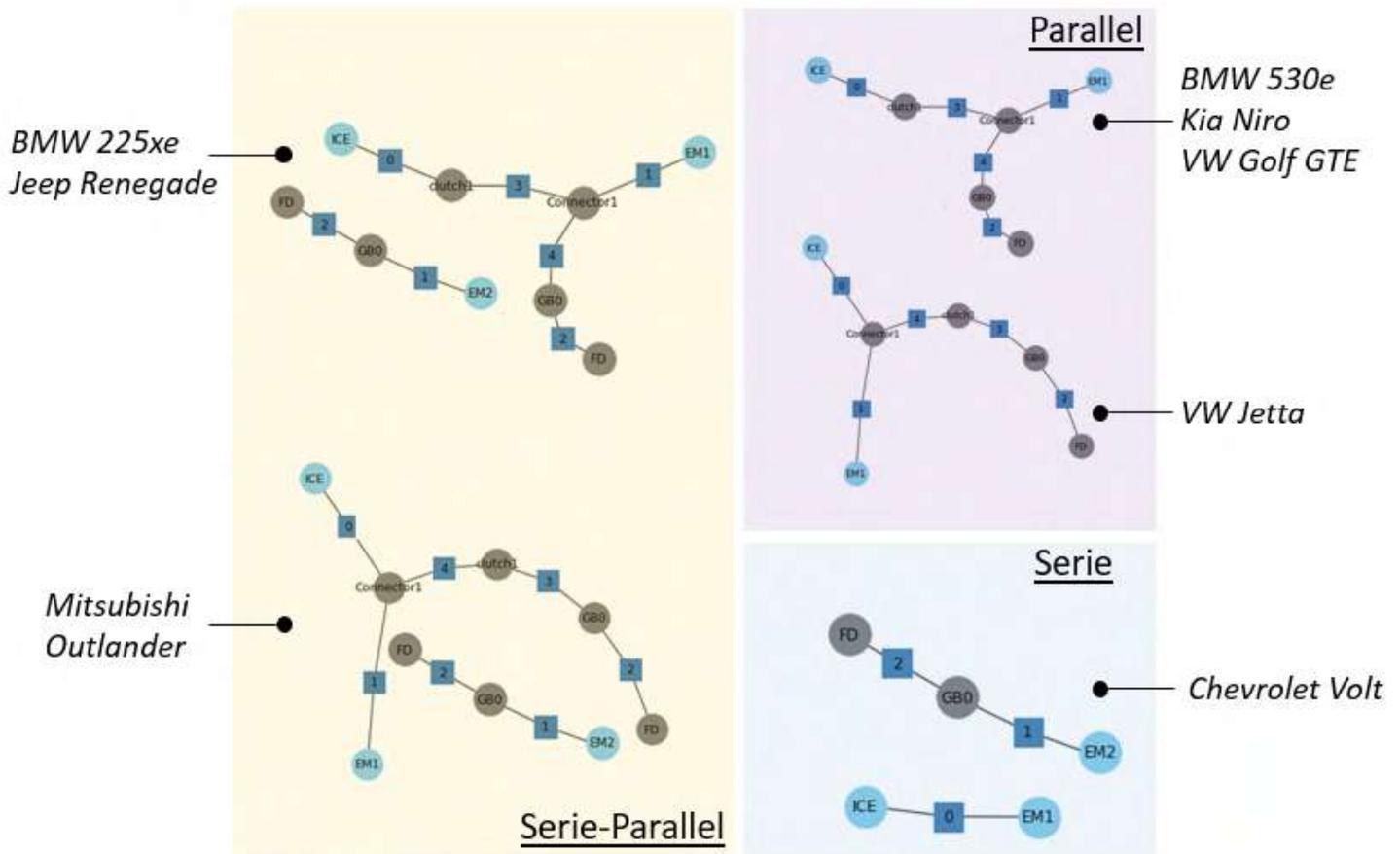


Figure 31 : Architecture de système HEV de la concurrence retrouvée par l'outil de génération de solutions

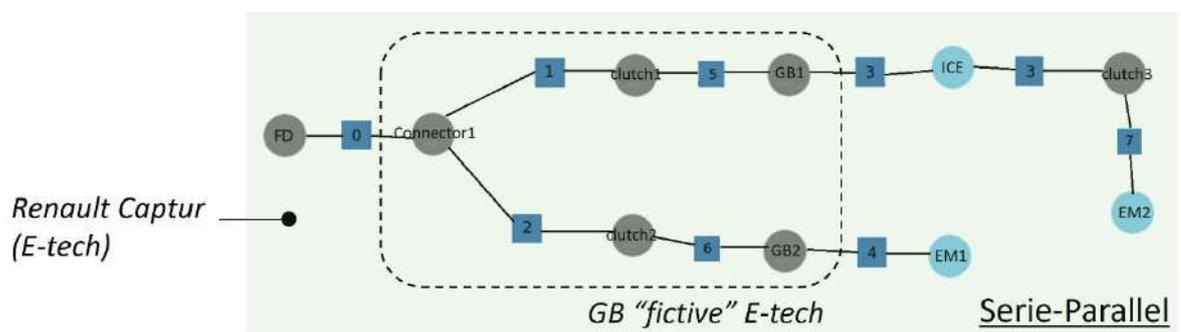


Figure 32 : Représentation de l'architecture de la Renault Captur (E-tech)

### 3.5 Modélisation énergétique d’architecture de système HEV

L’évaluation des solutions d’architectures organiques de système HEV générées nécessite de modéliser et simuler leurs comportements physiques sur cycle. L’évaluation du critère de consommation de carburant sur cycle permet de classer les solutions en fonction de leurs rendements énergétiques. Le comportement dynamique des systèmes HEV est modélisé par un jeu d’équations algébriques différentielles traduisant les interactions entre les différents composants du système. Ce paragraphe présente les modèles utilisés pour représenter le comportement physique des différents composants caractérisant un système HEV. Tout comme dans la thèse de Miropadovani [97], l’objectif est de modéliser les composants avec suffisamment de détails pour aboutir à une modélisation macroscopique d’un système HEV.

#### 3.5.1 Modélisation véhicule et transmissions mécaniques

La modélisation du véhicule est indispensable dans une modélisation énergétique de système HEV. Le comportement dynamique du véhicule est modélisé dans cette thèse via un modèle longitudinal de véhicule. Ce modèle permet de relier la vitesse du véhicule à chaque instant  $t$  d’un cycle aux forces auquel il est soumis. Selon le principe fondamental de la dynamique, l’équation traduisant cette relation de dépendance entre la vitesse et les forces subies par le véhicule peut s’écrire :

$$T_v = (F_r + F_a + F_i)r \quad (\text{Équation 4})$$

Sur la base de l’équation précédente, le couple et la vitesse de rotation au niveau de l’arbre d’entrée de la boîte de vitesses peuvent être calculés à l’aide des équations suivantes :

$$T_{gb} = \begin{cases} \frac{T_v}{\gamma(i)\eta_{gb}} & \text{si } T_v > 0 \\ \frac{T_v\eta_{gb}}{\gamma(i)} & \text{si } T_v < 0 \end{cases} \quad (\text{Équation 5})$$

$$\omega_{gb} = \gamma(i)\omega_v \quad (\text{Équation 6})$$

$$\dot{\omega}_{gb} = \gamma(i)\dot{\omega}_v \quad (\text{Équation 7})$$

A partir de la connaissance des vitesses angulaires des arbres mécaniques en aval des machines électriques et du moteur thermique, il est possible de calculer les couples inertiels appliqués à ces organes de puissances. Les deux équations suivantes donnent les couples inertiels pour une architecture de système HEV parallèle de type P2 (cf Annexe A pour plus de détails sur cette architecture).

$$T_{EM\_i} = I_{EM}\omega_{gb} \quad (\text{Équation 8})$$

$$T_{ICE\_i} = I_{ICE}\omega_{gb} \quad (\text{Équation 9})$$

Enfin la demande de couple total est calculée en fonction de la demande de couple à la roue et des couples inertiels des différents organes de puissance de la chaîne de traction. Cette demande de couple est ensuite répartie entre les différentes machines électriques et le moteur thermique selon la LGE définie. L’équation suivante donne le calcul de la demande de couple total pour une architecture de système HEV parallèle de type P2 (cf Annexe A pour plus de détails sur cette architecture) :

$$T_{tot} = T_{ICE\_i} + T_{EM\_i} + T_v \quad (\text{Équation 10})$$

### 3.5.2 Modèles de moteur thermique

Un moteur thermique est un organe de puissance utilisé dans des chaînes de traction de véhicule pour fournir un couple mécanique. Ce composant transforme l’énergie chimique contenue dans le carburant en énergie mécanique pour entraîner en rotation un vilebrequin. Cette transformation n’étant pas parfaite, des pertes sont associées au fonctionnement d’un moteur thermique. Le rendement d’un moteur thermique dépend de son point de fonctionnement (couple et vitesse de rotation), la Figure 33 représente une cartographie de consommation normalisée de carburant.

Dans une approche de modélisation énergétique de système HEV, la modélisation énergétique de moteur thermique est généralement basée sur une cartographie donnant la consommation en carburant en fonction du point de fonctionnement, l’équation utilisée est la suivante :

$$\dot{m}_{carburant} = f_{ICE}(T_{ICE}, \omega_{ICE}) \quad (\text{Équation 11})$$

où  $T_{ICE}$  et  $\omega_{ICE}$  sont le couple du moteur thermique.  $f_{ICE}$  est la fonction d’interpolation permettant de calculer la consommation de carburant à partir de la cartographie présentée en Figure 33.

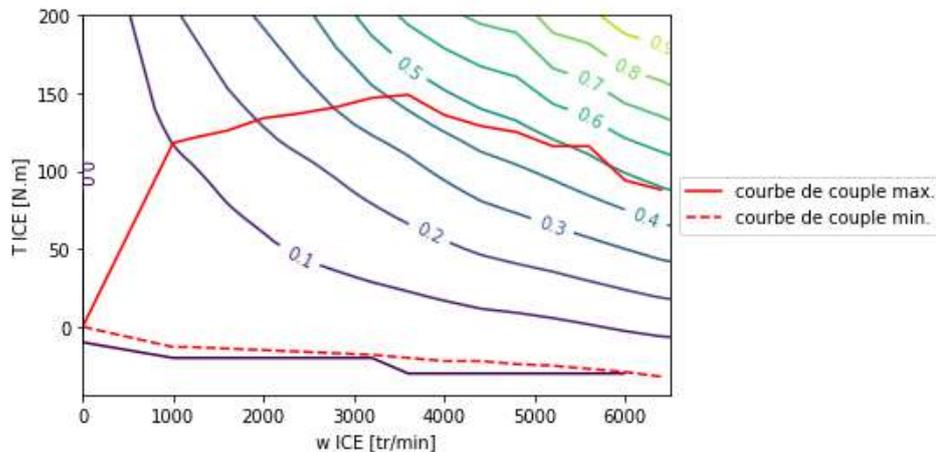


Figure 33 : Cartographie de consommation normalisée et courbes de couple max et min du moteur thermique

Le couple de sortie d’un moteur thermique est borné en fonction de sa vitesse de rotation. Dans le cadre de la modélisation quasi-statique du moteur thermique, l’espace de définition du couple de sortie du moteur thermique est donné par la relation suivante :

$$T_{ICE_{min}}(\omega_{ICE}) < T_{ICE}(\omega_{ICE}) < T_{ICE_{max}}(\omega_{ICE}) \quad (\text{Équation 12})$$

Les deux courbes de la Figure 33 représentent les limites minimale et maximale de couple de sortie pouvant être délivrée par le moteur thermique.

Un moteur thermique fonctionne selon un certain rendement énergétique en fonction de son point de fonctionnement. Des pertes mécaniques et thermiques sont donc constatées. Une partie des pertes thermiques sont évacuées via le circuit de refroidissement vers l’environnement extérieur. La Figure 34 représente une cartographie des pertes thermiques à évacuer vers le circuit de refroidissement d’un moteur thermique en fonction de son point de fonctionnement.

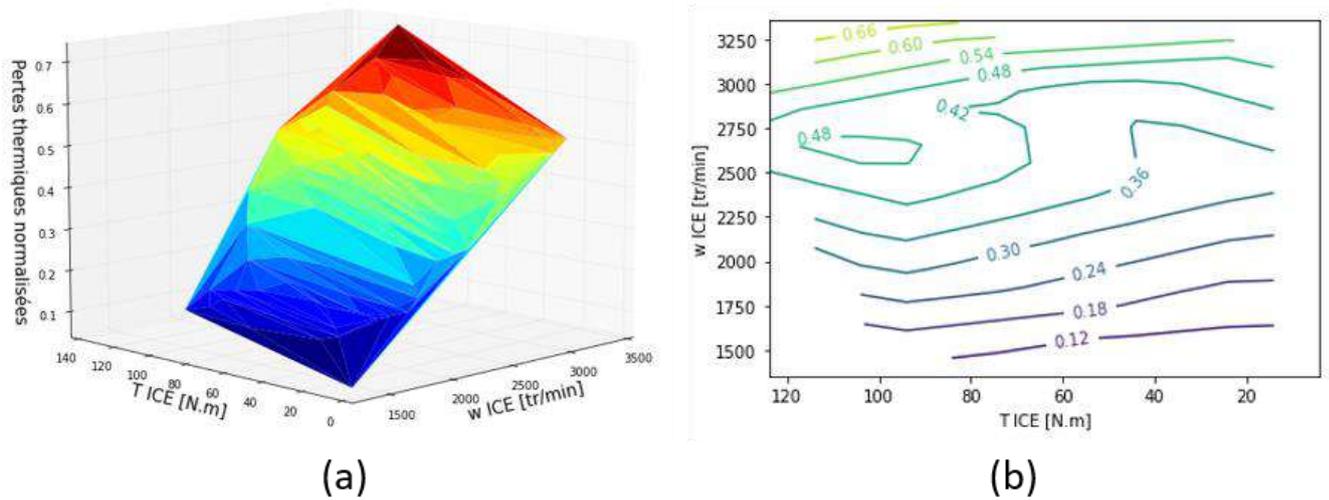


Figure 34 : (a) pertes thermiques normalisées du moteur thermique (b) projection 2D des pertes normalisées

La modélisation énergétique des pertes thermiques à évacuer vers le sous-système de refroidissement est formulée par l’équation suivante :

$$P_{thermique_{ICE}} = f_{pertes\ thermique\ ICE}(T_{ICE}, \omega_{ICE}) \quad (\text{Équation 13})$$

où  $P_{thermique_{ICE}}$  sont les pertes thermiques du moteur thermique et  $f_{pertes\ thermique\ ICE}$  est la fonction d’interpolation permettant de calculer les pertes thermiques à partir de la cartographie présentée en Figure 34.

### 3.5.3 Modèles de machine électrique et électronique de puissance

Une machine électrique est un organe de puissance capable de transformer une énergie électrique en une énergie mécanique de rotation ou inversement. Cette transformation est effectuée selon un certain rendement énergétique en fonction du point de fonctionnement de la machine électrique (couple et vitesse de rotation). Les Figure 35 et Figure 36 représentent les cartographies de rendement des deux machines électriques utilisées dans les travaux de cette thèse.

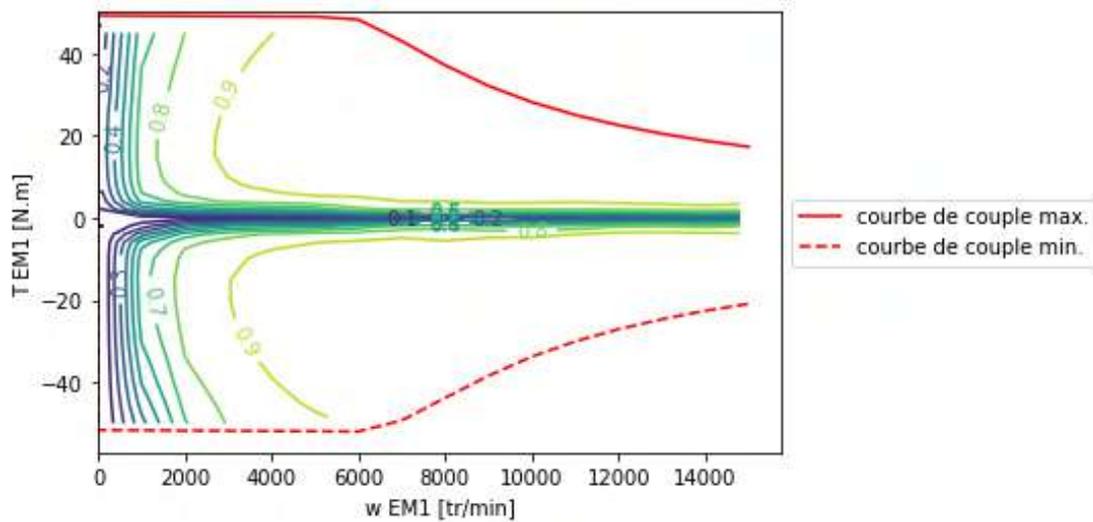


Figure 35 : Cartographie de rendements et courbes de couple max et min de la machine électrique n°1

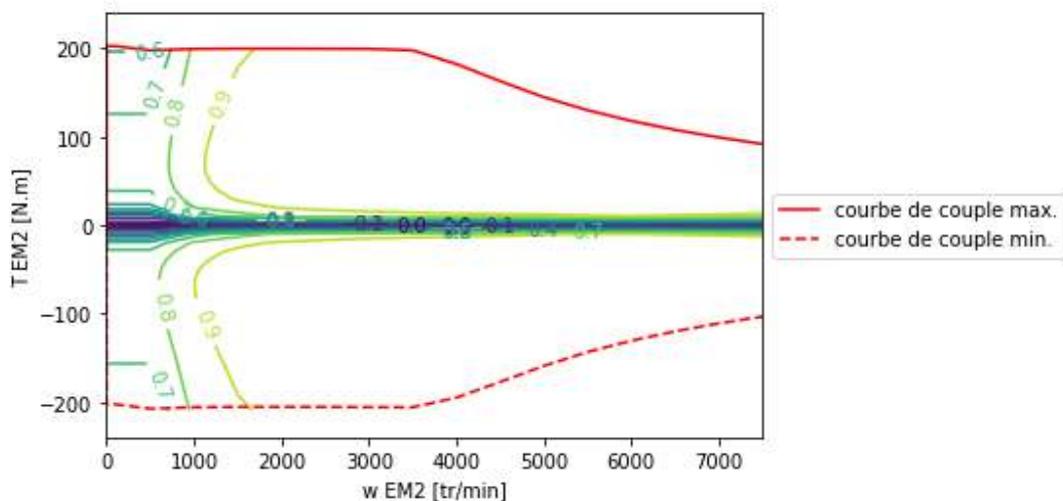


Figure 36 : Cartographie de rendements et courbes de couple max et min de la machine électrique n°2

Dans une approche de modélisation énergétique de véhicule HEV, la modélisation quasi-statique basée sur une cartographie de rendements en fonction du point de fonctionnement est généralement utilisée pour modéliser une machine électrique. Le

rendement énergétique de la machine électrique est alors donné par la relation suivante :

$$\eta_{EM} = f_{EM}(T_{EM}, \omega_{EM}) \quad (\text{Équation 14})$$

où  $T_{EM}$  et  $\omega_{EM}$  sont le couple de la machine électrique.  $f_{EM}$  est la fonction d'interpolation permettant de calculer le rendement énergétique à partir des cartographies présentées aux *Figure 35* et *Figure 36*.

La puissance de la machine électrique est calculée en fonction de son rendement selon l'équation suivante :

$$P_{EM} = \begin{cases} \omega_{EM} T_{EM} \eta_{EM} & \text{si } T_{EM} > 0 \\ \frac{\omega_{EM} T_{EM}}{\eta_{EM}} & \text{si } T_{EM} < 0 \end{cases} \quad (\text{Équation 15})$$

Tout comme pour un moteur thermique, le couple mécanique réalisable par la machine électrique est borné par une valeur minimale et maximale en fonction du régime de rotation.

$$T_{EM_{\min}}(\omega_{EM}) < T_{EM}(\omega_{EM}) < T_{EM_{\max}}(\omega_{EM}) \quad (\text{Équation 16})$$

En fonction du point de fonctionnement de la machine électrique des pertes thermiques sont générées. Ces pertes thermiques sont ensuite évacuées vers l'environnement extérieur via le sous-système de refroidissement. La modélisation des pertes thermiques des machines électriques est basée sur des cartographies, présentées sur les *Figure 37* et *Figure 38*.

$$P_{thermique_{EM}} = f_{pertes\ thermique_{EM}}(T_{EM}, \omega_{EM}) \quad (\text{Équation 17})$$

où  $P_{thermique_{EM}}$  sont les pertes thermiques d'une machine électrique et  $f_{pertes\ thermique_{EM}}$  est la fonction d'interpolation permettant de calculer les pertes thermiques à partir des cartographies présentées en *Figure 37* et *Figure 38*.

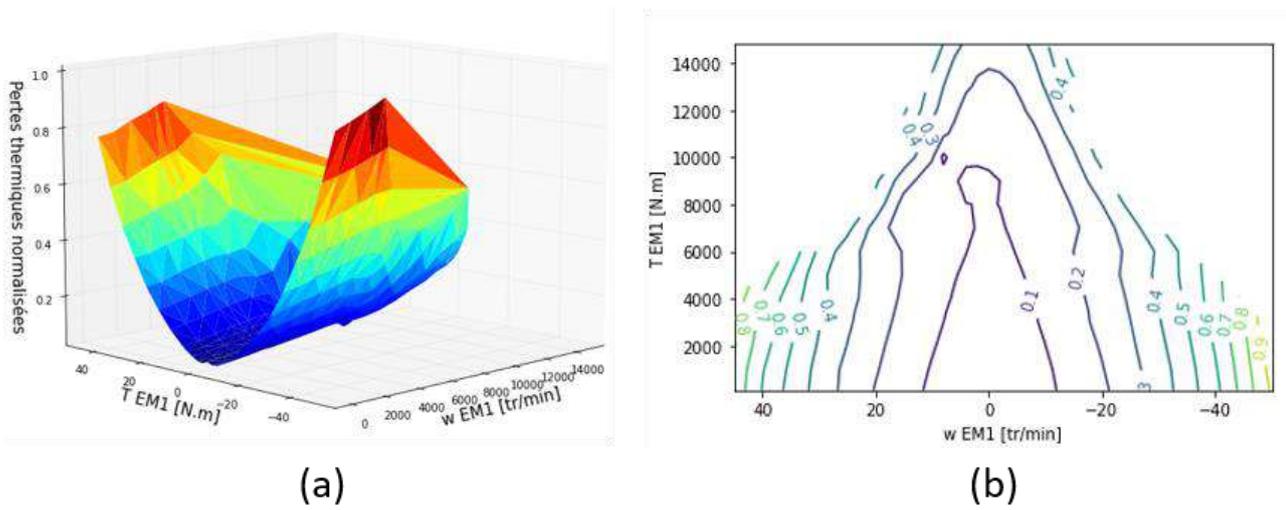


Figure 37 : (a) pertes thermiques normalisées de la machine électrique n°1 (b) projection 2D des pertes normalisées

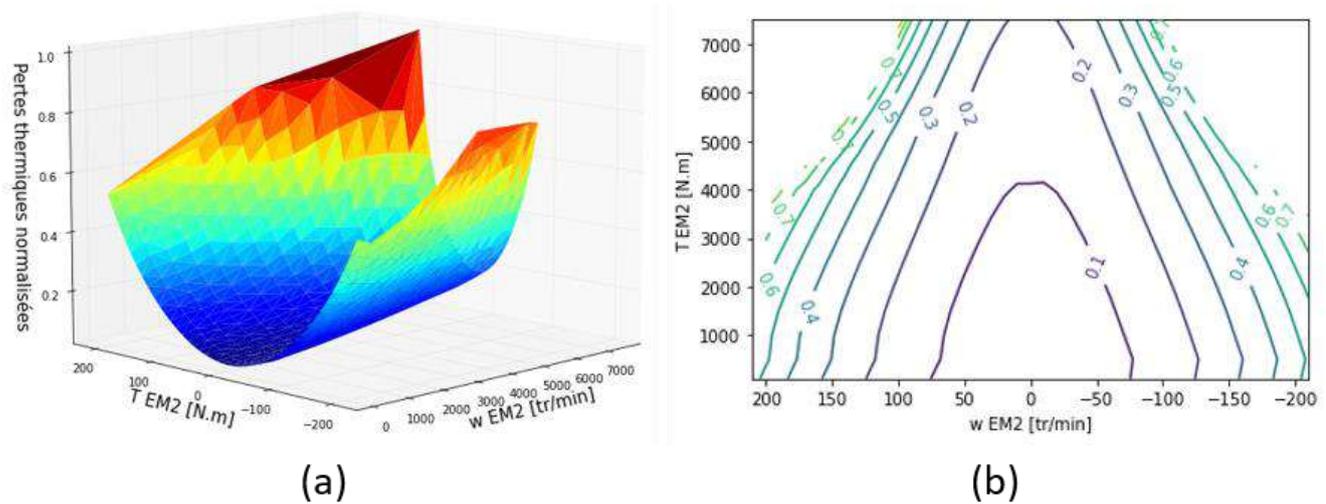


Figure 38 : (a) pertes thermiques normalisées de la machine électrique n°2 (b) projection 2D des pertes normalisées

L’électronique de puissance dans une chaîne de traction hybride est utilisée afin d’adapter la puissance électrique côté batterie à l’alimentation de la machine électrique. Ce type de convertisseur de puissance génère également des pertes selon le point de fonctionnement de la machine électrique. La Figure 39 donne une cartographie des pertes thermiques produites par l’électronique de puissance en fonction du point de fonctionnement de la machine électrique.

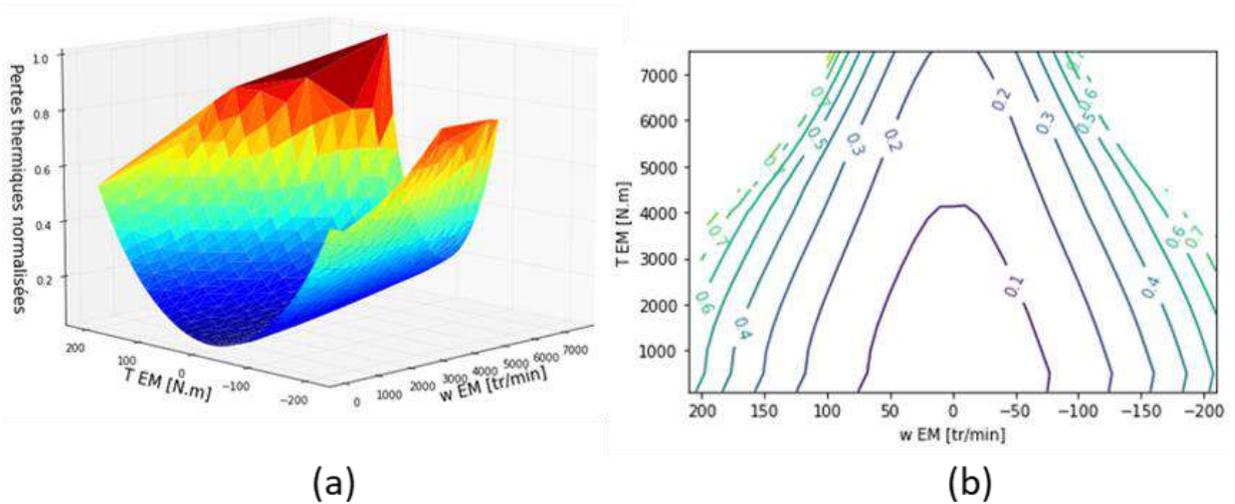


Figure 39 : (a) pertes thermiques normalisées de l'électronique de puissance (b) projection 2D des pertes normalisées

La modélisation retenue pour prédire les pertes thermiques de l'électronique de puissance est basée sur une cartographie des pertes thermiques en fonction du point de fonctionnement de la machine électrique. L'équation donnant les pertes thermiques au niveau de l'électronique de puissance est la suivante :

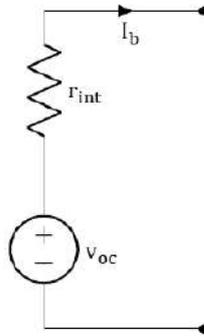
$$P_{thermique_{PEB}} = f_{pertes\ thermique\ PEB}(T_{EM}, \omega_{EM}) \quad (\text{Équation 18})$$

où  $P_{thermique_{PEB}}$  sont les pertes thermiques du moteur thermique et  $f_{pertes\ thermique\ PEB}$  est la fonction d'interpolation permettant de calculer les pertes thermiques à partir de la cartographie présentée en Figure 39.

### 3.5.4 Modèles de batterie

Une batterie est un organe utilisé dans les chaînes de traction pour fournir ou stocker de l'énergie électrique. Au sein de la batterie l'énergie est stockée sous forme chimique dans les différentes cellules constituant la batterie. Une réaction d'oxydoréduction permet de passer d'une énergie électrochimique à une énergie électrique. Cette réaction chimique est caractérisée par un certain rendement selon que l'on charge ou décharge la batterie.

Dans le cadre de modélisation énergétique, le comportement d'une batterie peut être assimilé à celui d'une source de tension à vide  $v_{oc}$  associé à une résistance interne en montée en série  $r_{int}$ . Ce type de modèle est illustré sur la *Figure 40*.



*Figure 40 : Modèle batterie circuit ouvert*

Comme illustré sur la *Figure 41*, la résistance interne ainsi que la tension à vide de la batterie dépendent de son état de charge. La modélisation retenue pour ces deux variables est formulée par les deux équations suivantes :

$$r_{int} = r_{int}(x) \quad (\text{Équation 19})$$

$$v_{oc} = v_{oc}(x) \quad (\text{Équation 20})$$

où  $r_{int}(x)$  et  $v_{oc}(x)$  sont des fonctions d'interpolations linéaires permettant de calculer la résistance interne et la tension à vide de la batterie à partir des deux courbes de la *Figure 41*.

Le courant de la batterie est calculé en appliquant la loi de Kirchhoff au schéma électrique représentant la batterie.

$$-P_b = r_{int}I_b^2 + v_{oc}I_b \quad (\text{Équation 21})$$

$$I_b = \frac{v_{oc} - \sqrt{v_{oc}^2 - 4r_{int}P_b}}{2r_{int}} \quad (\text{Équation 22})$$

L'évolution de l'état de charge de la batterie est formulée en fonction du courant et de la capacité de la batterie via l'équation suivante :

$$x(t) = \frac{Q_b(t)}{Q_{bMax}} = x(t_0) + \frac{1}{Q_{bMax}} \int_{t_0}^t I_b d\tau \quad (\text{Équation 23})$$

où  $Q_{bMax}$  représente la capacité de la batterie (exprimée en A.h) et correspond à un état de charge de 100%.

Enfin, la puissance électrique de la batterie est calculée en fonction de la tension à vide, de sa résistance interne et de son rendement énergétique ( $\eta_b$ ).

$$P_b = \eta_b I_b v_{oc} \quad (\text{Équation 24})$$

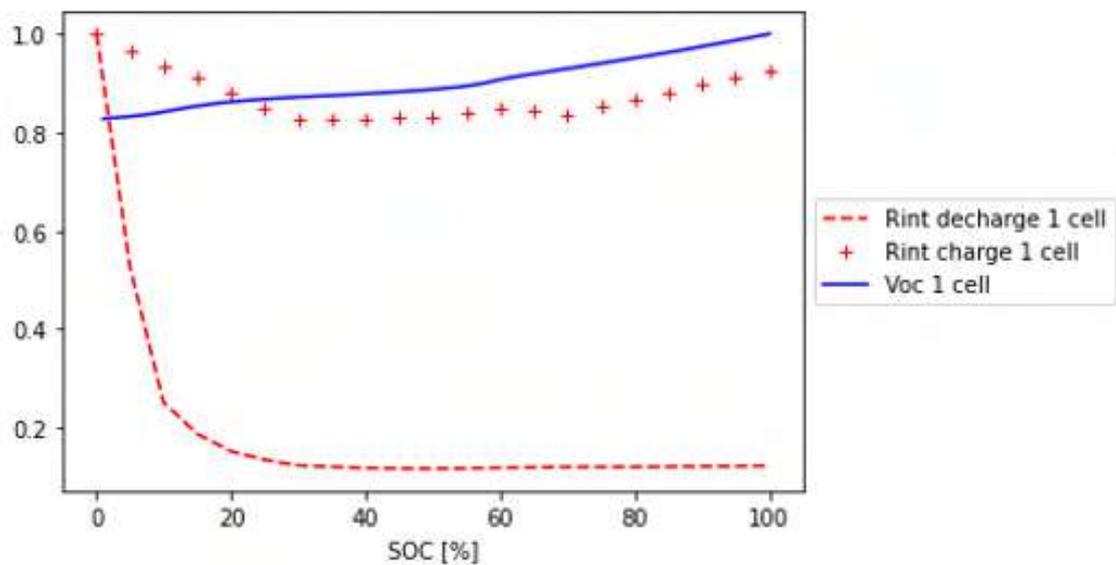


Figure 41 : Courbes de résistance interne de charge et décharge normalisée et de tension à vide de la batterie normalisée

La résistance interne de la batterie génère des pertes thermiques via l'effet Joule. Les pertes par effet Joule sont formulées par l'équation suivante :

$$P_{Joule} = r_{int} I_b^2 \quad (\text{Équation 25})$$

## **3.6 Evaluation et optimisation automatique d'architectures de système HEV**

Ce paragraphe présente une méthode d'évaluation automatique d'architecture de système HEV sur la base de la modélisation énergétique des différents composants détaillée dans le paragraphe précédent.

### **3.6.1 Détection de modes réalisables et filtre**

Une pré-étape de détection de modes/configurations réalisables par chaque architecture organique de système HEV est dans un premier temps effectué. En effet, comme mentionné par Bayrak *et al*, certaines architectures de chaîne de traction hybride peuvent avoir qu'une seule configuration, d'autres peuvent en avoir des plusieurs pendant les différentes phases de fonctionnement du véhicule [71]. La collection de l'ensemble des configurations réalisables définit l'architecture organique du système HEV. La connaissance de l'ensemble des modes permet de construire les équations traduisant leurs comportements et donc le comportement global de l'architecture du système HEV. La *Figure 42* illustre le processus de détection des modes réalisables par une architecture. Le processus débute par la recherche d'embrayage au sein du graphe représentant l'architecture étudiée. Les configurations réalisables sont obtenues en effectuant une combinaison de tous les états possibles (ouvert/fermé) de l'ensemble des embrayages précédemment détectés. Les configurations réalisables contenant des boîtes de vitesses sont à leur tour déclinées en sous-configurations en fonction du nombre de rapports de réduction caractérisant les boîtes de vitesses. Sur l'exemple présenté en *Figure 42*, la première configuration détectée aboutit à un ensemble de trois différentes sous-configurations en raison de la présence d'une boîte de vitesse à trois rapports de réduction.

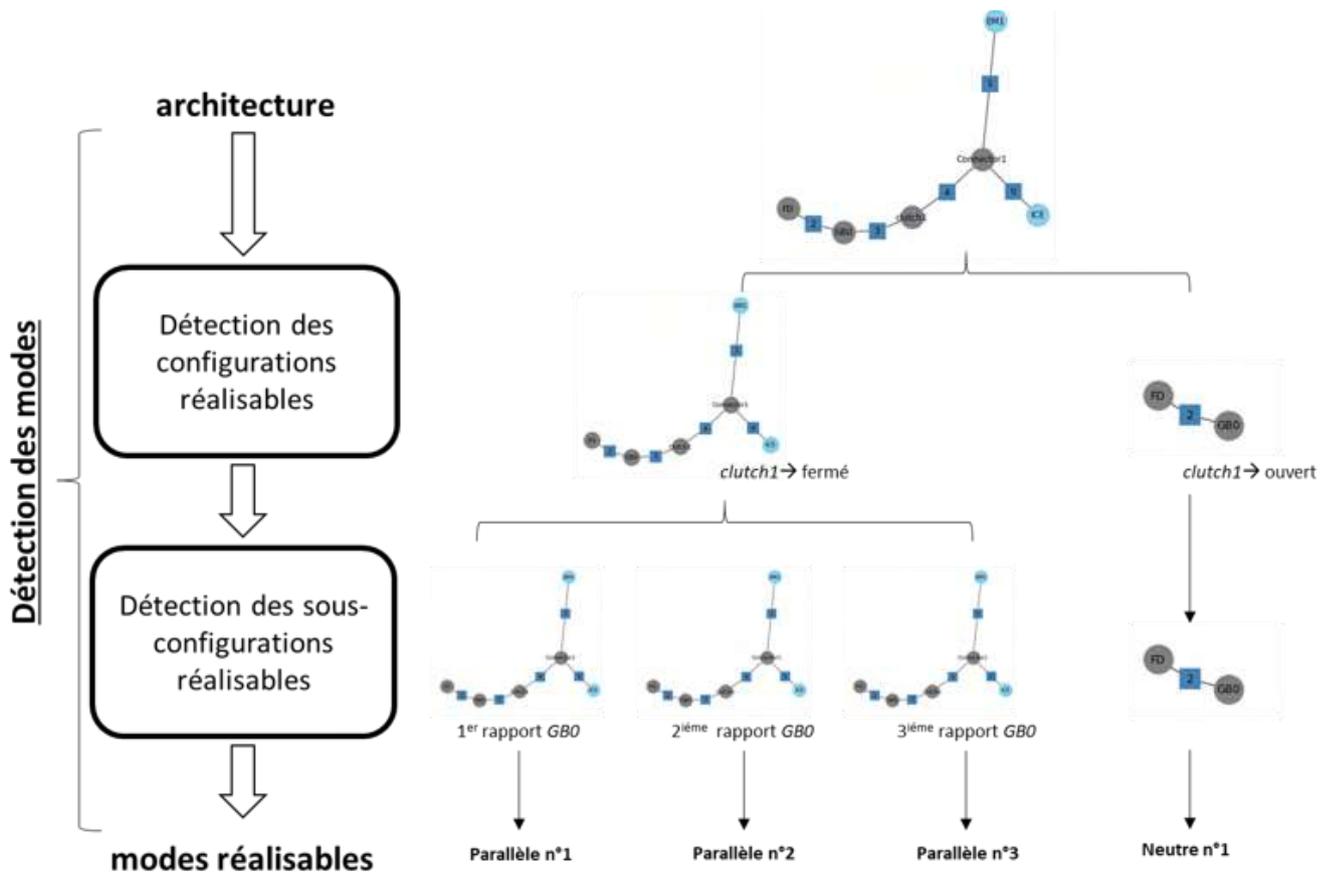
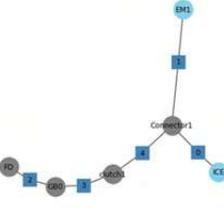


Figure 42 : Détection des modes réalisables d’une architecture système HEV

La Table 4 résume l’ensemble de modes réalisables pour l’architecture de système HEV parallèle. Chaque mode est défini par trois attributs : son mode parent, un ensemble de chemin de puissance et un ensemble de rapport de réduction. L’attribut mode parent renseigne sur le type du mode (i.e parallèle, série ou neutre). Un chemin de puissance relie une source de couple (machine électrique ou moteur thermique) à la transmission finale. Pour chaque chemin de puissance possible un rapport de réduction est caractérisé si un des rapports de réductions est présent sur le chemin.



	Modes					
	Neutre1	Parallèle1	Parallèle2	Parallèle3	Parallèle4	Parallèle5
<b>Mode parent</b>	Neutre	Parallèle	Parallèle	Parallèle	Parallèle	Parallèle
<b>Chemin(s)</b>	[GB0—FD]	[EM1—FD] [ICE—FD]	[EM1—FD] [ICE—FD]	[EM1—FD] [ICE—FD]	[EM1—FD] [ICE—FD]	[EM1—FD] [ICE—FD]
<b>Rapport(s) de réduction</b>	-	$R_{GB_1} + R_{FD}$ $R_{GB_1} + R_{FD}$	$R_{GB_2} + R_{FD}$ $R_{GB_2} + R_{FD}$	$R_{GB_3} + R_{FD}$ $R_{GB_3} + R_{FD}$	$R_{GB_4} + R_{FD}$ $R_{GB_4} + R_{FD}$	$R_{GB_5} + R_{FD}$ $R_{GB_5} + R_{FD}$

Table 4 : Exemple de modes réalisables pour une architecture système HEV donnée

Le processus complet de génération et d’optimisation d’architectures organiques de système HEV est présenté sur la *Figure 43*. Afin d’optimiser et évaluer uniquement les architectures répondant aux exigences système formulées en amont de projet, un filtre sur les modes réalisables par les architectures générées est effectué. Le filtre est basé sur un set de modes de fonctionnement souhaités que doivent réaliser les architectures à optimiser et à évaluer. Dans le cadre de cette thèse les architectures de système HEV doivent inclure au moins les modes de fonctionnement suivants :

- mode de fonctionnement neutre : traduisant l’aptitude de l’architecture de système HEV à déconnecter, via des embrayages, l’ensemble des sources de puissance.
- mode hybride (i.e. parallèle, série)

Les architectures de système HEV validées par le filtre sont optimisées d’un point de vue énergétique. L’objectif à minimiser est la consommation sur cycle WLTC.

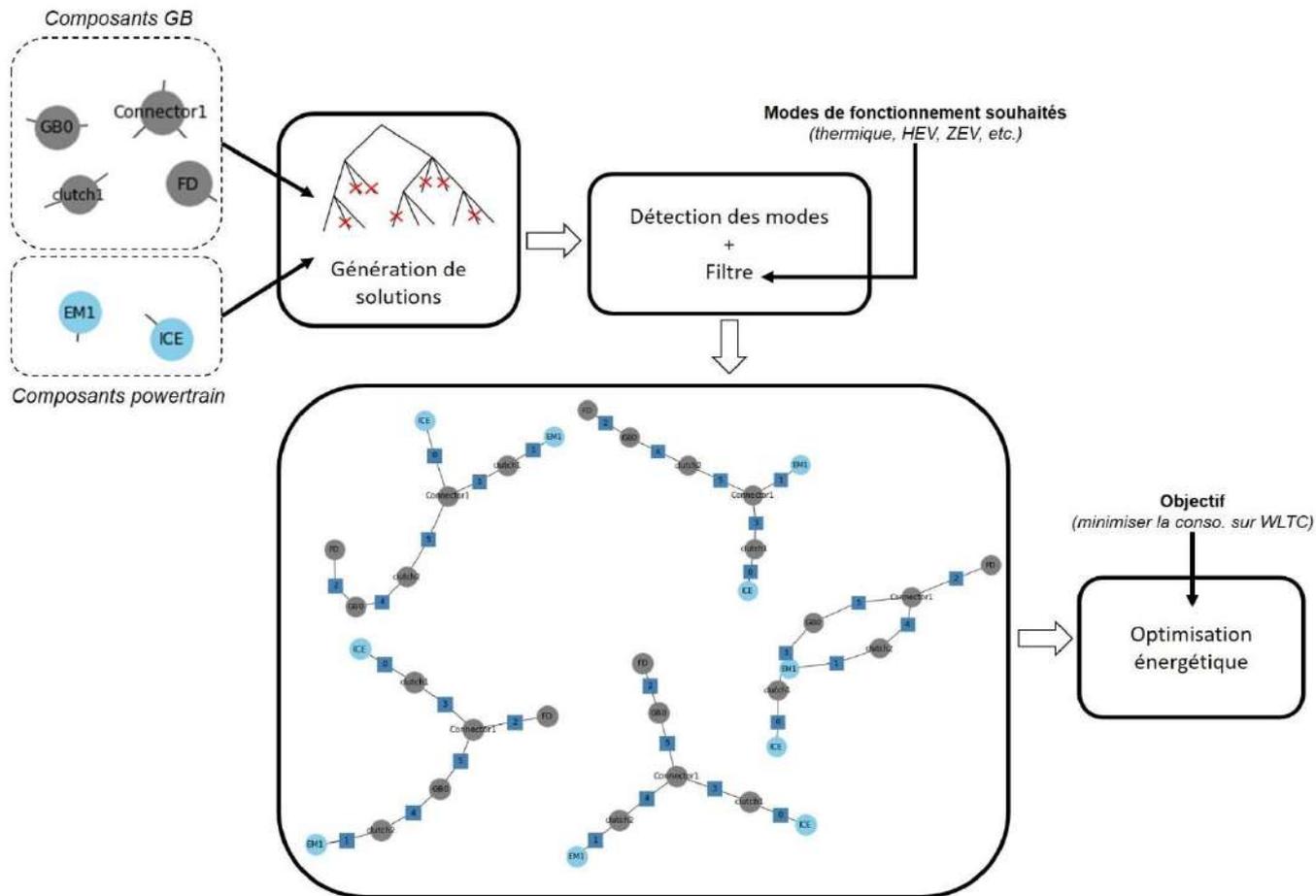


Figure 43 : Processus de génération et optimisation d'architectures de système HEV

### 3.6.2 Optimisation LGE (DP)

La présence d'une source d'énergie alternative sur les véhicules hybrides permet d'optimiser la répartition de puissance entre le moteur à combustion interne et la ou les machines électriques afin de minimiser la consommation de carburant. L'algorithme d'optimisation utilisé pour définir une stratégie de gestion d'énergie optimale pour les architectures de système HEV générées est basé sur l'approche de programmation dynamique et est présenté dans la suite de ce paragraphe.

L'application de la programmation dynamique à la recherche de loi de gestion d'énergie optimale pour véhicule HEV nécessite d'utiliser une stratégie basée sur une approche hors ligne. Autrement dit, le cycle de roulage pour lequel la LGE est optimisée doit être connu à l'avance, et est discrétisé en temps. Les variables d'état sont également discrétisées, dans ce travail le système est représenté par une seule

variable d’état : l’état de charge de la batterie. Dans ce cas la discrétisation de la variable d’état et du temps mène à un maillage où chaque nœud représente une certaine valeur de la variable d’état à un instant  $t$  donné. La méthode consiste à partir de la fin du cycle, et calculer pour chaque pas de temps  $\Delta t$  l’ensemble des solutions permettant de passer de l’état  $t - 1$  à l’état  $t$ . La Figure 44 illustre les états de charge accessibles de la batterie à l’instant  $k + 1$  en partant d’un état de charge  $x_k^i$  à l’instant  $k$ . Le nombre de nœuds qu’il est possible d’atteindre dépend des modes réalisables par l’architecture de système HEV et est réduit par les contraintes sur les variables de contrôle. Les variables de contrôle des différents modes sont répertoriées dans la Table 5.

La trajectoire permettant de minimiser la consommation, trajectoire optimale, sous les contraintes définies (le problème résolu est un problème de minimisation sous contraintes), est contenue dans l’ensemble des trajectoires sauvegardées pendant le processus.

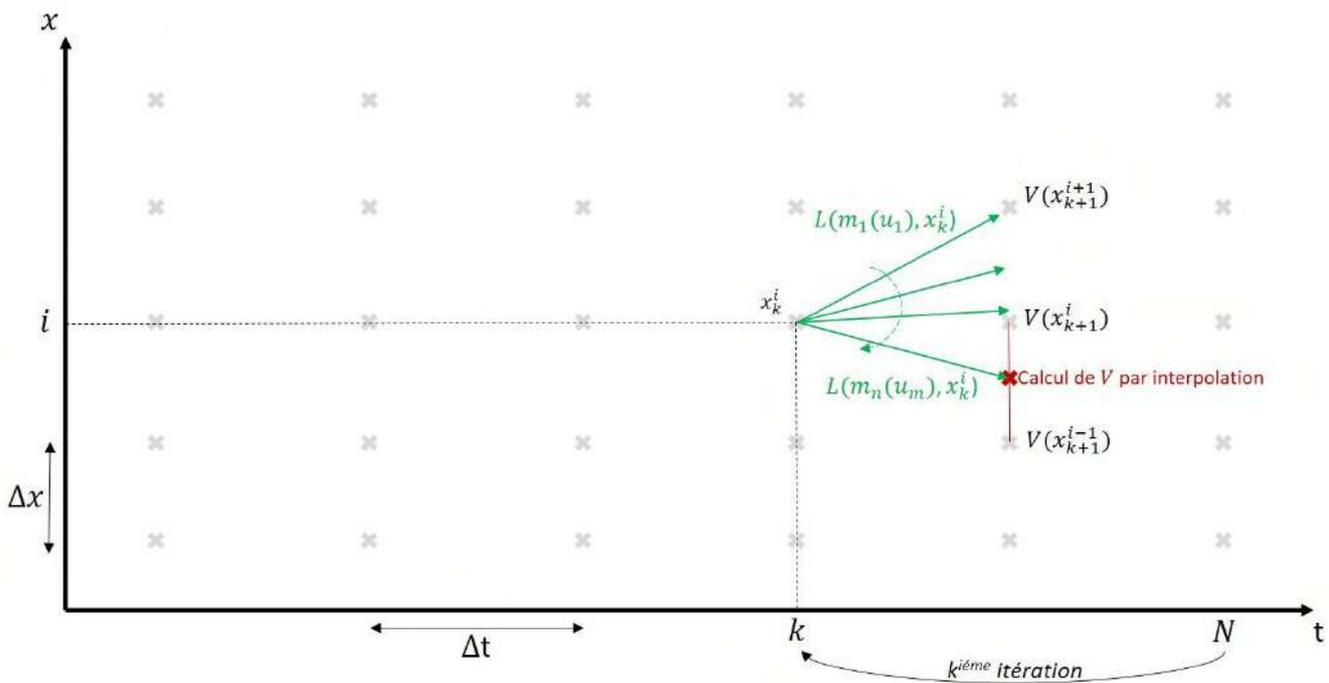


Figure 44 : Itération d’un algorithme de programmation dynamique (DP)

Le processus récursif de calcul de commandes optimales par la programmation dynamique nécessite d’initialiser le problème. L’initialisation du problème se fait au niveau des coûts liés aux états à l’instant final :

$$V(x_N^i) = \begin{cases} \phi(x_N^i) & \text{si } x_N^i \neq x_{final} \\ 0 & \text{si } x_N^i = x_{final} \end{cases} \quad (\text{Équation 26})$$

où  $V(x_k^i)$  est la fonction donnant la valeur du coût lié au point  $(x_k^i)$  de la grille discrétisée en temps et en état de charge de la batterie.  $x_{final}$  et  $N$  sont l’état de charge final cible et le nombre total de pas de temps. Enfin,  $\phi$  est la fonction définissant les pénalités appliquées aux points dont l’état de charge à l’instant final est différent de l’état de charge cible.

La valeur de la fonction coût lié à un point de la grille discrétisée en temps et état de charge de la batterie est calculée de la façon suivante :

$$V(x_k^i) = \min_{\substack{u_p \in U \\ mode_q \in M}} \{L(mode_q(u_p), x_k^i) + V(f(x_k^i, mode_q(u_p)))\} \quad (\text{Équation 27})$$

où  $U$  représente l’espace de définition des variables de contrôle et  $M$  l’ensemble des différents modes réalisables par l’architecture de système HEV. Les fonctions  $L(mode_q(u_p), x_k^i)$  et  $f(x_k^i, mode_q(u_p))$  donnent respectivement le coût et le point d’arrivée sur la grille lors de l’application du mode  $mode_q$  selon la variable de contrôle  $u_p$  au point de la grille  $(x_k^i)$ .

Mode	Variable de contrôle
Thermique	-
Electrique 1 EM	-
Electrique 2 EMs	$T_{EM1}$
Parallèle 1 EM	$T_{ICE}$
Parallèle 2 EMs	$T_{ICE}$ $T_{EM1}$
Série	$T_{ICE}$
Recharge en roue libre 1 EM	$T_{ICE}$
Neutre	-

Table 5 : Variables de contrôle pour les différents modes réalisables des architectures de système HEV

### 3.7 Exemple d'application

Ce paragraphe présente un exemple d'application du processus de génération et optimisation énergétique d'architecture de système HEV présenté sur la *Figure 43*. La liste des composants utilisés pour générer les architectures de système HEV possibles ainsi que leur nombre maximal d'instances sont présentés sur la *Table 6*.

Composant	Nombre max. d'instances
Moteur (ICE)	1
Machine électrique (EM)	1
Boîte de vitesse (GB)	1
Embrayage (clutch)	2
Transmission finale (FD)	1
Connecteur mécanique (connector)	1

*Table 6 : Nombre maximal d'instances des composants utilisés pour l'exemple d'application du processus de génération et optimisation d'architecture de système HEV*

La *Figure 45* rassemble les architectures organiques de système HEV générées à partir des données entrées définies dans la *Table 6*. Parmi cet ensemble d'architectures, deux sont considérées comme non valides et ne passent pas le filtre sur les modes souhaités formulés dans les exigences système HEV. En effet, les architectures d'index 4 et 6 ne sont pas capables de réaliser le mode neutre. La machine électrique dans l'architecture numéro 4 ne peut pas être déconnectée de la transmission finale. Pour l'architecture numéro 6, le moteur thermique ne peut pas être déconnecté des roues.

L'algorithme de programmation dynamique développé et présenté dans ce chapitre est appliqué sur chacune des architectures valides pour optimiser leur loi de gestion d'énergie sur cycle WLTC. La consommation de carburant sur cycle WLTC calculée pour chaque architecture de système HEV valide est présentée sur la *Figure 46*. La solution numéro 3 permet de minimiser la consommation de carburant. A noter que l'architecture numéro 2 n'apparaît pas dans les résultats présentés sur la *Figure 46*, car le chemin de puissance reliant le moteur thermique à la transmission finale ne passe

pas par une boîte de vitesses. Dans ce cas, le moteur thermique utilisé dans cette thèse est incapable de suivre la demande de couple demandée au niveau des roues sur l'ensemble du cycle WLTC.

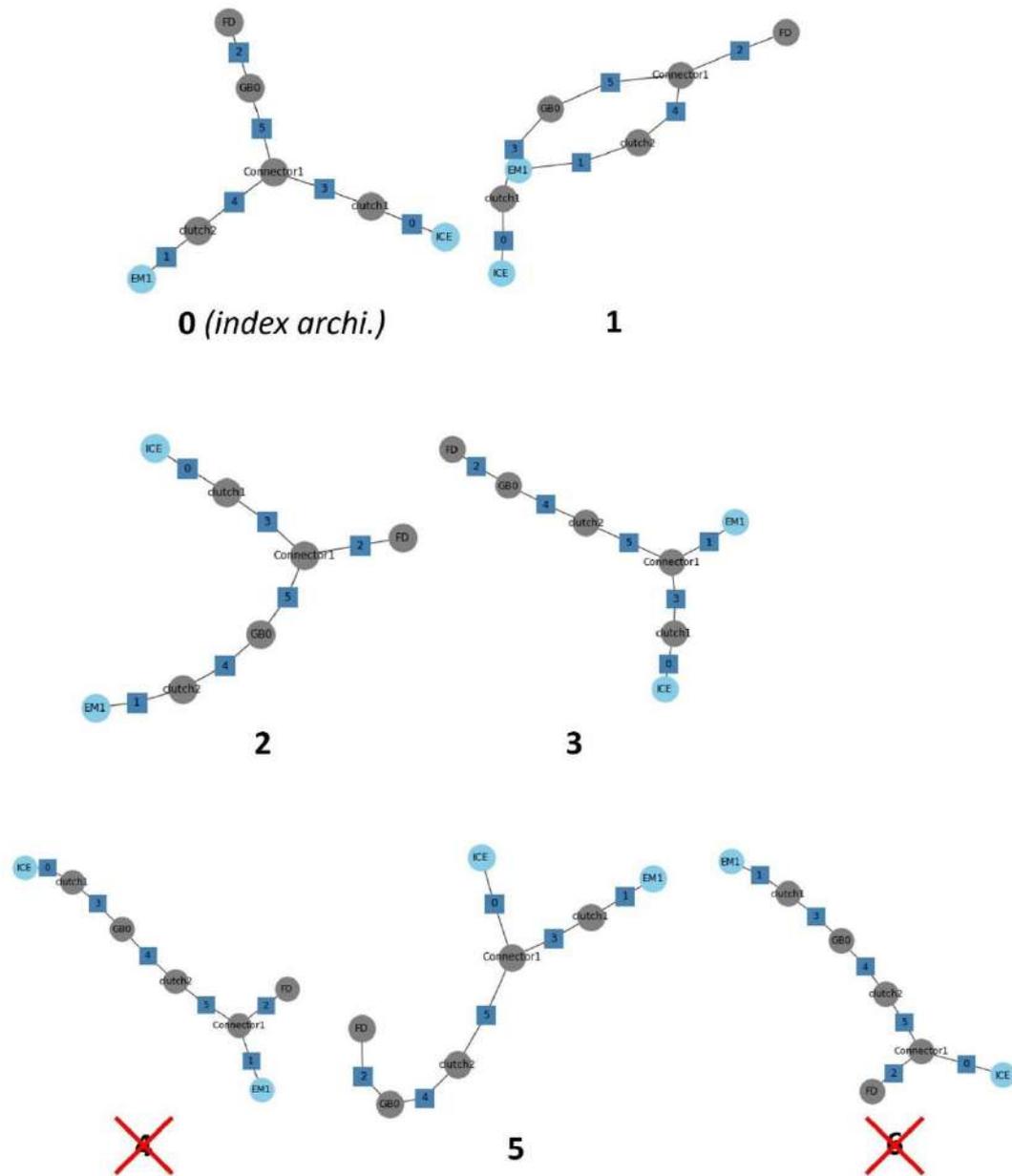


Figure 45 : Architectures organiques de système HEV générées pour l'exemple d'application du processus de génération et optimisation d'architecture de système HEV

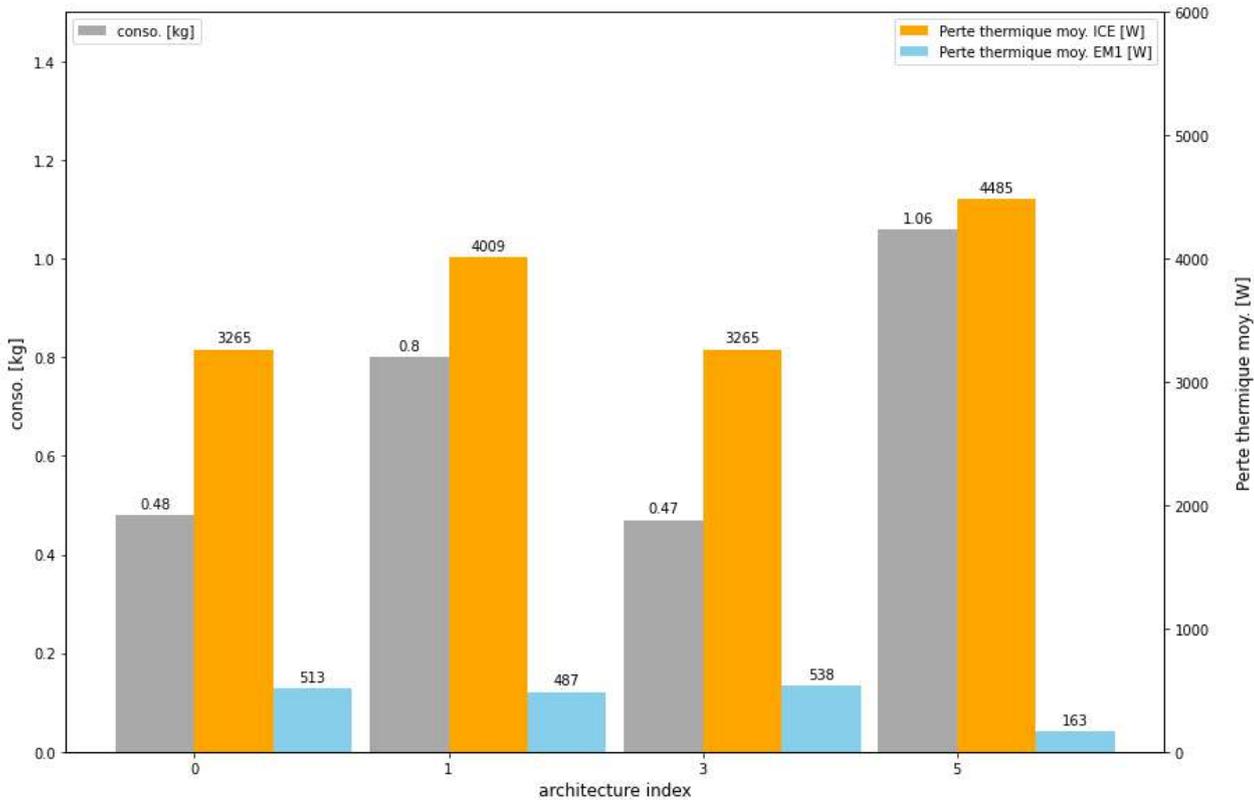


Figure 46 : Résultats énergétiques des architectures système HEV valides pour l'exemple d'application du processus de génération et optimisation d'architecture de système HEV

Les Figure 47 à Figure 50 détaillent les points de fonctionnement du moteur thermique (a) et de la machine électrique (b) pour chaque architecture de système HEV valides. Les deux meilleures architectures (numéro 0 et 3) font fonctionner le moteur thermique dans des zones de meilleurs rendements par rapport aux autres architectures (numéro 1 et 5). Les pertes thermiques calculées pour le moteur thermique sont plus importantes pour les architectures d'index 1 et 5. Concernant les pertes thermiques liées à l'utilisation de la machine électrique, les écarts entre les architectures sont moins importants étant donnés les niveaux de rendements de ce type de machine. Cependant, l'architecture d'index 5 génère moins de pertes thermiques pour sa machine électrique, car celle-ci est moins utilisée par rapport aux autres solution (Figure 50).

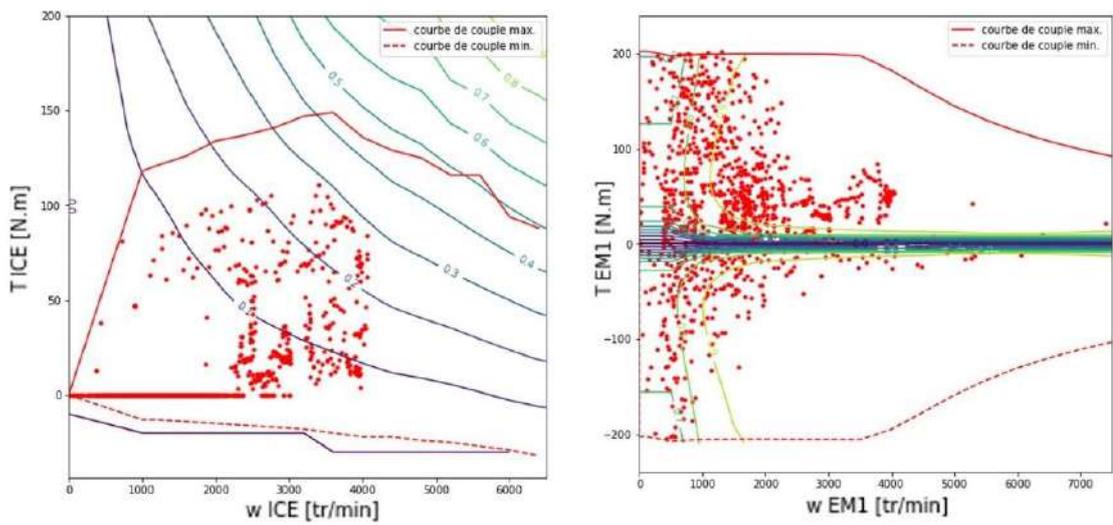


Figure 47 : Points de fonctionnement moteur thermique (a) et machine électrique (b) pour l'architecture n°0

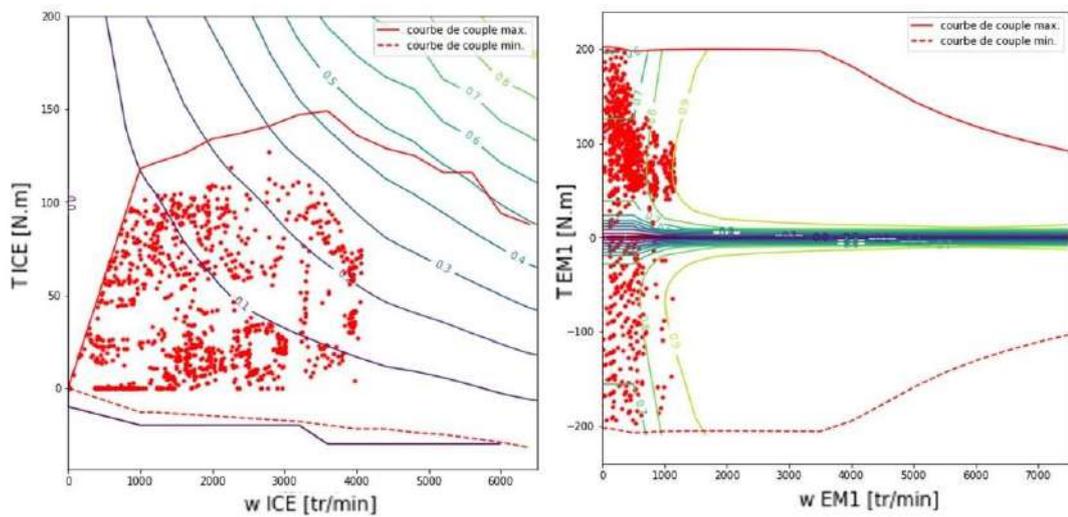


Figure 48 : Points de fonctionnement moteur thermique (a) et machine électrique (b) pour l'architecture n°1

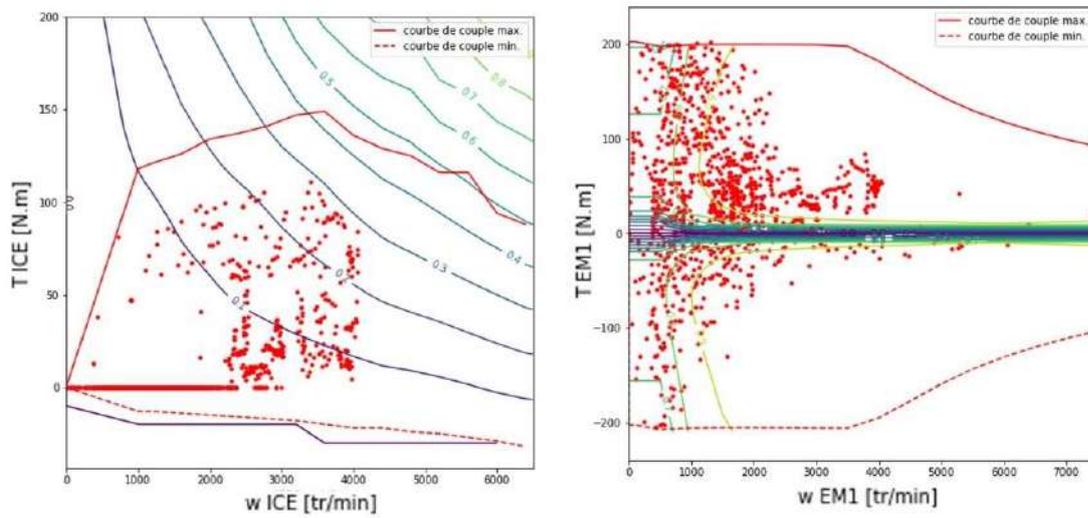


Figure 49 : Points de fonctionnement moteur thermique (a) et machine électrique (b) pour l'architecture n°3

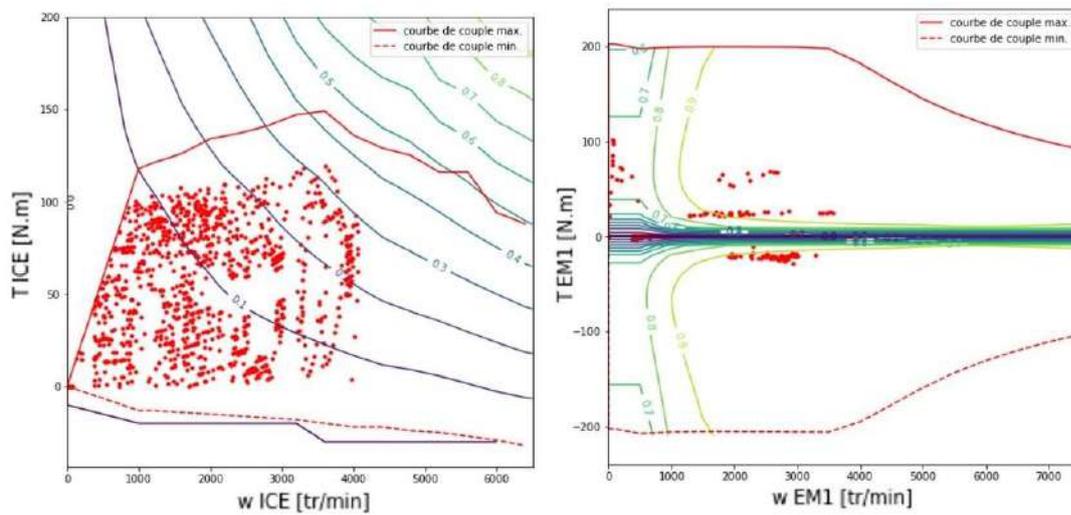


Figure 50 : Points de fonctionnement moteur thermique (a) et machine électrique (b) pour l'architecture n°5

### **3.8 Conclusion**

Une méthode automatique de génération et optimisation énergétique d'architectures organiques de système HEV a été présentée dans ce chapitre. La première étape consiste à générer automatiquement, à l'aide d'un algorithme basé sur un concept d'arbre de décision, des solutions d'architectures de chaîne de traction HEV. Le processus de génération démarre par la définition de la liste des composants à connecter et des exigences système à respecter. Des contraintes sont définies dans l'outil de génération d'architectures organiques afin de s'assurer que les solutions générées sont réalisables et représentent bien une solution de chaîne de traction HEV. Un filtre sur les solutions viables est ensuite effectué pour ne conserver que les solutions respectant les exigences système. La seconde étape de la méthodologie vise à optimiser automatiquement la consommation sur cycle de chaque solution. Pour cela un algorithme de programmation dynamique a été développé. Les sollicitations et les pertes thermiques sur cycle sont alors déterminés pour chaque composant d'une architecture de système HEV.

Le chapitre suivant détaille une méthode de génération automatique d'architectures organiques de sous-systèmes de refroidissement pour un véhicule HEV. Elle est basée sur la définition des exigences de refroidissement des composants d'un système HEV. Ces données sont un résultat de la méthodologie présentée dans ce chapitre.



# Chapitre 4 - Génération automatique d'architectures de sous-système de refroidissement

## 4.1 Introduction

A l'instar du problème de conception du système HEV présenté dans le chapitre précédent, le problème de conception du sous-système de refroidissement possède un large espace des solutions possibles. Chaque solution possible est caractérisée selon trois niveaux de détails : architecture, composant et contrôle. Ce chapitre a pour objectif de détailler une méthode de génération automatique d'architectures organiques de sous-systèmes de refroidissement.

La *Figure 51* résume les stratégies d'optimisation utilisées dans le cadre de cette thèse pour résoudre le problème de recherche d'architecture système optimale pour le sous-système de refroidissement. Ce chapitre traite la stratégie d'optimisation au niveau de la conception de l'architecture organique. Deux outils d'optimisation sont présentés pour gérer cette stratégie. Le premier outil est le logiciel *Studio* développé par SIEMENS. Le second outil est développé dans le cadre de cette thèse. Dans un premier temps une représentation sous forme de graphe d'architecture organique de sous-système de refroidissement est proposée. A partir de cette représentation, une méthode de génération d'architectures organiques de circuit de refroidissement basée sur un arbre de décision est détaillée. Enfin un exemple d'application sur un projet existant Renault (Captur HEV) ainsi qu'une analyse de la concurrence sont présentés à l'aide de l'outil développé.

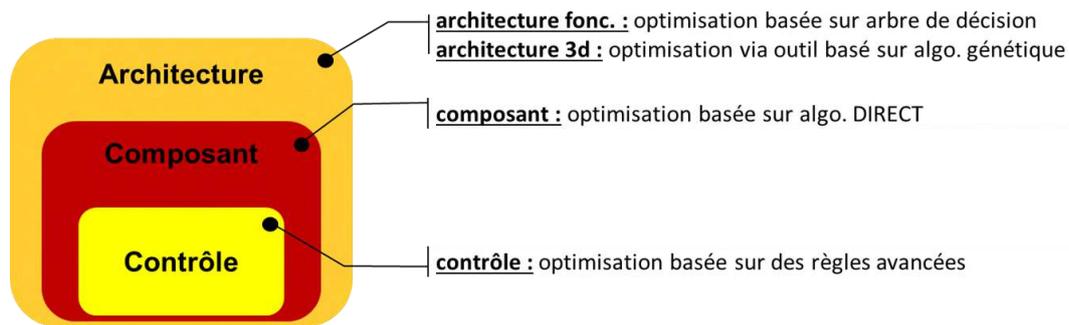


Figure 51 : Stratégies d'optimisation des différents niveaux de conception du sous-système de refroidissement

## 4.2 Outil *Studio* (SIEMENS)

### 4.2.1 Présentation de l'outil *Studio*

Ce paragraphe présente l'outil *Studio* développé par SIEMENS permettant de générer, optimiser et évaluer des architectures système. Cet outil est ensuite appliqué au sous-système de refroidissement de véhicule conventionnel.

La *Figure 52* décrit le processus global de la génération à l'évaluation des architectures systèmes [98]. La première étape consiste à déclarer un modèle système en le décomposant en sous-systèmes et composants. Le modèle peut être vu sous différents aspects, les relations hiérarchiques entre les différents composants et sous-systèmes sont définies dans un diagramme type diagramme *SysML BDD*, les contraintes liant les différents blocs du système définies aussi dans un diagramme type diagramme *SysML IBD*. La déclaration d'un système est composée de blocs représentant les différents sous-systèmes et composants. Les blocs ont des multiplicités traduisant le nombre de fois qu'ils doivent apparaître dans le système. En introduisant cette multiplicité comme un intervalle, l'outil permet d'introduire la variété entre les différentes architectures générées. En effet des architectures peuvent donc contenir plusieurs instances de différents éléments constituant le système.

Chaque bloc est également défini par des ports caractérisant son interface, dont les attributs sont :

- le type (i.e. mécanique, électrique, thermique, etc.)
- les directions (entrée ou sortie)

- optionnalité (cette condition est représentée par une logique booléenne, qui laisse l'option de connecter ou non ce port, donnant ainsi plus de variété dans la génération d'architectures)

Enfin, un dernier point essentiel de l'outil est la définition de contraintes sur les connexions entre les différents blocs. Elles peuvent être définies sur les blocs ou bien sur les ports. Par exemple une contrainte d'interdiction de connexion entre le bloc « moteur thermique » et le bloc « véhicule » peut être définie. Il existe trois types de contraintes : restrictive, prescriptive et forcée.

Le modèle système peut être enrichi avec des modèles de simulation dans l'optique d'évaluer l'architecture d'un point de vue énergétique. Si pour chaque bloc qui n'est pas composé d'autres blocs, un modèle de simulation est ajouté, l'architecture peut être évaluée sous un environnement de modélisation et simulation numérique.

Pour chaque bloc du modèle système qui est enrichi d'un modèle de simulation, un lien vers ce modèle de simulation doit être renseigné, mais également la façon dont sont connectés les ports et variables dans le modèle de simulation.

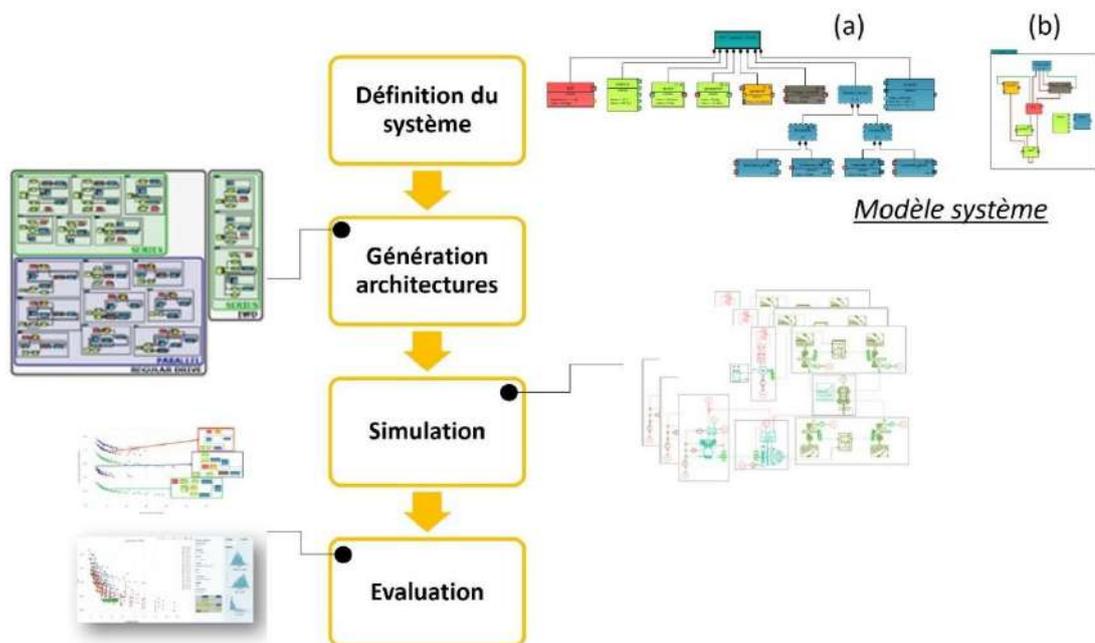


Figure 52 : Processus de génération et évaluation automatique d'architectures système du logiciel Studio

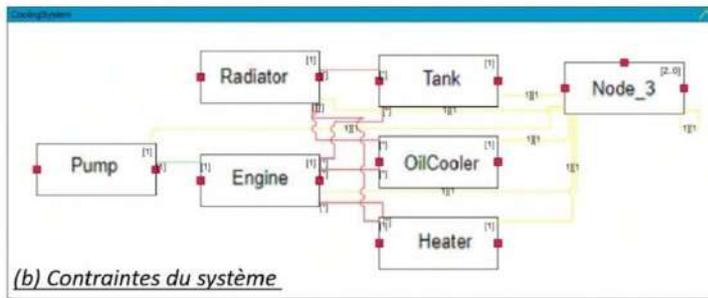
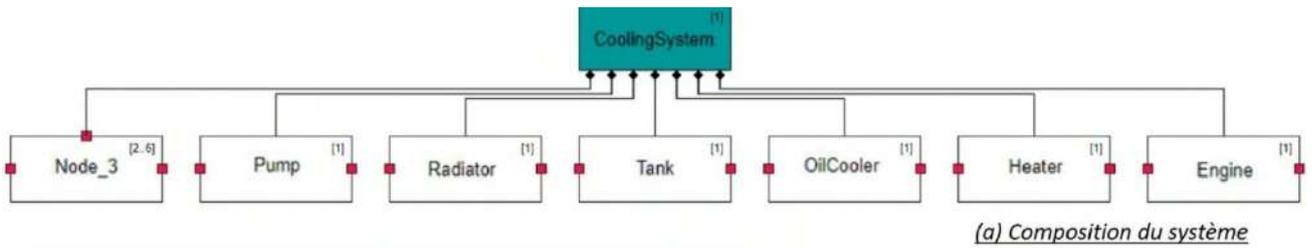
### 4.2.2 Cas d'application sur véhicule conventionnel

Dans le cadre de cette thèse l'outil *Studio* a été testé sur un cas de système de refroidissement d'un véhicule conventionnel. L'objectif de ce cas d'étude est de modéliser le sous-système de refroidissement selon l'approche système utilisée par cet outil, puis générer les architectures possibles.

Une première modélisation du système est proposée sur la *Figure 53*. Cette modélisation comprend la décomposition hiérarchique du système en composants ainsi que la définition de l'ensemble des contraintes appliquées au système à concevoir. Les contraintes définies dans cette modélisation portent uniquement sur les blocs représentant les différents composants du système de refroidissement.

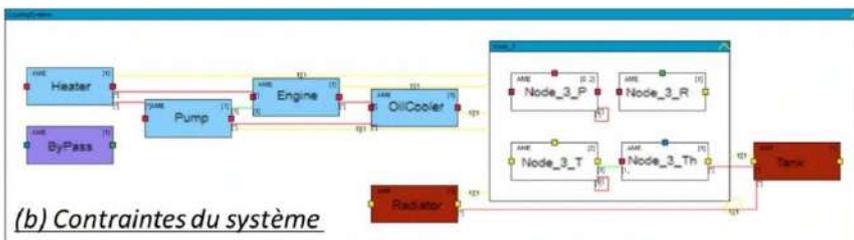
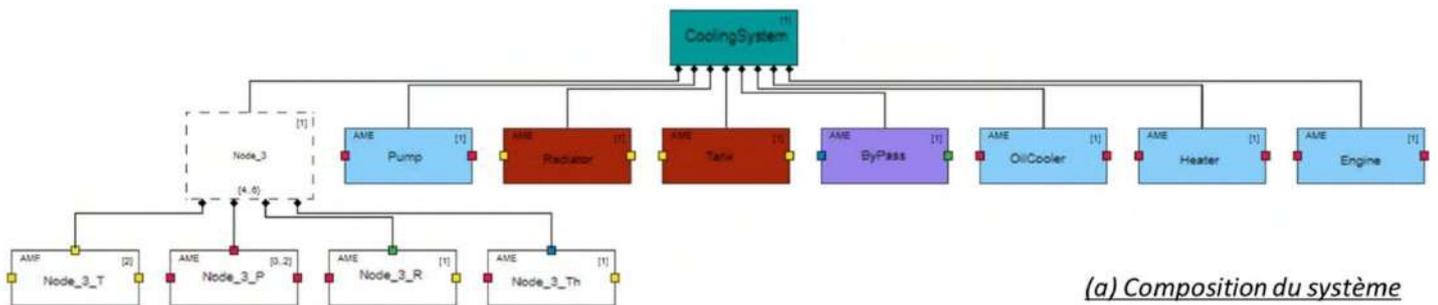
Cette première proposition de modélisation système aboutit à une génération d'environ 42 000 solutions. Parmi cet ensemble de solutions, un grand nombre ne représentent pas de solution valide (i.e. présence de boucle de fluide morte, cf *Figure 65*). De plus cette modélisation ne permet pas de renseigner les configurations réalisables par les architectures générées pour vérifier si les solutions peuvent répondre aux besoins de refroidissement de l'ensemble des composants sur les différents points de fonctionnement. Une solution plus lourde en temps de calcul serait de résoudre pour chaque architecture générée un problème de contrôle optimal.

Une seconde modélisation du système de refroidissement d'un véhicule conventionnel est illustrée sur la *Figure 54*. La principale différence réside dans la définition des ports des composants. Les types des ports sont définis pour orienter les configurations réalisables par les architectures générées. Les types de ports utilisés dans cette modélisation système sont présentés sur la *Figure 55*. Ils permettent de s'assurer que les architectures générées auront la capacité d'opérer selon les configuration dites « circuit permanent » et « circuit thermostaté » indispensable au bon fonctionnement du système et aux respects des exigences de refroidissement. Cette modélisation système permet à l'outil de générer 26 architectures organiques de circuit de refroidissement répondant au cahier des charges.



Nombre d'architectures générées ~ 42 000

Figure 53 : Modèle système A dans Studio d'un circuit de refroidissement conventionnel



Nombre d'architectures générées = 26

Figure 54 : Modèle système B dans Studio d'un circuit de refroidissement conventionnel

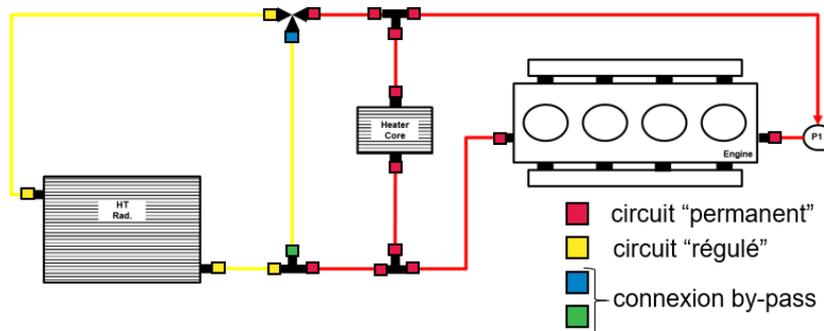


Figure 55 : Définition des types de ports thermo-hydraulique

En conclusion sur ce cas d’étude, **l’outil Studio ne répond pas entièrement aux besoins de la thèse. En effet, cet outil ne permet pas actuellement de générer des architectures de circuits de refroidissement à partir des exigences système.** Il nécessite l’introduction d’a priori vis-à-vis des solutions. Il est nécessaire de définir les types de ports pour générer des architectures capables de réaliser les configurations permettant de satisfaire l’ensemble des exigences de refroidissement. Autrement dit, les configurations réalisables par les architectures doivent être une donnée d’entrée du modèle. Dans ce cas, l’outil est utile pour optimiser la topologie et le dimensionnement d’une architecture dont les configurations sont connues.

### 4.3 Outil basé sur le concept d’arbre de décision

Cette partie détaille un outil de génération d’architectures organiques de circuit de refroidissement à partir des exigences système, qui a été développé dans le cadre de cette thèse.

#### 4.3.1 Représentation d’architecture de système de refroidissement

Similairement au problème de génération automatique d’architectures de système HEV présenté au Chapitre 3, la génération automatique d’architectures de sous-système de refroidissement nécessite de définir une représentation des solutions.

La théorie des graphes est utilisée pour définir la représentation d’architectures organiques de circuit de refroidissement proposée dans cette thèse. La Figure 56 illustre cette représentation sous forme de graphes de sous-systèmes de refroidissement. Les nœuds d’un graphe appartenant à cette représentation sont classés en trois familles de composants. La première famille définit les composants primaires, ce sont les composants qui sont la raison d’être d’un circuit de

refroidissement. C’est-à-dire les composants ayant des exigences de refroidissement (e.g. le moteur thermique). La seconde famille rassemble les composants secondaires. Les composants secondaires assurent le bon fonctionnement d’un circuit de refroidissement (e.g. une pompe hydraulique a pour fonction de faire circuler un débit de liquide de refroidissement). Enfin la dernière famille de composant représente les jonctions hydrauliques à  $n$  branches (i.e un Té est une jonction hydraulique à 3 branches). Les liaisons entre les différents nœuds d’un graphe schématisent les liaisons hydrauliques du circuit de refroidissement représenté. Les liaisons dans un graphe représentent des tuyaux hydrauliques.

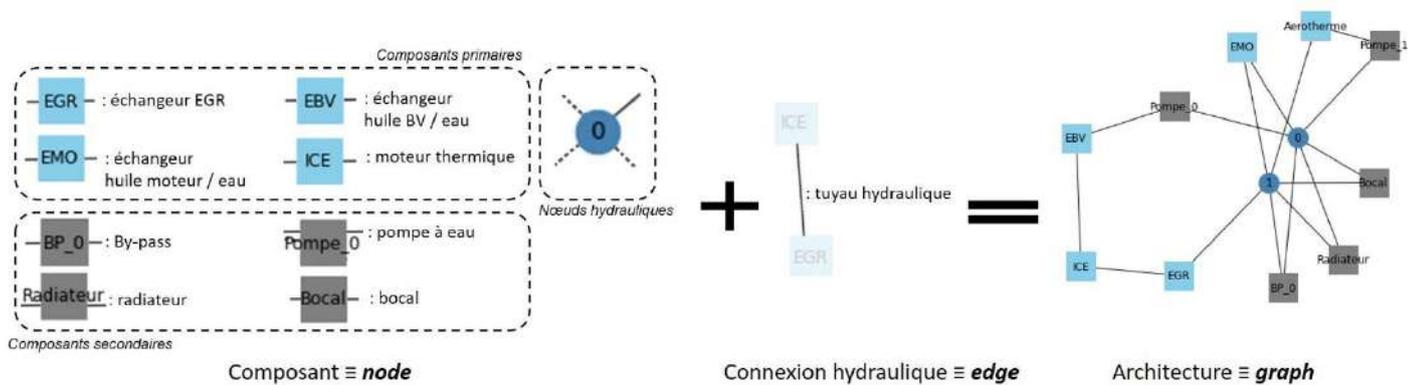


Figure 56 : Représentation proposée d’architectures organiques de sous-système de refroidissement basée sur la théorie des graphes

### 4.3.2 Génération automatique d’architectures de sous-système de refroidissement

Cette partie présente la méthode développée pour générer automatiquement des architectures organiques de circuit de refroidissement à partir d’exigences système. Tout d’abord les exigences de refroidissement des composants primaires d’un circuit de refroidissement sont détaillées. La méthode de génération automatique d’architectures organiques de sous-système de refroidissement, basée sur une représentation sous forme de graphe, est ensuite présentée.

#### 4.3.2.1 Exigences de refroidissement

La méthode d’optimisation globale d’architectures système présentée sur la Figure 24 est basée sur une approche d’ingénierie système. Les exigences d’un niveau hiérarchique dans la décomposition du système à concevoir sont déclinées à partir des

exigences du niveau supérieur. Dans le cas du sous-système de refroidissement, les définitions de ses exigences sont formulées à partir du niveau système HEV (étudié au Chapitre 3).

Au niveau système HEV, la technologie ainsi que le dimensionnement des composants de la chaîne de traction sont définis. De plus les sollicitations de ces composants sur cycle d'homologation (WLTC) sont également définies par le contrôle du système HEV. Les sollicitations des composants de la chaîne de traction vont définir les besoins de refroidissement que doit satisfaire le sous-système de refroidissement. Au niveau des composants, les technologies et dimensionnement déterminent les niveaux de températures acceptables par les différents composants. La définition des composants spécifie également les caractéristiques de besoins en termes de débit de liquide de refroidissement pour assurer leur fonctionnement optimal.

Les niveaux de températures de fonctionnement des différents composants d'une chaîne de traction HEV sont présentés sur la *Figure 57*. Cette formulation d'exigences sur les températures de fonctionnement permet de regrouper les composants en groupes opérationnels. Les composants ayant une plage de fonctionnement étendue génèrent des combinaisons possibles de groupes. En effet, ces composants (i.e. échangeur eau/huile moteur (EMO) ou échangeur eau/huile boîte de vitesses (EBV)) peuvent être à la fois dans les boucles de refroidissement haute et basse températures (HT et BT).

Les caractéristiques de besoins en termes de demande en débit de refroidissement des différents composants du système HEV sont définies à partir de deux stratégies. La première utilise des mesures sur banc d'essai disponibles chez Renault pour caractériser les besoins de refroidissement des composants. Les mesures expérimentales permettent de définir des cartographies précises donnant les besoins de refroidissement des composants. La seconde se base sur le savoir-faire et l'expérience des architectes du système de refroidissement chez Renault.

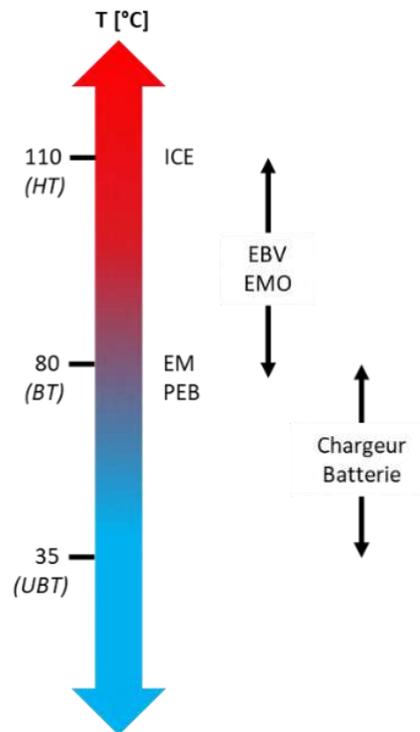


Figure 57 : Niveaux de température des composants d'un système HEV pour conception de sous-système de refroidissement

La Figure 58 montre la cartographie 3D définissant les besoins de débit de liquide de refroidissement d'un moteur thermique. Les variables d'état choisies pour représenter les points de fonctionnement d'un moteur thermique sont :

- la température du liquide de refroidissement
- le couple moteur
- le régime moteur

La Figure 59 présente les besoins de débit de liquide de refroidissement pour les échangeurs thermiques entre l'eau et l'huile moteur, l'eau et l'huile de boîte de vitesses ainsi que celui du radiateur de la boucle de refroidissement HT. Les exigences de refroidissement pour ces composants sont modélisées par des courbes 1D en fonction de la variable d'état correspondant à la température du liquide de refroidissement. Ces courbes sont issues du savoir-faire et de l'expérience de l'architecte système de refroidissement chez Renault.

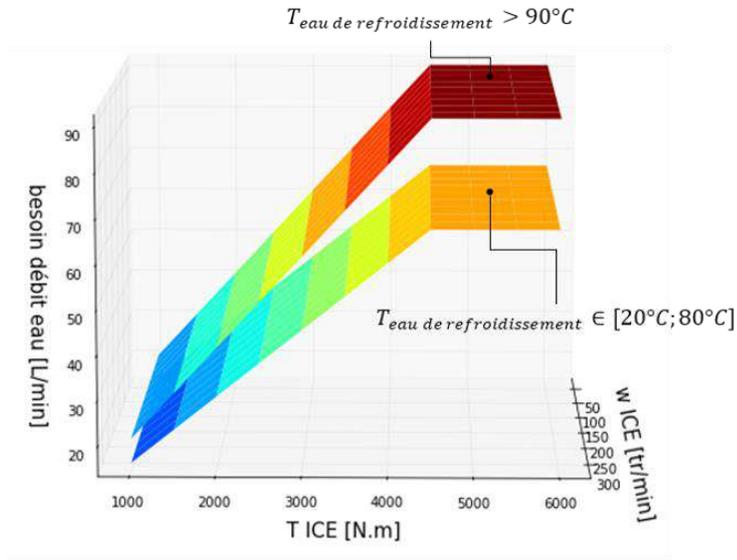


Figure 58 : Exemple de cartographie 3D de besoin en débit de refroidissement d’un moteur thermique

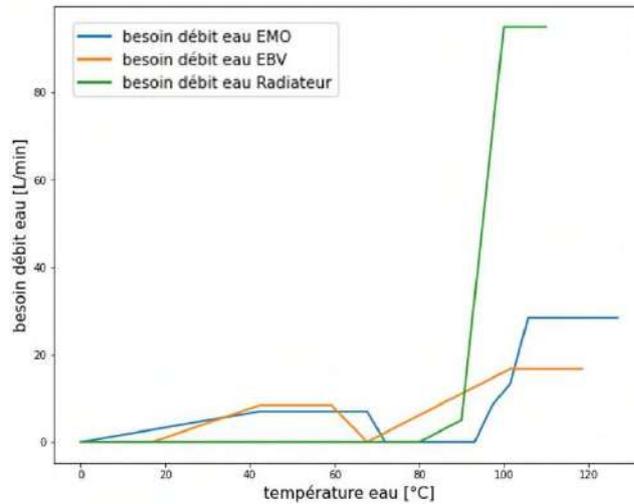


Figure 59 : Exemple de cartographie 2D de besoin en débit de refroidissement d’échangeurs thermiques

Le sous-système de refroidissement doit être conçu de façon à satisfaire l’ensemble des exigences de refroidissement des composants du système HEV. Ces exigences de refroidissement sont déterminées en fonction des points de fonctionnement des composants et de leurs caractéristiques de besoin de débit de refroidissement. Les

points de fonctionnement sont déterminés au niveau système HEV lors de la définition de la loi de gestion d'énergie sur cycle d'homologation.

#### **4.3.2.2 Définition de set de points de fonctionnement**

Ce paragraphe présente une méthode de clusterisation d'un ensemble de points de fonctionnement d'un système HEV. L'objectif de cette méthode est de modéliser les points de fonctionnement les plus utilisés d'un système HEV par un cluster, afin d'optimiser le sous-système de refroidissement sur un ensemble de cluster et non un nombre important de points de fonctionnement.

La clusterisation ou encore la classification non supervisée consiste à regrouper en classe des objets ayant des points commun [99]. Il existe différentes méthodes de clusterisation, les plus connues sont la méthode de partitionnement *K-means* ; la méthode fondée sur la densité *DBSCAN* et la *CAH* (Classification Ascendante Hiérarchique). Lorsque la densité varie entre les clusters la méthode *DBSCAN* nécessite un réglage du seuil de distance (tous les points situés dans ce seuil sont considérés comme point de voisinage) pour l'identification des points de voisinage d'un cluster à l'autre. La méthode *K-means* possède comme principal inconvénient, contrairement à la méthode *CAH*, le besoin de fixer le nombre de clusters. La méthode retenue pour clustériser les points de fonctionnement d'un système HEV est la méthode *CAH*.

La *Figure 60* illustre l'application de la méthode *CAH* pour déterminer les centroïdes des clusters d'un ensemble de points de fonctionnement du moteur thermique issues de l'utilisation du système HEV sur un cycle d'homologation WLTC.

L'ajout de la variable d'état représentant la température du liquide de refroidissement aux centroïdes de la *Figure 60* permet d'obtenir le set de points de fonctionnement de la *Figure 61*. Les caractéristiques de besoins en demande de débit de refroidissement des différents composants du système HEV couplées au set de points de fonctionnement permet de calculer les demandes de débits de chaque composant sur chaque point de fonctionnement. Ces demandes de débits calculées sont utilisées comme donnée d'entrée pour la génération d'architectures organiques de sous-systèmes de refroidissement présentées dans la suite de ce chapitre. Elles sont également utilisées comme données d'entrée au processus d'optimisation hydraulique d'architecture de circuit de refroidissement afin d'optimiser les

perméabilités des réseaux hydrauliques sur les points de fonctionnement les plus utilisés.

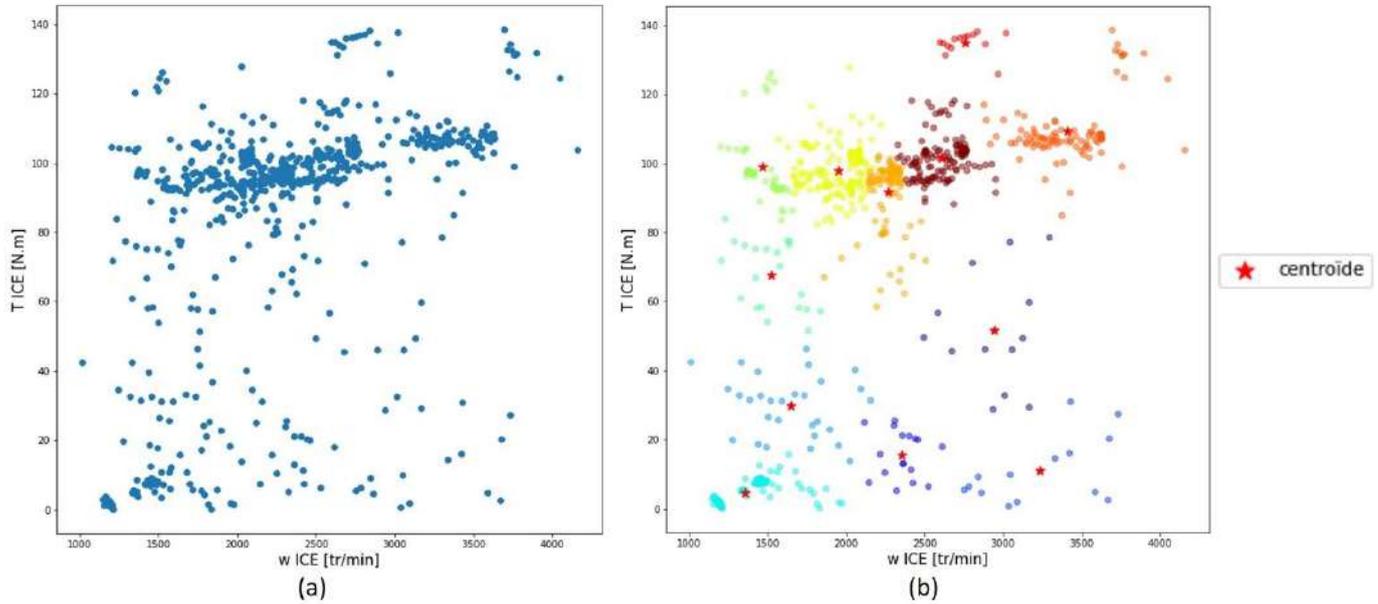


Figure 60 : Points de fonctionnement moteur thermique sur WLTC (a) et leurs clusterisations avec centroïdes (b)

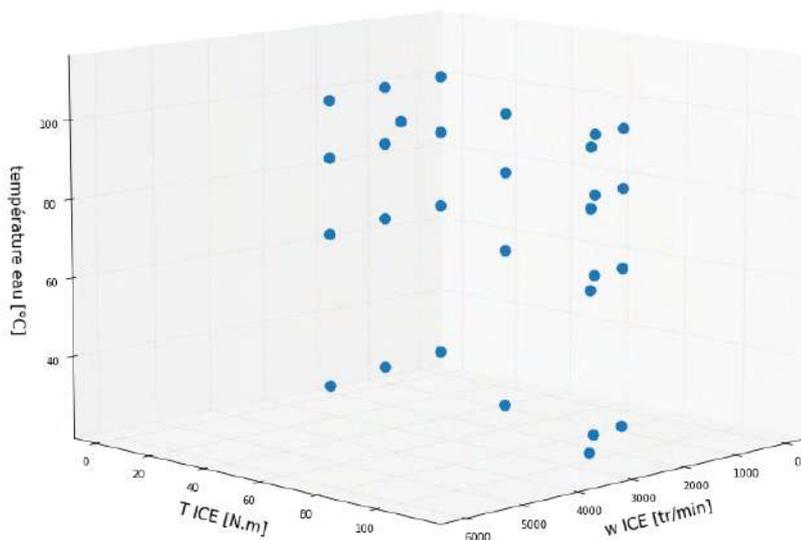


Figure 61 : Exemple d'ensemble de points de fonctionnement utilisés pour l'optimisation hydraulique de sous-systèmes de refroidissement haute température

### 4.3.2.3 Squelettes hydrauliques

La méthode de génération automatique d'architectures organiques de sous-systèmes de refroidissement utilise la notion de squelette hydraulique. Un squelette hydraulique est simplement un réseau hydraulique composé de  $n$  jonctions hydrauliques et de  $m$  branches. Pour garantir l'exhaustivité des solutions d'architecture de sous-système de refroidissement (dans l'espace des solutions possibles délimité par les hypothèses prises dans le cadre de cette thèse), il est nécessaire de s'intéresser à l'exhaustivité des squelettes hydrauliques.

La génération de squelettes hydrauliques est initialisée par la définition des limites de l'espace de recherche des solutions possibles. Le nombre de composants primaires, définis pour la recherche de solutions d'architectures organiques de circuit de refroidissement, permet de calculer le nombre maximal de branches que peut comporter un squelette hydraulique. En effet, ce nombre maximal de branches ( $n_{br_{max}}$ ) correspond au cas extrême où tous les composants primaires sont positionnés en parallèle les uns aux autres. Une fois ce nombre maximal identifié, l'espace des solutions de squelettes hydrauliques possibles est délimité par la fonction suivante :

$$2 < n_{br} < n_{br_{max}} \quad (\text{Équation 28})$$

Pour un nombre de branches  $n_{br}$  donné, il est possible de calculer le nombre de connexions  $n_c$  à réaliser par les solutions de squelette hydraulique. Le nombre de connexions  $n_c$  à réaliser est calculé à partir du nombre de branches à l'aide de l'équation suivante :

$$n_c = n_{br} \times 2 \quad (\text{Équation 29})$$

Finalement, l'espace de recherche de squelettes hydrauliques est complètement défini par le paramètre  $n_{br_{max}}$ . La recherche de l'ensemble des solutions possibles consiste à rechercher l'ensemble des combinaisons possibles de sommets à  $n$  branchements permettant de satisfaire le nombre de connexions donnés par l'équation 28, pour un nombre de branches satisfaisant l'équation 29. L'algorithme de génération de squelettes hydrauliques développé dans cette thèse est basé sur le concept d'arbre de décision. Comme illustré sur la *Figure 62*, l'exploration d'un arbre de décision appliqué à la recherche de solutions de réseaux hydrauliques, permet d'effectuer successivement les étapes de construction d'une solution représentant un réseau hydraulique. Similairement à l'arbre de décision utilisé dans le Chapitre 3 pour

générer des solutions d’architectures de système HEV, il est nécessaire de définir une représentation mathématique des solutions de squelettes hydrauliques à générer. Une solution est représentée mathématiquement par un vecteur. Un exemple est donné sur la *Figure 64*, la solution représentée correspond au squelette numéro 2 de la *Figure 63*. La dimension du vecteur solution est déterminée en fonction du nombre de branches et de sommets que doivent posséder les squelettes hydrauliques.

L’application d’un arbre de décision à la recherche de squelettes hydrauliques permet, lors de son exploration, d’écartier les solutions non physiques. La génération de solutions se concentre uniquement sur les solutions valides. Les critères permettant de classer une solution comme non physique sont basés sur la connaissance et le savoir-faire liés au système à concevoir. Dans le cas présent de recherche de solutions de squelettes hydrauliques, les solutions présentant une boucle de fluide morte (cf *Figure 65*) ainsi que les isomorphismes (cf *Figure 67*) sont écartées.

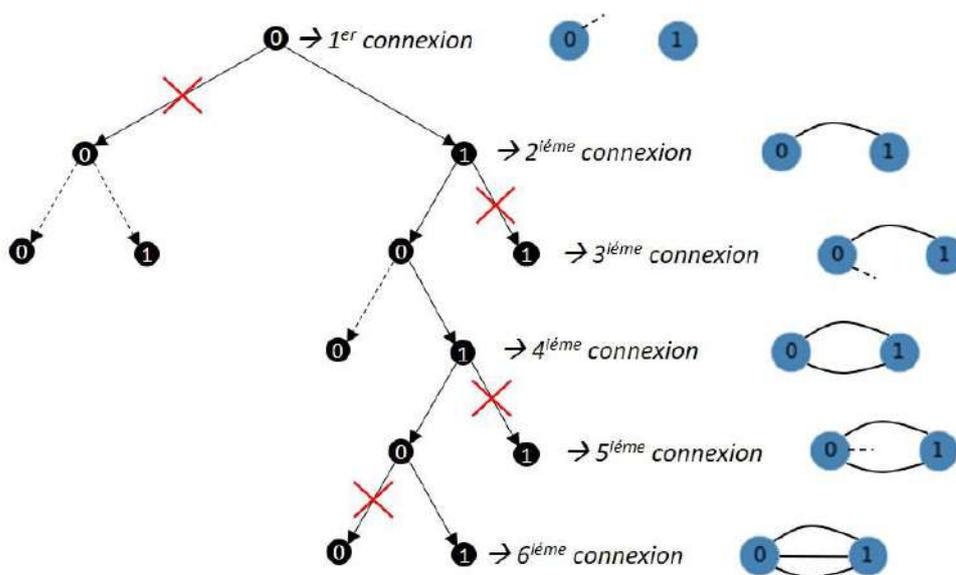


Figure 62 : Exemple d’application d’arbre de décision pour la génération de réseaux hydrauliques

A titre d’exemple, la *Figure 63* montre un échantillon de cinq solutions, appartenant à cinq familles distinctes de squelettes hydrauliques, générés par l’algorithme basé sur le concept d’arbre de décision. Les première et cinquième familles définissent respectivement les squelettes hydrauliques construits à partir de deux sommets et deux branches et ceux construits à partir de trois sommets et cinq branches.

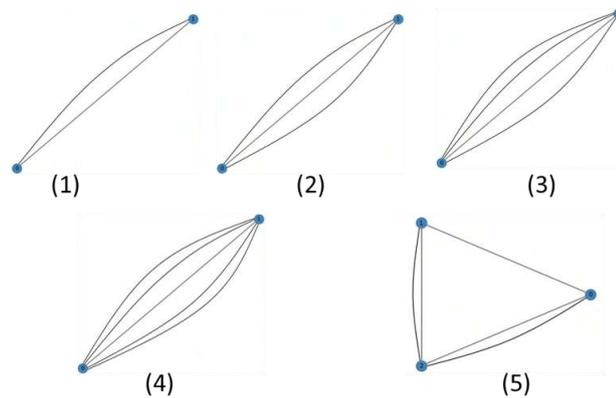


Figure 63 : Exemple de squelettes hydrauliques pour génération d'architectures de sous-système de refroidissement

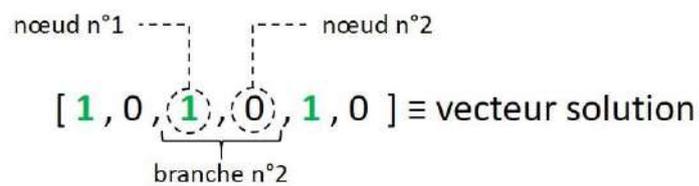


Figure 64 : Représentation du vecteur solution utilisée dans le concept d'arbre de décision appliqué à la génération de squelettes hydrauliques

La Figure 65 illustre un réseau hydraulique comportant deux boucles de fluide mortes (une première entre les nœuds 1,2 et 0 et une seconde entre les nœuds 3 et 4). Un réseau hydraulique représenté par un graphe, contient une boucle de fluide morte s'il n'existe pas pour toute paire de nœuds hydrauliques du graphe au moins deux chemins différents.

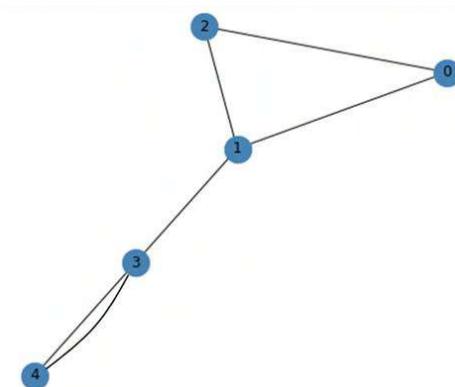


Figure 65 : Boucle de fluide morte dans réseau hydraulique

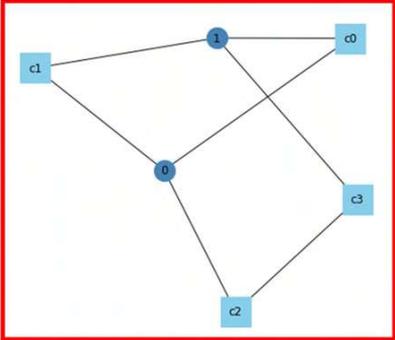
#### 4.3.2.4 Positionnement des composants primaires

Ce paragraphe présente l'algorithme permettant de positionner les composants primaires caractérisant un circuit de refroidissement sur un ensemble de squelettes hydrauliques. Les différents positionnements possibles sur les différents squelettes définissent l'ensemble des solutions possibles du problème de recherche d'architectures organiques de sous-systèmes de refroidissement.

Les différents positionnements possibles d'un set de composants primaires sur un squelette hydraulique donné sont générés via un concept d'arbre de décisions. Les composants sont positionnés au fur et à mesure de l'exploration de l'arbre de décision. De la même façon que la génération de squelettes hydrauliques via un arbre de décision, une représentation mathématique doit être définie pour représenter une solution de positionnement des composants primaires sur un squelette. Une nouvelle fois, la représentation choisie est vectorielle. Un exemple de vecteur solution est donné sur la *Figure 66*, cet exemple représente la solution mise en valeur dans la *Table 7*. Les coordonnées mises en valeur en vert correspondent aux nombres de composants primaires positionnés sur la branche courante. Les coordonnées suivantes renseignent sur les indices des composants qui ont été positionnés sur cette branche courante. La dimension des vecteurs solutions est égale à la somme du nombre de branches et du nombre de composants primaires à positionner.

La *Table 7* résume les combinaisons possibles de positionnement de quatre composants primaires sur un squelette hydraulique à trois branches et deux sommets. Un exemple de solutions possibles est mis en valeur, le graphe parent obtenu contient le composant c1 sur la première branche, le composant c0 sur la seconde branche et les composants c2 et c3 sur la dernière branche. Ce simple exemple génère un total de 3375 solutions possibles. Cet ensemble de solutions contient des isomorphismes de graphes représentant des architectures organiques de sous-systèmes de refroidissement. La *Figure 67* présente un exemple de ce type d'isomorphisme. De plus, pour une application de sous-système de refroidissement, certains composants primaires ont des exigences de refroidissement incompatibles entre eux et ne doivent pas être positionnés en série. Afin d'assurer l'unicité organique des solutions générés, les isomorphismes générés sont écartés de l'ensemble des solutions admissibles. L'introduction de contraintes systèmes sur les exigences de refroidissement dans l'arbre de décision permet de se limiter à la génération d'architectures organiques répondant à l'ensemble des exigences de refroidissement des composants primaires.

Edge 1	Edge 2	Edge 3
(c0)	<b>(c0)</b>	(c0)
<b>(c1)</b>	(c1)	(c1)
(c2)	(c2)	(c2)
(c3)	(c3)	(c3)
(c0,c1)	(c0,c1)	(c0,c1)
(c0,c2)	(c0,c2)	(c0,c2)
(c0,c3)	(c0,c3)	(c0,c3)
(c1,c2)	(c1,c2)	(c1,c2)
(c1,c3)	(c1,c3)	(c1,c3)
(c2,c3)	(c2,c3)	<b>(c2,c3)</b>
(c0,c1,c2)	(c0,c1,c2)	(c0,c1,c2)
(c0,c1,c3)	(c0,c1,c3)	(c0,c1,c3)
(c0,c2,c3)	(c0,c2,c3)	(c0,c2,c3)
(c1,c2,c3)	(c1,c2,c3)	(c1,c2,c3)
(c0,c1,c2,c3)	(c0,c1,c2,c3)	(c0,c1,c2,c3)



*Graph parent*

Table 7 : Exemple des combinaisons possibles de positionnement de quatre composants sur un squelette hydraulique à trois branches

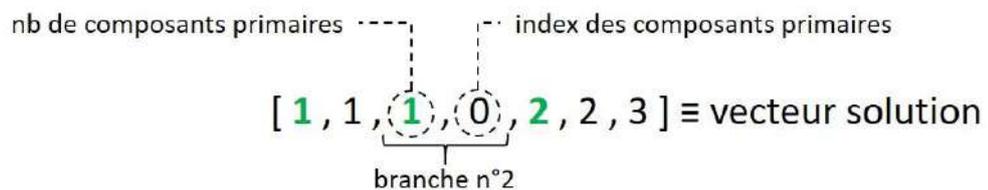


Figure 66 : Représentation du vecteur solution utilisé dans le concept d'arbre de décision appliqué à la génération de solutions de positionnement de composants sur un squelette hydraulique

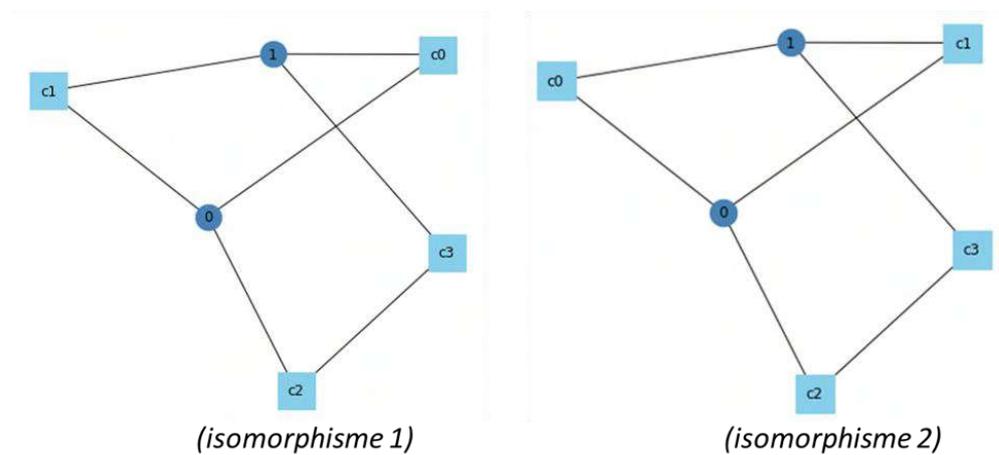


Figure 67 : Exemple d’isomorphismes d’architecture de sous-système de refroidissement

#### 4.3.2.5 Détection de configurations et positionnement des composants secondaires

Une architecture organique de circuit de refroidissement a la capacité de réaliser différentes configurations afin de répondre au mieux aux exigences de refroidissement des composants primaires. Un circuit de refroidissement haute température d’un véhicule conventionnel comporte généralement un thermostat à cire (cf Figure 55) permettant de réaliser deux configurations selon l’état d’ouverture du thermostat. L’ouverture du thermostat, pour des températures élevées de liquide de refroidissement, modifie la topologie du circuit de refroidissement en ajoutant au réseau hydraulique la branche comportant le radiateur. Dans ce paragraphe une méthode permettant de détecter automatiquement les configurations réalisables par les architectures organiques générées est proposée. Le positionnement automatique des composants secondaires est également discuté dans ce paragraphe.

Le processus de détection de configurations réalisables et de positionnement de composants secondaires sur une architecture organique de sous-système de refroidissement est présenté sur la Figure 68. La première étape consiste à détecter, à partir d’un placement possible de composants primaires sur un squelette hydraulique, les pré-configurations. L’ensemble des pré-configurations est obtenu en fonction de la topologie du placement des composants primaires sur le squelette hydraulique et des exigences de refroidissement des composants primaires. Les exigences de refroidissement et les différents points de fonctionnement du système HEV,

permettent d'identifier les composants primaires pouvant être déconnectés du reste du réseau hydraulique sur des points de fonctionnement spécifiques. A partir de cette information et étant donnée la topologie du placement des composants primaires sur le réseau hydraulique, les branches pouvant être déconnectées sur les points de fonctionnement identifiés sont déterminées. Les ensembles des branches pouvant être déconnectées sur les mêmes points de fonctionnement permettent de définir l'ensemble des pré-configurations. L'étape suivante dans le processus présenté sur la *Figure 68* est le positionnement des composants secondaires. Ces composants sont positionnés selon des règles définies à partir du savoir-faire et de la connaissance des architectes du système de refroidissement. Les premiers composants secondaires à positionner sont les échangeurs thermiques (e.g. radiateur et chiller). Deux stratégies de positionnement des échangeurs thermiques ont été définies, une pour la boucle haute température (HT) et l'autre pour les boucles basse et ultra basse températures (BT et UBT). La première stratégie consiste à positionner l'échangeur thermique (e.g. le radiateur HT) en parallèle de la branche comportant le composant primaire générant le plus de pertes thermiques. Pour la seconde stratégie, les échangeurs thermiques sont également positionnés en série du composant primaire générant le plus de pertes thermiques, afin de corréliser avec la diversité qui a été constatée sur ce type de boucle de refroidissement dans le Chapitre 1. Les pompes hydrauliques sont ensuite positionnées. Une première pompe hydraulique est positionnée en amont du composant ayant les besoins en termes de débit de refroidissement les plus importants. Une boucle d'itérations sur les pré-configurations est réalisée afin de positionner des pompes additionnelles sur les pré-configurations dépourvue de pompe hydraulique. La même stratégie que celle utilisée pour positionner la première pompe est utilisée pour positionner les pompes additionnelles. Le processus s'arrête lorsque chaque pré-configuration contient au-moins une pompe hydraulique. Enfin, le dernier type de composant secondaire à positionner est le vase d'expansion. Il est positionné sur une branche supplémentaire reliant l'entrée du radiateur et l'entrée de la pompe hydraulique. Ce positionnement permet de bénéficier de la température élevée entrée du radiateur pour pressuriser le vase d'expansion, et permet d'éviter les problèmes de cavitation pompe en fournissant une pression statique suffisante.

L'architecture organique de sous-système de refroidissement traité comme exemple sur la *Figure 68* contient trois différentes configurations réalisables. La première configuration permet à l'architecture de déconnecter tous les composants primaires n'ayant pas besoin de débit de refroidissement à froid. Cette configuration optimise la montée en température du liquide de refroidissement, de l'huile moteur et de l'huile

boîte de vitesses. La montée en température du moteur thermique est également optimisée. Les deux autres configurations permettent de piloter l’alimentation en débit de refroidissement de la branche comportant le radiateur. La seconde configuration régule la température du liquide de refroidissement en déconnectant le radiateur du reste de l’architecture. La dernière configuration, dite de protection thermique, utilise la branche radiateur pour refroidir le liquide de refroidissement afin de ne pas dépasser la limite non acceptable des composants primaires.

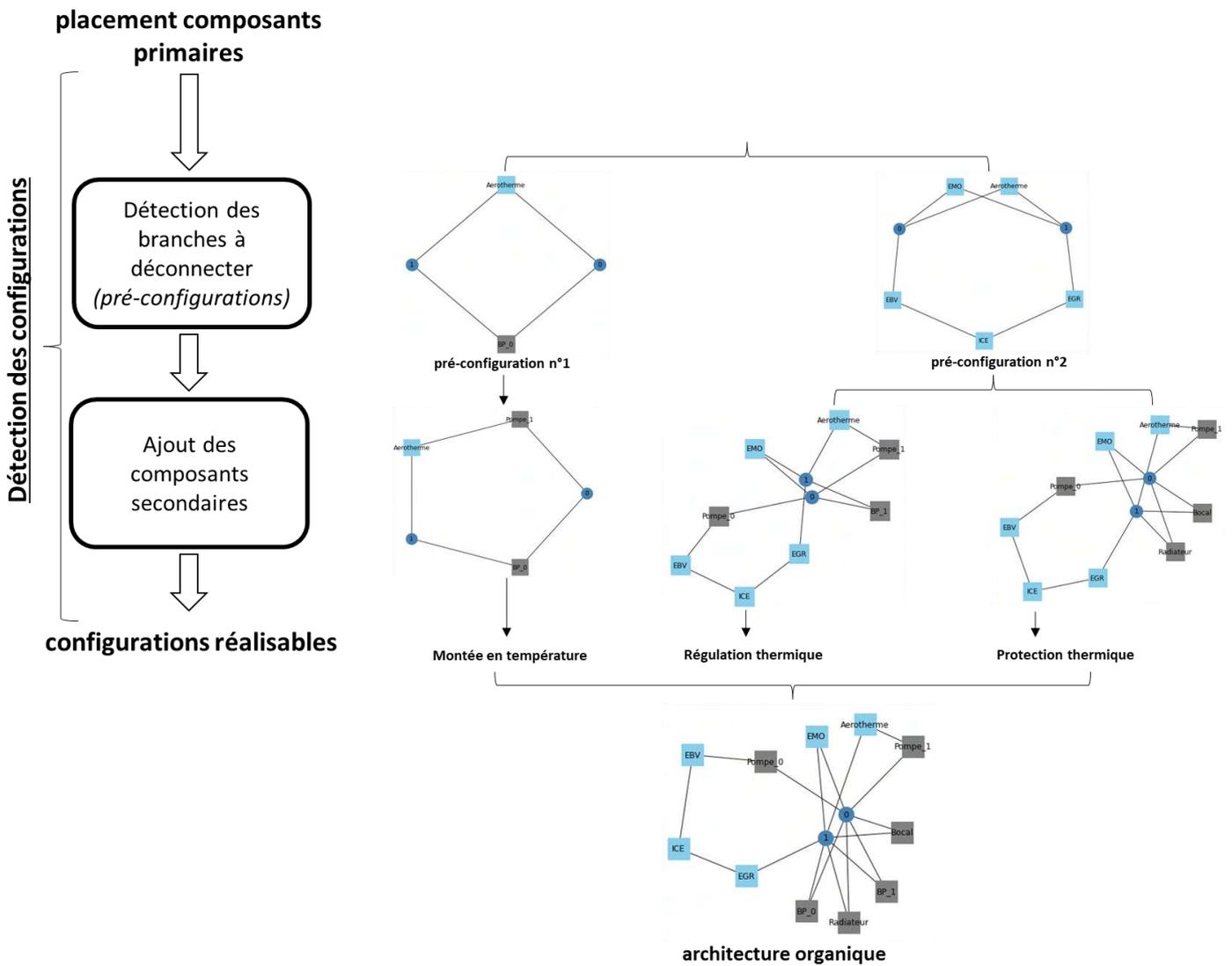


Figure 68 : Détection des configurations réalisables d’une architecture de sous-système de refroidissement

#### 4.3.2.6 Analyse de la concurrence

Comme effectué pour l'outil de génération d'architectures organiques de système HEV présenté dans le Chapitre 3, une analyse de la concurrence en termes d'architectures de circuit de refroidissement est sur l'outil détaillé dans ce chapitre est présentée dans ce paragraphe. L'objectif de cette étude est de démontrer que les différentes architectures organiques de sous-systèmes de refroidissement de véhicule HEV présentées dans le Chapitre 1, sont retrouvées par l'outil de génération d'architectures organiques de circuit de refroidissement.

Les *Figure 69* et *Figure 70* montrent une bonne corrélation entre les architectures organiques générées par l'outil présenté et celles issues de l'analyse de la concurrence présentée sur les *Figure 6* et *Figure 7*. Cependant, certaines architectures nécessitent des mises au point mineures pour retrouver tous les détails de la topologie de l'architecture organique du constructeur automobile.

Les architectures de circuit haute température sur les véhicules Ford Kuga et Renault Captur présentent une micro-boucle autour de l'aérotherme. Cette micro-boucle a pour fonction de répondre à l'exigence de demande de chauffage habitacle lors des phases de roulage en mode électrique. Ce détail n'est pas présent dans les topologies des architectures organiques générées par l'outil. Cependant, comme il est montré dans le Chapitre 5 sur les *Figure 98* et *Figure 99*, le niveau de détails topologique de l'architecture organique du circuit de refroidissement HT du Renault Captur générée par l'outil permet d'obtenir un comportement physique corrélé à la référence.

L'architecture organique du circuit BT de la Jeep Renegade utilise une pompe additionnelle positionnée en parallèle du turbo. Cette pompe est utilisée pour refroidir le turbo quand le moteur thermique chaud est à l'arrêt [100]. En effet, une partie du liquide de refroidissement proche du turbo lors de l'arrêt du moteur thermique peut se vaporiser. Lors de la remise en marche du moteur thermique la vapeur présente dans le turbo se met en mouvement et se met en contact avec du liquide de refroidissement présent dans les tuyaux hydrauliques en aval du turbo. Le contact entre la vapeur et le liquide de refroidissement froid provoque une condensation de la vapeur et provoque un bruit parasite. La présence de la pompe additionnelle permet de forcer un débit du liquide de refroidissement dans le turbo après la mise à l'arrêt du moteur thermique chaud, et éviter ce phénomène. Cette micro-boucle autour du turbo n'est pas générée par l'outil de génération d'architectures organiques de circuits de refroidissement.



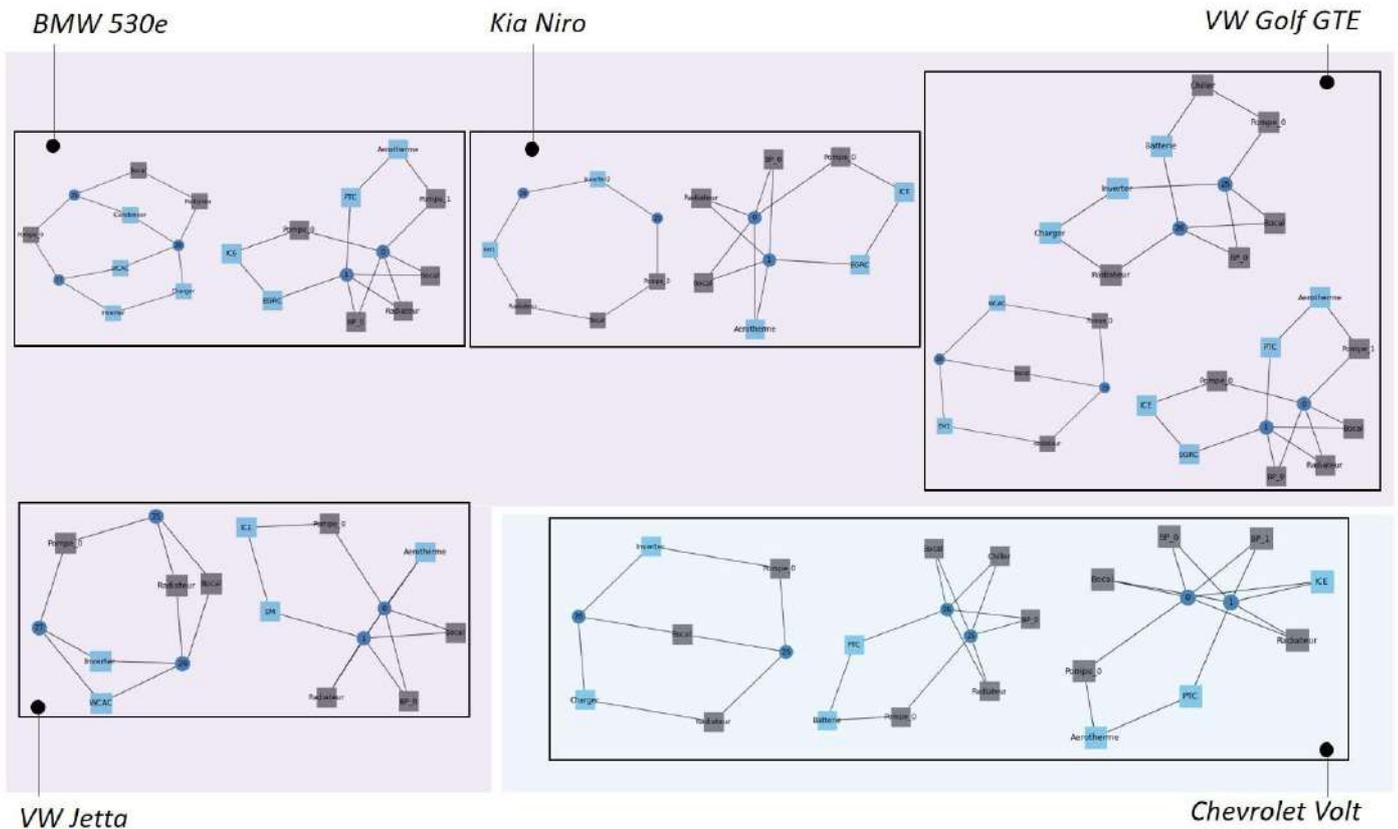


Figure 70 : Architectures de sous-système de refroidissement de la concurrence retrouvées par l'outil de génération de solutions (partie 2)

### 4.3.3 Exemple d'application

L'outil de génération d'architectures organiques de circuit de refroidissement est appliqué à un projet Renault existant, le Captur en version HEV [101]. L'architecture de référence Renault, présentée sur la Figure 71, est composée de deux boucles de refroidissement : une haute température (HT) et une basse température (BT). Deux études ont été menées pour générer des alternatives d'architecture organique système pour la boucle HT et BT.

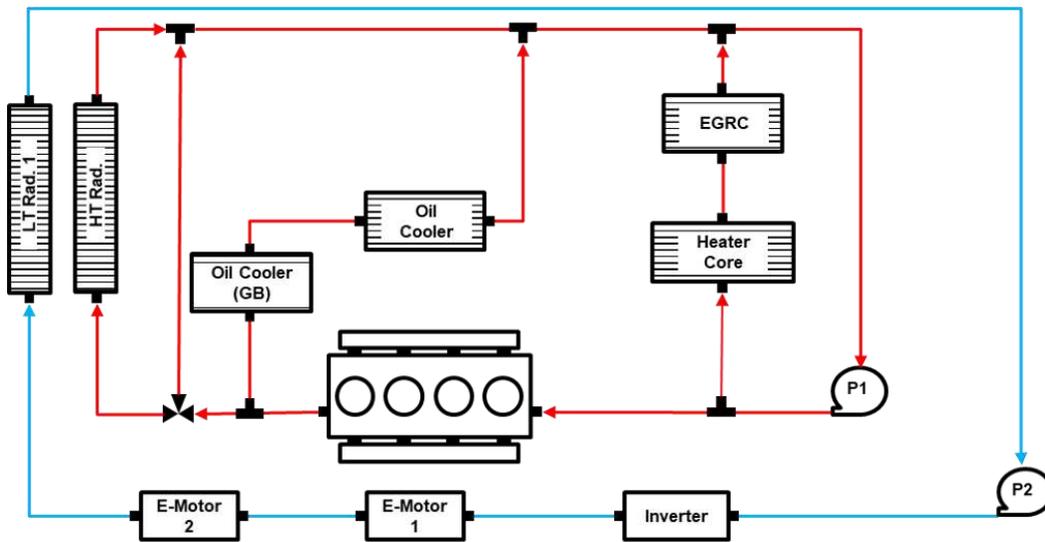


Figure 71 : Architecture de sous-système de refroidissement de système HEV Renault

Les Figure 72 et Figure 73 illustrent les architectures de références pour les boucles HT et BT retrouvées par l’outil de génération d’architectures organiques de sous-systèmes de refroidissement. Pour faciliter la lecture de ces architectures, un outil de réagencement a été développé, afin d’optimiser le placement des composants du graphe représentant la solution en minimisant l’enchevêtrement des liaisons entre les nœuds du graphe.

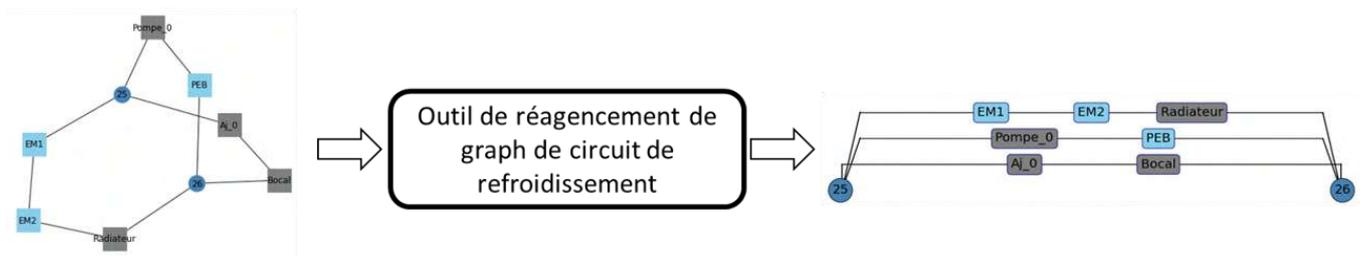


Figure 72 : Architecture de sous-système de refroidissement de système HEV Renault retrouvée par l’outil de génération de solutions (boucle BT)

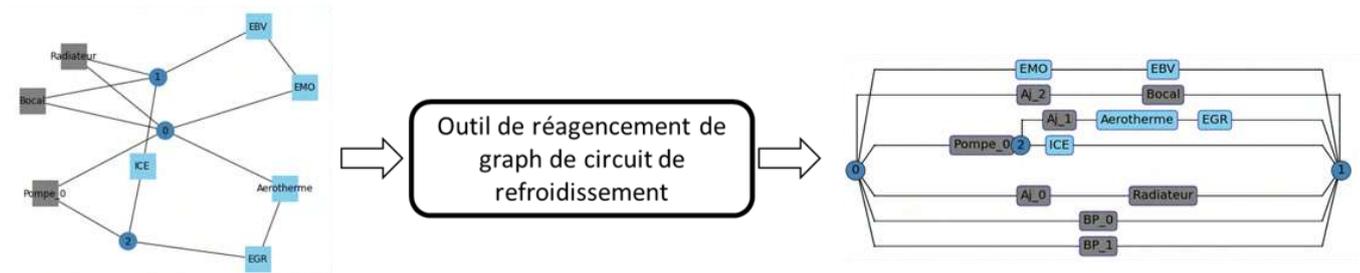


Figure 73 : Architecture de sous-système de refroidissement de système HEV Renault retrouvée par l'outil de génération de solutions (boucle HT)

Les Figure 74 et Figure 75 présentent un échantillon d'architectures organiques générées pour la boucle basse température et la boucle haute température. L'agencement graphique de ces solutions est issu de l'outil d'optimisation de réagencement de graphe.

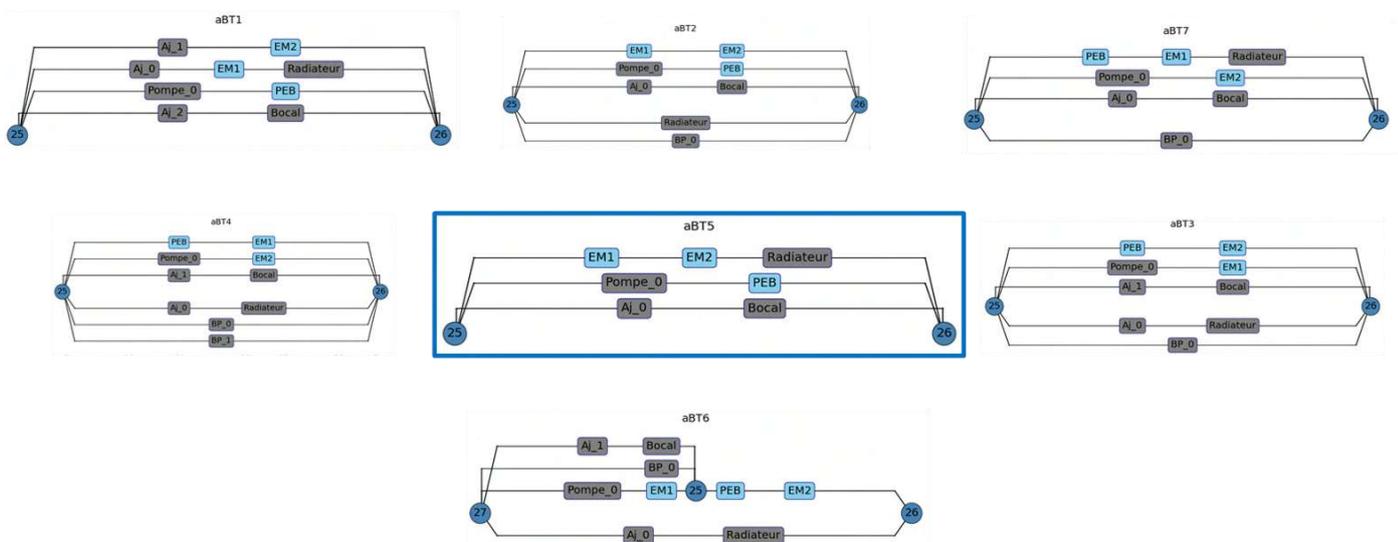


Figure 74 : Exemple d'architectures de sous-système de refroidissement générées par l'outil de génération de solutions (boucle BT)

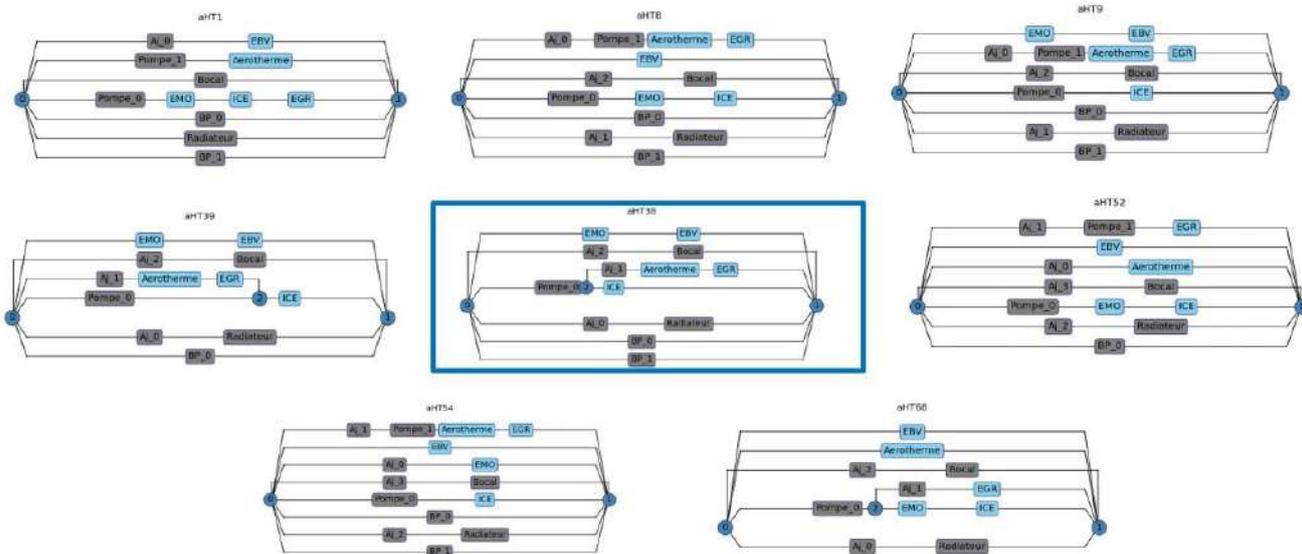


Figure 75 : Exemple d'architectures de sous-système de refroidissement générées par l'outil de génération de solutions (boucle HT)

## 4.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté une méthode de génération automatique d'architectures organiques de circuit de refroidissement. Les données d'entrée de la méthodologie sont la liste des composants ayant des besoins de refroidissement (composants primaires) ainsi que la définition de leurs exigences de refroidissement. Un algorithme basé sur un concept d'arbre de décision couplé à un jeu de contraintes, génère ensuite les solutions de circuit de refroidissement répondant aux exigences système. Le processus de génération de solutions se fait en trois étapes. Tout d'abord les squelettes hydrauliques possibles sont générés. L'ensemble des possibilités de positionner les composants ayant des besoins de refroidissement sur ces squelettes hydrauliques est déterminé. Pour chaque solution de positionnement des composants primaires, les configurations réalisables sont détectées. Enfin, les composants secondaires (i.e. pompe, radiateur et vase d'expansion) sont positionnés selon des règles d'experts afin d'assurer le bon fonctionnement de chaque configuration.

Une méthode automatique d'optimisation énergétique, sous des contraintes d'intégration, d'architectures de sous-système de refroidissement est détaillée dans le chapitre suivant.

# Chapitre 5 - Optimisation énergétique d'architectures de sous-système de refroidissement

## 5.1 Introduction

Le Chapitre 4 présente une méthode de génération automatique d'architectures organiques de sous-systèmes de refroidissement. Cette méthode est appliquée au niveau de l'architecture du problème de conception de circuit de refroidissement illustré sur la *Figure 51*, pour explorer l'espace possible des solutions d'architectures organiques. Ce chapitre présente les méthodes développées pour évaluer et optimiser automatiquement des architectures de sous-systèmes de refroidissement tenant compte des contraintes d'intégration 3D.

Premièrement, la modélisation énergétique des composants primaires et secondaires d'un circuit de refroidissement est discutée. Sur la base de cette modélisation énergétique, une méthode de construction automatique de modèles analytiques est ensuite utilisée. Ces modèles analytiques sont utilisés à deux fins différentes, d'une part pour simuler le comportement de différents dimensionnements d'échangeurs thermiques (e.g. radiateur) et de pompes hydrauliques, d'autre part, pour évaluer la répartition du débit dans un réseau hydraulique pour des conditions de débits pompe imposées. Le couplage de ces modèles analytiques générés à des algorithmes d'optimisation permet d'optimiser les performances hydrauliques globales d'une architecture de circuit de refroidissement sur un ensemble de points de fonctionnement. Une pré-étape au processus d'optimisation décrit précédemment est le calcul du temps passé sur chaque point de fonctionnement choisis afin d'optimiser les solutions sur les points les plus utilisés.

L'optimisation énergétique de sous-systèmes de refroidissement présentée dans ce chapitre intègre des contraintes d'intégration des composants. Ces contraintes d'intégration sont prises en compte par un outil d'optimisation 3D du tracé de réseau hydraulique dans un volume alloué. Cet outil est également présenté dans ce chapitre.

Enfin, un exemple d’application du processus automatisé d’optimisation énergétique de circuit de refroidissement est présenté sur un projet actuel chez Renault (Captur HEV).

## 5.2 Modélisation sous-système de refroidissement

Cette partie présente les modèles utilisés pour simuler le comportement hydraulique et thermique des différents composants constituant le système HEV et le sous-système de refroidissement.

### 5.2.1 Modélisation des composants primaires

Les composants dits primaires sont les composants qui sont à l’origine du besoin de conception d’un système de refroidissement. Principalement, ces composants sont : le moteur thermique, le(s) machine(s) électrique(s), l’électronique de puissance, le chargeur ou encore les échangeurs thermiques entre le liquide de refroidissement et les huiles de moteur et de boîte de vitesses.

Dans le cadre de cette thèse la modélisation énergétique d’une solution d’architecture de circuit de refroidissement a pour objectif de prédire son comportement thermo-hydraulique sur cycle d’homologation. Pour cela, la modélisation du sous-système de refroidissement doit intégrer des aspects hydrauliques et thermiques caractérisant les composants primaires. Les caractéristiques hydrauliques permettent de déterminer la répartition du débit et les niveaux de pressions statiques au sein d’un réseau hydraulique de circuit de refroidissement. Les évolutions temporelles des températures de liquide de refroidissement au niveau des différents composants primaires du circuit de refroidissement sont calculées en considérant les aspects thermiques souhaités.

#### Modélisation hydraulique :

Les pertes de charges au sein d’un composant primaire générées par un écoulement du liquide de refroidissement sont calculées à l’aide de l’équation fondamentale de Bernoulli qui s’écrit sous la forme suivante :

$$S_e = Q_v \times \sqrt{\frac{\rho}{2 \times \Delta P}} \quad (\text{Équation 30})$$

où  $Se$  est la perméabilité du composant en  $m^2$ ,  $Q_v$  représente le débit volumique en  $m^3/s$ ,  $\Delta P$  sont les pertes de charge en  $Pa$  et  $\rho$  est la masse volumique du fluide en  $kg/m^3$ .

Modélisation thermique :

Les sollicitations des différents composants primaires dépendent de la loi de gestion d’énergie définie par le système HEV. Ces sollicitations génèrent des pertes thermiques (calculées via les modèles de pertes thermiques présentés dans le Chapitre 3). L’évolution temporelle de ces pertes thermiques pour un composant primaire donné s’écrit :

$$Q = f_{P_{therm}}(t) \quad (\text{Équation 31})$$

où  $f_{P_{therm}}$  est l’évolution temporelle des pertes thermiques calculées tenant compte des sollicitations des composants du système HEV.

L’évolution temporelle de la température du fluide de refroidissement au niveau d’un composant primaire est déterminée par l’équation de conservation de l’énergie :

$$\frac{dT_{fluide}}{dt} = \frac{Q}{\rho \times c_p \times V} + \dot{m}_f c_p (T_{fluide\_in} - T_{fluide\_out}) \quad (\text{Équation 32})$$

où,  $T_{fluide}$  est la température de liquide de refroidissement dans le noyau d’eau du composant primaire de volume  $V$ . La grandeur  $c_p$  est la capacité calorifique massique du liquide de refroidissement.

## 5.2.2 Modélisation des composants secondaires

La seconde catégorie des composants qui constituent un circuit de refroidissement, concerne les composants secondaires. Ces composants assurent le bon fonctionnement du sous-système de refroidissement. Les modèles utilisés pour simuler le comportement du radiateur, des pompes hydrauliques, des vannes hydrauliques, des chillers ou bien le composant vase d’expansion sont présentés dans cette partie.

### 5.2.2.1 Modèle de radiateur

L’objectif d’un radiateur dans un circuit de refroidissement d’un véhicule est d’évacuer la chaleur produite par les composants primaires vers l’environnement extérieur, de

réguler la température du liquide de refroidissement. Les échanges thermiques entre le fluide de refroidissement et l'air extérieur, sur un point de fonctionnement donné, se font en fonction de son efficacité thermique. La performance intrinsèque énergétique du radiateur s'exprime par le rapport entre la quantité de chaleur réellement échangée sur la quantité de chaleur qui serait échangée si l'échangeur thermique était idéal.

Dans une approche de modélisation énergétique d'un circuit de refroidissement, les échangeurs thermiques de type radiateur sont généralement modélisés par des cartographies de performances thermiques. La *Figure 74* représente une cartographie d'efficacités thermiques en fonction des débits du liquide de refroidissement ( $G_f$ ) et de l'air extérieur ( $G_a$ ), d'un radiateur utilisé chez Renault. Cette cartographie est utilisée pour modéliser le comportement d'un radiateur dans les travaux de cette thèse. L'efficacité thermique du radiateur est alors donnée par la relation suivante :

$$\varepsilon = f_{\text{Radiateur}}(G_f, G_a) \quad (\text{Équation 33})$$

où  $G_f$  et  $G_a$  sont respectivement les débits de liquide de refroidissement par unité de largeur et d'air par unité de surface.  $f_{\text{Radiateur}}$  est la fonction d'interpolation permettant de calculer l'efficacité thermique à partir de la cartographie présentée en *Figure 74*.

Une méthode de prédiction de performances thermiques de radiateurs a été développée et présentée en Annexe E. Cette méthode s'applique aux échangeurs thermiques à courants croisés avec une seule passe de fluide interne, comme les radiateurs de type 'I'. Les radiateurs de type 'U' peuvent être traités en considérant deux radiateurs de type 'I' monté en série. Des coefficients empiriques  $a$ ,  $b$  et  $\alpha$  dépendant du fluide interne et de la géométrie élémentaire de l'échangeur sont définis pour une famille d'échangeurs thermiques. L'identification de ces coefficients, permet de prédire l'efficacité de tout autre échangeur de même technologie mais de surface d'échanges thermiques différente.

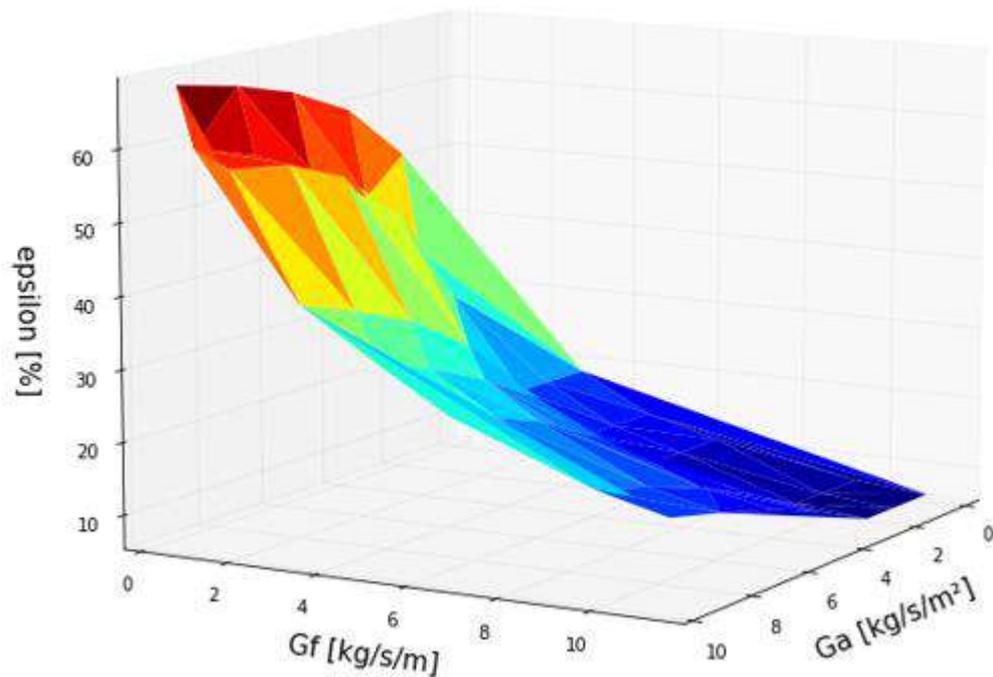


Figure 76 : Cartographie 3D d'efficacité thermique d'un radiateur

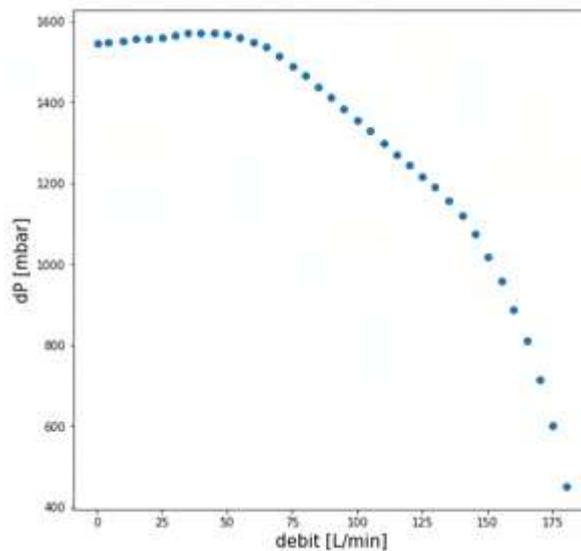
### 5.2.2.2 Modèle de pompe

Les pompes hydrauliques, dans un circuit de refroidissement, permettent d'assurer le débit du fluide de refroidissement dans le réseau hydraulique. Le débit généré dans chaque branche du circuit de refroidissement doit permettre de répondre aux besoins de refroidissement des composants primaires.

La tendance actuelle d'électrification des véhicules décrite dans le Chapitre 1 confirme le besoin d'assurer en continu le refroidissement des composants et de chauffer l'habitacle. Ces besoins complexifient l'architecture du système de refroidissement par rapport à un véhicule conventionnel. En effet, les phases de fonctionnement en électrique ne permettent pas de faire fonctionner une pompe hydraulique conventionnelle mécanique [102]. Les pompes électriques sont généralement utilisées pour répondre aux exigences de refroidissement des véhicules hybrides et électriques. De plus, une pompe électrique, contrairement à une pompe entraînée mécaniquement, permet de définir un contrôle du débit en fonction du point de fonctionnement et ainsi faire fonctionner la pompe sur ses meilleurs rendements [102]. Dans cette thèse, les architectures de circuit de refroidissement étudiées utilisent uniquement des pompes électriques.

La modélisation énergétique retenue pour représenter le comportement hydraulique des pompes électriques est basée sur un réseau de caractéristiques de pompe pour différents régimes du moteur électrique. Une caractéristique de pompe hydraulique pour un régime moteur donné, représente la relation entre la différence de pressions aux bornes de la pompe et du débit qu'elle est capable de générer. Les *Figure 77* et *Figure 78* illustrent respectivement un exemple de caractéristique de pompe électrique pour un régime moteur donné et une cartographie de réseau de caractéristiques de pompes électriques pour plusieurs régimes moteur.

Les pompes de même technologie vérifient des lois de similitude. Ces lois permettent à partir d'une caractéristique donnée pour une vitesse de rotation d'obtenir la caractéristique pour un nouveau régime moteur ou bien une modification géométrique de la pompe. Une modification de la commande et/ou d'un paramètre géométrique d'une pompe impacte également son rendement global. Une méthode permettant d'obtenir les caractéristiques et courbes de rendements pour des modifications de commande ou de paramètres géométriques d'une pompe centrifuge électrique de référence est proposée en Annexe F.



*Figure 77 : Exemple de caractéristique de pompe hydraulique électrique*

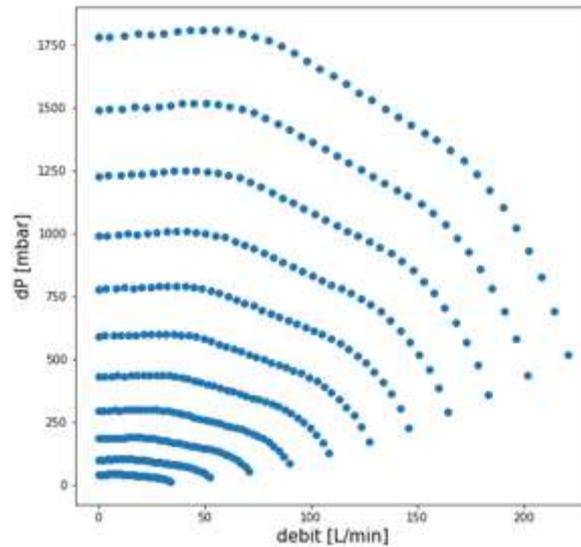


Figure 78 : Réseau de caractéristiques de pompe hydraulique électrique

### 5.2.2.3 Modèles de vase d'expansion

Les fonctions du composant secondaire vase d'expansion sont multiples. Un vase d'expansion doit en premier lieu assurer la réserve de liquide du circuit de refroidissement auquel il est rattaché. Son second rôle est d'assurer la pressurisation du circuit hydraulique en aval qui dépend de la température du fluide dans le vase d'expansion. La température du liquide dans le vase d'expansion définit la pression de référence dans le circuit. Enfin il est chargé de l'extraction des gaz présents dans le circuit (dégazage). Ces gaz peuvent être de l'air lors du remplissage du vase d'expansion en liquide de refroidissement ou encore des gaz d'échappement (apparition possible en cas de fuite du joint de culasse par exemple).

Le vase d'expansion est modélisé d'un point de vue thermo-hydraulique par un accumulateur composé de deux fluides séparés par une membrane. Les deux fluides sont du liquide de refroidissement et de l'air. Le volume total dans l'accumulateur est conservé avec une distribution de volumes qui évolue librement pour maintenir un équilibre des pressions. D'un point de vue hydraulique, les pertes de charges générées par ce type de composant sont modélisées à l'aide de l'équation définie par la modélisation des composants primaires.

#### 5.2.2.4 Modèles de chiller

Un chiller est un échangeur thermique généralement utilisé pour le refroidissement du composant primaire batterie sur des points de fonctionnement où le radiateur n’est pas suffisant [103]. Il connecte la boucle du circuit de refroidissement comportant la batterie au circuit de climatisation. En fonction des conditions d’alimentations en débits de liquide de refroidissement et de réfrigérant et de l’efficacité thermique du chiller, une quantité de chaleur est transférée au circuit de climatisation.

La modélisation hydraulique de ce composant est similaire à celle utilisée pour les composants primaires. L’équation 30 permet de simuler le comportement hydraulique d’un chiller. Concernant la modélisation du comportement thermique, un chiller est simplement modélisé par un puit de chaleur actif si la température au niveau de la batterie dépasse un seuil.

$$\frac{dT_{fluide}}{dt} = \begin{cases} \frac{-Q_{refroid. \rightarrow clim.}}{\rho \times c_p \times V} & \text{si } T_{bat} > T_{seuil} \\ 0 & \text{si } T_{bat} \leq T_{seuil} \end{cases} \quad (\text{Équation 34})$$

où  $Q_{refroid. \rightarrow clim.}$  est la quantité de chaleur transférée du circuit de refroidissement vers le circuit de climatisation,  $T_{bat}$  et  $T_{seuil}$  représentent respectivement la température au niveau de la batterie et la température d’activation du chiller.

#### 5.2.2.5 Modèles de vanne hydraulique

Une vanne hydraulique est un dispositif utilisé dans un réseau hydraulique pour un débit dans une branche du circuit. Ce type de composant secondaire permet dans une application de circuit de refroidissement d’un véhicule de contrôler la répartition de débit en fonction des points de fonctionnement dans les différentes branches. Le contrôle de la répartition des débits dans les composants primaires en fonction des points de fonctionnement permet d’assurer le respect des exigences de refroidissement du système à concevoir.

Dans cette thèse le comportement d’une vanne hydraulique est modélisé par un orifice dont le diamètre est pilotable afin de gérer le débit de la branche munie de la vanne hydraulique. Le coefficient d’écoulement de l’orifice est calculé à l’aide de l’équation suivante :

$$C_d = \frac{\dot{m}}{A\sqrt{2 \times \rho \times \Delta P}} \quad (\text{Équation 35})$$

où  $C_d$  est le coefficient d’écoulement de l’orifice,  $\dot{m}$  et  $\Delta P$  sont respectivement le débit massique et les pertes de charge au travers de l’orifice.  $A$  représente la section de passage, qui est une fonction du diamètre.

### 5.2.3 Modélisation dans GT-SUITE

GT-SUITE est un outil commercialisé par la société Gamma Technologies pour analyser des systèmes de gestion de la thermique d’un moteur. Cet outil peut être utilisé pour analyser le comportement d’un circuit de refroidissement sur cycle. Il est basé sur la dynamique des fluides en 1D en représentant l’écoulement et les transferts de chaleur dans les tuyaux et les différents composants d’un système de refroidissement [104]. GT-SUITE est caractérisé par un code basé sur des objets, facilitant la construction de modèles de simulation à partir de bibliothèques d’objets.

L’évaluation automatique d’architectures de sous-système de refroidissement générées par les outils présentés dans le Chapitre 4 via GT-SUITE nécessite d’automatiser la création des modèles thermo-hydrauliques dans l’environnement GT-SUITE. Pour cela, Gamma Technologies, a développé un package (GT-Automation) basé sur le langage Python. L’utilisateur au travers d’un script python peut automatiser les tâches liées à la construction et évaluation de modèles sous GT-SUITE. Ces tâches sont représentées sur la *Figure 79*.

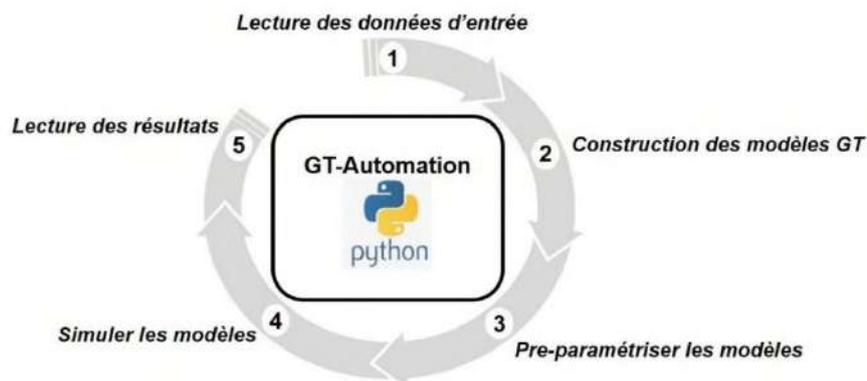


Figure 79 : étapes automatisées liées au processus de construction et évaluation de modèles sous GT-SUITE

Afin de répondre au besoin de construire automatiquement un modèle thermo-hydraulique sous GT-SUITE de chaque architecture de sous-système de refroidissement générées, un ensemble de scripts python a été développé pour automatiser les taches définies sur la *Figure 79*.

Les données d'entrée nécessaires à la construction et l'évaluation de modèle de circuit de refroidissement sous GT-SUITE sont les suivantes :

1. architecture organique de circuit de refroidissement sous forme de graphe ;
2. les objets GT-SUITE représentant le comportement de chaque composant du circuit de refroidissement ;
3. détails géométriques sur les tuyaux d'eau (i.e. longueur(s) et coude(s)) ;
4. pertes thermiques des composants primaires ;
5. caractéristiques hydrauliques et thermiques des composants primaires et secondaires.

Les données d'entrée 2 permettent de positionner, dans un modèle vide GT-SUITE, les différents objets GT-SUITE représentant le comportement physique des composants du circuit de refroidissement. Un script python spécifique à l'automatisation du positionnement des objets GT-SUITE selon des coordonnées cartésiennes a été développé. La donnée d'entrée 1 est utilisée pour relier les différents objets GT-SUITE précédemment positionnés afin de représenter l'architecture organique souhaitée. Un exemple de construction automatique de modèle thermo-hydraulique (b) représentant une architecture organique spécifique de circuit de refroidissement (a) est illustré en *Figure 80*. Enfin les données d'entrée 3, 4 et 5 sont utilisées pour paramétrer et simuler le modèle thermo-hydraulique construit. La dernière étape consiste à récupérer les résultats de la simulation numérique. Les variables d'intérêt retenues pour évaluer un circuit de refroidissement sont : la puissance électrique des pompes hydrauliques et l'évolution temporelle de la température du liquide de refroidissement.

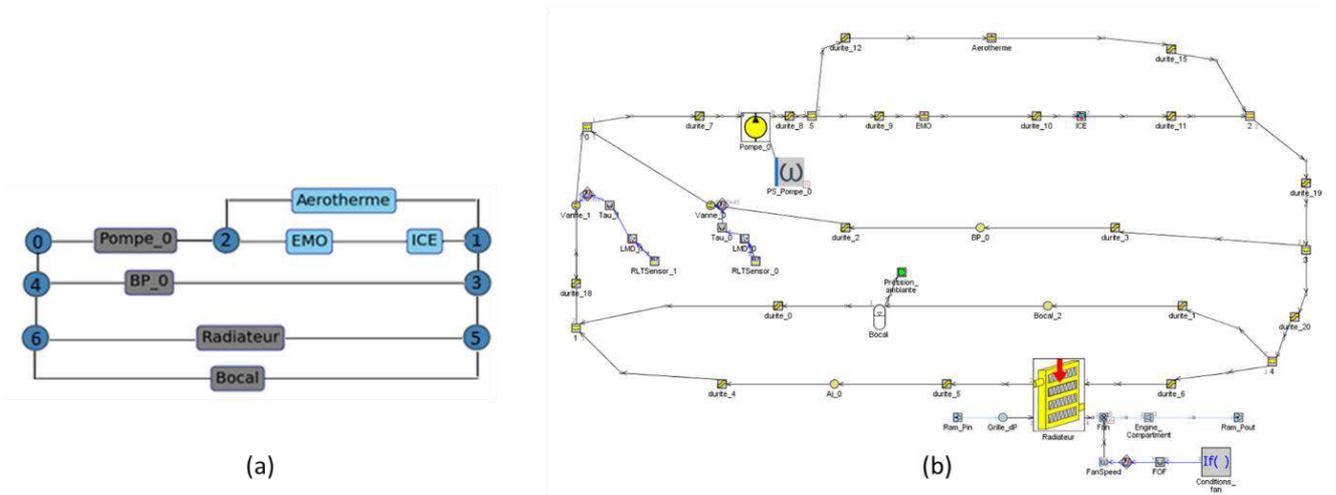


Figure 80 : Architecture de sous-système de refroidissement (a) et son modèle GT-SUITE (b)

## 5.3 Optimisation hydraulique

Cette partie détaille la méthode d’optimisation hydraulique d’architecture organique de circuit de refroidissement. La méthode présentée est basée sur le couplage d’un outil de calcul hydraulique à un algorithme d’optimisation (DIRECT). L’objectif à minimiser est la puissance demandée à la pompe pour satisfaire les exigences de refroidissement des composants primaires sur un ensemble de points de fonctionnement donné. Des coefficients de pondérations sont définis afin de favoriser les points de fonctionnement les plus utilisés. Les variables d’optimisation sont les perméabilités des branches du circuit de refroidissement.

### 5.3.1 Calcul hydraulique

Afin d’évaluer la répartition de débit dans les différentes branches d’une architecture organique de sous-système de refroidissement, un outil de calcul hydraulique a été développé dans un environnement python.

L’application des lois de Kirchhoff (loi des mailles et des nœuds) à un réseau hydraulique maillé permet de définir un système d’équations. La Figure 81 montre deux mailles possibles dans une architecture organique de circuit de refroidissement. La somme algébrique des pertes de charge dans une maille est nulle :

$$\sum \Delta P = 0 \quad (\text{Équation 36})$$

Les pertes de charge dans les différents composants primaires et secondaires sont calculées en fonction de leurs modélisations hydrauliques et du débit d’eau les traversant :

$$\Delta P_{\text{comp.}} = f(Se, Q_v) \quad (\text{Équation 37})$$

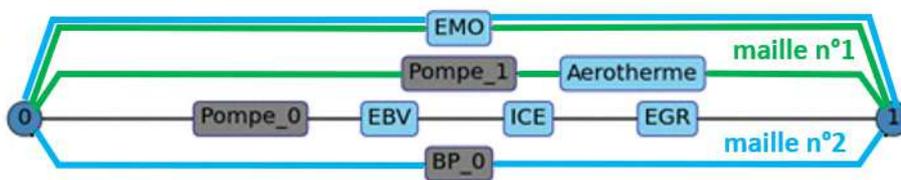


Figure 81 : Loi des mailles appliquée sur une architecture organique de sous-système de refroidissement

La seconde loi de Kirchhoff, s’applique au niveau des différents nœuds du réseau hydraulique maillé. Cette loi stipule qu’en tout nœud du réseau, la somme des débits entrants et sortants est nulle :

$$\sum_{i=1}^n Q_{v_i} = 0 \quad (\text{Équation 38})$$

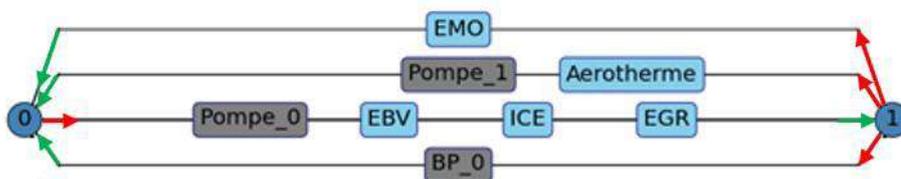


Figure 82 : Loi des nœuds appliquée sur une architecture organique de sous-système de refroidissement

L’ajout d’un jeu d’équations imposant les débits des différentes pompes qui sont présentes dans le circuit hydraulique, permet de résoudre le système d’équations formulé par les lois de Kirchhoff.

Afin de s’intégrer au processus automatisé de génération, d’optimisation et d’évaluation d’architectures systèmes, la création de modèles de simulation hydraulique par l’outil de calcul hydraulique présenté dans ce paragraphe doit être également automatisée. Un script développé dans un environnement python permet d’évaluer automatiquement une architecture organique de sous-système de refroidissement selon les différentes configurations qu’elle peut réaliser. Pour rappel, la *Figure 83* présente l’ensemble des configurations réalisables par une architecture de circuit de refroidissement. Ces configurations sont utilisées en fonction des points de fonctionnement du système. Le script python génère automatiquement le système d’équations propre à chaque configuration réalisable de la solution étudiée. La résolution de chaque système d’équations permet de déterminer la répartition de débit et les pertes de charge dans chaque branche de chaque configuration pour des conditions aux limites données.

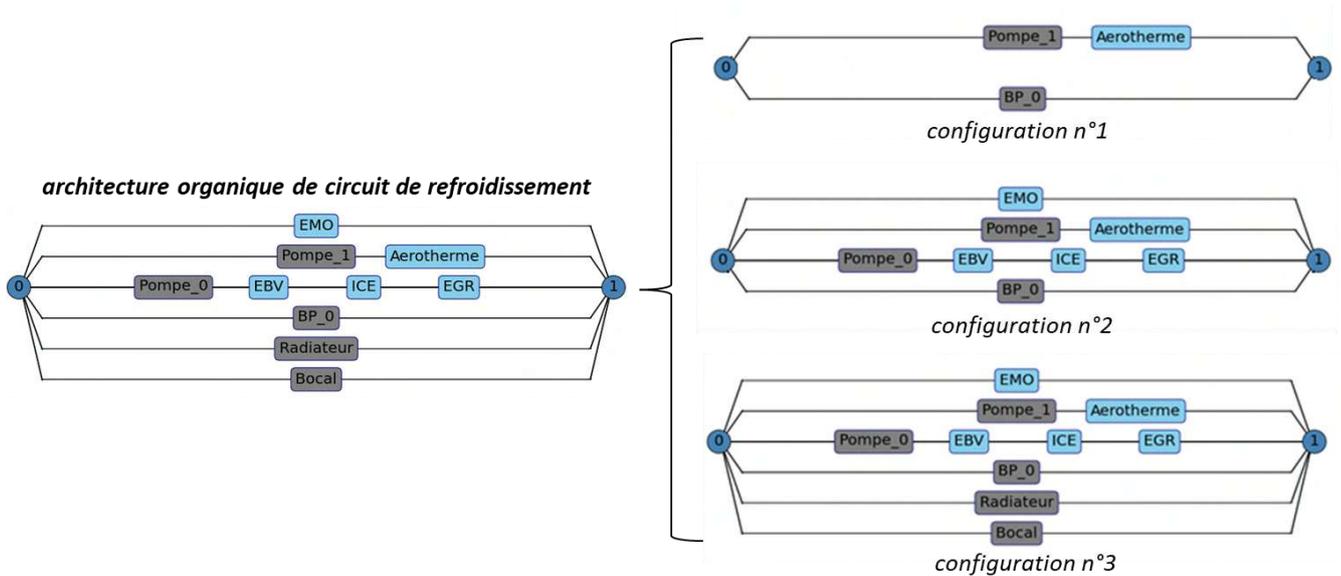


Figure 83 : Ensemble des configurations réalisables pour une architecture organique de sous-système de refroidissement donnée

### 5.3.2 Calcul des coefficients de pondération

L'optimisation hydraulique présentée dans ce chapitre est effectuée sur un ensemble de points de fonctionnement. Afin de favoriser les points de fonctionnement les plus utilisés sur un cycle d'homologation des coefficients de pondération sont définis.

La définition des coefficients de pondération est basée sur la définition des coordonnées de barycentre. La *Figure 84* schématise la définition d'un barycentre A en surfacique pour un triangle de sommets B1, B2 et B3. Les coefficients de pondération  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  et  $\alpha_3$  peuvent être définis pour les trois sommets en fonction des ratios de surfaces définis dans la *Table 8*.

Cette méthode est appliquée à un nuage de points de fonctionnement (un exemple de maillage possible est donné en *Figure 61*) pour calculer les coefficients de pondération en fonction de l'utilisation d'un système HEV sur cycle d'homologation. Les évolutions temporelles des variables d'états caractérisant les points de fonctionnement étudiés sont issues de la définition de la loi de gestion du système HEV sur le cycle d'homologation choisi. A chaque pas de temps du cycle, les valeurs prises par les différentes variables d'états permettent de positionner un point dans le nuage de points de fonctionnement (exemple du point barycentre A sur la *Figure 84*). A partir d'une triangulation de Delaunay [105], qui est une des méthodes les plus connues et les plus utilisées pour générer un maillage [106], le nuage de points de fonctionnement est maillé. Le maillage obtenu permet de sélectionner à chaque pas de temps, les points les plus proches du point précédemment positionné dans le nuage de points de fonctionnement. Selon les dimensions du nuage de points, le nombre nécessaire de points à sélectionner est définie (en 3D quatre points sont nécessaires contre seulement trois en 2D).

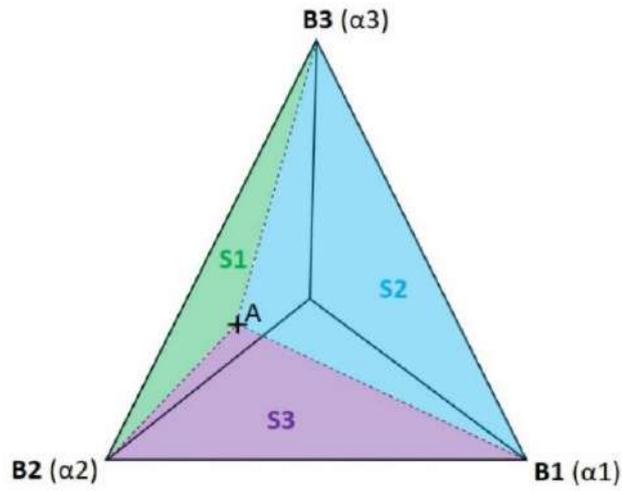


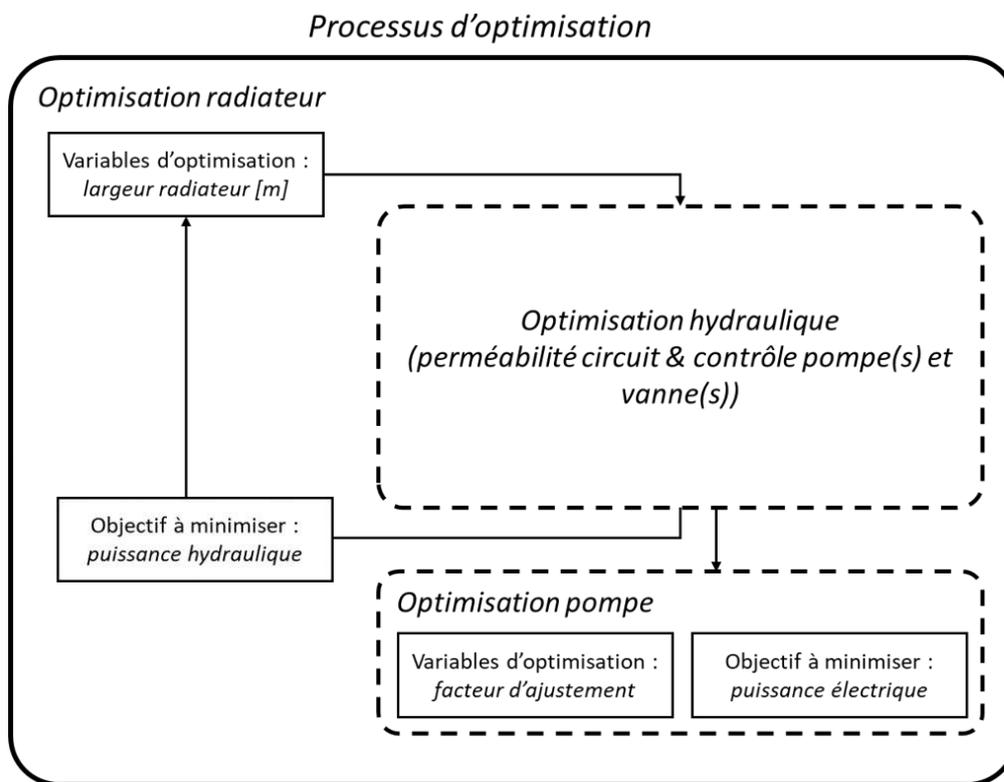
Figure 84 : Barycentre A d'un triangle (en surfacique)

Surfacique (triangle)	Volumique (trièdre)
$S = S1 + S2 + S3$	$V = V1 + V2 + V3 + V4$
$\alpha1 = \frac{S1}{S}$	$\alpha1 = \frac{V1}{V}$
$\alpha2 = \frac{S2}{S}$	$\alpha2 = \frac{V2}{V}$
$\alpha3 = \frac{S3}{S}$	$\alpha3 = \frac{V3}{V}$
	$\alpha4 = \frac{V4}{V}$

Table 8 : Définition des coefficients de pondération en surfacique et volumique

### 5.3.3 Optimisation hydraulique

Cette partie permet de traiter l’optimisation des pertes de charges dans un circuit de refroidissement et le dimensionnement des composants secondaires radiateurs et pompes sur un ensemble de points de fonctionnement. Le processus d’optimisation global est présenté sur la *Figure 85*. L’optimisation du dimensionnement du radiateur est couplée à l’optimisation hydraulique du circuit de refroidissement. A partir de la solution optimale obtenue de ce couplage, l’optimisation du dimensionnement des pompes électrique est effectuée.



*Figure 85 : Processus d’optimisation hydraulique d’architectures organiques de sous-système de refroidissement*

Un algorithme génétique est utilisé pour optimiser le dimensionnement du radiateur. La variable d’optimisation est sa largeur et donc indirectement la surface d’échange thermique. Pour une largeur de radiateur testée, la modélisation hydraulique de ce composant permet de définir une cartographie des performances thermiques. L’optimisation hydraulique de l’architecture organique de circuit de refroidissement est ensuite lancée. Le processus d’optimisation hydraulique est présenté sur la *Figure*

86. L’optimisation est effectuée en deux temps, premièrement au niveau des branches de l’architecture puis ensuite au niveau de l’architecture elle-même. Considérant les branches, un algorithme DIRECT permet de déterminer les perméabilités optimales des composants afin de minimiser la puissance hydraulique sur l’ensemble des points de fonctionnement pondérés par leur fréquence d’utilisation.

L’équation suivante permet de calculer la puissance hydraulique :

$$P_{hydraulic} = Q_v \times \Delta P \quad (\text{Équation 39})$$

où  $P_{hydraulic}$  est la puissance hydraulique pour un débit volumique  $Q_v$  et des pertes de charge  $\Delta P$ .

La formulation du problème d’optimisation au niveau des branches de l’architecture peut s’écrire de la façon suivante :

$$\min_{Se_1, \dots, Se_p} P_{hydraulic} = \sum_{k=0}^N \alpha_k Q_{v_k} \times \Delta P_k \quad (\text{Équation 40})$$

$$g_k(Q_{v_j}) \leq 0 ; \forall j \in [1, \dots, p] \text{ et } \forall k \in [1, \dots, N] \quad (\text{Équation 41})$$

$$h_k(Se_j) \leq 0 ; \forall j \in [1, \dots, p] \text{ et } \forall k \in [1, \dots, N] \quad (\text{Équation 42})$$

$$l_k(Se_j) \geq 0 ; \forall j \in [1, \dots, p] \text{ et } \forall k \in [1, \dots, N] \quad (\text{Équation 43})$$

où  $Q_{v_k}$  est le débit calculé au niveau de la branche permettant à minima d’avoir le débit spécifié pour le point de fonctionnement  $k$  pour chaque composant présent sur la branche. Les fonctions  $g_k(Q_{v_j})$  sont les contraintes portant sur le respect des exigences de refroidissement des composants sur le point de fonctionnement  $k$  (le débit dans le composant d’indice  $j$  doit avoir à minima le débit  $Q_{v_j}$  sur le point  $k$ ). Les  $Se_i$ , pour  $i$  appartenant à l’intervalle  $[1, \dots, p]$  correspondent aux perméabilités des composants présents sur la branche.  $\Delta P_k$  sont les pertes de charge au niveau de la branche pour le point de fonctionnement  $k$ .

Les valeurs des perméabilités optimales identifiées traduisent les potentiels besoins de by-pass au niveau des composants. Comme illustré sur l’exemple de la *Figure 86*, en fonction de l’écart entre les perméabilités initiales et optimales obtenues des composants des by-pass interne ou externe sont définis. Des by-pass internes sont

utilisés lorsque l'écart est relativement faible, la topologie de l'architecture reste dans ce cas inchangée.

Au niveau de l'architecture, l'optimisation hydraulique est également basée sur l'algorithme DIRECT. Similairement à la stratégie d'optimisation au niveau des branches, les variables d'optimisation sont les perméabilités des branches. Les valeurs initiales de ces variables sont issues du premier niveau d'optimisation au niveau des branches. L'objectif à minimiser est également la puissance hydraulique pondérée en fonction de l'utilisation des points de fonctionnement. La formulation du problème d'optimisation est similaire à celle décrite précédemment. Chaque point de fonctionnement est associé à une configuration réalisable par l'architecture à optimiser. L'outil de calcul hydraulique développé permet de déterminer la répartition de débit dans les branches et la puissance hydraulique afin de respecter les contraintes sur les exigences de refroidissement des composants. Pour chaque point de fonctionnement la puissance hydraulique pondérée par son utilisation est calculée. Les valeurs optimales de perméabilité des branches permettent de traduire, à l'instar de l'optimisation des perméabilités au niveau des composants, le besoin de by-pass ou bien d'ajutage. Une perméabilité optimale d'une branche supérieure à sa valeur initiale traduit le besoin d'un by-pass, l'inverse nécessite un ajutage.

La dernière étape du processus global d'optimisation hydraulique d'une architecture organique de circuit de refroidissement est le dimensionnement des pompes électriques. Un algorithme génétique est utilisé pour optimiser la puissance électrique des pompes sur l'ensemble des points de fonctionnement. La variable d'optimisation est un facteur de mise à l'échelle permettant de simuler, via la modélisation hydraulique proposée de pompe électrique, plusieurs tailles de pompe. Pour une taille de pompe testée, la modélisation hydraulique permet de générer son réseau de caractéristiques et courbes de rendement. L'optimisation hydraulique du circuit de refroidissement a permis de déterminer les débits demandés aux pompes sur chaque point de fonctionnement testés afin de respecter les exigences de refroidissement des composants. Les pertes de charges sont également calculées. La puissance électrique des pompes est calculée à partir des couples de débits demandés et pertes de charges sur les points de fonctionnement ainsi que les caractéristiques et courbes de rendement des pompes.

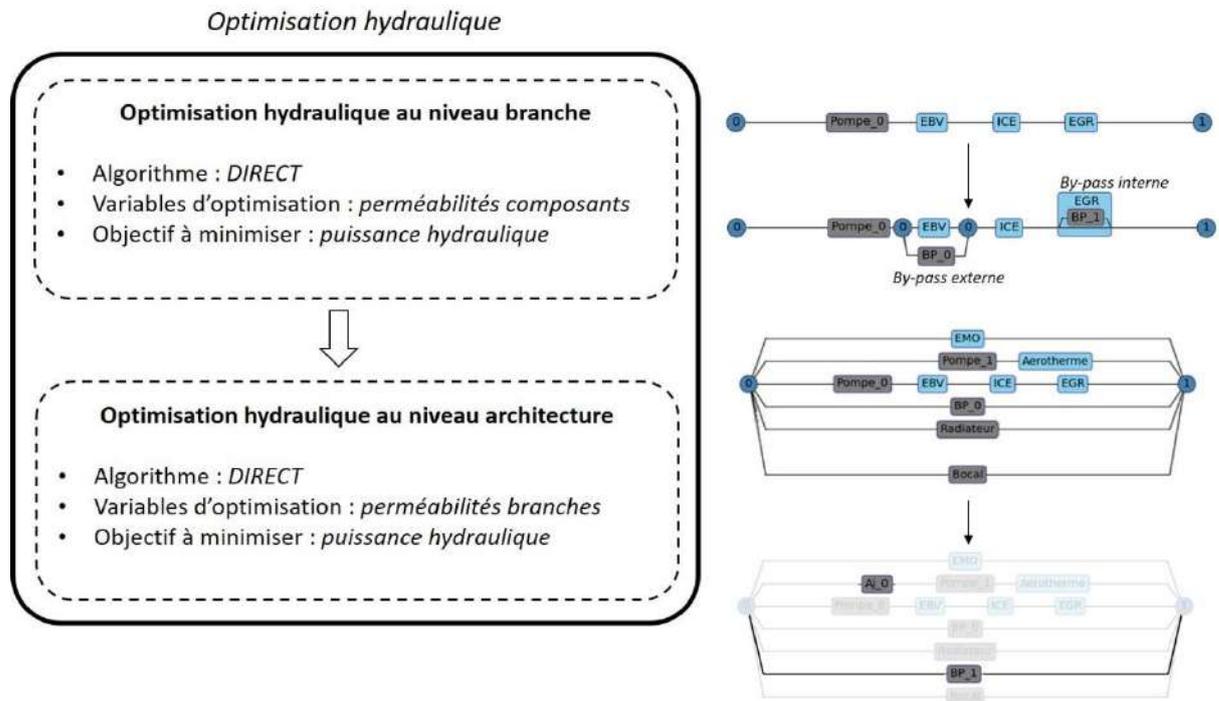


Figure 86 : Processus d’optimisation des pertes de charges hydraulique au sein d’une architecture de sous-système de refroidissement

### 5.3.4 Etude de différents algorithmes d’optimisation

Il existe une diversité importante d’algorithmes d’optimisation disponibles pour résoudre les problèmes d’optimisation liés la conception d’un système énergétique. Entner *et al.* [107] propose une procédure de sélection permettant d’aider dans le choix de l’algorithme le plus adapté au problème d’optimisation à résoudre. La procédure présentée définit en particulier un jeu de critère pour évaluer différents algorithmes d’optimisation. Les critères retenus pour l’évaluation de différents algorithmes d’optimisation pour résoudre le problème d’optimisation hydraulique précédemment présenté sont les suivants :

- optimum trouvé
- nombre d’itérations
- temps de convergence
- écart-type (obtenu après plusieurs résolutions du problème d’optimisation avec des valeurs initiales différentes)

L’étude de comparaison de différents algorithmes d’optimisation a été réalisée sur un échantillon de 14 architectures organiques de circuit de refroidissement. Les algorithmes testés pour résoudre le problème d’optimisation hydraulique sur les 14 candidats sont : COBYLA, CMAES, algorithme génétique, ESCH et DIRECT. Concernant le critère portant sur l’écart-type, le problème d’optimisation hydraulique pour chaque solution d’architecture testée a été lancé dix fois. L’écart-type permet d’évaluer la dispersion des optimums trouvés par un algorithme d’optimisation après plusieurs résolutions du problème d’optimisation avec des valeurs initiales différentes.

Les Figure 87 à Figure 90 montrent l’évaluation des différents algorithmes d’optimisation testés selon le jeu de critère défini. Les résultats montrent que l’algorithme DIRECT est le meilleur compromis entre temps de calcul et qualité de l’optimum trouvé sur l’échantillon d’architectures testées.

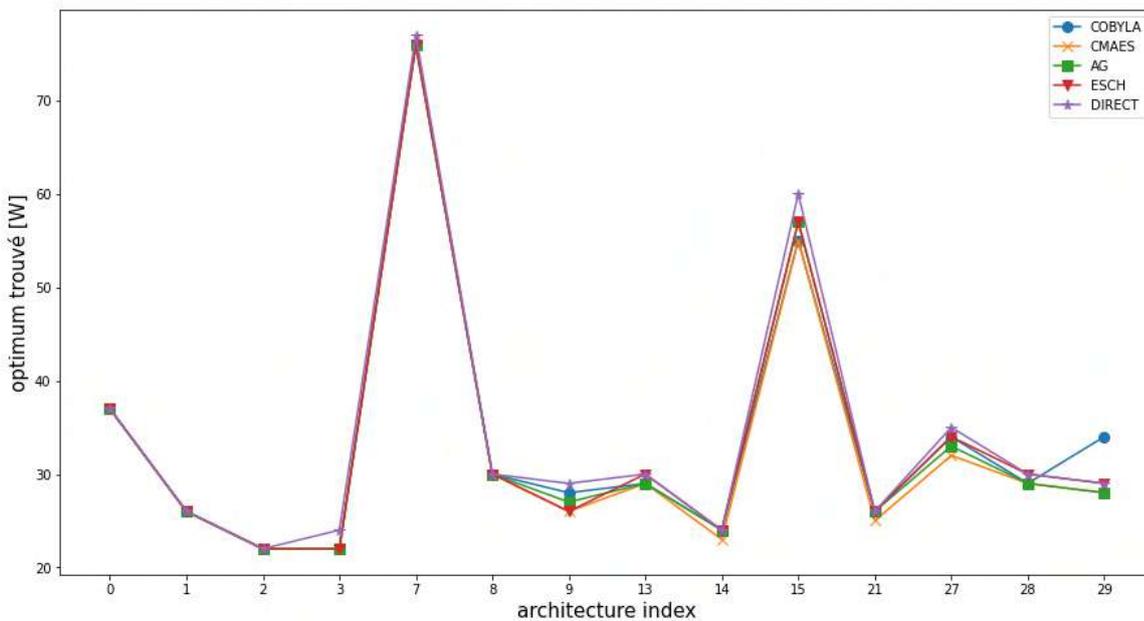


Figure 87 : Optimums trouvés par les différents algorithmes d’optimisation étudiés

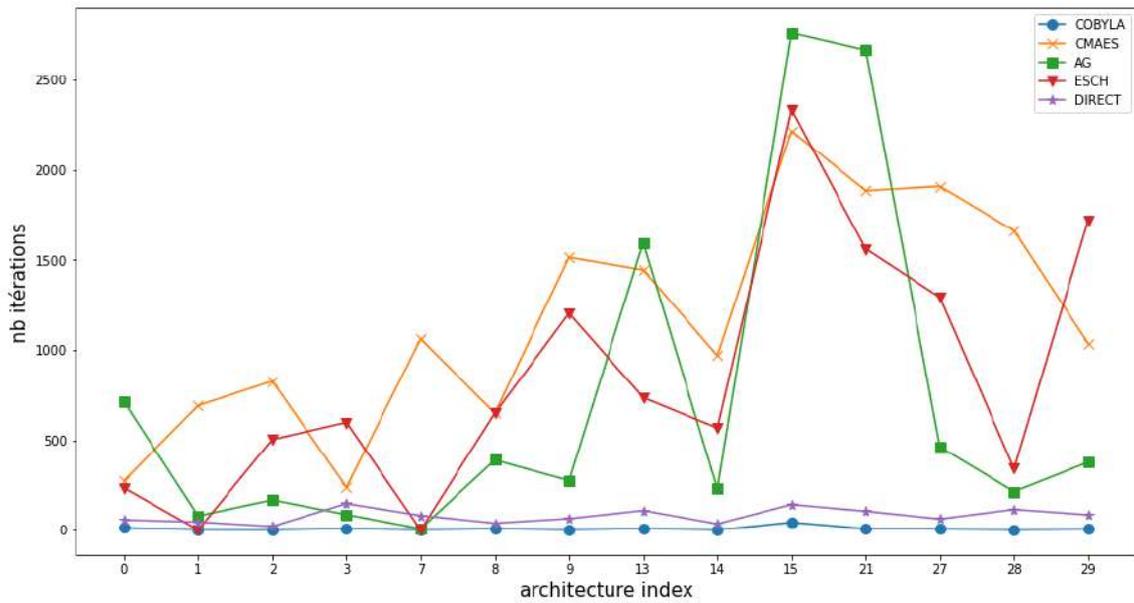


Figure 88 : Nombre d’itération pour les différents algorithmes d’optimisation étudiés

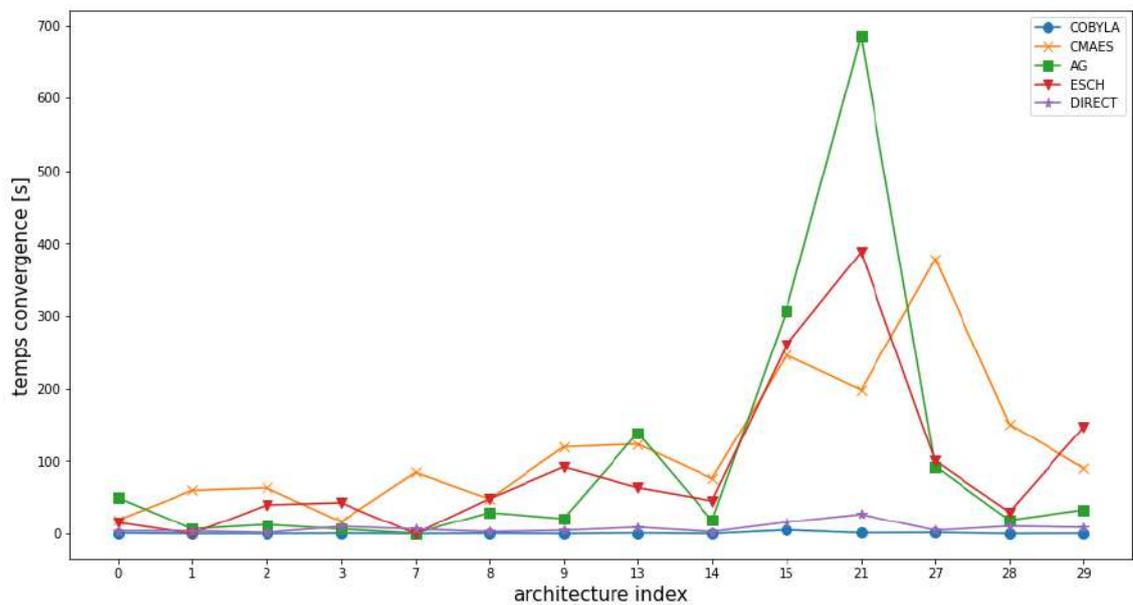


Figure 89 : Temps de convergence pour les différents algorithmes d’optimisation étudiés

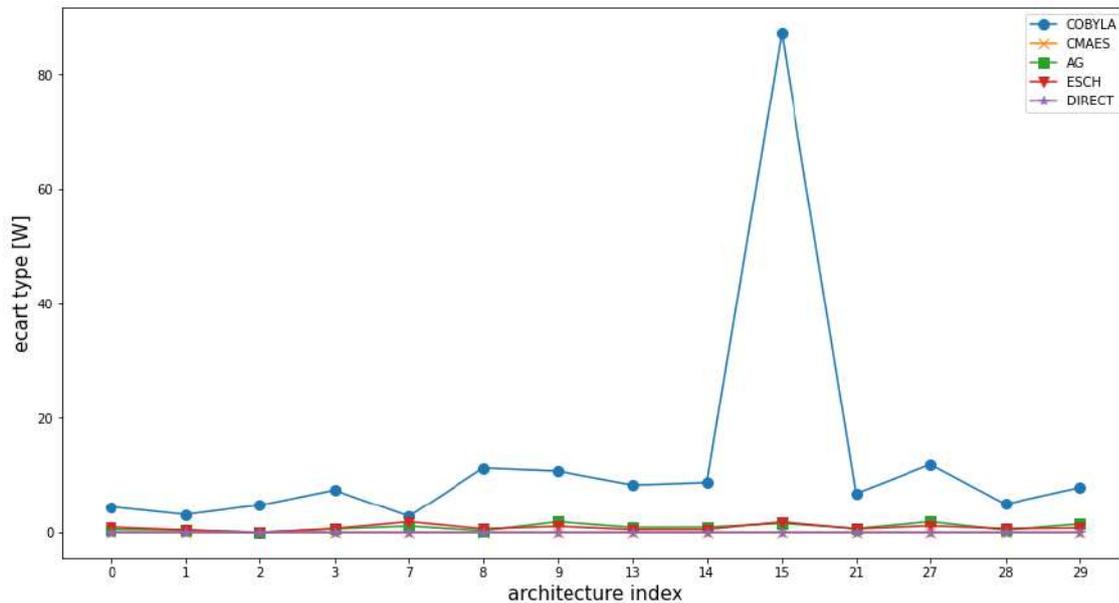


Figure 90 : Ecart type calculés par les différents algorithmes d’optimisation étudiés

### 5.3.5 Permutation de composants sur branche hydraulique

La génération d’architectures organiques de sous-systèmes de refroidissement présentée dans le Chapitre 4 ne prend pas en compte les permutations possibles des composants sur les branches. Pour générer cette diversité de solutions supplémentaires, un algorithme a été développé pour permuter les composants d’une branche d’une solution d’architecture organique optimisée hydrauliquement. La première étape est de générer la combinatoire des permutations possibles pour une architecture organique de circuit de refroidissement donnée. Ensuite pour chaque permutation possible, une nouvelle solution est générée. Un exemple de trois solutions filles déduites d’une solution mère par permutation de composants est présenté sur la Figure 91.

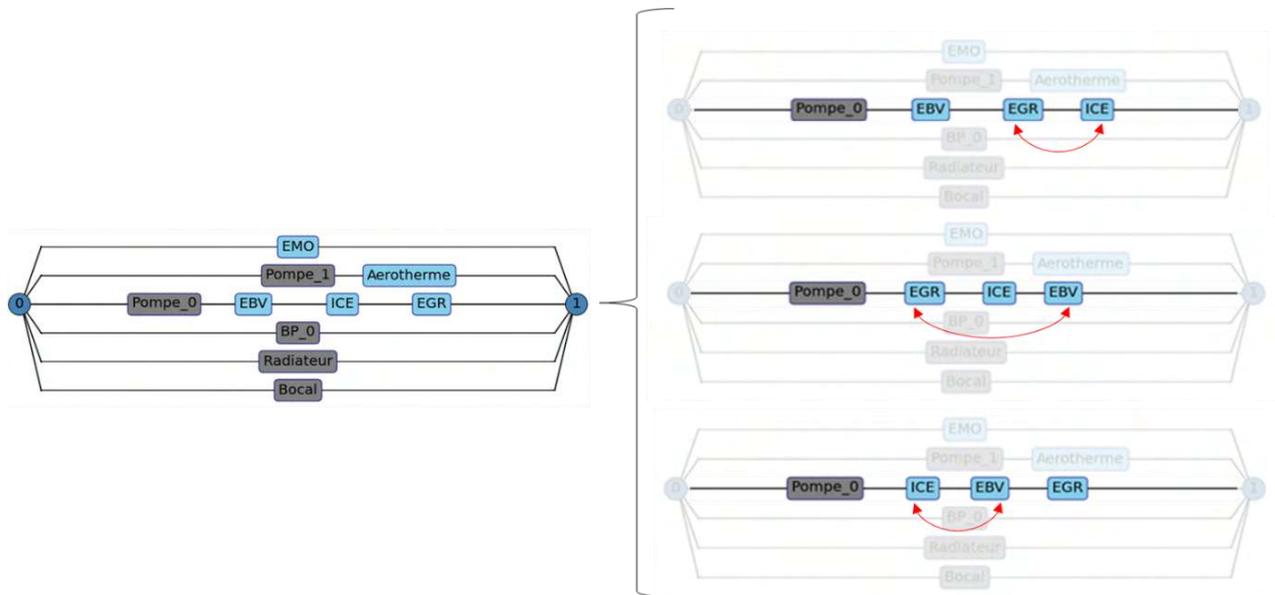


Figure 91 : Permutation de composants sur une branche d’une architecture de sous-système de refroidissement

### 5.3.6 Ordonnancement de branchement

Les architectures organiques de circuit de refroidissement générées peuvent contenir des nœuds hydrauliques à plus de trois branches. Un exemple de ce type d’architecture organique est donné sur la Figure 92. Dans le cadre des travaux de cette thèse, les architectures organiques de circuit de refroidissement générées ne doivent contenir que des nœuds hydrauliques à trois branches (matérialisé par une jonction Té). Sur l’exemple de la Figure 92, un ordonnancement de branchement doit être effectué afin de se ramener à une architecture contenant uniquement des nœuds hydrauliques à trois branches.

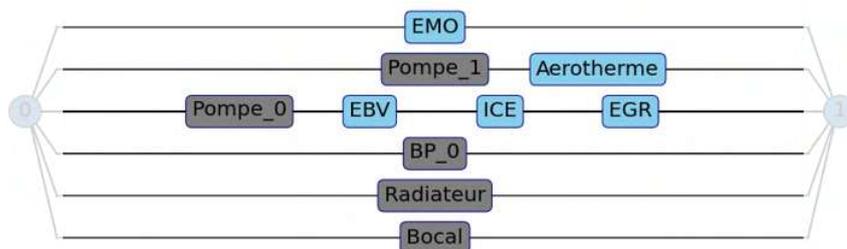


Figure 92 : Exemple d’architecture de sous-système de refroidissement avant ordonnancement de branchement

La première étape de l'algorithme d'ordonnement de branchement est la détection des nœuds hydrauliques nécessitant un ordonnancement (nœud à plus de trois branches). Les branches connectées à chaque nœud sont ensuite déterminées, puis un classement de ces branches en fonction de leur débit maximal calculé sur l'ensemble des points de fonctionnement. Les deux branches possédant les débits les plus élevés sont considérées comme des branches principales. La *Table 7* est un exemple de résultat d'application de ces étapes de l'algorithme d'ordonnement pour l'exemple d'architecture organique donné en *Figure 92*. Un arbre de décision est utilisé pour générer l'ensemble des possibilités de connecter les branches secondaires entre les deux branches principales définies. Les branches du type by-pass sont traitées séparément après ordonnancement des autres branches secondaires. Les solutions sont représentées mathématiquement par un vecteur de dimension égale au nombre de branches connectées au nœud nécessitant un ordonnancement. Un exemple de vecteur représentant une solution d'ordonnement pour l'architecture traitée en exemple dans ce paragraphe est illustré sur la *Figure 94*. Deux contraintes ont été définies dans l'arbre de décision. La première consiste à regrouper les branches selon les configurations où elles sont présentes (la colonne « configurations » de la *Table 9* donne pour chaque branche les indices des configurations où elles sont présentes). La seconde stipule que chaque branche doit inclure ou être incluse dans les configurations des précédentes branches déjà positionnées. Le vecteur donnant les configurations de chaque branche secondaire (hors by-pass) pour la solution de la *Figure 94* est le suivant : [ **2,3 2,3 1,2,3 3 3** ]

Enfin la dernière étape de l'algorithme d'ordonnement de branchement consiste à positionner les branches du type by-pass. Pour chaque by-pass une recherche des branches incluant les configurations du by-pass à positionner est effectuée. A titre d'exemple, le by-pass numéro 5 (présent sur les configurations 1 et 2) de la *Table 9* se connecte à la branche numéro 4 (présente sur les configurations 1, 2 et 3).

numéro branche	branche	débit max [L/h]	configurations
1	[0, 'Pompe_0', 'EBV', 'ICE', 'EGR', 1]	6130	2,3
2	[0, 'Radiateur', 1]	3940	3
3	[0, 'EMO', 1]	1430	2,3
4	[0, 'Aj_0', 'Pompe_1', 'Aerotherme', 1]	685	1,2,3
5	[0, 'BP_0', 1]	500	1,2
6	[0, 'Bocal', 1]	210	3

Table 9 : Exemple de table d’ordonnancement de branchement d’architecture de sous-système de refroidissement

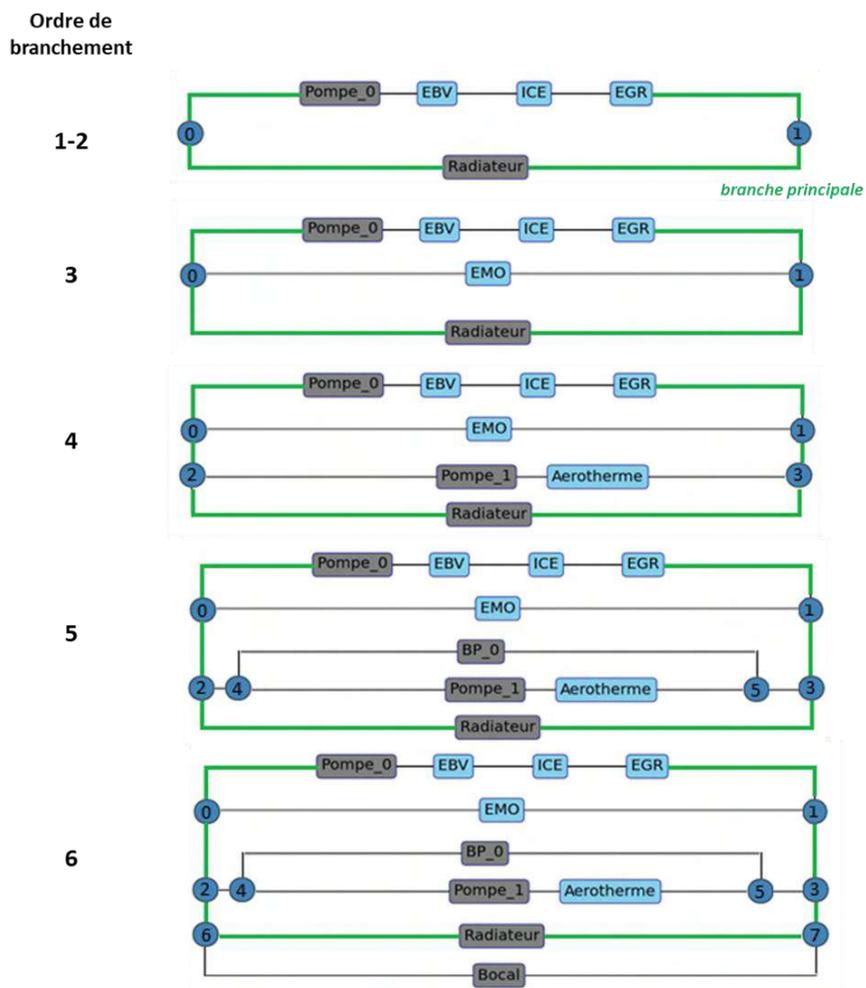


Figure 93 : Exemple du processus d’ordonnancement de branchement d’architecture de sous-système de refroidissement

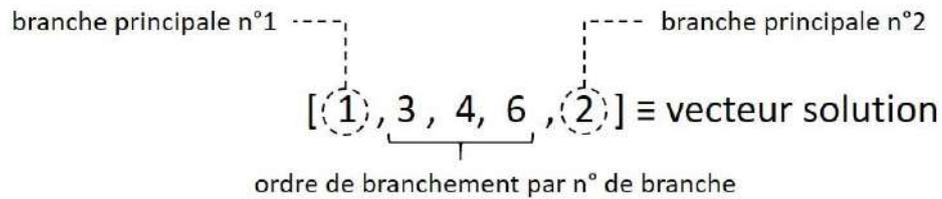


Figure 94 : Représentation du vecteur solution utilisée dans le concept d'arbre de décision appliqué à la génération de solutions d'ordonnancement de branchement

L'ordonnancement défini par l'algorithme présenté dans ce paragraphe est traduit sous un formalisme interprétable par l'outil d'optimisation 3D chargé de tracer géométriquement un réseau hydraulique à partir d'architecture organique. Le formalisme utilisé est présenté sur la Figure 95. Une décomposition hiérarchique des branches est effectuée au niveau de chaque nœud hydraulique, de façon à obtenir deux branches principales et une branche secondaire (matérialisant un branchement ou un piquage, cf Figure 104).

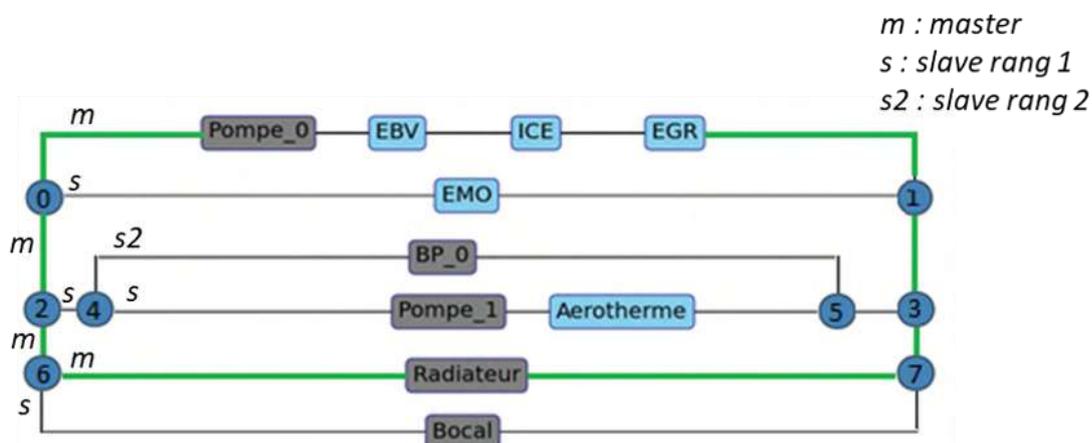


Figure 95 : Exemple de description de branchement pour chaque nœud hydraulique « côté gauche » pour outil d'optimisation 3d

### 5.3.7 Positionnement de vanne(s) hydraulique(s)

L’ordonnancement de branchement au niveau des nœuds hydrauliques aboutit aux topologies finales des architectures organiques de circuit de refroidissement. Les configurations réalisables par les architectures organiques renseignent sur les branches qui sont déconnectées sur des points de fonctionnement spécifiques. L’architecture organique positionnée à gauche de la *Figure 96* possède une liste de branches à déconnecter, elles sont matérialisées par la présence d’une vanne hydraulique. La stratégie de positionner une vanne hydraulique sur chaque branche ayant le besoin d’être déconnecté sur un ensemble de points de fonctionnement ne minimise pas le nombre total de vannes utilisées.

Afin d’optimiser le nombre de vannes utilisées pour satisfaire les besoins de déconnexions de l’ensemble des branches d’une architecture, un algorithme de recherche de vanne a été développé (cf Annexe D). Cet algorithme est illustré par un exemple d’application sur la *Figure 96*. Sur cet exemple trois vannes sont nécessaires pour réaliser l’ensemble des configurations réalisables (contre cinq initialement). Par exemple, les deux branches contenant le radiateur et le vase d’expansion sont présentes sur les mêmes points de fonctionnement (configurations lorsque le moteur thermique est chaud). La branche reliant les nœuds hydrauliques 0 et 6 permet de déconnecter les deux branches précédentes. L’algorithme positionne une vanne sur cette dernière branche (à noter que la branche reliant les nœuds hydrauliques 1 et 7 aurait pu être également utilisée).

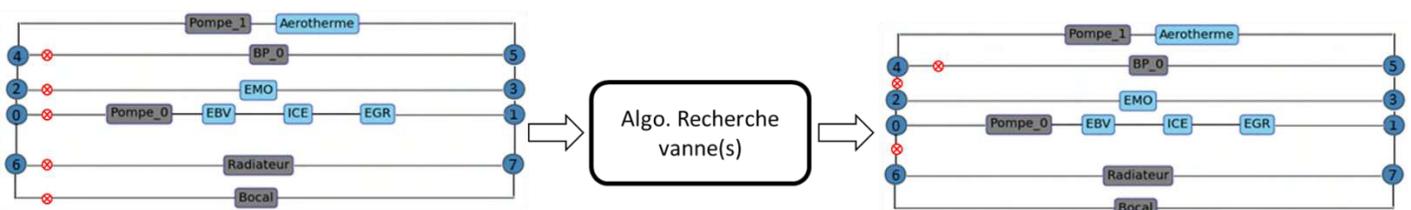


Figure 96 : Algorithme de recherche de vanne(s) hydraulique(s)

### **5.3.8 Corrélation résultats optimisation hydraulique et outil métier Renault (AMESim)**

L'outil métier Renault pour simuler le comportement thermo-hydraulique en phase amont d'architectures de circuit de refroidissement est AMESim. Ces modèles thermo-hydrauliques construits avec AMESim détaillent la partie moteur thermique, le circuit d'huile, le circuit de refroidissement et l'environnement sous capot. Le bloc moteur est discrétisé en masses métalliques afin d'évaluer des transitoires thermiques sur cycle. La partie moteur thermique comporte également un bloc modélisant la combustion sous forme de cartographies donnant les températures de gaz ainsi que les coefficients d'échanges thermiques aux parois en fonction du point de fonctionnement du moteur. La modélisation thermo-hydraulique du circuit d'huile permet de prendre en compte la dépendance de la viscosité à la température. Les débits d'huile sont tabulés en fonction du régime moteur. Les données d'entrée du modèle sont les évolutions temporelles du régime et du couple moteur thermique ainsi que la vitesse du véhicule. Concernant la partie contrôle du circuit de refroidissement, la commande de la pompe électrique est déterminée en fonction des besoins spécifiques pour chaque composant en débit pour chaque point de fonctionnement du moteur thermique. Les besoins de débit de refroidissement sont modélisés par des cartographies de demande de débit en fonction du point de fonctionnement du moteur considéré. A chaque pas de temps la demande de débit est calculée pour chaque composant, l'organe qui représente le besoin de débit le plus important (ramené à la pompe pour prendre en compte les pertes de charge du circuit) détermine l'activation de la commande de la pompe électrique.

L'outil d'optimisation hydraulique développé dans le cadre de cette thèse permet de déterminer les demandes de débits pompes optimales pour répondre aux exigences d'un circuit de refroidissement pour un ensemble de points de fonctionnement. La *Figure 97* montre les débits pompe calculés à partir de l'outil d'optimisation hydraulique pour chaque point de fonctionnement du nuage de points. L'utilisation des mêmes données d'entrée que celles utilisées dans le modèle AMESim permet à chaque pas de temps d'interpoler dans le maillage présenté sur la *Figure 97* afin de déterminer la trace temporelle de débit de pompe. Les pertes de charges calculées à l'aide de l'outil d'optimisation hydraulique pour chaque point de fonctionnement sont utilisées pour calculer la puissance hydraulique.

Enfin, une comparaison sur cycle WLTC des deux outils présentés ci-dessus est réalisée et présentée sur les *Figure 98* et *Figure 99*. Les résultats montrent une bonne corrélation à la fois sur le débit pompe et la puissance hydraulique. Ces résultats valident l'outil d'optimisation hydraulique développé dans cette thèse en tant qu'outil d'aide à la décision à utiliser en phase amont de projet pour proposer des choix pertinents d'architectures de sous-système de refroidissement.

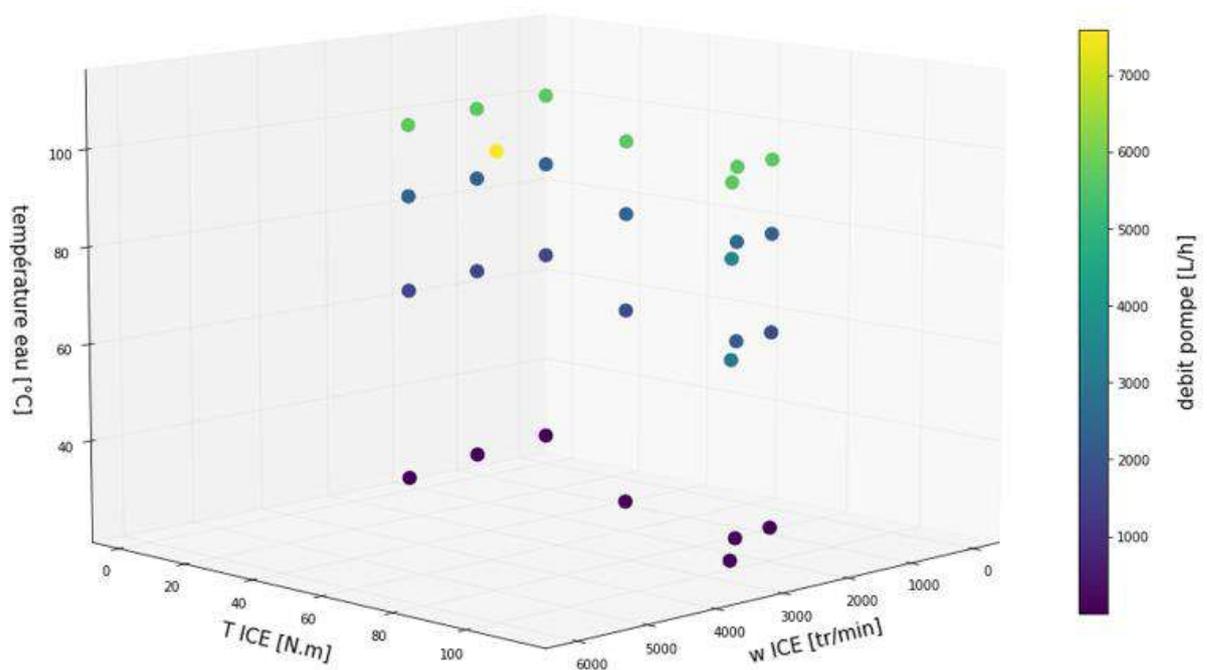


Figure 97 : Exemple de cartographie 3D de débit de pompe pour un nuage de points de fonctionnement

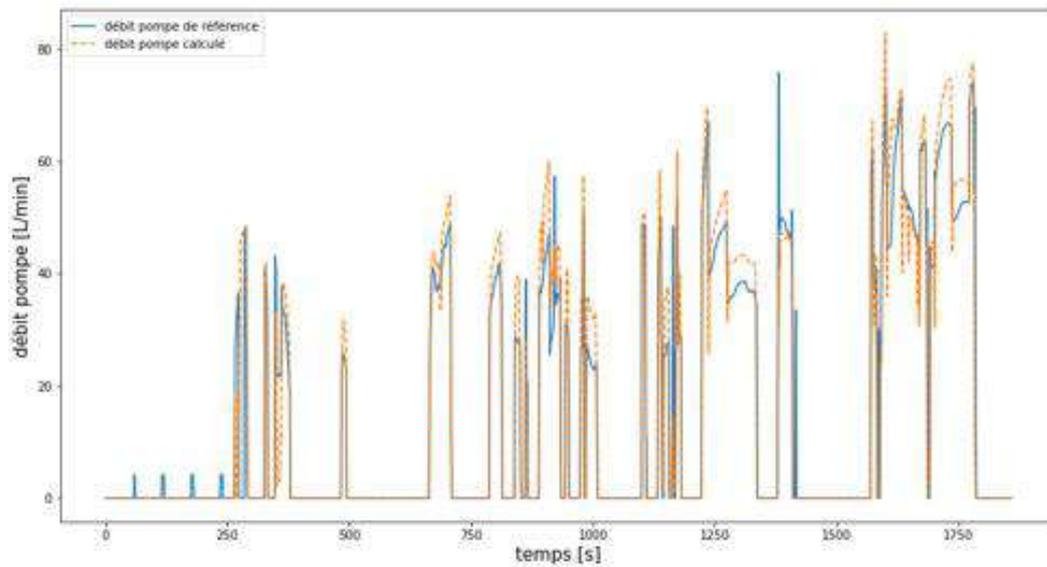


Figure 98 : Corrélation sur cycle WLTC entre débit pompe calculé via l’outil d’optimisation hydraulique et outil métier Renault (AMESim) sur architecture de sous-système de refroidissement Renault

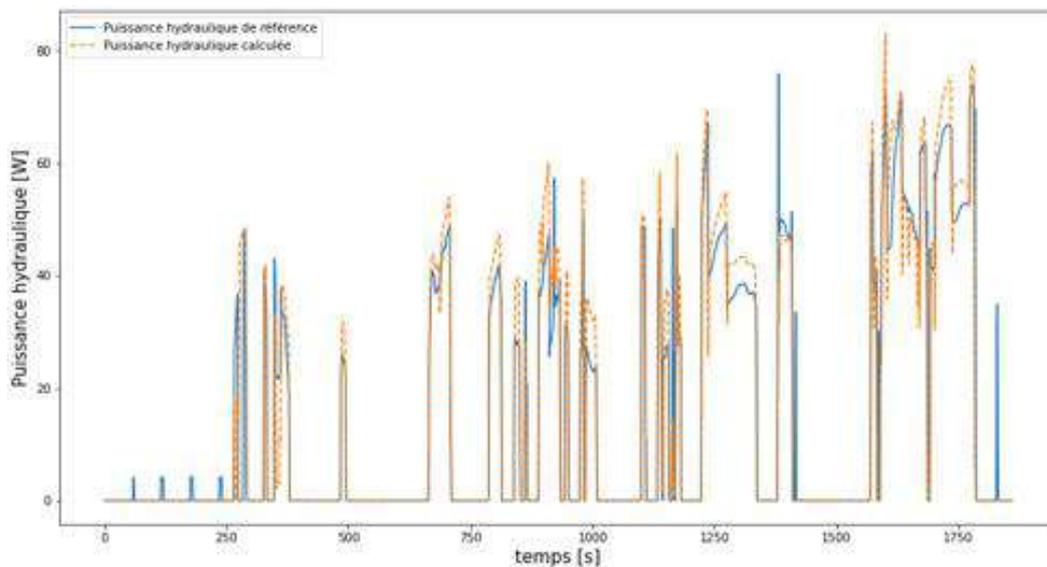


Figure 99 : Corrélation sur cycle WLTC entre puissance hydraulique calculée via l’outil d’optimisation hydraulique et outil métier Renault (AMESim) sur architecture de sous-système de refroidissement Renault

## 5.4 Optimisation 3D

DesslA [108], est une entreprise qui a développé une plateforme basée sur l’intelligence artificielle explicable visant à supporter l’ingénieur dans les tâches de conception de système. Les assistants virtuels développés se font en deux temps, tout d’abord par la structuration du savoir puis ensuite par l’explication de la façon dont les personnes travaillent entre eux. L’objectif est d’automatiser les tâches.

La première étape consiste à positionner les différents composants de la chaîne de traction dans un volume alloué. Sur la base du positionnement 3d des composants, un assistant virtuel trace un réseau hydraulique. Le réseau hydraulique est tracé pour une architecture organique de circuit de refroidissement.

L’assistant virtuel est composé d’un algorithme de routage basé sur l’algorithme Dijkstra [109] (identification du chemin le plus court entre deux points d’un réseau) couplé à un algorithme génétique (pour définir la position optimal des jonctions T). Des contraintes de non-interférence entre tuyaux tracés et composants sont prises en compte.

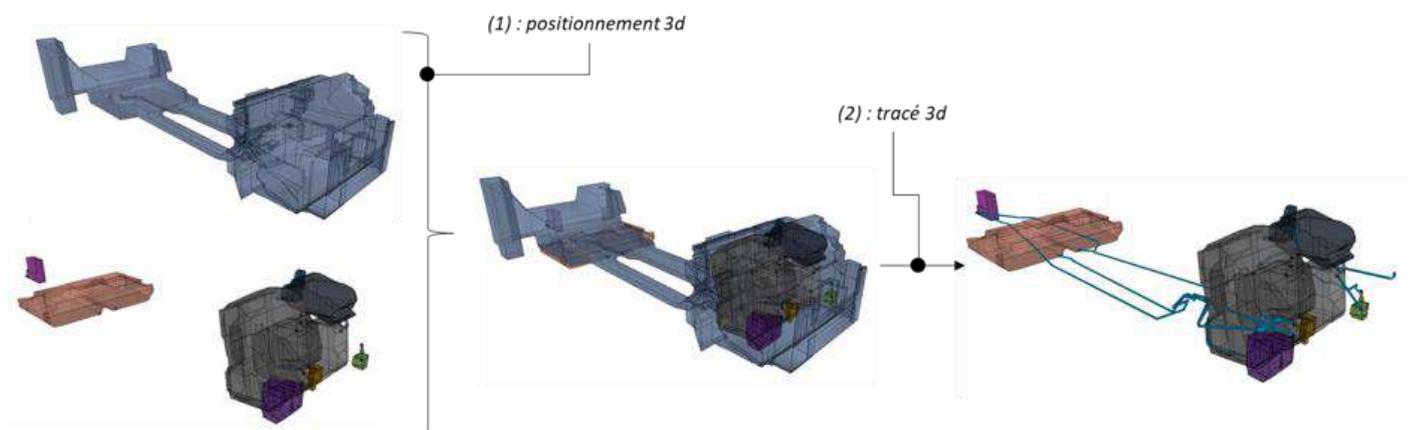


Figure 100 : Etapes de positionnement 3d des composants et tracé 3d de réseaux hydrauliques

L’ordre d’ordonnancement est interprété par l’algorithme de routage afin de relier les composants et les jonctions entre eux. Une liaison entre deux éléments est tracée en deux étapes, illustrées sur la Figure 101. La première étape consiste à tracer dans un premier temps la liaison directe (en rouge sur la Figure 101), puis ensuite, les points

d'interférence avec les composants sont détectés (les étoiles). L'algorithme Dijkstra permet d'identifier le chemin le plus court sur la surface externe du composant maillé, reliant ainsi les deux points d'interférences. La seconde étape cherche à lisser les lignes brisées tracées en appliquant un rayon de courbure inférieur ou égal à un maximum imposé. Un exemple de liaison tracée entre la batterie et le chiller est présentée en Figure 102.

L'algorithme génétique vise à chercher la position optimale des jonctions hydrauliques. La variable d'optimisation est un paramètre compris entre 0 et 1, représentant l'abscisse curviligne. L'algorithme génétique cherche les points d'accroche sur les liaisons tracées via l'algorithme de routage des branches en minimisant la longueur (avoir l'abscisse curviligne la plus courte).

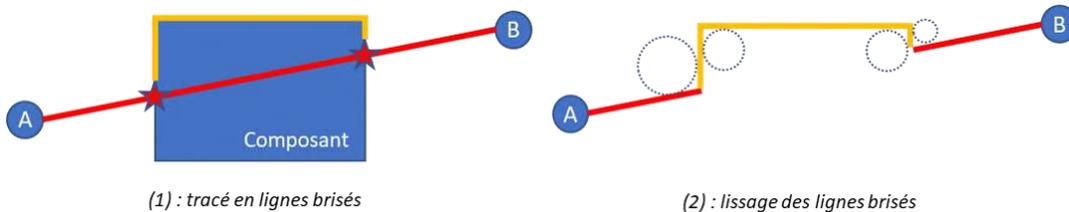


Figure 101 : Tracé en lignes brisés (1) et lissage (2) de liaison hydraulique entre deux points

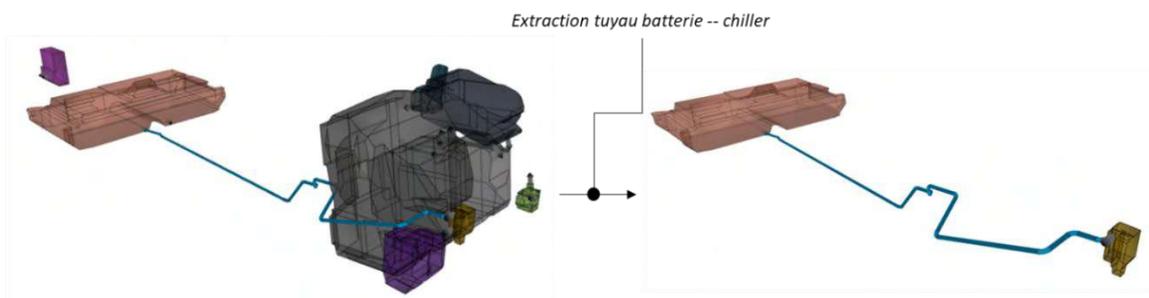


Figure 102 : Exemple d'extraction d'une liaison hydraulique entre les composants batterie et chiller

Les algorithmes développés en partenariat avec DessIA ont été testés et validés sur un cas d'application Renault. Le critère de validation retenu est la longueur cumulée de tuyaux de l'architecture de circuit de refroidissement. Les longueurs totales de

référence et calculée selon les algorithmes d’optimisation 3d sont présentées en *Table 10*. Un écart de 3.3% est constaté.

	Longueur de référence [m]	Longueur calculée [m]
<b>Boucle HT application e-tech Renault</b>	5.2	5.03 (-3.3%)

*Table 10 : Corrélation longueur durite calculée par outil d’optimisation 3d sur application Renault*

## 5.5 Optimisation diamètres

L’optimisation des diamètres des tuyauteries pour minimiser le coût est fréquent dans les réseaux de distributions d’eau [110][111]. De plus, l’étude bibliographique menée n’a pas identifié de travaux sur l’optimisation des diamètres pour les circuits de refroidissement.

Le processus d’optimisation des diamètres pour une architecture de circuit de refroidissement est détaillé sur la *Figure 103*. L’optimisation hydraulique définit une cible optimale de perméabilité pour chaque branche du circuit de refroidissement. Les caractéristiques géométriques des branches, en termes de longueur et coudes, sont déterminées via l’optimisation 3D. A partir de ces deux données d’entrée une recherche des diamètres optima est effectuée pour chaque branche afin de respecter au maximum les cibles de perméabilité. Pour cela un algorithme génétique va tester différents jeux de diamètres, pour lesquels un calcul de perméabilité des branches est réalisé. L’objectif à minimiser par l’algorithme génétique est l’écart entre les perméabilités cibles et celles calculées. Le calcul de perméabilité prend en compte les pertes de charges induites dans les jonctions hydrauliques du type Té ou coudes (comme illustré sur la *Figure 104*) ainsi que les composants primaires et secondaires. Les pertes de charges dans ces composants sont déterminées par les équations définies par Idelchik dans [112].

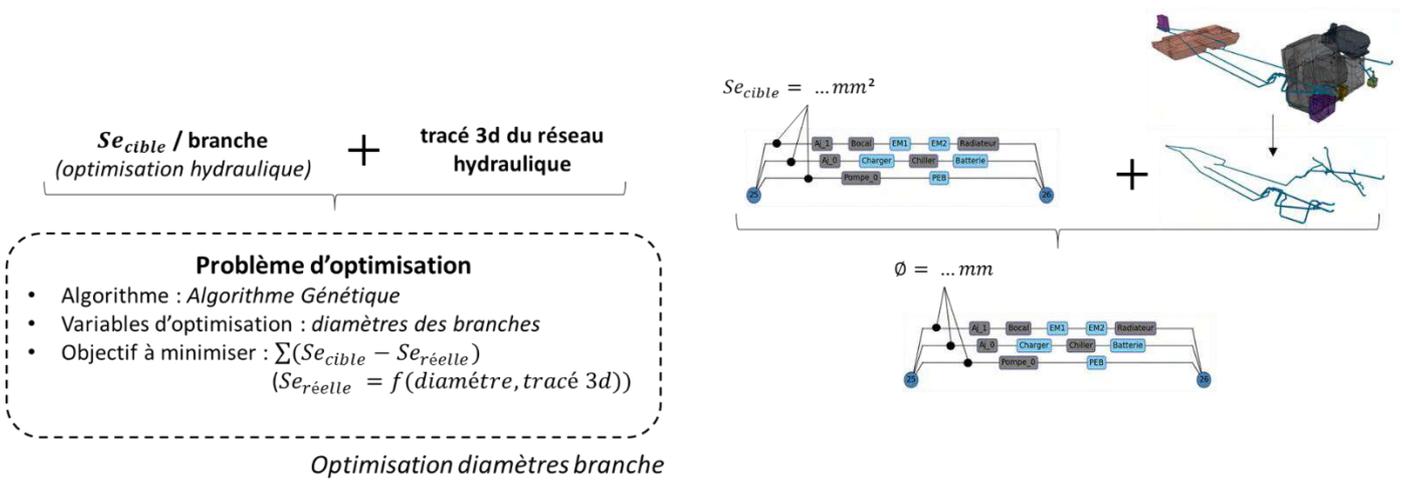


Figure 103 : Processus d’optimisation des diamètres d’une architecture de sous-système de refroidissement

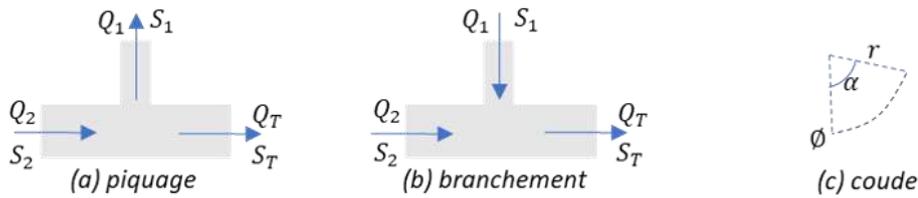


Figure 104 : Illustrations de piquage et branchement sur nœud hydraulique et coude

### 5.6 Optimisation multicritères

Les architectures de sous-système de refroidissement générées et optimisées sont caractérisées par un jeu de critères. Ces critères traduisent les performances énergétiques et le coût des différentes solutions. Il existe plusieurs méthodes pour traiter les problèmes d’optimisation multicritère. Wang *et al.* [113] présentent une approche pour définir les coefficients de pondération pour optimiser trois critères : la consommation électrique, la consommation de carburant et le temps d’accélération. L’approche consiste à faire varier les trois coefficients d’un pas de 0.25. Plusieurs configurations sont ainsi testées, amenant à balayer différentes portions du front optimal de Pareto. Ce type d’approche est également utilisé par Vijayagopal *et al* pour traiter un problème d’optimisation à deux critères, et est illustré sur la *Figure 105* [67]. Une autre approche présentée par Prechottka *et al* consiste à définir les coefficients de

pondération tenant compte de la base de connaissance, de l’expertise des ingénieurs vis-à-vis du système à concevoir et enfin du segment du marché ciblé [38]. Dans l’étude présentée trois critères d’évaluation sont définis pour évaluer des architectures de système HEV : efficacité énergétique, confort et performance. Les coefficients de pondération définis pour ces trois critères sont respectivement : 40%, 20% et 40%.

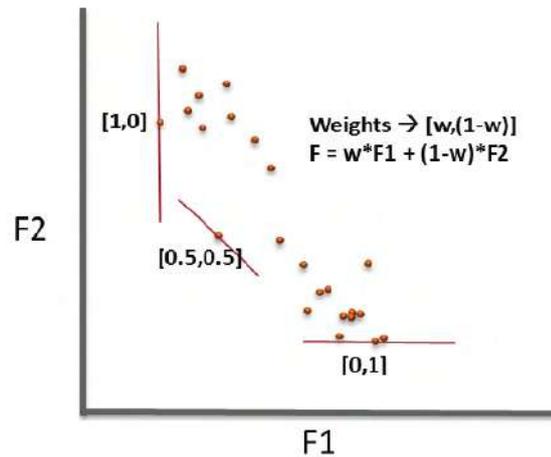


Figure 105 : Résolution d’un problème d’optimisations multicritère pour différents coefficients de pondération

Dans le cadre de cette thèse, le problème d’optimisation multicritères est ramené à un problème d’optimisation monocritère. Le critère d’optimisation est le coût des solutions. Le nombre de pompes, de jonctions hydrauliques Té et de tuyaux hydraulique peuvent directement s’exprimer en termes de coût. Les performances énergétiques, représentées par les puissances électriques des pompes hydrauliques, peuvent être exprimées en coût. En effet, les réglementations en vigueur en 2022 imposent une amende de 95 euros par gramme de CO<sub>2</sub> excédentaire par rapport à la limite autorisée. Considérant l’hypothèse, de premier ordre, que soixante watts électriques est équivalent de 1 gramme de CO<sub>2</sub>, 1 watt électrique est équivalent à  $\frac{95}{60}$  euros.

Les équations utilisées pour calculer les coûts liés aux pompes, aux Tés, aux tuyaux hydrauliques et aux puissances électriques sont les suivantes :

$$\text{Coût}_{pompe(s)} = 55 \times \text{nombre}_{pompes} \quad (\text{Équation 44})$$

$$Coût_{Té(s)} = 0.6 \times nombre_{Tés} \quad (\text{Équation 45})$$

$$Coût_{tuyaux} = 0.35 \times \emptyset \times longueur \quad (\text{Équation 46})$$

$$Coût_{P_{elec}} = \left(\frac{95}{60}\right) \times P_{elec} \quad (\text{Équation 47})$$

Les coûts unitaires de pompe et Té sont issus de base de données accessibles chez Renault. Le coefficient 0.35 permettant de calculer le coût des tuyauteries hydrauliques a été déterminé à partir d'une corrélation effectuée sur une application Renault HR18 e-tech du circuit HT.

La fonction coût globale à minimiser s'exprime de la façon suivante :

$$f_{coût\ global} = Coût_{pompe(s)} + Coût_{Té(s)} + Coût_{tuyaux} + Coût_{P_{elec}} \quad (\text{Équation 48})$$

## 5.7 Exemples d'applications

Le dimensionnement des sous-systèmes de refroidissement chez Renault est réalisé sur les points de fonctionnement de l'enveloppe véhicule considérés comme étant les plus critiques. Or le temps passé sur ces points de fonctionnement sur la durée de vie d'un véhicule est de l'ordre de 5% [114]. La méthode d'optimisation proposée dans ce chapitre vise à optimiser ces sous-systèmes sur un cycle d'homologation (i.e. WLTC) tout en respectant les exigences de refroidissement des points de fonctionnement les plus critiques.

Des exemples d'application des fonctionnalités décrites dans ce chapitre sont présentés dans la suite de ce paragraphe. Le premier exemple traite de l'application de la méthode globale d'optimisation d'architectures de circuit de refroidissement appliquée à un projet Renault. Pour des raisons de temps de calcul, les algorithmes de permutations de composants et d'ordonnement de branchement ne sont pas utilisés dans cet exemple. Ces deux derniers algorithmes sont appliqués sur une architecture organique spécifique dans deux exemples spécifiques. Un quatrième exemple étudie l'influence de l'architecture d'un système HEV sur la génération et l'optimisation énergétique d'architectures organiques de circuit de refroidissement. Enfin une étude de sensibilité sur les exigences de refroidissement des composants primaires sur le choix de l'architecture organique optimale d'un point de vue énergétique est réalisée dans un dernier exemple.

### **5.7.1 Application méthode d'optimisation globale sur projet Renault**

Dans ce premier exemple les méthodes automatiques de génération, d'optimisation et d'évaluation d'architectures systèmes sont appliquées au sous-système de refroidissement d'une architecture de système HEV Renault donnée (Captur HEV).

Les données d'entrée du processus global d'optimisation d'architectures de sous-système de refroidissement représentent la liste des composants primaires et leurs exigences de refroidissement. Ces exigences concernent les températures de fonctionnement, les demandes de débits ainsi que les pertes thermiques des composants primaires. La première exigence portant sur les températures de fonctionnement permet de scinder les composants primaires en deux groupes : HT et BT. Pour chaque groupe un ensemble de points de fonctionnement est déterminé à partir de l'utilisation des composants de l'architecture système HEV sur cycle d'homologation défini par la LGE. Un point de fonctionnement est caractérisé par un set de variables d'état. Pour le groupe HT les variables d'état caractérisant les points de fonctionnement sont le régime et le couple du moteur thermique et la température d'eau. Concernant le second groupe BT les points de fonctionnements sont définis par la température d'eau et une variable définissant le mode hybride (i.e. une machine électrique active, deux machines électriques actives, etc.). Dans les deux cas, les exigences de refroidissement en termes de demande de débits sont synthétisées sur l'ensemble de points de fonctionnement défini. Le calcul des coefficients de pondération de chaque point de fonctionnement utilisés dans l'optimisation hydraulique nécessite une trace temporelle de la température d'eau de chaque solution sur cycle d'homologation. Pour cela une boucle itérative est réalisée sur le processus de génération et d'optimisation des architectures de circuit de refroidissement. Une itération consiste tout d'abord à calculer les coefficients de pondérations des points de fonctionnement, puis à générer et optimiser les architectures de circuit de refroidissement. L'évaluation thermo-hydraulique de chaque solution générée et optimisée permet de mettre à jour leur trace de température d'eau sur cycle d'homologation. Dans le cadre de la thèse seul une itération a été effectuée.

Les coûts globaux des architectures de circuit de refroidissement HT et BT générées et optimisées sont présentés dans les *Figure 106* et *Figure 107*. Les architectures de circuit de refroidissement HT et BT choisies par les architectes du sous-système de refroidissement chez Renault sont encadrées en vert. Comme adressé dans le Chapitre 4, ces deux architectures sont retrouvées par l'outil de génération d'architectures

système. Toutes les solutions HT et BT générées répondent aux exigences de refroidissement avec une valeur de la fonction coût global plus ou moins important. Pour le circuit HT, 11 architectures présentent un coût global plus faible que la solution retenue pour le projet Renault. Concernant le circuit BT, l’hypothèse prise concernant la définition des points de fonctionnement et la synthèse des exigences de refroidissement fait ressortir la solution où les composants primaires sont positionnés en série comme étant optimale. En effet, les exigences de refroidissement en termes de demande de débits pour les composants primaires du circuit BT sont uniformes.

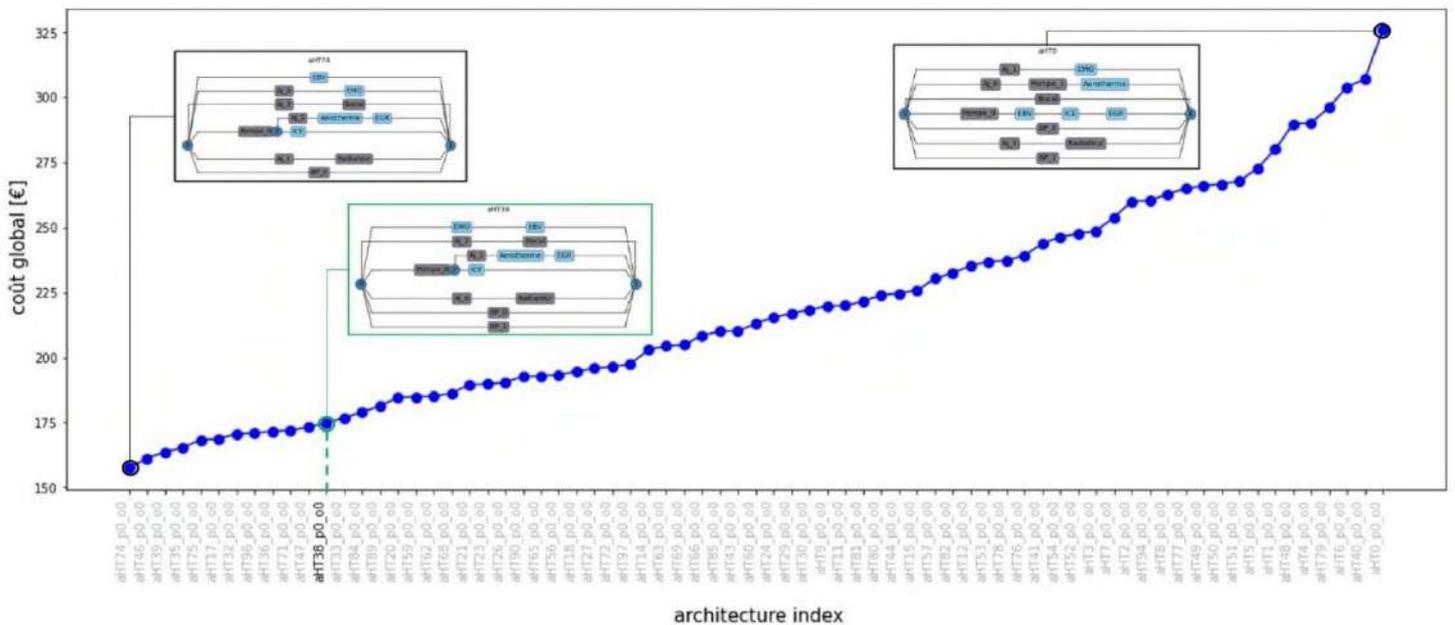


Figure 106 : Coût global des architectures organiques de circuit de refroidissement HT générées et optimisées

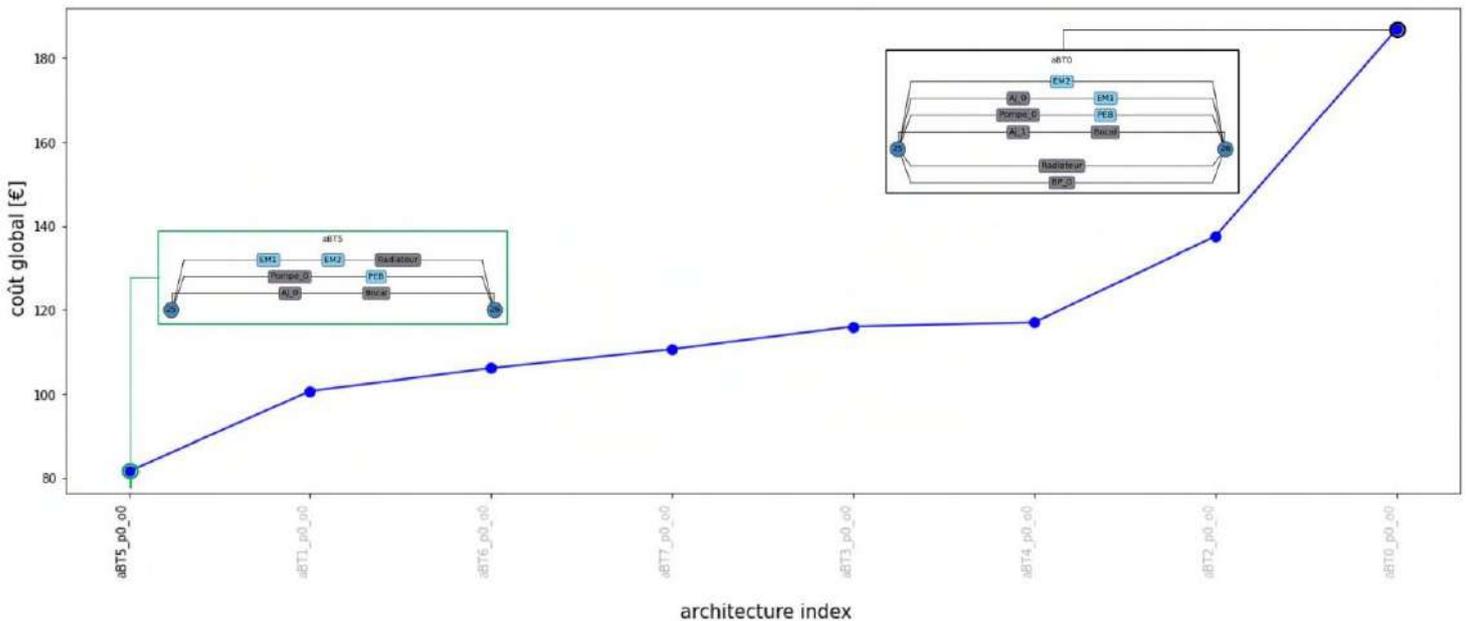


Figure 107 : Coût global des architectures organiques de circuit de refroidissement BT générées et optimisées

### 5.7.2 Etude d’influence de permutation composants

L’influence de l’agencement des composants sur les branches d’une architecture de circuit de refroidissement est discutée dans ce paragraphe. Pour une branche donnée, plusieurs variantes de positionnement des composants sont possibles en permutant ces derniers.

A titre d’exemple, dans l’architecture de circuit de refroidissement numéro 2 générée dans l’exemple précédent, six alternatives d’architectures peuvent être générées en permutant les composants de la branche mise en valeur dans la Figure 108. Les méthodes d’optimisation du 3D des tracés de tuyauteries et l’optimisation des diamètres sont effectuées sur ces six alternatives. La Table 11 présente le critère d’évaluation  $Coût_{tuyaux}$  prenant en compte les caractéristiques 3D du tracé des tuyauteries pour chaque alternative. La moyenne du  $Coût_{tuyaux}$  est de 120€ avec un écart-type de 13.4€.

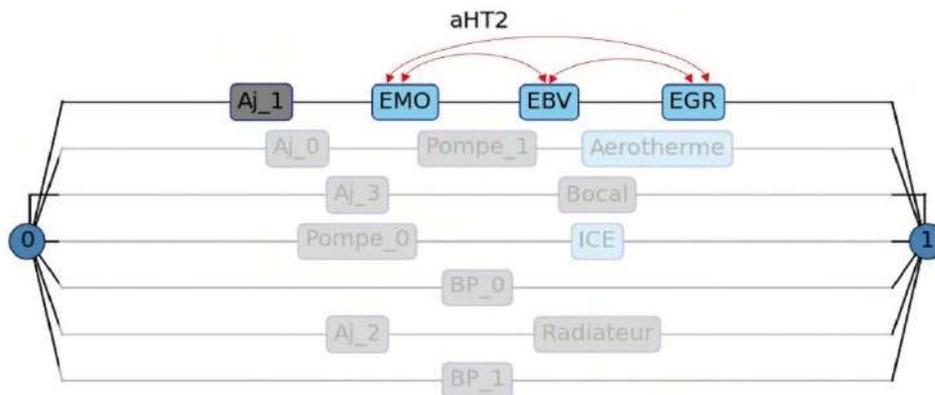


Figure 108 : Différentes permutations possibles de composants pour l’architecture HT n°2

Index architecture	Coût <sub>tuyaux</sub> [€]
aHT2_p0_o0	122.94
aHT2_p1_o0	106.11 (-13,7%)
aHT2_p2_o0	136.25 (+10,8%)
aHT2_p3_o0	109.76 (-10,7%)
aHT2_p4_o0	137.81 (+12%)
aHT2_p5_o0	106.23 (-13,6%)
aHT2_p6_o0	117.81 (-4,2%)

Table 11 : Coût des tuyaux pour différentes permutation de composants d’une architecture organique de circuit de refroidissement HT

### 5.7.3 Etude d’influence de l’ordonnement de branchement

L’influence de l’ordonnement de branchement au niveau des nœuds hydrauliques de plus de trois connexions sur une architecture organique de circuit de refroidissement est étudié dans cet exemple.

La Figure 109 présente les deux alternatives possibles d’ordonnement de branchement (issues de l’algorithme d’ordonnement présenté dans ce chapitre) au niveau du nœud hydraulique 2 de l’architecture de circuit HT numéro 80 générée dans

le premier exemple. Tout comme dans l’exemple précédent, le tracé 3D des tuyaux ainsi que leurs diamètres sont optimisés. La *Table 12* donne les valeurs du critère d’évaluation des solutions  $Coût_{tuyaux}$  pour les deux alternatives générées. Un écart de 1.15€ (1.2%) entre ces deux solutions est constaté.

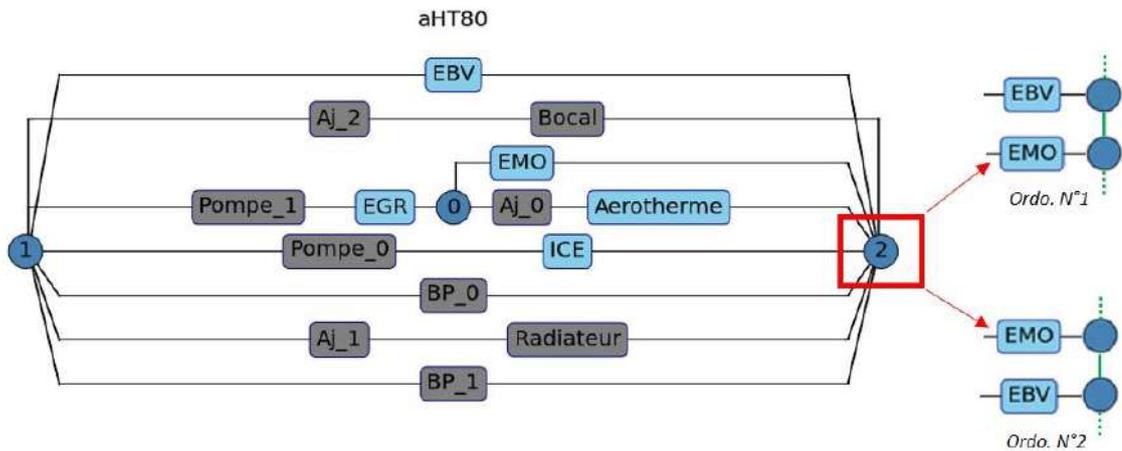


Figure 109 : Différents ordonnancements possibles pour l’architecture HT n°80

Index architecture	$Coût_{tuyaux}$ [€]
aHT80_p0_o0	93.63
aHT80_p0_o1	94.78 (+1,2%)

Table 12 : Coût des tuyaux pour différents ordonnancement de branchement d’une architecture organique de circuit de refroidissement HT

### 5.7.4 Etude d’influence de l’architecture système HEV

Les exigences de refroidissement des différents composants d’un système HEV sont définies au niveau de l’architecture système HEV. En effet, comme adressé dans le Chapitre 4 la loi de gestion d’énergie et le dimensionnement des composants d’un système HEV définissent les sollicitations de ces derniers.

Ce paragraphe a pour objectif d’étudier l’influence de l’architecture système HEV sur la génération, optimisation et évaluation d’architectures de sous-système de refroidissement HT. La partie optimisation ne traite que l’aspect énergétique. Pour des

contraintes de temps, l'optimisation 3D nécessitant le positionnement spécifique des composants d'une architecture de système HEV dans le volume sous-capot alloué n'est pas effectuée. Le critère  $Coût_{tuyaux}$  est alors défini par une valeur par défaut. Les architectures de système HEV étudiées sont celles générées et optimisées dans l'exemple du Chapitre 3. Pour chacune de ces architectures les exigences de refroidissement des composants primaires sont définies. Le processus de génération, d'optimisation énergétique et d'évaluation d'architectures organiques de circuit de refroidissement HT est lancé sur ces 4 cas d'étude.

La *Figure 110* montre les coûts globaux des architectures organiques de circuit de refroidissement HT générées et optimisées énergétiquement pour les 4 architectures de système HEV étudiées. Les 4 études génèrent le même nombre d'architectures organiques de circuit de refroidissement HT et celles-ci sont semblables d'une étude à une autre (à l'exception de présence de by-pass et ajutages définis lors de l'optimisation hydraulique), car :

- les 4 architectures de système HEV partagent les mêmes composants avec des topologies différentes.
- les exigences de refroidissement des composants primaires d'une architecture de système HEV sont semblables. Les variations concernent les amplitudes des débits de refroidissement sur l'ensemble des points de fonctionnement étudiés et les pertes thermiques des composants. Ces deux grandeurs dépendent de la LGE, c'est-à-dire des sollicitations des différents composants.

Les index des architectures de la *Figure 110* sont classés en fonction des coûts globaux issus de l'étude sur l'architecture de système HEV n°0. Les classements de ces architectures sur les 3 autres études sont différents, traduisant l'influence des exigences de refroidissement sur le choix de l'architecture optimale. Comme discuté dans le Chapitre 3, les architectures de système HEV numéro 0 et 3 considèrent le fonctionnement du moteur thermique sur des points à meilleurs rendements par rapport aux architectures de système HEV numéro 1 et 5. Les exigences de refroidissement pour les architectures de système HEV numéro 0 et 3 sont moins sévères. Cela se constate dans les coûts globaux des architectures organiques de circuits de refroidissement générées et optimisées pour ces deux architectures de système HEV. Les coûts globaux sont généralement moins élevés pour l'ensemble des solutions pour les architectures de système HEV numéro 0 et 3 par rapport aux 1 et 5.

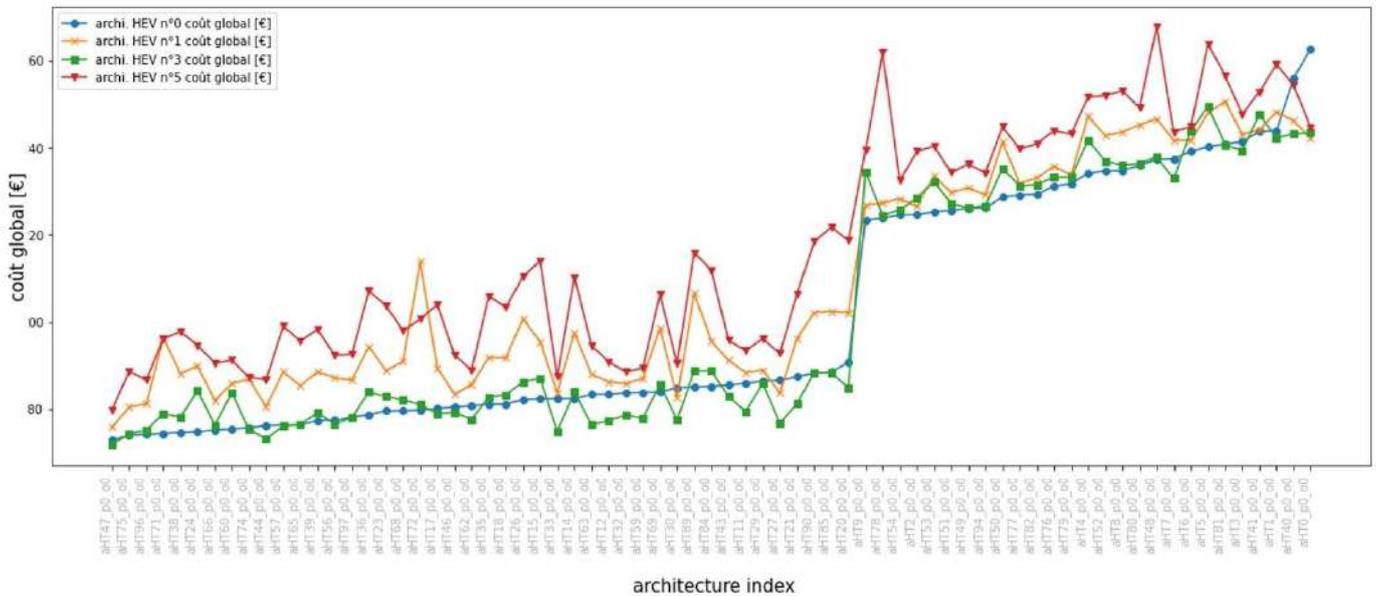


Figure 110 : Coût global des architectures organiques de circuit de refroidissement HT générées et optimisées pour différentes architectures de système HEV

### 5.7.5 Etude de sensibilité sur les exigences de refroidissement

Ce dernier exemple permet de réaliser une étude de sensibilité de l’optimisation hydraulique tenant compte de variations d’exigences de refroidissement de composants primaires. Le plan d’expériences est une méthode efficace pour étudier l’influence d’un ou plusieurs paramètres sur une sortie d’un modèle numérique [115].

Il existe de nombreuses méthodes pour construire des plans d’expériences [116]. La méthode la plus simple consiste à construire le plan d’expérience à partir de l’ensemble des combinaisons possibles obtenues en faisant varier de manière exhaustive tous les facteurs selon tous leurs niveaux. Cette méthode est applicable sur des systèmes avec peu de facteurs et pour des temps de calcul par essai peu coûteux. Une autre méthode vise à définir des plans d’expériences non plus complet mais réduits. Les plans réduits sont construits en sélectionnant des combinaisons du plan complet. Ces méthodes cherchant un compromis entre temps de calcul et informations disponibles pour caractériser le comportement du système sous des variations de paramètres. La méthode utilisée par Box et Hunter consiste à fractionner

$p$  fois le plan d’expériences complet à  $n$  paramètres et ne retenir qu’une demi-fraction de chaque plan fractionné [117]. La taille du plan d’expériences est alors réduite à  $2^{n-p}$ .

L’influence des exigences de refroidissement en termes de demande de débit d’eau de 4 composants primaires (i.e. ICE, EGR, EMO et EBV) sur la puissance hydraulique moyenne est étudiée sur 4 architectures organiques de circuit de refroidissement. Pour chacun des composants primaires sélectionnés, les demandes de débits de liquide de refroidissement sur l’ensemble des points de fonctionnement sont modifiées par un facteur de 1.05 et 0.95 fois les valeurs nominales. L’analyse de sensibilité est réalisée à l’aide d’un plan complet à 4 paramètres à deux niveaux (cf Annexe G) pour les 4 architectures organiques de circuit de refroidissement de numéro 49, 51, 54 et 71 générées dans le premier exemple. Un critère de robustesse peut être défini pour chacune de ces architectures en fonction de la puissance hydraulique moyenne et sa variance calculée sur l’ensemble des essais du plan d’expériences. Ce critère peut s’écrire sous forme de rapport de signal sur bruit. Le signal correspond à la puissance hydraulique moyenne et le bruit à sa variance. Ces deux grandeurs étant à minimiser le critère de robustesse, afin d’être maximisé, peut se formuler de la façon suivante :

$$C_{robustesse} = \frac{1/P_{hydraulic}}{Variance} = \frac{1/S}{B} \quad (\text{Équation 49})$$

Les résultats de cette analyse sont présentés dans la *Table 13*. L’ajout d’un critère de robustesse permet de prendre en compte la sensibilité des performances énergétiques des solutions par rapport à des variations d’exigences de refroidissement. Parmi les 4 architectures organiques de circuit de refroidissement HT étudiées, la solution numéro 70 présente le meilleur compromis entre les performances énergétiques et une faible sensibilité aux variations des exigences de refroidissement des 4 composants primaires retenus pour cet exemple.

Index architecture	Phyd. moy. [W] ( <i>S</i> )	Variance [W <sup>2</sup> ] ( <i>B</i> )	$\frac{1/S}{B}$
aHT49_p0_o0	10,40	0,62	0,15
aHT51_p0_o0	10,33	0,69	0,14
aHT54_p0_o0	10,02	0,59	0,17
aHT70_p0_o0	10,04	0,56	0,18

Table 13 : Résultats d'étude de sensibilité d'exigences de refroidissement sur différentes architectures de circuit de refroidissement HT

## 5.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté une méthode automatique d'évaluation et d'optimisation énergétique, sous contraintes d'intégration, de sous-système de refroidissement pour un véhicule hybride. Pour une architecture organique de circuit de refroidissement donnée, un modèle analytique hydraulique est automatiquement construit dans un environnement python. Ce modèle hydraulique permet de calculer les pertes de charge dans le circuit de refroidissement pour un point de fonctionnement donné. Les pertes de charge sont optimisées à l'aide d'un algorithme d'optimisation DIRECT sur un jeu de points de fonctionnement représentant un cycle d'homologation. Un coefficient de pondération est attribué à chaque point de fonctionnement en fonction de son temps passé dessus sur le cycle d'homologation. La perméabilité de l'architecture de circuit de refroidissement est ainsi optimisée sur les points de fonctionnement les plus utilisés. L'optimisation hydraulique d'architecture de circuit de refroidissement est couplée à des modèles paramétriques de composants secondaires (pompes et radiateurs) afin d'optimiser leur dimensionnement et leur contrôle. Un outil d'optimisation automatique de tracé 3D de tuyaux pour une architecture organique de circuit de refroidissement a été intégré au processus d'optimisation énergétique afin de prendre en compte des contraintes d'intégration.

Dans l'objectif d'évaluer les performances thermo-hydrauliques sur cycle d'une architecture de circuit de refroidissement optimisée d'un point de vue hydraulique et 3D, un modèle sous GT-SUITE est automatiquement généré. L'outil GT-Automation a

permis d'automatiser les tâches de construction, de paramétrisation et d'évaluation d'un modèle GT-SUITE de circuit de refroidissement.

Enfin, les méthodes d'optimisation et d'évaluation énergétique développées dans ce chapitre peuvent être appliquées sur les architectures organiques de circuit de refroidissement générées à l'aide de la méthode présentée dans le Chapitre 4. Le problème d'optimisation multicritères de recherche de solutions optimales a été ramené à un problème d'optimisation monocritère à l'aide d'une fonction coût globale définie à partir d'une somme pondérée des critères de sélection des solutions.



## **Conclusion générale et perspectives**

L'étude bibliographique menée dans ce travail de thèse a permis de mettre en évidence un manque de méthode d'optimisation globale d'architectures de circuits de refroidissement pour véhicules hybrides dans la littérature. Une optimisation globale de sous-systèmes de refroidissement pour un système de HEV nécessite de traiter les trois niveaux de conception : architecture, composant et contrôle. L'espace des solutions possibles d'architectures de sous-système de refroidissement et de systèmes HEV étant large, l'automatisation du processus de recherche de solutions optimales est obligatoire dans un contexte où le projet industriel impose des temps de développement réduits. Les méthodes classiques généralement utilisées dans l'industrie pour résoudre ce type de problème d'optimisation, consistent à rechercher manuellement selon le savoir-faire de l'entreprise des solutions. Ces méthodes aboutissent souvent à un optimum local car elles ne permettent pas d'explorer un grand nombre de solutions possibles. Afin de respecter l'ensemble des exigences système il est nécessaire d'introduire des boucles d'itérations afin d'aboutir à un choix d'architecture satisfaisant. Ces itérations représentent un coût de développement. Le coût augmente plus elles apparaissent tard dans le processus de développement. Ces itérations peuvent également surgir lors de modifications d'exigences système au cours du développement du système à concevoir.

Une méthode d'optimisation automatique et globale d'architectures de sous-système de refroidissement pour un système HEV a été développée. Cette méthode est constituée d'un ensemble d'outils permettant, à partir d'exigences systèmes, de générer, d'optimiser et d'évaluer automatiquement un nombre important de solutions d'architectures de système HEV et de sous-systèmes de refroidissement. L'approche système suivie consiste dans un premier temps, à générer et optimiser les architectures système HEV. L'optimisation des lois de gestion d'énergie de chaque solution donne les sollicitations de chaque composant. Les exigences de refroidissement sont définies à partir de l'utilisation des composants du système HEV et sont utilisées comme données d'entrée au processus de génération et d'optimisation d'architectures de circuits de refroidissement. Enfin, une optimisation multicritères basée sur la construction d'une fonction mono-objectif à optimiser est utilisée pour aider les architectes systèmes à choisir la solution répondant au mieux au cahier des charges.

La méthode développée propose de fournir rapidement, dans les phases amont de projet industriel, une ou plusieurs architectures système répondant à l'ensemble des exigences systèmes. Contrairement aux méthodes dites classiques, les exigences systèmes qui sont formulées dans le cahier des charges en amont de projet ne sont plus subies. Une analyse de sensibilité des solutions générées par rapport aux exigences systèmes permet ainsi leur gestion. Les points sensibles sont détectés en amont de projet et peuvent être surveillés tout le long du processus de développement du système afin d'éviter les boucles d'itérations sur les choix d'architectures systèmes. De plus, les exemples d'application de la méthode d'optimisation globale d'architectures système présenté dans ce travail de thèse ont montré que le système est porté par ses exigences. Une modification des exigences système est susceptible de modifier la solution d'architecture système optimale par rapport au cahier des charges. Enfin, la méthode développée est indépendante de l'expérience de l'architecte système.

L'application de la méthode globale d'optimisation du sous-système de refroidissement d'un projet existant chez Renault a permis d'identifier des solutions plus performantes par rapport à la solution choisie à l'aide des méthodes standards. L'optimisation multicritères, basée sur la construction d'une fonction mono-objectif de coût global, montre des gains allant jusqu'à 11%.

La solution optimale d'architecture du sous-système de refroidissement identifiée par la méthode d'optimisation globale proposée dans le cadre de cette thèse est étroitement liée à la définition des exigences de refroidissement des composants primaires. La méthode pourrait être améliorée en augmentant la précision de la définition des exigences de refroidissement. Une solution consisterait par exemple à utiliser des modèles physiques pour calculer les demandes en débit de refroidissement en fonction des caractéristiques et des sollicitations des composants. De plus, afin de compléter la méthode d'optimisation d'architectures de système HEV, une optimisation 3D des solutions peut être intégrée. Cela permettrait de prendre en compte aussi les contraintes d'intégration par la génération automatique de modèle 3D de solution de chaîne de traction HEV.

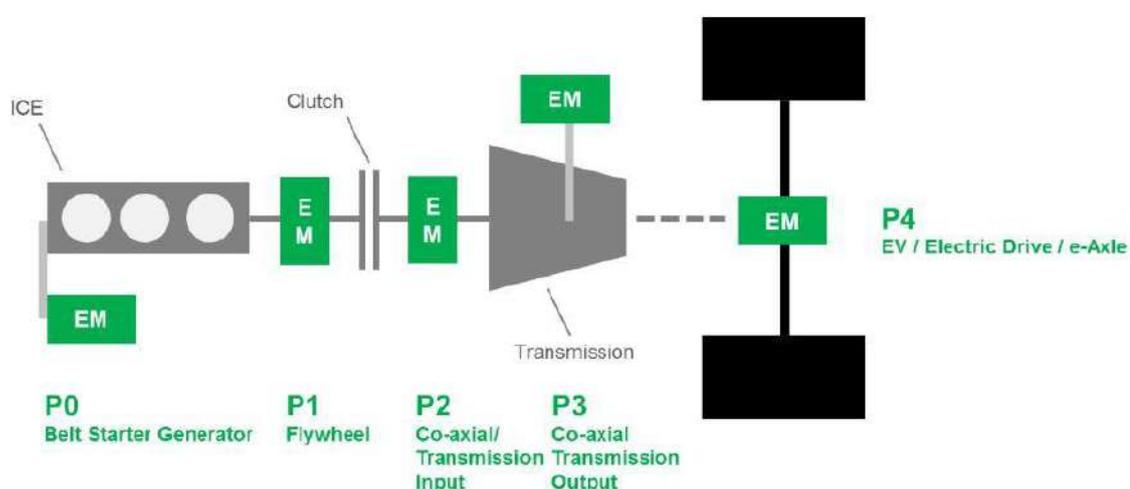
Les outils de génération d'architectures système utilisés sont basés sur des concepts d'arbres de décision. Ces concepts sont utilisés dans l'objectif de générer des données. Ces bases de données pourront être utilisées par des algorithmes d'apprentissage pour construire des modèles de prédiction de solutions.

Enfin, la méthode pourrait être étendue à l'analyse d'autres sous-systèmes du système HEV. Par exemple l'intégration des circuits d'huile et d'air aux modèles permettrait de générer des solutions de refroidissement avec une machine électrique positionnée sur une branche du circuit d'huile. La batterie peut également être refroidie par l'air. L'intégration de ces deux circuits rendrait également possible l'optimisation énergétique de pompes à huile ainsi que des ventilateurs.

## Annexe A

### Architectures parallèles « PX »

Il existe plusieurs possibilités de réaliser des architectures de véhicules parallèles en simple ou double arbres, ces différentes possibilités sont illustrées sur la *Figure 111*, chacune d'elle est détaillée dans la suite de cette annexe.



*Figure 111 : Définitions « PX » utilisée pour classer les architectures HEV parallèles [9]*

L'architecture P0 possède la même apparence qu'un alternateur conventionnel, la machine électrique remplace le démarreur et l'alternateur classiques [94]. Ce type d'hybridation nécessite très peu de modifications, seulement adapter la courroie d'accessoires afin qu'elle puisse supporter l'augmentation de couple engendré par la machine électrique [118]. Le moteur thermique étant couplé via la courroie à la machine électrique, lors des phases de récupération d'énergie, le rendement énergétique est pénalisé par les pertes par pompage. De plus la courroie limite le transfert de couple.

La topologie de type P1 peut être réalisée en montage direct sur l'arbre de sortie moteur thermique ou bien par l'intermédiaire d'une courroie. Un montage direct permet d'utiliser une machine électrique à fort diamètre générant un fort couple et permet un démarrage plus silencieux. Ce type d'architecture est présente sur l'Insight

de Honda [119]. Comme le P0, cette architecture limite la récupération d'énergie cinétique du véhicule. En effet dans les deux cas la machine électrique n'est pas découplée du moteur thermique.

La configuration P2 permet de découpler les deux machines de traction. Le découplage est réalisé par l'intermédiaire d'un embrayage positionné entre la machine électrique et le moteur thermique. Le moteur électrique est positionné en amont de la boîte de vitesse. Deux fonctionnalités supplémentaires sont alors possibles : la récupération d'énergie en roue libre et le mode tout électrique. L'ajout d'un mode zéro émission, nécessite d'électrifier certains accessoires, afin qu'ils puissent fonctionner en continu, tel que la pompe de liquide refroidissement ou le compresseur du circuit de climatisation [120], [121]. La machine électrique bénéficiant des rapports de la boîte de vitesses, elle est capable de couvrir une grande partie des décollages du véhicule en électrique. De plus elle peut jouer le rôle de démarreur pour le moteur thermique [122]. Cette architecture se retrouve sur la Jetta de Volkswagen [121].

Un positionnement de la machine électrique en aval de la boîte de vitesses caractérise une architecture P3. Le moteur électrique étant connecté aux roues, permet de maintenir la transmission d'un couple pendant les phases de changement de vitesses et de stationner automatiquement en utilisant le moteur électrique [123]. Cependant cette position par rapport aux roues, impose un choix de ratio de transmission afin de ne pas dépasser la vitesse maximale de rotation de la machine électrique pour la vitesse maximale du véhicule, et ne bénéficie pas des rapports de la boîte de vitesse [124]. Le couple de la machine électrique étant ajouté après la boîte de vitesses, le profil de couple appliqué aux roues est plus souple. De plus à haute vitesse, la machine électrique peut être découplée, et le moteur thermique peut fonctionner sous un rapport de boîte de vitesses important.

Enfin l'architecture P4, en positionnant les roues directement sur le train arrière du véhicule, permet le mode de conduite quatre roues motrices. Sur sol glissant cette architecture possède un faible rendement de récupération d'énergie, dans ce cas les architectures ayant la machine électrique sur le train avant sont plus intéressantes.

## **Annexe B**

# **Arbre de décision appliqué à la génération de numéros de téléphone**

Cette annexe présente l'application d'un concept d'arbre de décision à la génération de numéros de téléphone portable possibles. Un numéro de téléphone portable est considéré comme valide s'il commence par le chiffre 0 et est suivi soit d'un 6 ou bien d'un 7 et comporte dix chiffres au total.

La première étape dans l'utilisation d'un arbre de décision est la définition de la représentation mathématique d'une solution à générer. Dans l'exemple traité dans cette annexe une solution représentant un numéro de téléphone portable est représentée sous forme mathématique par un vecteur de dimension dix. Chaque coordonnée du vecteur représente un chiffre du numéro de téléphone. Sur la base de cette représentation, un arbre de décision permet de générer l'ensemble des solutions possibles en explorant ses différentes branches (ou différents niveaux). Des contraintes peuvent être définies pour éviter d'explorer des branches n'aboutissant pas à des solutions viables. La *Figure 112* illustre l'application d'un arbre de décision à la génération de numéros de téléphones portables sous contraintes. Le premier niveau de l'arbre de décision comporte dix possibilités, correspondant au premier chiffre possible d'un numéro de téléphone. Les contraintes définies interdisent la génération de numéro de téléphone ne commençant pas par 0. Au second niveau, pour chaque possibilité valide du niveau supérieur (i.e. premier niveau), dix possibilités sont à nouveau proposées (chiffres de 0 à 9) pour procéder à la construction du vecteur représentant un numéro de téléphone. Certaines branches sont coupées au second niveau par la définition de contraintes. En effet, les numéros commençant par 0 et suivi d'un autre chiffre que 6 ou 7 ne sont pas considérés comme valides. Le processus s'arrête lorsque le niveau atteint dans l'arbre de décision correspond à la dimension du vecteur représentant une solution, ici 10. La solution générée est alors conservée. Dix autres solutions peuvent être générées à ce même niveau dans l'arbre. Une fois ces solutions générées, l'exploration de l'arbre de décision remonte d'un niveau (9ième niveau) pour passer à la possibilité suivante (i.e. chiffre 1). Dix autres solutions sont alors générées, dont la première est représentée par le vecteur

[0,6,0,0,0,0,0,0,1,0]. L'ensemble des numéros commençant par 0 et 6 sont dans un premier temps générés, puis la branche des numéros commençant par 0 et 7 est explorée.

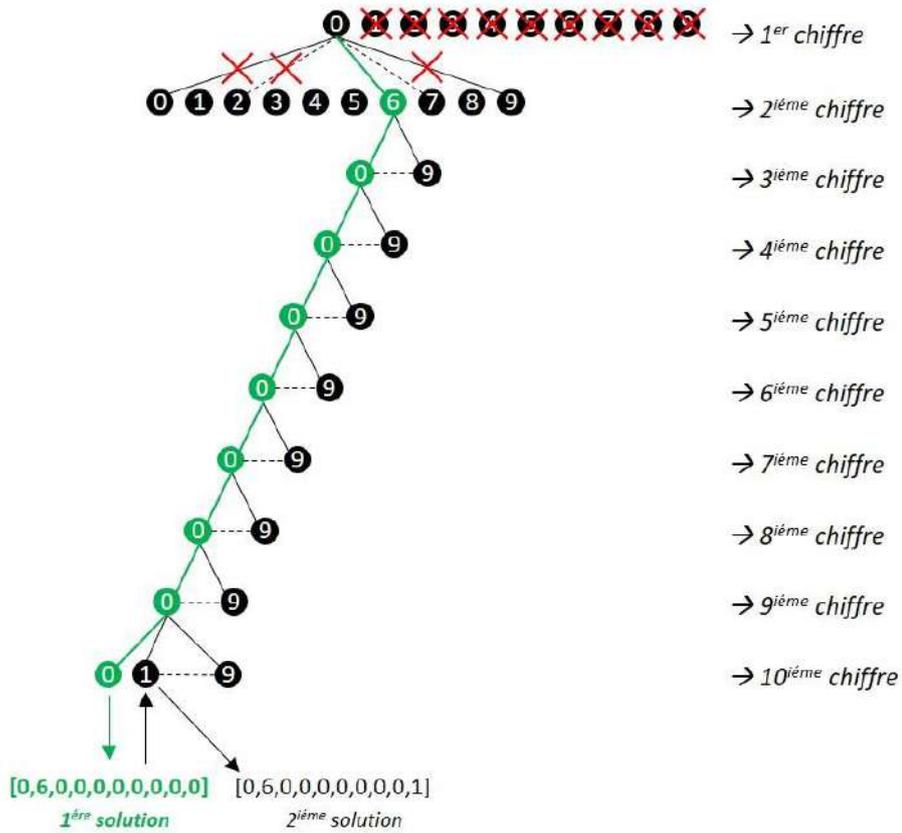


Figure 112 : Arbre de décision appliqué à la génération de numéros de téléphone portable

## **Annexe C**

# **Algorithme de détection de boucle hydraulique morte**

Cette annexe présente un algorithme permettant de détecter les boucles hydrauliques mortes dans un graphe représentant un réseau hydraulique. Un exemple de boucle hydraulique morte est présenté sur la *Figure 114*.

Le pseudo code de la procédure de détection de boucle hydraulique dans un graphe est détaillé sur la *Figure 113*. Les graphes sont définis à partir du package python Networkx [125]. Ce package permet de manipuler des graphes. Les données d'entrée de l'algorithme présenté dans cette annexe sont un graphe Networkx et la liste des nœuds de ce graphe ayant trois ou plus de connections. Les nœuds définissant cette dernière liste sont supprimés temporairement un à un. La suppression d'un nœud permet de définir un nouveau graphe, dont le nombre de sous-graphe peut être déterminé par une fonctionnalité du package Networkx (« *connected component subgraphs* »). Si le nombre de sous-graphes déterminé pour la suppression d'un nœud spécifique est supérieur à 1 alors une boucle hydraulique morte est présente dans le graphe. Enfin, le nœud supprimé est rajouté dans le graphe. La procédure s'arrête lorsque tous les nœuds de la liste des nœuds du graphe à trois ou plus de connections.

début

données d'entrée : *list\_nœuds* = liste des nœuds à 3 ou plus de liaisons

*graph* = graph networkx

pour *nœud* dans *list\_nœuds*

suppression du *nœud* dans *graph*

calcul du nombre de *sous\_graph* dans *graph*

si nombre de *sous\_graph* > 1 alors

présence d'une boucle hydraulique morte = vrais

fin si

rajout du *nœud* dans *graph*

fin pour

fin

Figure 113 : Pseudo code de la procédure de détection de boucle hydraulique morte

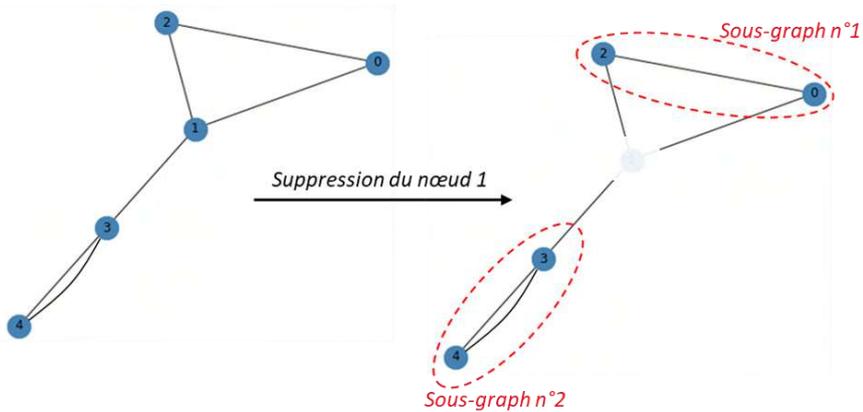


Figure 114 : Exemple de détection de boucle hydraulique morte dans un graphe

## **Annexe D**

# **Algorithme de positionnement de vanne(s) hydraulique(s)**

La détection des configurations réalisables par les architectures organiques de circuit de refroidissement présentée dans le Chapitre 4 fait ressortir les branches ayant besoin d'être déconnectées sur certains points de fonctionnement. L'utilisation de vannes hydrauliques dans une architecture organique donnée permet de réaliser les configurations souhaitées en contrôlant la répartition de débit dans les différentes branches en fonction des points de fonctionnement.

Le pseudo code détaillant l'algorithme est présenté sur la *Figure 115*. La première étape de l'algorithme est, pour une architecture organique de circuit de refroidissement, de générer les combinaisons possibles de  $n$  branches parmi l'ensemble des branches ayant besoin d'être déconnectées sur des points de fonctionnement. Le paramètre  $n$  varie de 2 au nombre de branches à déconnecter par pas de 1. La seconde étape consiste à déterminer les combinaisons de branches à déconnecter générées capables de réaliser l'ensemble des configurations de l'architecture. Enfin, la combinaison retenue est la combinaison comportant le plus petit nombre de branche parmi les combinaisons identifiées durant la seconde étape. Une vanne hydraulique est alors positionnée sur chaque branche de la combinaison retenue.

début

**données d'entrée :** *list\_confs* = liste des configurations réalisables par l'architecture

*archi* = architecture fonctionnelle

*list\_branches\_off* = liste des branches de l'architecture devant être déconnectées sur des points de fonctionnement

**Initialisation :** *nb\_confs\_realisables* = 0

*nb\_confs* = len(*list\_confs*)

*combis\_branches* = liste des combinaisons de *n* branches (avec  $n \in \{2; \text{len}(\text{list\_branches})\}$ ) parmi *list\_branches*

*list\_combis\_possibles* = liste vide

**pour** *combi* **dans** *combis\_branches*

**pour** *conf* **dans** *list\_conf*

**pour** *branche* **dans** *list\_branches\_off*

**si** *branche n'est pas dans conf*

suppression de *branche* dans *archi*

**fin si**

**fin pour**

**si** *archi.graph\_networkx* = *conf.graph\_networkx* **alors**

*nb\_confs\_realisables* += 1

**fin si**

**pour** *branche* **dans** *list\_branches\_off*

**si** *branche n'est pas dans conf*

rajout de *branche* dans *archi*

**fin si**

**fin pour**

**fin pour**

**si** *nb\_confs\_realisables* = *nb\_confs* **alors**

*list\_combis\_possibles* += *combi*

**fin si**

**fin pour**

*combi\_opti* = *combi* de *list\_combis\_possibles* avec le moins de branches

fin

Figure 115 : Pseudo code de la procédure de positionnement de vanne(s) hydraulique(s) sur une architecture organique de circuit de refroidissement

# Annexe E

## Méthode de prédiction d'échanges thermiques pour radiateur

Cette annexe présente une méthode de calcul d'échanges thermique de radiateur, corrélée à des mesures de performances thermiques sur banc d'essai. L'identification d'un jeu de paramètres caractérisant le comportement d'un radiateur d'une technologie et géométrie données, permet de prédire les performances thermiques d'un radiateur de même technologie mais de géométrie différente.

La surface de l'échangeur est tout d'abord discrétisée en surface élémentaire  $dx dy$ . La finesse du découpage dépend de la cartographie de vitesse et/ou de température d'air dans le plan  $(x, y)$ . Une fois le découpage réalisé, l'efficacité de chaque échangeur élémentaire  $dx dy$  est calculée en fonction de la vitesse locale d'air extérieur et de la vitesse du fluide interne. La température du fluide interne est ensuite calculée, permettant d'estimer la densité de puissance échangée entre l'air et le fluide interne ainsi que l'augmentation de la température d'air extérieur à travers l'échangeur.

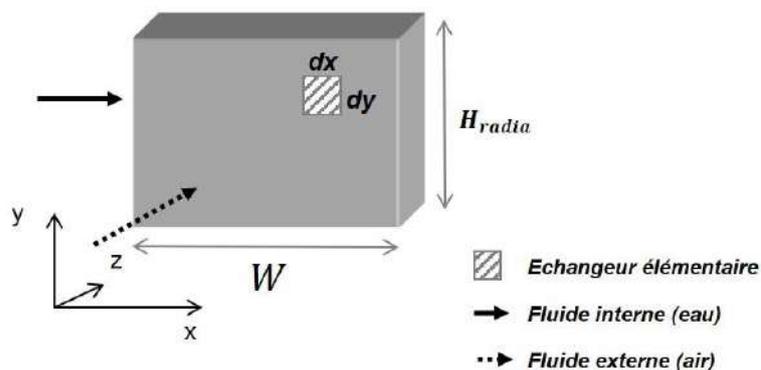


Figure 116 : Modèle simplifié de radiateur

Equations bilan d'énergie appliqués au fluide et à l'air traversant la tranche de l'échangeur  $dxdy$ :

$$\delta \dot{m}_f C p_f (T_f(x + dx, y) - T_f(x, y)) + \delta K (T_f(x, y) - T_{ae}(x, y)) = 0 \quad (\text{Équation 50})$$

$$\delta \dot{m}_a C p_a (T_{as}(x, y) - T_{ae}(x, y)) + \delta K (T_f(x, y) - T_{ae}(x, y)) = 0 \quad (\text{Équation 51})$$

où  $\dot{m}_f$  et  $\dot{m}_a$  sont les débits massiques de fluide et d'air.  $T_f$ ,  $T_{ae}$  et  $T_{as}$  sont les températures du fluide, de l'entrée et sortie de l'air.  $\delta K$  est la conductance thermique élémentaire de l'échangeur.

Le débit massique du fluide interne  $\delta \dot{m}_f$  étant proportionnel à la hauteur  $dy$ , il est possible d'écrire :

$$G_f = \frac{\delta \dot{m}_f}{dy} = \frac{\dot{m}_f}{H_{radia.}} \quad (\text{Équation 52})$$

$$G_a = \frac{\delta \dot{m}_a}{dxdy} = \rho_a V_a(x, y) \quad (\text{Équation 53})$$

où  $H_{radia.}$  Est la hauteur du radiateur.  $V_a$  et  $\rho_a$  sont respectivement la vitesse et la densité de l'air.

La conductance  $\delta K$  est proportionnelle à la surface élémentaire  $dxdy$  de l'échangeur. Le rapport  $U$  représente un coefficient d'échange équivalent. Ce coefficient d'échange est fonction des nombres de Reynolds interne et externe. Compte tenu de l'expression du nombre de Reynolds ( $Re = \frac{\rho V \phi}{\mu}$ ), le nombre de Reynolds interne est lié au débit massique spécifique de fluide  $G_f$  et le nombre de Reynolds externe est lié au débit massique surfacique d'air  $G_a$ . Le coefficient d'échange  $U$  peut alors s'exprimer de la façon suivante :

$$U = \frac{\delta K}{dxdy} = U(G_f, G_a) \quad (\text{Équation 54})$$

Compte tenu des notations précédentes, l'équation du bilan peut être réécrite de la façon suivante :

$$\frac{\partial T_f}{\partial x} + \frac{(T_f(x, y) - T_{ae}(x, y))}{W_c} = 0 \quad (\text{Équation 55})$$

$$\text{avec : } W_c(G_f, G_a) = \frac{G_f C p_f}{U(G_f, G_a)} \quad (\text{Équation 56})$$

Avec des hypothèses de champs de vitesse d'air et de température d'air homogènes, l'intégration de l'équation du bilan permet d'obtenir le profil de température du fluide interne :

$$T_f(x, y) = T_{ae} + (T_f(0, y) - T_{ae}) \exp\left(-\frac{x}{W_c}\right) \quad (\text{Équation 57})$$

L'équation précédente montre que la température du fluide interne décroît exponentiellement le long de l'axe x. En prenant en compte le mélange du fluide dans les collecteurs en entrée et en sortie de l'échangeur, l'intégration de l'équation précédente le long de l'axe y permet d'écrire :

$$T_{fm}(x = W_c) = T_{ae} + (T_{fm}(x = 0) - T_{ae}) \exp\left(-\frac{x}{W_c(G_f, G_a)}\right) \quad (\text{Équation 58})$$

L'efficacité de l'échangeur se définit comme le ratio de refroidissement réel du fluide interne sur le refroidissement maximal (obtenu pour un échangeur idéal, de W infini) :

$$\varepsilon = \frac{T_{fm}(x = 0) - T_{fm}(x = W)}{T_{fm}(x = 0) - T_{ae}} \quad (\text{Équation 59})$$

L'efficacité peut se réécrire selon l'équation 57. Elle dépend de la longueur de l'échangeur  $W$  et des deux débits spécifiques  $G_a$  et  $G_f$  :

$$\varepsilon(W, G_f, G_a) = 1 - \exp\left(-\frac{W}{W_c(G_f, G_a)}\right) \quad (\text{Équation 60})$$

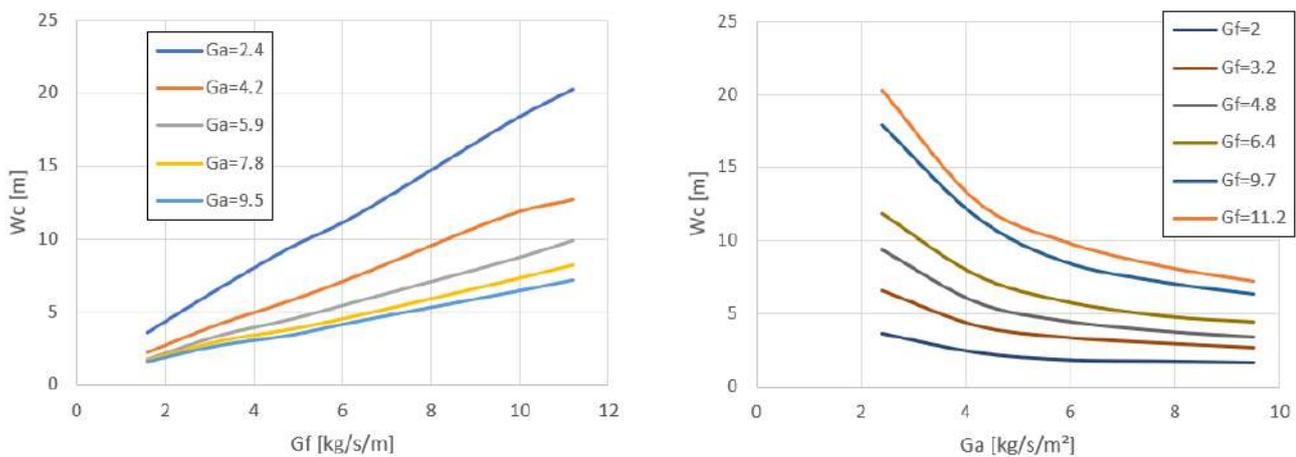
L'efficacité de l'échangeur est une grandeur mesurable compte tenu de la relation (ratio réel/max). En la cartographiant en fonction des débits spécifiques  $G_a$  et  $G_f$ , on peut obtenir la longueur caractéristique  $W_c$  en inversant la relation précédente :

$$W_c(G_f, G_a) = \frac{W}{\ln\left(\frac{1}{1 - \varepsilon(W, G_f, G_a)}\right)} \quad (\text{Équation 61})$$

A titre d'exemple, la cartographie en *Table 14* correspond à un radiateur de type 'U' de 420 mm de hauteur et de 690 mm de largeur. Il est équivalent à un radiateur de type 'I' de 210 mm de hauteur ( $H_{radia.}$ ) et de 1380 mm de longueur ( $W$ ).

$W_c(G_f, G_a)$	$G_f$					
	1,6	3,2	4,8	6,4	9,7	11,2
2,4	3,6	6,6	9,4	11,8	17,9	20,3
4,2	2,3	4,2	5,8	7,6	11,6	12,7
5,9	1,8	3,4	4,5	5,8	8,5	9,9
7,8	1,7	3,0	3,8	4,8	7,1	8,2
9,5	1,6	2,7	3,4	4,4	6,3	7,2

*Table 14 : cartographie radiateur type U mesurée chez Renault*



*Figure 117 : Courbes des longueurs caractéristiques  $W_c$  en fonction des débits spécifiques  $G_a$  et  $G_f$  de la Table 14*

Les courbes présentées en *Figure 117* montrent qu'on peut exprimer la longueur caractéristique par une relation de type :

$$W_c = a + \frac{bG_f}{G_a^\alpha} \quad (\text{Équation 62})$$

Les coefficients  $a$ ,  $b$  et  $\alpha$  sont coefficients empiriques qui dépendent du fluide interne et de la géométrie élémentaire de l'échangeur (pas d'ailettes, pas des tubes, diamètre hydraulique et section de passage pour le fluide interne, ...etc.). L'identification de ces coefficients, permet de prédire l'efficacité de tout autre échangeur de même technologie mais de  $W$  différente.

La puissance échangée est donnée par l'équation :

$$P = \dot{m}_f C p_f (T_{fm}(x = 0) - T_{fm}(x = W)) \quad (\text{Équation 63})$$

Cette équation peut être réécrite en fonction de l'équation de l'efficacité :

$$P = \dot{m}_f C p_f \varepsilon \Delta T_e \quad (\text{Équation 64})$$

La Figure 118 montre la corrélation entre des mesures obtenues sur banc d'essai et les performances estimée par le modèle simplifié pour un radiateur donné. L'erreur sur l'ensemble des 32 points de fonctionnement est de 2.2%.

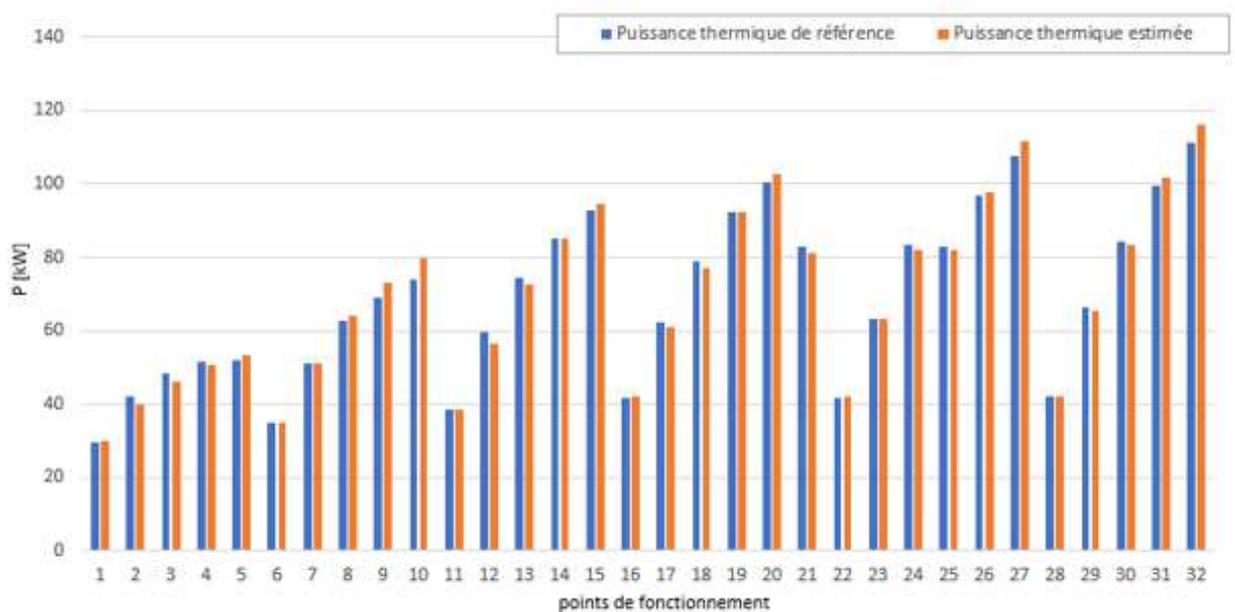


Figure 118 : Corrélation entre puissance thermique calculée via modèle simplifié et puissance thermique de référence



## Annexe F

# Méthode de prédiction de caractéristiques de pompe hydraulique centrifuge

Une méthode permettant de prédire, à partir de courbes de référence de pompe centrifuge électrique, les courbes de delta de pressions et de rendements en fonction du débit d'une pompe dont les paramètres de construction et d'utilisation varient, est présentée dans cette annexe. Les courbes de références sont issues de résultats d'essai sur banc.

La première étape de la méthode consiste à déterminer la droite d'Euler de la pompe de référence. Cette droite représente le comportement idéal et théorique de la pompe, les équations permettant de déterminer les deux points extrêmes de la droite sont données dans le chapitre 11 du livre de White [126] :

$$H_{(Q=0)Euler-ref} = \frac{U_2^2}{g} \quad (\text{Équation 65})$$

$$U_2 = \pi \times \beta_2 \times D_2 \quad (\text{Équation 66})$$

où  $H_{(Q=0)Euler-ref}$  est la pression (en hauteur de liquide) du point de débit nul de la droite d'Euler de la pompe de référence,  $U_2$  est la vitesse du fluide,  $\beta_2$  et  $D_2$  sont respectivement la largeur et le diamètre de la roue de la pompe de référence.

$$Q_{v(H=0)Euler-ref} = U_2 \times S \times \tan \beta_2 \quad (\text{Équation 67})$$

où  $Q_{v(H=0)Euler-ref}$  est le débit du point de la courbe d'Euler de la pompe de référence pour une pression nulle.  $S$  est la surface débitante de la pompe centrifuge.

Cependant, les pompes hydrauliques ne sont pas idéales, elles fonctionnent selon un certain rendement en fonction du point de fonctionnement. Pour un débit donné, le calcul du rendement hydraulique peut s'exprimer de la façon suivante :

$$\eta_{hydraulique} = H_{réduit} = \frac{H_{ref}(Q_v)}{H_{Euler-ref}(Q_v)} \quad (\text{Équation 68})$$

où  $H_{ref}(Q_v)$  et  $H_{Euler-ref}(Q_v)$  sont respectivement, la hauteur de pression de la courbe de delta de pression en fonction du débit et la hauteur théorique de la droite d'Euler de la pompe de référence pour un débit  $Q_v$ . Cette équation permet d'adimensionnée la hauteur de pression.

Le débit fourni par la pompe peut également être adimensionné via l'équation suivante :

$$Q_{v\text{réduit}} = \frac{Q_{v\text{ref}}}{Q_{v(H=0)Euler-ref}} \quad (\text{Équation 69})$$

où  $Q_{v\text{ref}}$  et  $Q_{v(H=0)Euler-ref}$  sont respectivement les débits de la courbe de delta de pression en fonction du débit et le débit théorique maximal de la droite d'Euler de la pompe de référence.

Le postulat de la méthode de prédiction de caractéristiques de pompes est le suivant : les courbes adimensionnées précédentes sont applicables aux droites d'Euler obtenues pour une variation de paramètres géométriques ou d'utilisation d'une pompe de référence. A partir d'une nouvelle droite d'Euler, déterminée par les lois de similitudes de pompes hydrauliques, et des  $H_{réduit}$  et  $Q_{v\text{réduit}}$  il est alors possible de calculer la courbe de delta de pression en fonction du débit. Un exemple d'estimation de caractéristique pompe à partir de droite d'Euler pour des modifications géométriques du diamètre de roue, de la largeur et de l'épaisseur des pales par un facteur de mise à l'échelle, est donnée sur la *Figure 120*.

Pour les courbes de rendement, une loi empirique en fonction du régime de la pompe a été déterminé à partir de résultats d'essai. D'après les points d'essais présentés sur la *Figure 119*, la loi recherchée est de la forme  $\eta = \frac{\omega}{\omega_{ref}}^x$ . Un balayage sur les valeurs possibles de  $x$  a été effectué, la valeur  $x = -\sqrt{2}$  permet de minimiser l'écart entre les mesures d'essais et les valeurs calculées par la corrélation linéaire proposée.

La *Figure 121* montre un exemple de prédiction de courbes de rendements et caractéristique de pompe pour les mêmes modifications géométriques présentés sur l'exemple de la *Figure 120*.

Enfin, la *Figure 122* montre les corrélations entre les caractéristiques et courbes de rendement d'une pompe de référence, pour un régime de 4500 tr/min, issues de mesures d'essai et de la méthode de prédiction détaillée dans cette annexe.

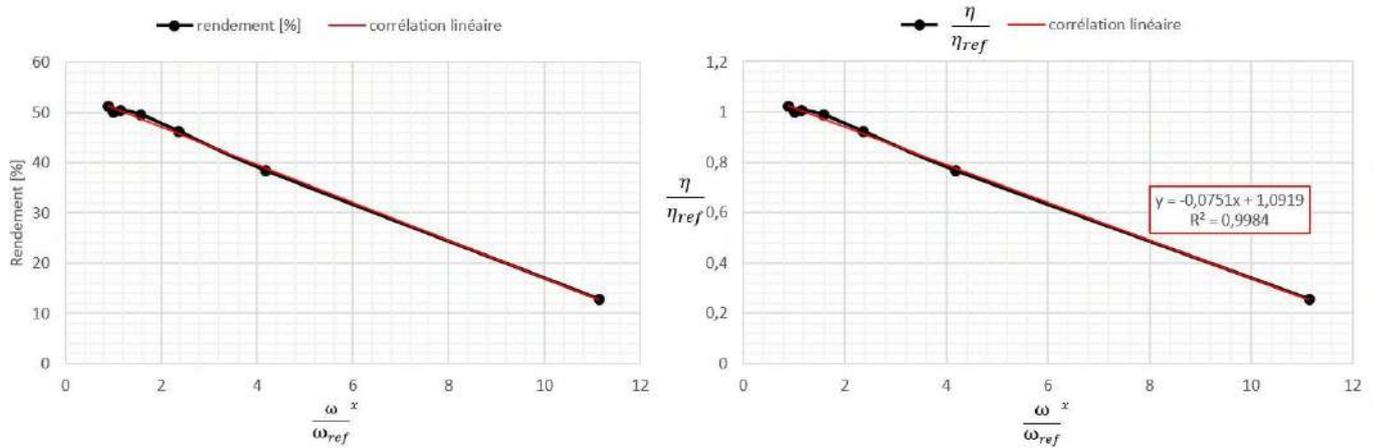


Figure 119 : Loi de similitude pour calcul de courbes de rendement

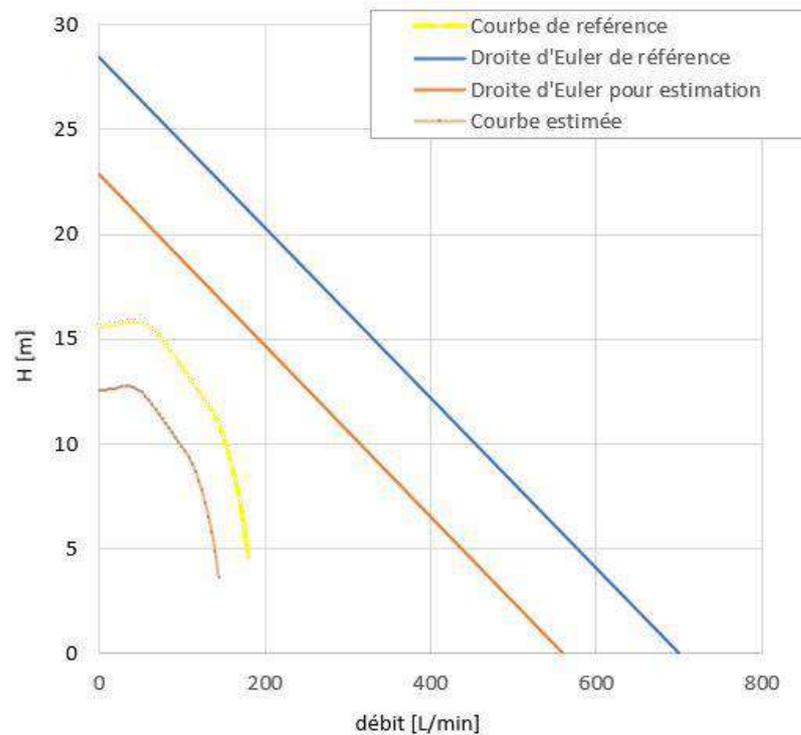


Figure 120 : Courbe de delta P et droite d'Euler de référence et pour une modification du facteur de mise à l'échelle du modèle simplifié de pompe

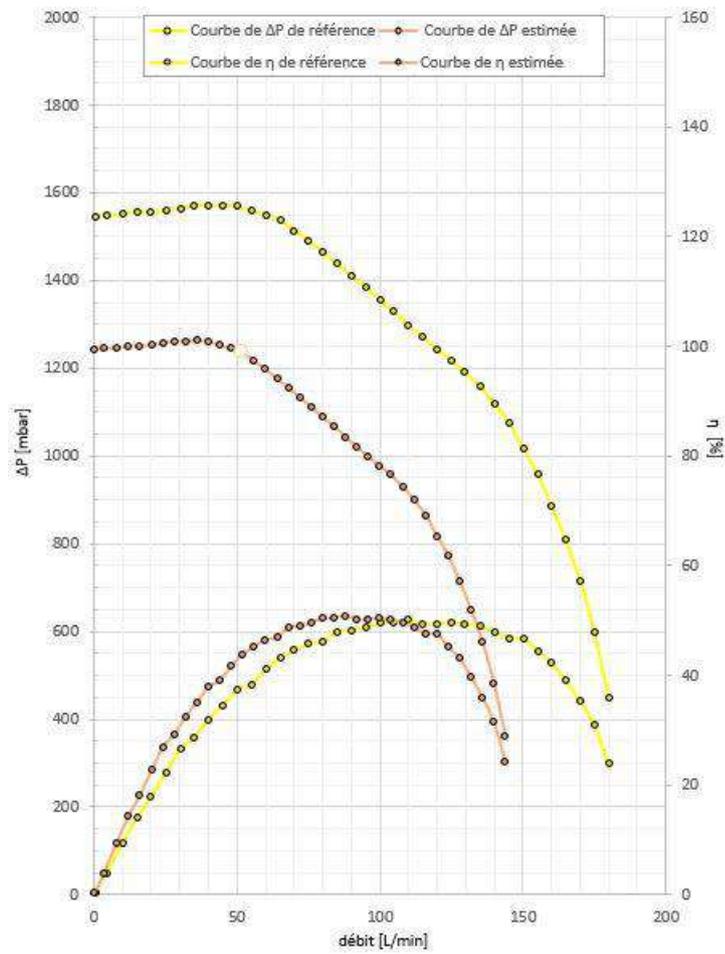


Figure 121 : Exemple de calcul de courbes de rendements et de delta P pour une modification du facteur de mise à l'échelle du modèle simplifié de pompe

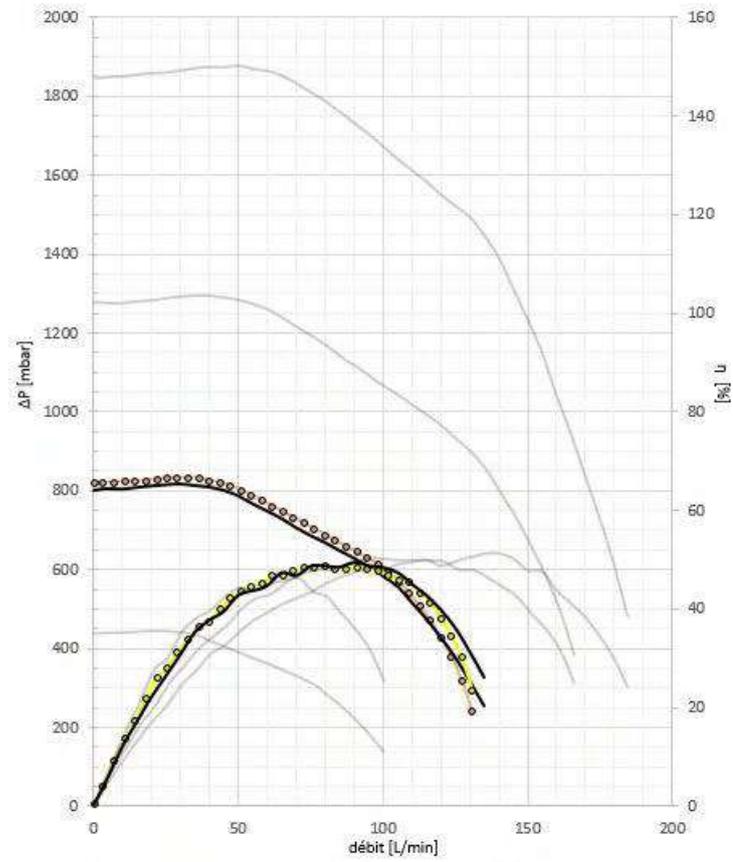


Figure 122 : Corrélation entre courbe de référence et courbe calculée via modèle simplifié (pour 4500 tr/min)



## Annexe G

### Plans d'expériences 4 variables à 2 niveaux

Le plan d'expériences complet pour 4 variables à 2 niveaux est présenté sur la *Figure 123*. Les niveaux bas et haut des variables sont représentés respectivement par un 0 et un 1 dans les 16 essais du plan d'expériences.

N° Essai	$x_4$	$x_3$	$x_2$	$x_1$
1	0	0	0	0
2	0	0	0	1
3	0	0	1	0
4	0	0	1	1
5	0	1	0	0
6	0	1	0	1
7	0	1	1	0
8	0	1	1	1
9	1	0	0	0
10	1	0	0	1
11	1	0	1	0
12	1	0	1	1
13	1	1	0	0
14	1	1	0	1
15	1	1	1	0
16	1	1	1	1

*Figure 123 : Plan d'expériences à 4 variables sur 2 niveaux*



## Bibliographie

- [1] E. Guimart and J. Moisset, “De la COP21 à la COP22 : Les défis du changement climatique pour mon entreprise.” Planète-Verte, Sep. 2016.
- [2] F.-X. Dussud, I. Joassard, F. Wong, J. Duvernoy, and R. Morel, “Repères - Chiffres clés du climat France et Monde - Edition 2016.” Service de l’observation et des statistiques, 2016.
- [3] A. Bringault, “Observatoire climat-énergie résultats pour l’année 2017.” Réseau Action Climat CLER-Réseau pour la transition énergétique, 2017.
- [4] Z. Yang and A. Bandivadekar, “2017 Global update: Light-duty vehicle greenhouse gas and fuel economy standards,” The international council on clean transportation, 2017.
- [5] “RDE et WLTP de nouvelles règles pour l’homologation.” CCFA, Jun. 15, 2018.
- [6] N. E. Ligterink, P. van Mensch, and R. F. A. Cuelenaere, “NEDC - WLTP comparative testing,” TNO 2016 R11285, Oct. 2016.
- [7] N. Higuchi, Y. Sunaga, M. Tanaka, and H. Shimada, “Development of a New Two-Motor Plug-In Hybrid System,” *SAE Int. J. Alt. Power.*, vol. 2, no. 1, pp. 135–145, Apr. 2013, doi: 10.4271/2013-01-1476.
- [8] “Bilan transversal de l’impact de l’électrification par segment : PROJET E4T. ADEME.” IFP Energies Nouvelles, 2018.
- [9] R. Gillet, “EMEA Powertrain Forecasting, IHS Markit,” 2018.
- [10] J. Gindele, “A Comprehensive System Approach for Future Powertrain Electrification,” *CTI Mag*, pp. 10–15, May 2018.
- [11] S. Saab, “Etude par simulation 0D des systèmes thermiques du groupe motopropulseur et de l’habitacle d’un véhicule automobile en vue de réduire sa consommation de carburant,” PhD Thesis, Ecole centrale de Nantes, 2014.
- [12] S. Park, “A Comprehensive Thermal Management System Model for Hybrid Electric Vehicles,” PhD Thesis, 2011.
- [13] T. Ohgaki, M. Matsuda, and M. Matsumoto, “Integrated Cooling System for Underfloor High Voltage Devices in PHEV,” *SAE Technical Paper 2018-01-1184*, p. 7, 2018.
- [14] J.-P. Meinadier, *Découvrir et comprendre l’ingénierie système*, Cépaduès. 2012.

- [15] J. C. Blair, R. S. Ryan, L. A. Schutzenhofer, and W. R. Humphries, "Launch Vehicle Design Process: Characterization, Technical Integration, and Lessons Learned." NASA, Jun. 2001.
- [16] T. A. Johnson, "Integrating models and simulations of continuous dynamic system behavior into SYSML," Master Thesis, 2008.
- [17] M. Bajaj, D. Zwemer, R. Yntema, A. Phung, A. Kumar, A. Dwivedi, and M. Waikar, "MBSE++ - Foundations for Extended Model-Based Systems Engineering Across System Lifecycle," *INCOSE International Symposium*, vol. 26, no. 1, pp. 2429–2445, Jul. 2016, doi: 10.1002/j.2334-5837.2016.00304.x.
- [18] G. Sirin, "Supporting Multidisciplinary Vehicle Modeling: Towards an Ontology based Knowledge Sharing in Collaborative Model Based Systems Engineering Environment," PhD Thesis, Centrale Supélec, 2015.
- [19] C. Yang, P. Menegazzi, J.-D. Piques, O. Coppin, P. Chesse, and D. Chalet, "MBSE approach adapted to vehicle energy consumption optimization," *NAFEMS World Congress 2017*, 2017.
- [20] S. Mahapatra, T. Egel, R. Hassan, R. Shenoy, and M. Carone, "Model-Based Design for Hybrid Electric Vehicle Systems," *SAE Technical Paper 2008-01-0085*, p. 10, 2008.
- [21] H. Ucarol, A. Kaypmaz, R. N. Tuncay, and O. Tur, "A performance comparison study among conventional, series hybrid and parallel hybrid vehicles," p. 4, 2005.
- [22] M. Cao, "Thermal And Cooling Systems Modeling Of Powertrain For A Plug -In Parallel-Through-The-Road Hybrid Electric Vehicle," Master Thesis, Wayne State University, 2014.
- [23] A. J. Torregrosa, P. Olmeda, A. Garcia-Ricos, J. Natividad, and C. A. Romero, "A Methodology for the Design of Engine Cooling Systems in Standalone Applications," Apr. 2010, pp. 2010-01–0325. doi: 10.4271/2010-01-0325.
- [24] X. Zhou, D. Qin, D. Rotella, and M. Cammalleri, "Hybrid Electric Vehicle Powertrain Design: Construction of Topologies and Initial Design Schemes," *Advances in Italian Mechanism Science*, pp. 49–60, 2018.
- [25] A. J. Torregrosa, A. Broatch, P. Olmeda, and C. Romero, "Assessment of the influence of different cooling system configurations on engine warm-up, emissions and fuel consumption," *Int.J Automot. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 447–458, Aug. 2008, doi: 10.1007/s12239-008-0054-1.
- [26] N. Dutta, C. Rouaud, M. Masera, F. Beuzelin, and C. A. V. Hughes, "Powertrain cooling concept selection process for hybrid electric vehicles," in *Innovations in Fuel Economy and Sustainable Road Transport*, Elsevier, 2011, pp. 61–72. doi: 10.1533/9780857095879.1.61.

- [27] N. Albarello, J.-B. Welcomme, and C. Reyterou, “A formal design synthesis and optimization method for systems architectures,” presented at the MOSIM’12, Bordeaux, France, 2012.
- [28] H. Chen, L. Li, M. Schudeleit, A. Lange, F. Küçükay, C. Stamme, and P. Eilts, “Composition Platform for Conventional and Hybrid Powertrains,” *SAE Technical Paper 2017-24-0172*, 2017.
- [29] G. A. Miller, “The Magical Number Seven, Plus or Minus Two Some Limits on Our Capacity for Processing Information,” *Psychological Review*, vol. 101, no. 2, pp. 343–352, May 1955.
- [30] J. Wijkniet and T. Hofman, “Modified Computational Design Synthesis Using Simulation-Based Evaluation and Constraint Consistency for Vehicle Powertrain Systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 9, pp. 8065–8076, Sep. 2018, doi: 10.1109/TVT.2018.2844024.
- [31] C. Wei, T. Hofman, E. Ilhan Caarls, and R. van Iperen, “A Review of the Integrated Design and Control of Electrified Vehicles,” *Energies*, vol. 13, no. 20, p. 5454, Oct. 2020, doi: 10.3390/en13205454.
- [32] X. Zhang, C.-T. Li, D. Kum, H. Peng, and J. Sun, “Configuration Analysis for Power Split Hybrid Vehicles with Multiple Operating Modes,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, no. 8, pp. 3544–3552, 2012, doi: 10.1109/TVT.2012.2208210.
- [33] “AMESim documentation.” SIEMENS, 2021. [Online]. Available: [https://docs.plm.automation.siemens.com/content/amesim/2019.2/help/en\\_US/simcenter\\_amesim\\_20192/simcenter\\_amesim\\_help.html](https://docs.plm.automation.siemens.com/content/amesim/2019.2/help/en_US/simcenter_amesim_20192/simcenter_amesim_help.html)
- [34] E. Silvas, “Integrated optimal design for hybrid electric vehicles,” PhD Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2015.
- [35] J. Vanhuyse, “Closed-loop Design Methodology for Hybrid Electric Vehicle Powertrains,” PhD Thesis.
- [36] A. Bayrak, “Topology Considerations in Hybrid Electric Vehicle Powertrain Architecture Design,” PhD Thesis, 2015.
- [37] B. Kaban, “Systematic methodology for generation and design of hybrid vehicle powertrains,” PhD Thesis, Université de Lyon, 2020.
- [38] H. Piechottka, F. Küçükay, F. Kercher, and M. Bargende, “Optimal Powertrain Design through a Virtual Development Process,” *WEVJ*, vol. 9, no. 1, p. 11, Jun. 2018, doi: 10.3390/wevj9010011.

- [39] S. Masfaraud, F. Danes, P.-E. Dumouchel, F. D. Vuyst, and N. Vayatis, “Automatized gearbox architecture design exploration by exhaustive graph generation,” *WCCM XII*, Seoul, Korea, p. 12, 2016.
- [40] D. Pierre-Emmanuel, “Electric gearbox optimization with Artificial Intelligence,” *CTI symposium Berlin*, Berlin, 2018.
- [41] P. T. Boggs and J. W. Tolle, “Sequential Quadratic Programming,” *Acta Numerica*, vol. 4, pp. 1–51, Jan. 1995, doi: 10.1017/S0962492900002518.
- [42] B. Neveu, M. de la Gorce, P. Monasse, and G. Trombettoni, “A generic interval branch and bound algorithm for parameter estimation,” *J Glob Optim*, vol. 73, no. 3, pp. 515–535, Mar. 2019, doi: 10.1007/s10898-018-0721-3.
- [43] U. Kumar, S. Soman, and Jayadeva, “Benchmarking NLOpt and state-of-the-art algorithms for continuous global optimization via IACOR,” *Swarm Evol. Comput.*, vol. 27, pp. 116–131, Apr. 2016.
- [44] J. Nievergelt, “Exhaustive Search, Combinatorial Optimization and Enumeration: Exploring the Potential of Raw Computing Power,” in *SOFSEM 2000: Theory and Practice of Informatics*, vol. 1963, V. Hlaváč, K. G. Jeffery, and J. Wiedermann, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000, pp. 18–35. doi: 10.1007/3-540-44411-4\_2.
- [45] D. Assanis, G. Delagrammatikas, R. Fellini, Z. Filipi, J. Liedtke, N. Michelena, P. Papalambros, D. Reyes, D. Rosenbaum, A. Sales, and M. Sasena, “An Optimization Approach to Hybrid Electric Propulsion System Design,” *Mechanics of Structures and Machines*, vol. 27, no. 4, pp. 393 – 421, 1999.
- [46] F. Mangun, M. Idres, and K. Abdullah, “Design Optimization of a Hybrid Electric Vehicle Powertrain,” *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 184, p. 012024, Mar. 2017, doi: 10.1088/1757-899X/184/1/012024.
- [47] W. Gao and C. Mi, “Hybrid vehicle design using global optimisation algorithms,” *IJEHV*, vol. 1, no. 1, p. 57, 2007, doi: 10.1504/IJEHV.2007.014447.
- [48] R. Souza-Antunes, F. Loureiro, L. Antônio-Scola, and J. Vieira-de-Vasconcellos, “Optimization of pipe networks by genetic algorithm employing the colebrook correlation//Optimización de redes de tuberías por algoritmo genético que emplea la correlación de colebrook,” *. ISSN*, vol. 22, no. 1, p. 8, 2019.
- [49] S. Park, M. Kokkolaras, A. Malikopoulos, B. AbdulNour, J. Sedarous, and D. Jung, “Thermal management system modeling and optimization for heavy hybrid electric military vehicles,” in *Proceedings of the 2010 NDIA Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium*, Dearborn, MI, USA, 2010.

- [50] X. Tao and J. R. Wagner, “Optimization of a Military Ground Vehicle Engine Cooling System Heat Exchanger - Modeling and Size Scaling,” *SAE Technical Paper 2017-01-0259*, Mar. 2017.
- [51] A. Ryniecki, “Basics of Process Control: the On-Off Control System,” *FOOD INDUSTRY*, vol. 1, no. 11, pp. 28–31, Dec. 2015, doi: 10.15199/65.2015.11.6.
- [52] L. Wang, *PID Control System Design and Automatic Tuning using MATLAB/Simulink*. Wiley-IEEE Press, 2020.
- [53] D. P. Bertsekas, *Dynamic Programming and Optimal Control Volume I*, 3rd ed., vol. 1. Athena Scientific.
- [54] M. A. Karbaschian and D. Söffker, “Review and Comparison of Power Management Approaches for Hybrid Vehicles with Focus on Hydraulic Drives,” *Energies*, vol. 7, no. 6, pp. 3512–3536, May 2014, doi: 10.3390/en7063512.
- [55] E. Trélat, *Contrôle optimal : théorie et applications*, Vuibert. 2005.
- [56] E. Mion, “Hybrid Electric Vehicle energy management control based on stochastic dynamic programming,” Master Degree, 2017.
- [57] Namwook Kim, Sukwon Cha, and Huei Peng, “Optimal Control of Hybrid Electric Vehicles Based on Pontryagin’s Minimum Principle,” *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 19, no. 5, pp. 1279–1287, Sep. 2011, doi: 10.1109/TCST.2010.2061232.
- [58] E. Kural and B. A. Güvenç, “Predictive-Equivalent Consumption Minimization Strategy for Energy Management of A Parallel Hybrid Vehicle for Optimal Recuperation,” *Journal of Polytechnic*, vol. 18, no. 3, pp. 113–124, 2015.
- [59] J. Zhang, H. He, and X. Wang, “Model Predictive Control Based Energy Management Strategy for a Plug-In Hybrid Electric Vehicle:,” presented at the 2015 3rd International Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Systems, Yinchuan, China, 2015. doi: 10.2991/icmeis-15.2015.165.
- [60] X. Sun, C. Shao, G. Wang, R. Li, D. Niu, and J. Shi, “Global Energy Management for Propulsion, Thermal Management System of A Series-parallel Hybrid Electric Vehicle:,” in *Proceedings of the 3rd International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, Porto, Portugal, 2017, pp. 332–338. doi: 10.5220/0006370403320338.
- [61] M. Gräber, J. Fritzsche, and W. Tegethoff, “From system model to optimal control - A tool chain for the efficient solution of optimal control problems,” *Proceedings of the 12th International Modelica Conference*, Jul. 2017, doi: 10.3384/ecp17132249.

- [62] X. Tao and J. R. Wagner, “An Engine Thermal Management System Design for Military Ground Vehicle - Simultaneous Fan, Pump and Valve Control,” *SAE Int. J. Passeng. Cars – Electron. Electr. Syst.*, vol. 9, no. 1, pp. 243–254, Apr. 2016, doi: 10.4271/2016-01-0310.
- [63] X. Zhang, A. Ivanco, X. Tao, J. Wagner, and Z. Filipi, “Optimization of the Series-HEV Control with Consideration of the Impact of Battery Cooling Auxiliary Losses,” *SAE Int. J. Alt. Power.*, vol. 3, no. 2, pp. 234–243, Apr. 2014, doi: 10.4271/2014-01-1904.
- [64] F. Merz, A. Sciarretta, J.-C. Dabadie, and L. Serrao, “On the Optimal Thermal Management of Hybrid-Electric Vehicles with Heat Recovery Systems,” *Oil Gas Sci. Technol. – Rev. IFP Energies nouvelles*, vol. 67, no. 4, pp. 601–612, Jul. 2012, doi: 10.2516/ogst/2012017.
- [65] M. Khodabakhshian, L. Feng, and J. Wikander, “Predictive control of the engine cooling system for fuel efficiency improvement,” in *2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Taipei, Aug. 2014, pp. 61–66. doi: 10.1109/CoASE.2014.6899305.
- [66] M. Rivallain, “Étude de l’aide à la décision par optimisation multicritère des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants,” PhD Thesis, Université Paris-Est, 2013.
- [67] R. Vijayagopal, R. Chen, P. Sharer, S. M. Wild, and A. Rousseau, “Using multiobjective optimization for automotive component sizing,” *WEVJ*, vol. 7, no. 2, pp. 261–269, Jun. 2015, doi: 10.3390/wevj7020261.
- [68] G. Fontaine, “Modélisation théorique et processus associés pour Architectes Modèle dans un environnement multidisciplinaire,” PhD Thesis, Université Paris-Saclay, 2017.
- [69] R. Barbedienne, “Gestion des interactions pour l’évaluation en phase de préconception, des architectures 3D de systèmes sous contraintes multi-physiques, application à la thermique,” PhD Thesis, Université Paris-Saclay, 2017.
- [70] J. Goos, C. Criens, and M. Witters, “Automatic Evaluation and Optimization of Generic Hybrid Vehicle Topologies using Dynamic Programming,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 10065–10071, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1778.
- [71] A. E. Bayrak, Y. Ren, and P. Y. Papalambros, “Topology Generation for Hybrid Electric Vehicle Architecture Design,” *Journal of Mechanical Design*, vol. 138, no. 8, p. 081401, Aug. 2016, doi: 10.1115/1.4033656.
- [72] W. van Harselaar, T. Hofman, and M. Brouwer, “Automated Dynamic Modeling of Arbitrary Hybrid and Electric Drivetrain Topologies,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 8, pp. 6921–6934, Aug. 2018, doi: 10.1109/TVT.2018.2834537.

- 
- [73] S. A. Sierla, T. A. Karhela, and V. Vyatkin, "Automatic Generation of Pipelines Into a 3D Industrial Process Model," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 26591–26603, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2774835.
- [74] M. Stanczak, C. Pralet, V. Vidal, and V. Baudoui, "Optimal Pipe Routing Techniques in an Obstacle-Free 3D Space:," in *Proceedings of the 9th International Conference on Operations Research and Enterprise Systems*, Valletta, Malta, 2020, pp. 69–79. doi: 10.5220/0008923300690079.
- [75] M. El-Hajj, "Optimisation de systèmes multi-physiques par une approche stochastique. Application au domaine de l'hydraulique de forte puissance," PhD Thesis, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, 2014.
- [76] L. Horrein, A. Bouscayrol, P. Delarue, J. N. Verhille, and C. Mayet, "Forward and Backward simulations of a power propulsion system," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 45, no. 21, pp. 441–446, 2012, doi: <https://doi.org/10.3182/20120902-4-FR-2032.00078>.
- [77] A. Paykani and M. T. Shervani-Tabar, "A comparative study of hybrid electric vehicle fuel consumption over diverse driving cycles," *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, vol. 1, no. 5, p. 052005, 2011, doi: 10.1063/2.1105205.
- [78] R. Trigui, E. Vinot, and B. Jeanneret, "Backward Modeling and Energy Management Optimization of a Two-Clutches Series-Parallel HEV for Efficiency Assessment," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 45, no. 21, pp. 422–427, 2012, doi: <https://doi.org/10.3182/20120902-4-FR-2032.00075>.
- [79] Z. Jianning, "Co-Optimisation du dimensionnement et du contrôle des groupes motopropulseurs innovants," PhD Thesis, Université Paris-Saclay, 2017.
- [80] G. Souffran, "Dimensionnement de la chaîne de traction d'un véhicule électrique hybride basé sur une modélisation stochastique des profils de mission," PhD Thesis, Université de Nantes, 2012.
- [81] N. Murgovski, J. Fredriksson, J. Sjöberg, and B. Norén, "Hybrid Powertrain Concept Evaluation Using Optimization," *Proc. 25th World Battery Hybrid Fuel Cell Elect. Veh. Symp. Exhib. EVS25*, pp. 1–7, 2010.
- [82] N. Marc, E. Prada, A. Sciarretta, S. Anwer, F. Vangraefscheppe, F. Badin, A. Charlet, and P. Higelin, "Sizing and fuel consumption evaluation methodology for hybrid light duty vehicles," *WEVJ*, vol. 4, no. 2, pp. 249–258, Jun. 2010, doi: 10.3390/wevj4020249.
- [83] R. Dubouil, "Etude par simulation des transferts thermiques dans un groupe motopropulseur hybride électrique automobile.txt," PhD Thesis, Ecole Centrale de Nantes, 2012.
- [84] M. Stellato, L. Bergianti, and J. Batteh, "Powertrain and Thermal System Simulation Models of a High Performance Electric Road Vehicle," *Proceedings of the 12th*

- International Modelica Conference, Prague, Czech Republic*, pp. 171–180, 2017, doi: 10.3384/ecp17132171.
- [85] M. H. Salah, T. H. Mitchell, J. R. Wagner, and D. M. Dawson, “A Smart Multiple-Loop Automotive Cooling System—Model, Control, and Experimental Study,” *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 15, no. 1, pp. 117–124, Feb. 2010, doi: 10.1109/TMECH.2009.2019723.
- [86] X. X. Sun, Y. C. Wang, C. M. Shao, Y. F. Wu, and G. Z. Wang, “Study of Thermal Management System for a Series-Parallel Hybrid Electric Vehicle Using Numerical Simulation,” *AMM*, vol. 300–301, pp. 932–937, Feb. 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.300-301.932.
- [87] M. Ackerl, J. Hager, K. Prenninger, and M. Winter, “Energy Management and Thermal Simulation of Hybrid Commercial Vehicles,” *ITS Niedersachsen*, pp. 98–114, 2010.
- [88] J. Philippine, A. G. Des Buttes, B. Jeanneret, R. Trigui, F. Deneve, and F. Pereyron, “Engine Cooling System Optimization for Fuel Consumption Reduction,” in *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Hanoi, Vietnam, Oct. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/VPPC46532.2019.8952496.
- [89] C. Danzer, M. Vallon, W. Wukisiewitsch, and M. Kratzsch, “Powertrain Synthesis for the Design of Complex System Configurations,” *MTZ Worldw*, vol. 77, no. 9, pp. 42–47, Sep. 2016, doi: 10.1007/s38313-016-0082-6.
- [90] A. Sturm, H. Piechottka, F. Küçükay, and S. Grams, “Synthesis, Interpretation and Evaluation of Future Powertrain Concepts,” *ATZ Worldw*, vol. 118, no. 12, pp. 62–67, Nov. 2016, doi: 10.1007/s38311-016-0136-z.
- [91] L. Royer, “Introduction To System Composer,” May 13, 2019.
- [92] B. R. Siddharth, V. S. Chandu, D. M. Babu, D. J. Pradeep, and Y. V. P. Kumar, “Performance Analysis of Hybrid Electric Vehicle Architectures under Dynamic Operating Conditions,” *International Journal of Advanced Science and Technology*, vol. 29, no. 10, p. 22, 2020.
- [93] S. Juraschek, R. Vachenauer, K. Lorenz, T. Marschall, A. Stephan, and J. Tachtler, “The Efficient Plug-In Hybrid Drive in the New BMW 2 Series Active Tourer eDrive,” , Germany, 2015, pp. 69–82.
- [94] J. E. Walters, R. J. Krefta, G. Gallegos-Lopez, and G. T. Fattic, “Technology Considerations for Belt Alternator Starter Systems,” *SAE Technical Paper 2004-01-0566*, 2004, doi: 10.4271/2004-01-0566.

- [95] K. Gadeyne, G. Pinte, and K. Berx, “Describing the design space of mechanical computational design synthesis problems,” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 28, no. 3, pp. 198–207, May 2014, doi: 10.1016/j.aei.2014.03.004.
- [96] N. Fremeau, A. Villeneuve, A. Ketfi-Cherif, and A. Vignon, “Transmission hybride a machine électrique déportée et procédé de commande de changements de rapports,” 3022495
- [97] T. Miropadovani, “Loi de gestion d’énergie embarquée pour véhicules hybrides : approche multi-objectif et modulaire,” PhD Thesis, Université d’Orléans, 2015.
- [98] M. Nicolai, “Generative Engineering with Dx.” SIEMENS, Feb. 20, 2019.
- [99] “Classification et réduction de dimension.” CEPE, 2020.
- [100] “Reduction of chugging noise level when engine starts after a stop with warm engine,” Règle Technique de Conception (RTC) Produit – Process BMIR-V0731-2013-0011 V1.0, Feb. 2013.
- [101] “Fiche F n°96 index E CMFB HR18DDh Eu7 HEV.” Renault, 2019.
- [102] X. Wang, X. Liang, Z. Hao, and R. Chen, “Comparison of electrical and mechanical water pump performance in internal combustion engine,” *IJVSMT*, vol. 10, no. 3, p. 205, 2015, doi: 10.1504/IJVSMT.2015.070155.
- [103] P. Dinakar and G. Rajeeve, “Modelling and Simulation of Cooling Systems for BEV High Voltage Battery,” *Division of Vehicle Engineering and Autonomous Systems*, Chalmers University of Technology, p. 73.
- [104] “Cooling Systems and Thermal Management Application Manual and Tutorial.” GT-SUITE, 2020.
- [105] B. Delaunay, “Sur la sphere vide,” *Izv. Akad. Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskii i Estestvennyka Nauk*, vol. 7, pp. 793–800, 1934.
- [106] P. Maur, “Delaunay Triangulation in 3D,” Technical Report DCSE/TR-2002-02, 2002.
- [107] D. Entner, P. Fleck, T. Vosgien, C. Münzer, S. Finck, T. Prante, and M. Schwarz, “A Systematic Approach for the Selection of Optimization Algorithms including End-User Requirements Applied to Box-Type Boom Crane Design,” *ASI*, vol. 2, no. 3, p. 20, Jul. 2019, doi: 10.3390/asi2030020.
- [108] “DessIA,” <https://dessia.tech/>.
- [109] M. A. Javaid, “Understanding Dijkstra Algorithm,” *SSRN Journal*, 2013, doi: 10.2139/ssrn.2340905.

- [110] R. P. Lejano, “Optimizing the layout and design of branched pipeline water distribution systems,” *Irrig Drainage Syst*, vol. 20, no. 1, pp. 125–137, Feb. 2006, doi: 10.1007/s10795-006-3140-4.
- [111] R. Uma, “Optimal Design of Water Distribution Network Using Differential Evolution,” *International Journal of Science and Research*, vol. 5, no. 11, pp. 1515–1520, 2015.
- [112] L. E. Idelchik, *Handbook of hydraulic resistance: Coefficients of Local Resistance and of Friction*. Moskva-Leningrad, 1960.
- [113] Z. Wang, Y. Cai, Y. Zeng, and J. Yu, “Multi-Objective Optimization for Plug-In 4WD Hybrid Electric Vehicle Powertrain,” *Applied Sciences*, vol. 9, no. 19, p. 4068, Sep. 2019, doi: 10.3390/app9194068.
- [114] W. Nessim and F. Zhang, “Powertrain Warm-up Improvement using Thermal Management Systems,” *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 1, no. 4, pp. 151–155, 2012.
- [115] A. Van Schepdael, A. Carlier, and L. Geris, “Sensitivity Analysis by Design of Experiments,” in *Uncertainty in Biology*, 2016, pp. 327–366.
- [116] L. GENDRE, A. SAVARY, and B. SOULIER, “Les plans d’expériences.” ENS CACHAN, Dec. 21, 2009.
- [117] G. E. P. Box, J. S. Hunter, and W. G. Hunter, *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*. Wiley–Blackwell, 2005.
- [118] M. Arnold and M. El-Mahmoud, “A Belt-Driven Starter-Generator Concept for a 4-Cylinder Gasoline Engine,” *AutoTechnol*, vol. 3, pp. 64–67, May 2003.
- [119] K. Aoki, S. Kuroda, S. Kajiwara, H. Sato, and Y. Yamamoto, “Development of Integrated Motor Assist Hybrid System: Development of the ‘Insight’, a Personal Hybrid Coupe,” Jun. 2000, pp. 2000-01–2216. doi: 10.4271/2000-01-2216.
- [120] S. Lauer, F. Graf, M. Springer, and S. Wechler, “48 Volt Hybrid with e-drive features - Excellent fuel efficiency and drivability,” *Electric & Electronic Systems in Hybrid and Electrical Vehicles and Electrical Energy Management*, pp. 17–18, 2017.
- [121] “La Jetta Hybrid Conception et fonctionnement - Service Training.” Volkswagen AG, 2013.
- [122] G. Wu, X. Zhang, and Z. Dong, “Powertrain architectures of electrified vehicles: Review, classification and comparison,” *Journal of the Franklin Institute*, vol. 352, no. 2, pp. 425–448, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.jfranklin.2014.04.018.
- [123] F. Casimir and L. Gimolli, “Modular Hybrid Drives with Manual Transmissions,” *MTZ Worldw*, vol. 80, no. 2, pp. 52–55, Feb. 2019, doi: 10.1007/s38313-018-0138-x.

- [124] N. Campillo-Davo and A. Rassili, Eds., *NVH analysis techniques for design and optimization of hybrid and electric vehicles*, Shaker Verlag Publications. Aachen: Shaker Verlag, 2016.
- [125] A. A. Hagberg, D. A. Schult, and P. J. Swart, “Exploring Network Structure, Dynamics, and Function using NetworkX,” *Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy 2008)*, p. 5, 2008.
- [126] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 7th ed. McGraw Hill, 2011.





---

**Titre :** Modélisation et simulation thermique de différentes architectures de chaîne de traction d'un véhicule hybride

**Mots clés :** architecture système, ingénierie système, optimisation énergétique,

**Résumé :** Afin de réduire les émissions de polluants et de CO<sub>2</sub> les constructeurs automobiles se tournent de plus en plus vers des solutions de chaîne de traction électrifiées. Cette électrification des véhicules augmente la complexité des systèmes à concevoir. Les outils MBSE basés sur une approche système peuvent être utilisés pour gérer cette complexité grandissante. Une optimisation globale nécessite de s'intéresser aux trois niveaux de conception suivants : architecture, composant et contrôle. L'objectif de cette thèse est de développer une méthode d'optimisation globale pour la conception de systèmes de refroidissement pour véhicules hybrides.

A partir d'un jeu de composants et d'exigences systèmes à satisfaire, la méthode commence par générer automatiquement toutes les solutions possibles. La génération

d'architectures est basée sur un concept d'arbre de décision. Chaque solution est ensuite optimisée d'un point de vue énergétique sous des contraintes hydrauliques, thermiques et d'intégration. Enfin, une optimisation multicritère permet d'aider les ingénieurs à prendre des décisions sur les choix de solution en phase amont de projet.

L'application de la méthode globale d'optimisation de circuit de refroidissement pour véhicule HEV sur un projet existant chez Renault a montré que le système est porté par ses exigences. Une modification des exigences système est susceptible de modifier la solution d'architecture système optimale par rapport au cahier des charges.

---

**Title :** Thermal modelling and simulation of different vehicle hybrid powertrain architectures

**Keywords :** system architecture, system engineering, energetical optimization

**Abstract :** To reduce CO<sub>2</sub> and pollutant emissions, automotive manufacturers tend to turn increasingly towards electrified powertrains solutions, such as Hybrid Vehicles (HEV). Model Based System engineering (MBSE) and computational tools are useful to support the development of HEV systems. Global optimization needs to investigate the following system design level: architecture, component and control. The aim of this thesis is to develop a global optimization framework to design cooling system for hybrid vehicles. The methodology starts from a set of component and system requirements to automatically generate all possible system architectures. The generation of solution is

based on a concept of decision tree. An energetical optimisation under hydraulic, thermal and integration constraints is done on each solution generated. Finally, a multicriteria optimization is used as decision making tool to support engineers on system architecture choices early in the development process.

This framework has been applied on a Renault project. Results showed that the system is highly dependent on its requirements. Changing system requirements can potentially modify the optimal system architecture regarding the system specifications.