



HAL
open science

Dimensionnement d'une propulsion hybride de voilier, basé sur la modélisation par les flux de puissance

Florian Dupriez-Robin

► **To cite this version:**

Florian Dupriez-Robin. Dimensionnement d'une propulsion hybride de voilier, basé sur la modélisation par les flux de puissance. Automatique / Robotique. Université de Nantes, 2010. Français. NNT : . tel-00732070

HAL Id: tel-00732070

<https://theses.hal.science/tel-00732070>

Submitted on 13 Sep 2012

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.

UNIVERSITE DE NANTES

ÉCOLE DOCTORALE

« SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DES
MATHEMATIQUES »

Année : 2010

Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes

Spécialité : Électronique & Génie Électrique

Présentée et soutenue publiquement par

Florian Dupriez-Robin

le 5 mai 2010

à l'école Polytechnique de l'université de Nantes, St Nazaire

**DIMENSIONNEMENT D'UNE PROPULSION HYBRIDE
DE VOILIER, BASE SUR LA MODÉLISATION
PAR LES FLUX DE PUISSANCE**

Jury

Président	: François BADIN	Direction Techniques d'applications énergétiques de l'IFP
Rapporteurs	: Eric BIDEAUX Guy FRIEDRICH	Professeur à l'INSA de Lyon, AMPERE Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne, LEC
Examineurs	: Philippe CHEVREL Fabien CLAVEAU Luc LORON	Professeur à l'Ecole des Mines de Nantes, IRCCyN Maître assistant à l'Ecole des Mines de Nantes, IRCCyN Professeur à Polytech'Nantes, IREENA
Invité	: Jean-François HETET	Professeur à l'Ecole Centrale de Nantes, LMF

Directeurs de Thèse : Philippe CHEVREL et Luc LORON

Co-encadrant : Fabien CLAVEAU

Composantes de rattachement des directeurs de thèse : Polytech'Nantes et Ecole des Mines de Nantes

Table des matières

Introduction	1
Chapitre 1 : Problématique de l'hybridation dans le naval	4
1.1 Hybridation d'une propulsion	5
1.1.1 Définition de l'hybridation	5
1.1.2 Utilisation de l'hybridation	6
1.1.3 Les différentes structures de propulsion hybride	6
1.2 La problématique navale	9
1.2.1 État de l'art	9
1.2.2 Comparaison terrestre/navale	11
1.2.3 Quelle utilisation de l'hybridation ?	11
1.3 Les composants d'une propulsion hybride	12
1.3.1 Le stockage d'énergie	12
1.3.2 La motorisation thermique	13
1.3.3 La motorisation électrique	14
1.3.4 L'hélice	14
1.3.5 La voile	15
1.3.6 La coque	16
1.4 Présentation du schéma d'une propulsion hybride navale	16
Chapitre 2 : Modélisation par la puissance	17
2.1 Finalités d'une modélisation	18
2.2 État de l'art	20
2.2.1 Modélisation de moteur thermique	20
2.2.2 Modélisation du moteur électrique	22
2.2.3 Modélisation des convertisseurs d'électronique de puissance	23
2.2.4 Modélisation d'un pack de batteries	24
2.2.5 Modélisation des efforts à l'avancement	26
2.2.6 Modélisation de l'hélice	27
2.2.7 Modélisation des voiles	30
2.2.8 Principaux logiciels de modélisation de propulsion hybride	31
2.3 Modélisation par les flux d'énergie	32
2.3.1 Motivations et état de l'art	32
2.3.2 Notations	34
2.4 Fondements théoriques : les Bond Graphs	36
2.4.1 Présentation succincte des Bond Graphs	36
2.4.2 Ligne de puissance et ligne de modulation	39
2.4.3 Lignes de fourniture d'énergie et de modulation du Bond Graph de la voiture hybride série	40
2.4.4 Modélisation d'un voilier hybride série	41

2.5	Conventions graphiques de la modélisation par les flux d'énergie	42
2.5.1	Blocs fondamentaux	42
2.5.2	Exemples de modélisation par les flux d'énergie	43

Chapitre 3 Modélisation par les flux d'énergie d'un navire hybride 45

3.1.	Modélisation des flux d'énergie des composants d'une propulsion hybride	46
3.2	.Modélisation en grandeurs réduites	47
3.2.1.	Modélisation des organes de puissance	47
3.2.2.	Modélisation des blocs en grandeurs réduites	57
3.3	.Modélisation en grandeurs réelles	60
3.3.1.	Modélisation du groupe électrogène	60
3.3.2.	Modélisation du groupe propulseur	62
3.4	.Conclusion sur la modélisation	64

Chapitre 4 : Problème de dimensionnement 66

4.1	Définition du problème	67
4.1.1	Stratégie d'optimisation sur cycle	68
4.1.2	Cycle pour les bateaux	69
4.2	Méthodologie par itération	70
4.3	Optimisation globale	73
4.3.1	Calcul du meilleur chemin	73
4.3.2	Programmation dynamique	75
4.3.3	Définition de l'algorithme	76
4.3.4	Application à une voiture hybride série	78
4.4	Optimisation locale	83
4.4.1	Optimisation de chaque bloc	84
4.4.2	Application à un véhicule hybride série	85
4.5	Conclusion sur la méthode d'optimisation	90

Chapitre 5 : Dimensionnement d'un navire hybride 91

5.1	Cahier des charges	93
5.1.1	Principales caractéristiques du voilier	95
5.1.2	Cycles de vent	95
5.1.3	Architectures étudiées	95
5.2	Optimisation globale en grandeurs réduites	98
5.2.1	Formulation du problème d'optimisation	98
5.2.2	Discretisation du temps et des variables d'état	100
5.2.3	Résultats de l'optimisation globale	102
5.2.4	Conclusions	106
5.3	Optimisations locales et sélection d'organes réels	107
5.3.1	Optimisation du groupe propulseur (hybride série)	107
5.3.2	Optimisation du groupe électrogène (hybride série)	109
5.3.3	Propulsion conventionnelle	111
5.4	Seconde optimisation globale et validation des choix	114

5.4.1 Propulsion hybride	113
5.4.2 Propulsion conventionnelle	115
5.5 Conclusions	115
Conclusion	116
Bibliographie	118
Annexes	122
Annexe 1 : Notice du Lagoon 420	A-II
Annexe 2 : Caractéristiques de l'hélice	A-IV
Annexe 3 : Caractéristiques de la voile	A-VII
Annexe 4 : Moteurs Thermiques	A-IX
Annexe 5 : Moteurs Electriques	A-X

Notations :

Organe	Symbole	Signification	Unité
Générale	P_o^{el}	Puissance de sortie d'un organe modélisé par les flux de puissance	W
	P_i^{el}	Puissance d'entrée d'un organe modélisé par les flux de puissance	W
	η^{el}	Rendement d'un organe modélisé par les flux de puissance	%
	η_{carto}^{el}	cartographie classique du rendement en fonction de l'effort et du flux	%
	E^{el}	Effort d'un élément	Variable
	F^{el}	Flux d'un élément	Variable
	S_{ext}	Signal influençant le rendement de l'organe modélisé par les flux de puissance	Variable
	Te	Pas d'échantillonnage	s
	$x(t)$	Variable d'état d'un véhicule	variable
	E_c^b	Énergie consommée par un bloc de puissance	Wh
	P^b	Puissance de sortie d'un bloc de puissance	W
	η^b	Rendement d'un bloc de puissance	%
	T^b	Durée d'utilisation d'un bloc de puissance à une puissance donnée	s
Voiles	P_V	Puissance de sortie de la voile	W
	T_V	Poussée des voiles	N
Coque	V_N	Vitesse d'avance du bateau	$m.s^{-1}$
	V_a	Vitesse de l'eau au niveau de l'hélice	$m.s^{-1}$
	t_T	Coefficient empirique de la dépression due à la coque	—
	w_N	Coefficient empirique de l'accélération de l'eau par la coque	—
	S_N	Surface projeté de la coque du bateau	m^2
	ρ_{eau}	Densité de l'eau	$kg.m^{-3}$
	R_N	Résistance à l'avancement de la coque	N
	P_N	Puissance absorbé par la coque	W
Hélice	P	Pas d'avance de l'hélice	m
	T_a	Poussé de l'hélice en eau libre	N
	T_H	Poussé de l'hélice	N
	Q_H	Couple sur l'arbre de l'hélice	N.m
	Ω_H	Vitesse de rotation de l'hélice	$rad.s^{-1}$

Hélice	P_H	Puissance de sortie de l'hélice	W
	w_N	Coefficient empirique de l'accélération de l'eau par la coque	—
	β	Angle d'attaque de la pale d'une hélice dans l'eau à 0.7 fois son rayon	rad
	V_a	Vitesse d'avance de l'eau au niveau de l'hélice	$m.s^{-1}$
	$V_{0.7}$	la vitesse de l'eau à 70% du rayon	$m.s^{-1}$
	D_H	Diamètre de l'hélice	m
	R_H	Rayon de l'hélice	m
	C_T	Valeur expérimentale liant la vitesse d'avance de l'eau, la vitesse de rotation de l'hélice et sa poussée	—
	C_Q	Valeur expérimentale liant la vitesse d'avance de l'eau, la vitesse de rotation de l'hélice et son couple	—
	α_H	Rapport entre P_H et P_N	—
	η^{hel}	Rendement d'une hélice	%
Moteur thermique	η_{carto}^{mth}	Rendement d'un moteur thermique tiré d'une cartographie couple/vitesse	—
	C^{mth}	Couple de sortie d'un moteur thermique	N.m
	Ω^{mth}	Vitesse de sortie d'un moteur thermique	$rad.s^{-1}$
	Ω_{max}^{mth}	Vitesse de rotation maximale d'un moteur thermique	$rad.s^{-1}$
	p_{ess}	Pression d'injection de l'essence dans un moteur thermique	Pa
	m_{mth}	Paramètre lié au contrôle d'un moteur thermique	—
	ρ_{ess}	Densité de l'essence	—
	P_c	Pouvoir calorifique de l'essence	$J.kg^{-1}$
	d_{ess}	Débit de l'essence en entré du moteur thermique	$l.s^{-1}$
	η^{mth}	Rendement d'un moteur thermique normalisé	%
	P^{mth}	Puissance de sortie d'un moteur thermique normalisé	%
	P_{max}^{mth}	Puissance de sortie maximale d'un moteur thermique, référence de la modélisation en grandeur réduite de celui-ci	W
Moteur électrique	η^{mel}	Rendement d'un moteur électrique normalisé	%
	P^{mel}	Puissance de sortie d'un moteur électrique normalisé	%

Moteur électrique	P_{max}^{mel}	Puissance de sortie maximale d'un moteur électrique, référence de la normalisation	W
	η^{bat}	Rendement d'une batterie normalisé	%
	P^{bat}	Puissance de sortie d'une batterie normalisé	%
	P_{1C}^{bat}	Puissance de charge ou de décharge d'une batterie à 1 C, référence de la normalisation	W
	$X_{EdC}(t)$	Variable d'état, état de charge de la batterie	Wh
Groupe électrogène	η_{carto}^{ge}	Rendement du groupe électrogène en grandeur réel	—
	Ω^{ge}	Vitesse de rotation du point milieu du groupe électrogène	rad.s ⁻¹
	C^{ge}	Couple du point milieu du groupe électrogène	N
	η^{ge}	Rendement d'un groupe électrogène normalisé	%
	P^{ge}	Puissance de sortie d'un groupe électrogène normalisé	%
	P_{carto}^{ge}	Puissance de sortie d'un groupe électrogène en grandeur réel	W
	P_{max}^{ge}	Puissance de référence maximale du groupe électrogène normalisé	W
	P^{cab}	Puissance consommée par le groupe électrogène	W
Groupe propulseur électrique	η^{gpe}	Rendement d'un groupe propulseur électrique normalisé	%
	P^{gpe}	Puissance de sortie d'un groupe propulseur électrique normalisé	%
	P_{max}^{gpe}	Puissance de sortie maximale du groupe propulseur électrique	W
	η_{carto}^{gpe}	Rendement d'un groupe propulseur électrique tiré d'une cartographie	%
	P_{carto}^{ge}	Puissance de sortie d'un groupe électrogène tirée d'une cartographie	W
Voiture	F_{av}	Résistance à l'avancement d'une voiture	N
	f_{voit}	Résistance au roulement de la roue d'une voiture	—
	m_{voit}	Masse d'une voiture	kg
	g	Intensité de la gravitation	m.s ⁻²
	ρ_{air}	Densité de l'air	kg.m ³
	S_{voit}	Surface frontale d'une voiture	m ²
	C_x	Coefficient de trainé d'une voiture	—
	V_{voit}	Vitesse d'avance d'une voiture	m.s ⁻¹
	A_{voit}	Accélération d'une voiture	m.s ⁻²
	R_{frein}	Force de freinage	N

Introduction

La propulsion hybride fait parler d'elle ces dernières années. La sortie des différentes voitures hybrides et la vague verte annoncée entraînent une frénésie de communication autour de tout changement annoncé « vert ». Mais J.M. Jancovici et A. Grandjean affirment dans (Jancovici et Grandjean 2009) que plus un phénomène est à la marge, plus il fait parler de lui. Pour autant ce mode de propulsion ne permet qu'une amélioration à la marge du rendement d'une propulsion, quand il faut gagner un facteur quatre sur le rejet de gaz à effet de serre pour éviter un réchauffement climatique trop fortement dommageable à notre planète. En effet, les voitures hybrides ne permettent qu'une diminution de la consommation de 20% à 30%, et encore en ville. Cette diminution de consommation ne peut-être utile que si elle s'accompagne d'autres actions, comme le présente l'association NégaWatt (Anon 2005). Pour autant faut-il arrêter de travailler à ce type de motorisation? Nous pensons que non.

Dans le domaine naval, la propulsion hybride est peu présente. Elle existe sur les gros navires sous forme de propulsion hybride série, sur les sous-marins et, depuis peu, sur un et sous forme de motorisations pour voilier (par exemple le voilier de série Lagoon) développées par la fondation Bénéteau (Lagoon 2007) ou l'entreprise Nanni-Diesel (Nanni-Diesel). Le dimensionnement de la propulsion d'un voilier n'est pas réalisé par une approche scientifique. Seul le dimensionnement de la voile et de la coque est optimisé pour les compétitions internationales (Parolini et Quarteroni 2005). L'étude de la chaîne de propulsion hybride d'un voilier en vue de son dimensionnement est donc une première.

Déjà intéressante dans le cas d'une combinaison thermique/électrique (Orberger 2008), la propulsion hybride voit son intérêt encore accrue dans le cas d'un voilier. La fondation Bénéteau le souligne bien :

- propulsion électrique silencieuse, non polluante sur le lieu de propulsion (port, zone fragile etc.) ;
- récupération possible de l'énergie du vent, ce qui entraîne une consommation de carburant plus faible et une plus grande autonomie.

Il existe d'autres avantages, en fonction de la solution technique choisie :

- possibilité de placer la motorisation thermique n'importe où dans le voilier, dans le cas d'une propulsion hybride série, et de mieux l'insonoriser ;
- possibilité d'utiliser d'autres types d'hélices ;
- possibilité d'utiliser d'autres motorisations.

Introduction

Le dimensionnement et l'optimisation d'une propulsion hybride est une problématique désormais connue dans le domaine automobile. Ces deux problèmes ne peuvent être résolus de manière indépendante : un système n'est bien dimensionné que relativement à des spécifications et à une commande. En effet, la meilleure commande ne peut répondre de façon optimale si le système n'est pas dimensionné correctement. De même, la conception d'un système ne peut être optimale qu'en fonction de la stratégie de commande choisie. Ce problème d'optimisation simultanée de la commande et du dimensionnement des composants est complexe et il doit s'appuyer sur des modèles de complexité juste nécessaire et suffisamment génériques des composants. Trop fine, la modélisation complique, voire rend impossible, le processus d'optimisation qui requiert la simulation de ces modèles à chaque évaluation du critère à optimiser. Trop simpliste, elle ne permet pas la prise en compte des paramètres non marginaux du système. L'objectif initial de l'hybridation est de profiter des avantages de plusieurs sources d'énergie. Or, cet objectif ne peut-être atteint que si le système est dimensionné en corrélation avec son utilisation. La méthode usuelle de dimensionnement d'un système naval consiste à définir les limites d'utilisation du navire et, à partir, de ces limites de choisir ses constituants. Cette méthode ne peut pas être utilisée dans le cadre d'une propulsion hybride, car elle ne prend pas en compte les interactions entre les sources d'énergie du système.

Nous avons bien évidemment analysé les méthodes utilisées pour l'optimisation de la propulsion d'un véhicule terrestre. Cette étude a fait ressortir une difficulté de la problématique navale : le manque de norme pour la motorisation, ce qui entraîne l'impossibilité de comparer un voilier d'un autre. On dispose, au mieux, de la consommation à l'heure, en vitesse de croisière. Mettre en place un cycle imposant la vitesse instantanée, comme pour l'automobile est trop peu réaliste (hormis près des côtes ou dans certaines zones bien particulières, la vitesse des navires n'est pas contrainte par la réglementation ou le flot de la circulation). Nous définirons uniquement le temps de parcours, ce qui revient à imposer la vitesse moyenne. Ceci introduit un degré de liberté supplémentaire à optimiser (la vitesse instantanée) et rend les calculs de cycle beaucoup plus longs.

L'ambition de cette thèse est de proposer une méthodologie d'optimisation conjointe du dimensionnement et de la commande d'une propulsion hybride, avec un minimum de choix technologiques a priori. La démarche que nous proposons comporte deux phases. La première ne considère que les flux d'énergie entre les principaux organes de la propulsion. Ces transferts ont un coût énergétique que nous évaluons grâce au rendement des organes. Pour éviter de faire des choix prématurés, nous avons défini des modèles génériques adimensionnels du rendement de chaque famille d'organes. L'objectif de la première phase est d'optimiser la répartition des puissances entre les différentes sources disponibles et de déterminer la sollicitation de chaque organe. Les modèles proposés étant très simples, l'optimisation peut être réalisée en un temps relativement court, même pour des systèmes complexes. Au cours de la seconde phase, nous précisons le modèle, en recherchant dans une base de données d'organes réels ceux qui offrent les meilleures performances pour la sollicitation obtenue en phase 1. On vérifie alors que la répartition des puissances n'a pas trop changé.

Introduction

Le contenu du mémoire est le suivant. Tout d'abord, lors du premier chapitre, nous rappellerons le principe de la propulsion hybride ainsi que les différents éléments de puissance la composant, puis nous présenterons brièvement les systèmes étudiés.

Dans le second chapitre, nous présenterons de façon détaillée les modèles utilisés usuellement dans la modélisation de propulsion hybride, puis nous présenterons le principe de la modélisation par les flux d'énergie et son fondement théorique sur les Bond-Graphs.

Le troisième chapitre présentera la modélisation des blocs de puissance à partir des modèles présentés au chapitre 2, que cela soit en grandeur réduite ou réelle.

Puis, dans le quatrième chapitre, nous aborderons la méthode utilisée pour optimiser le dimensionnement et la commande d'un système modélisé par les flux d'énergie. Nous appliquerons cette méthode à un exemple du secteur automobile.

Durant le dernier chapitre, nous appliquerons cette méthode d'optimisation, de dimensionnement et de commande au cas d'étude de cette thèse : un voilier hybride série.

Enfin, nous conclurons sur le travail effectué, sur les avantages et inconvénients de cette méthode et sur les résultats de l'optimisation d'un voilier hybride série.

Chapitre 1

Problématique de l'hybridation dans le naval

1.1 Hybridation d'une propulsion

Lorsqu'on s'intéresse à la propulsion hybride, on pense actuellement à l'hybridation moteur à combustion interne/moteur électrique. Cette combinaison est dominante, car elle permet des changements minimaux sur la conception des voitures, têtes de file de l'hybridation. D'autres hybridations sont possibles, comme l'hybridation thermique/hydraulique des engins de travaux publics, et ont eu plus ou moins de succès. La mise en place d'une propulsion hybride n'est pas une idée nouvelle. Si la définition d'une propulsion hybride est l'utilisation de deux sources d'énergie, les galères romaines étaient hybrides : une source musculaire et une source éolienne. Plus proches de nous, on trouve les premiers voiliers à vapeur. Nous allons donc commencer par définir l'hybridation de la propulsion d'un véhicule, puis ses usages possibles.

1.1.1 Définition de l'hybridation

L'hybridation d'une propulsion n'est pas un processus bien défini. La première condition, pour qu'une propulsion puisse être considérée comme hybride, est la présence d'au moins deux sources d'énergies. Mais cette condition n'est pas suffisante, sinon tous les véhicules à propulsion thermique peuvent être considérés comme hybrides, l'électricité étant forcément présente pour de multiples fonctions. D'autres conditions sont donc nécessaires pour différencier une propulsion conventionnelle d'une propulsion hybride. Pour l'application au domaine automobile (Scordia 2004) impose la présence d'au moins une source réversible, ce qui fait que J. Scordia propose deux définitions de l'hybridation :

- un véhicule hybride est un véhicule disposant d'au moins deux sources d'énergies, et dont au moins deux participent à la traction du véhicule ;
- un véhicule hybride est un véhicule disposant d'au moins deux sources d'énergie, et pourvu d'au moins une des fonctionnalités suivantes : optimisation de la gestion énergétique des accessoires, start/stop, récupération au freinage, « boost » et mode tout électrique.

La première définition revient à mettre de côté l'hybridation dite série, la seconde à définir l'hybridation par les fonctionnalités qu'elle peut apporter. Il reconnaît que ces définitions sont limitantes, et il souligne que la seconde correspond à la communication effectuée par le milieu industriel du monde automobile.

La définition que nous retiendrons est la suivante :

Définition 1.1 : Est dit hybride un véhicule dont la chaîne de propulsion contient au moins deux sources d'énergies d'ordre de grandeur équivalent dont au moins une est réversible.

Cette définition permet de prendre en compte les hybridations de type série et parallèle, mais elle met de côté la « micro-hybridation », car la seconde source d'énergie n'est pas du même ordre de grandeur que la source thermique.

1.1.2 Utilisation de l'hybridation

L'utilité d'une propulsion hybride n'est pas garantie. Dans le cas d'une utilisation à vitesse constante sur tout le trajet de déplacement, comme une voiture sur une autoroute, l'hybridation n'a pas d'intérêt si le moteur est correctement dimensionné, voire engendre une consommation d'énergie supplémentaire du fait de la masse ajoutée. L'hybridation thermique/électrique est tout de même utilisée sur les cargos et autres navires à gros tonnage pour deux raisons :

- permettre une redondance des sources d'énergies primaires, sans augmenter la complexité mécanique ;
- permettre d'alimenter les consommateurs électriques de bord, sans avoir de générateur supplémentaire.

L'hybridation n'est pas une solution simple à la course au rendement énergétique. C'est pour cela qu'il faut une méthodologie de modélisation, de dimensionnement et de commande spécifique.

1.1.3 Les différentes structures de propulsion hybride

Envisageons une propulsion hybride avec deux sources d'énergie et considérons un cas répandu : la source d'énergie 1 est une source thermique, non réversible, la source 2 est électrique, réversible.

Les principaux organes de la source 1 sont donc :

- un réservoir d'énergie chimique qui ne peut que se vider ;
- un convertisseur énergie chimique/mécanique.

Les principaux organes de la source 2 sont donc :

Chapitre 1

- un réservoir d'énergie électrique réversible (qui peut se vider et se remplir) ;
- un convertisseur électrique/mécanique réversible.

Il y a au moins trois grandes familles d'hybridation : l'hybridation parallèle, l'hybridation série et l'hybridation série-parallèle. L'hybridation série est la plus simple à mettre en œuvre. Il faut ajouter un moteur électrique à la place du moteur thermique ; retirer en partie les adaptations mécaniques nécessaires pour le moteur thermique (embrayage, boîte de vitesse, etc) et en revanche ajouter des batteries et un groupe électrogène. Cette structure est présentée en figure 1.1. Un grand avantage de cette solution est la souplesse quand au positionnement du moteur électrique comparé à celle d'un moteur thermique dans une solution traditionnelle. Ainsi un moteur électrique peut-être placé par exemple dans une roue, dans un POD (structure accrochée sous le bateau contenant l'hélice et le moteur). Un inconvénient est qu'elle nécessite trois moteurs de puissance équivalente (un thermique et deux électriques), ce qui engendre un coût et un poids supplémentaire. Les avantages et les inconvénients sont listés dans le tableau 1.1, dans le cadre d'une propulsion terrestre.

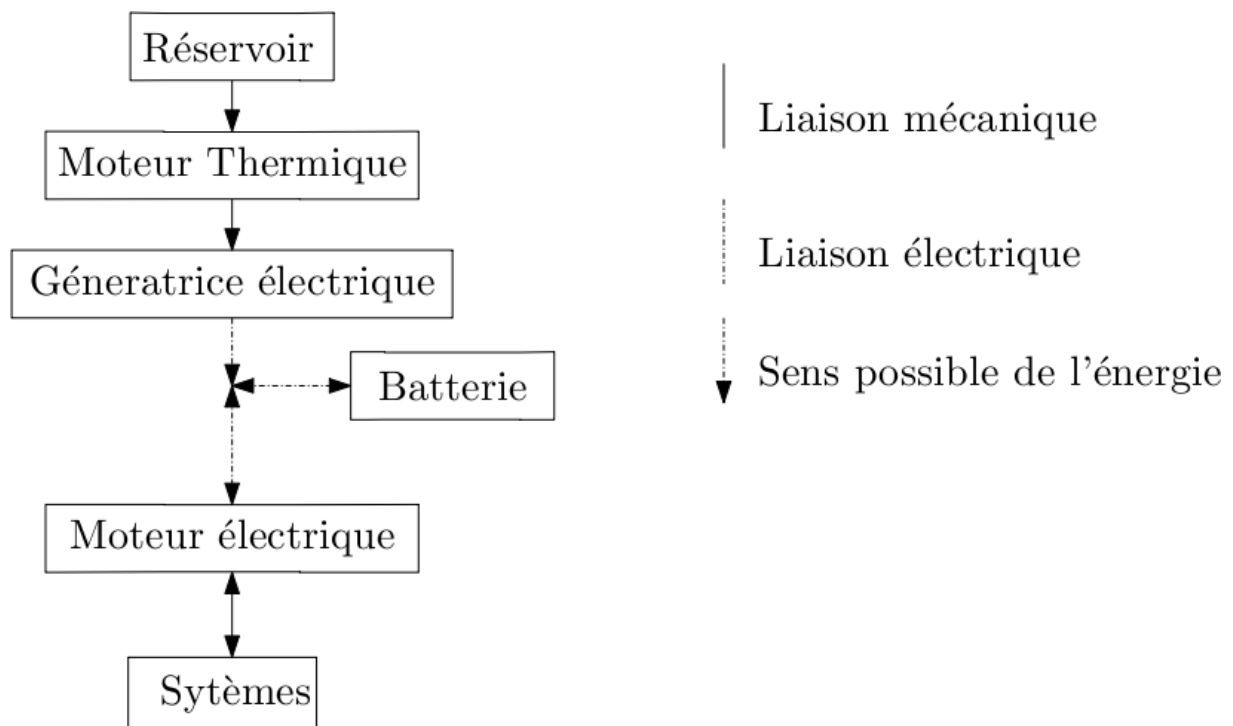


Figure 1. 1 : structure hybride série

Avantages	Inconvénients
Bon rendement en régime dynamique	Faible gain de rendement en régime stationnaire
Facilité de commande	Nécessite trois machines de forte puissance
Mode tout électrique possible	Coût
Bonne possibilité de récupération d'énergie	Masse embarquée
Confortable d'utilisation	
Flexibilité d'installation	

Tableau 1.1 :avantages et inconvénients de la propulsion hybride série

L'hybridation parallèle est plus complexe. Il faut un moteur électrique, des batteries bien sûr, et toujours un moteur thermique. Il faut aussi ajouter un couplage mécanique des deux moteurs. Cela peut être un embrayage ou un train épicycloïdal. Cette structure est présentée en figure 1.2. Il y a deux moteurs, un coût et un poids inférieurs à l'hybride série. Les avantages et les inconvénients sont listés dans le tableau 1.2.

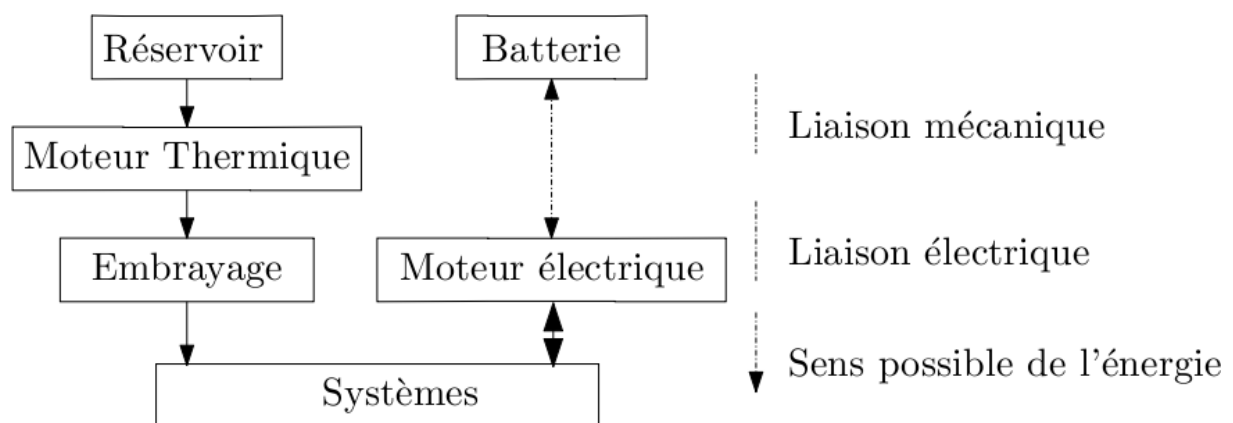


Figure 1. 2 : structure hybride parallèle

Avantages	Inconvénients
Bon rendement	Complexe à commander
Mode tout électrique possible	Complexe à implanter
Nécessite moins de machines tournantes	

Tableau 1.2 :avantages et inconvénients de la propulsion parallèle

L'hybridation série-parallèle est un mixe des deux, mais il y a de nombreuses façons de la mettre en place, (Scordia 2004) les présente de façon complète. Nous avons choisi de n'étudier par la suite que la structure hybride série qui nous semble davantage réaliste dans le cadre naval.

1.2 La problématique navale

La diminution de la consommation de carburant n'est pas le seul objectif de l'hybridation. Dans le cadre de la propulsion navale, l'hybridation permet aussi d'apporter de nouvelles fonctionnalités :

- propulsion électrique pure silencieuse ;
- réponse très rapide de la commande en poussée de l'hélice ;
- inversion de la poussée de l'hélice simple ;
- stockage plus important d'énergie électrique à bord ;
- si le navire a des voiles, récupération d'énergie par l'hélice ;
- placement de la motorisation thermique sans contrainte de ligne d'arbre, ce qui permet un meilleur calfeutrage des bruits et une meilleure répartition des masses ;
- utilisation de l'hélice dans un POD, nacelle orientable sous-marine, ce qui permet une meilleure manœuvrabilité.

Nous allons commencer par référencer les cas d'utilisations de propulsions hybrides, comparer la problématique terrestre et la problématique navale puis nous déterminerons quels types d'utilisation sont envisageables sur un navire dont la puissance de propulsion reste modeste.

1.2.1 État de l'art

L'hybridation série est de mise dans le cadre de la navigation. L'exemple le plus typique est la propulsion des sous-marins, mais ce type d'hybridation est aussi utilisé sur des navires de fort tonnage. Un exemple contemporain est la propulsion du paquebot « Queen Mary II » :

- deux turbines à gaz de 25.1MW ;
- quatre alternateurs diesel de 16.7MW ;
- quatre hélices de propulsion de type POD d'une puissance totale de 86MW.

Mais la problématique de cette thèse est la propulsion hybride de bateau dont la puissance propulsive est faible : inférieure à 100kW. Ceci change la donne. Jusqu'à très récemment, hormis quelques bateaux tout électrique pour de la navigation sur site protégé et quelques bricolages d'amateurs, il n'y avait pas de propulsion principale électrique pour de tels bateaux. Récemment Lagoon, filiale de Bénéteau a sorti un voilier hybride : le Lagoon 420.

Chapitre 1

La notice technique (Lagoon 2007) de ce catamaran présente ce voilier hybride série. Il a deux hélices entraînées par deux moteurs électriques de 10kW. Voici les principales caractéristiques de la propulsion, tirées de la documentation :

- Groupe électrogène 17,5 kVA - 50Hz (220V) ou 21.5 kVA - 60Hz (110V) en option ;
- 2 Chargeurs/Convertisseurs 220V/110V– 72V de 120 A chacun ;
- Stockage de l'énergie dédié aux moteurs électriques dans deux packs de six batteries séparables (sécurité : en cas de défaut d'une batterie, un pack peut encore alimenter un ou deux moteurs). L'énergie totale embarqué est de 30kWh ;
- Propulsion par deux moteurs électriques de 10 kW chacun, alimentés en 72V.

On peut remarquer un déséquilibre entre la puissance du groupe électrogène de base et la puissance des moteurs électriques. Un tel déséquilibre est courant dans la propulsion hybride et est appelé «downsizing». Il est en effet possible de diminuer la puissance du groupe électrogène en considérant que la puissance demandée en régime dynamique est lissée grâce aux batteries. La notice d'utilisation du réseau électrique de bord et de la propulsion est présentée en annexe 1.

On peut remarquer dans cette notice d'utilisation qu'il y a deux modes de fonctionnement en propulsion : le premier privilégie le réseau électrique de bord tandis que le second ne fournit de l'énergie qu'à la propulsion. Dans ces deux modes, il est possible de récupérer de l'énergie grâce à l'hélice. Dans ce cas, la régénération :

- n'est fonctionnelle qu'à partir de 5 nœuds, ce qui peut s'expliquer si l'on analyse le rendement des hélices (voir chapitre 2) ;
- est réalisée en limitant la vitesse de rotation de l'hélice à 150 tr/min, il n'y a donc pas de régulation de cette énergie : c'est la vitesse d'avance du bateau qui l'impose ;
- n'existe qu'en dessous de 18 nœuds pour éviter les risques de surcharges ;

La gestion de l'état de charge des batteries est réalisée par une vérification de la tension à vide toutes les heures.

La propulsion hybride de voiliers commence à se développer industriellement ; mais les limitations de cette solution sont importantes et des améliorations semblent possibles. Il est en effet possible, en maîtrisant la commande des moteurs, de ne pas limiter la puissance de régénération par la seule vitesse d'avance, mais de décider du pourcentage de régénération voulu. La gestion de l'état de charge des batteries peut-être réalisée plus finement, ce qui permettrait de ne pas se limiter à la variation d'état de charge de 20%, d'en utiliser une portion plus importante. La fondation Bénéteau a annoncé, en décembre 2009, le développement d'une motorisation hybride pour voilier. Cette motorisation se présente

comme une solution de transformation d'un voilier en voilier hybride parallèle avec l'hélice sur un POD. Une rotation de 180° de l'hélice est dès lors possible permettant une utilisation efficace en hydrolienne.

1.2.2 Comparaison terrestre/navale

La méthode de dimensionnement d'un bus hybride et d'un bateau réalisant des navettes peut-être similaire : un trajet maîtrisé, des temps d'utilisation connus, une charge dont l'impact n'est pas majeur sur la consommation. Hormis ce cas, les problématiques terrestres et navales ne sont pas les mêmes. Il est illusoire de vouloir appliquer directement les solutions terrestres pour le dimensionnement d'un navire, quelle que soit sa puissance. Un bateau se déplace à une vitesse de croisière très proche de sa vitesse moyenne (il peut rester des heures au même régime moteur).

Il faut prendre en compte ces impératifs pour le dimensionnement, mais aussi pour la modélisation d'une propulsion hybride navale.

Propulsion automobile	Propulsion navale
Beaucoup de régimes transitoires	Régime stationnaire prépondérant
Temps de trajet court	Temps de trajet long
Vitesse limitée par des règles	Vitesse libre la plupart du temps
Versatilité de l'utilisation du véhicule	Versatilité du vent dans le cas d'un voilier

Tableau 1.3 : comparaison d'utilisation de la propulsion terrestre et de la propulsion navale

1.2.3 Quelle utilisation de l'hybridation ?

L'utilité de la propulsion électrique, donc de la propulsion hybride série, n'est plus à démontrer : groupes électrogènes pouvant être multiples, sans système mécanique complexe, ce qui assure une redondance ; consommateurs de bord alimentés sur les batteries ; simplicité de l'arbre de l'hélice. Un autre avantage peut-être l'utilisation de POD, mais cette utilisation n'est pas considérée par tous les constructeurs/armateurs comme intéressante au vu des contraintes supplémentaires sur la coque et du peu de retour actuel sur cette technologie.

Comme annoncé précédemment, nous n'étudierons pas tous les cas d'hybridation de faible puissance. Nous n'étudierons que le cas d'un voilier monocoque. L'utilisation d'un tel bateau est très différente en fonction de ses passagers, du type de voilier, de la saison, du lieu de

mouillage. Nous nous intéresserons principalement à l'utilisation en navigation à la voile, sur un trajet assez long. Il serait possible de calculer le dimensionnement optimal pour des scénarios donnés. L'objectif de cette thèse n'est cependant pas de dimensionner un objet industriel, mais bien de proposer des outils de dimensionnement, et finalement de tester leur efficacité sur un problème réaliste.

1.3 Les composants d'une propulsion hybride

Une propulsion hybride est composée de nombreux éléments. Nous allons les décrire en commençant par le système de stockage de l'énergie, essentiel pour l'autonomie.

1.3.1 Le stockage d'énergie

Tout système mobile a besoin d'un apport extérieur d'énergie, mais c'est par le stockage réversible de l'énergie que la propulsion hybride prend un sens. Il existe de nombreuses façons de stocker l'énergie :

- sous forme chimique. C'est le cas des batteries, mais aussi du classique réservoir de carburant. Cette forme d'énergie peut donc être réversible ou non. Le stockage par batteries est en pleine évolution, pour répondre notamment aux besoins des véhicules hybrides ou électriques. Il est désormais possible de trouver des batteries ayant des densités d'énergie de 200Wh/kg. Ces densités sont à comparer à celle des meilleures batteries au plomb (40Wh/kg), mais à relativiser vis-à-vis du litre de carburant : 12kWh/kg. Le stockage dans un réservoir de carburant est celui qui offre et de loin la meilleure densité d'énergie. Malheureusement, cette solution n'est pas sans défaut : le carburant est bien souvent fossile et induit des émissions polluantes ;
- sous forme pression. Ce qui est le cas pour les réseaux de gaz sous pression, est aussi sur les réseaux hydrauliques. Le stockage du gaz sous pression souffre cependant d'un manque de retour scientifique sur le rendement associé. Le stockage hydraulique permet une hybridation, a une grande densité de puissance, mais une faible densité d'énergie.
- sous forme mécanique. C'est le cas pour les volants d'inertie. Les volants d'inertie ont une densité de puissance importante, mais une densité d'énergie assez faible. Ils sont très couramment utilisés dans tous les systèmes ayant des fluctuations de couples (moteur thermique etc.) mais pour de faibles énergies. Pour des énergies importantes,

ils supposent une installation sécurisée, ce qui est difficilement compatible avec un véhicule pouvant subir des accidents ;

- sous forme électrique. C'est le cas dans les capacités ou supercapacités. Les supercapacités ont une densité de puissance importante, mais une densité d'énergie assez faible, comme les volants d'inertie ;
- sous forme magnétique. C'est le cas dans les bobines supraconductrices, mais elles nécessitent de maintenir des températures trop basses pour être viables sur un système mobile ;
- sous forme thermique. Ce type de stockage n'est pas utilisable pour un système mobile, car il demande des masses trop importantes.

Les méthodes habituelles de stockages sont les plus efficaces en terme de densité d'énergie et de simplicité de réutilisation. Le stockage par réservoir de carburant est donc le plus utilisé, puis celui par batterie. Le premier pour sa densité, le second car l'électricité à des applications irremplaçables : éclairage, petite motorisation, contrôle électronique, etc. Dans le domaine automobile, les deux motorisations développées furent les motorisations électriques et thermiques, mais cette dernière a pris le pas en raison de sa densité de stockage. Malheureusement, c'est un moyen de stockage non réversible. L'hybridation est la solution actuellement retenue pour contrebalancer cet inconvénient, sans diminuer l'énergie embarquée et l'autonomie du système.

Les batteries modernes ont une densité énergétique, et une densité de puissance, bien plus importante que les batteries au plomb, ce qui permet une hybridation plus avancée (plus de puissance de batteries embarquée).

1.3.2 La motorisation thermique

Comme rappelé précédemment, l'intérêt de la motorisation thermique découle de la densité énergétique du stockage. En ce sens, toutes les technologies de motorisation thermique à combustion interne sont envisageables. Par exemple, les moteurs diesel, diester, essence, GPL, gaz naturel, et pourquoi pas hydrogène. Les possibilités de chaque technologie sont différentes, que cela soit d'un point de vue des performances dynamiques, mais aussi du rendement, de l'encombrement, etc. Il est aussi envisageable d'utiliser des moteurs thermiques à combustion externe comme le moteur Stirling, ou le moteur Éricsson que présentent (Bonnet 2005) et (Alaphilippe et al. 2004). Les intérêts de ces moteurs sont multiples : pas d'explosion donc moins de bruit, une combustion plus complète et mieux maîtrisée, un rendement maximal théorique supérieur. Nous ne les avons pas étudié faute de données constructeurs

relatives à des moteurs d'une centaine de kW. Ce type de motorisation refait cependant surface dans la cogénération (Sunmachine 2005). Les faibles performances dynamiques ne sont pas une gêne dans le cas d'une propulsion hybride série. Il est toutefois bon de rappeler que dans le domaine naval de faible puissance, les motorisations essence et diesel sont omniprésentes. Nous ne considérerons, par la suite, que la motorisation thermique à combustion interne.

1.3.3 La motorisation électrique

Comme pour les moteurs thermiques, toutes les technologies sont possibles. Les moteurs électriques peuvent être à courant continu, synchrones ou asynchrones. Nous n'étudierons que les moteurs synchrones et les moteurs asynchrones. Il est important de rappeler qu'un moteur électrique seul n'est pas suffisant : il faut prendre en compte l'électronique de puissance associée. La chute du prix de l'électronique numérique ainsi que sa montée en puissance permettent d'envisager des commandes fines et abordables. De nombreuses études actuelles portent sur la propulsion navale tout électrique (comprendre hybride série), que ce soit pour le dimensionnement du moteur (Skinner et al. 2007), pour la modélisation de cette propulsion (Wenzhong Gao et al. 2007) ou pour la mise en place de l'électronique de commande (Pant et al. 2007).

1.3.4 L'hélice

Il existe deux grandes familles d'hélices :

- L'hélice classique. De nombreuses publications sont consacrées, pour la modéliser (Carlton 2007), (Fossen 2002), la concevoir (D'Espagnier et al. 2007) et (Takinaci et Altar 2002), ou pour la piloter (McDonald et al. 2007), (Smogeli 2006). Cette hélice peut être installée à sa position habituelle en queue de bateau, mais aussi sur un POD comme le présente (Lateb et al. 2005)
- L'hélice RIM. Il s'agit d'une hélice dont la motorisation est périphérique comme le présente la figure 1.3. Ce type d'hélice est considéré par (Shu Hau 2006), pour dimensionner un moteur électrique de type synchrone à aimants permanents. L'entreprise Brunvoll fabrique ce type d'hélice, et annonce des gains en rendement, une diminution des vibrations, une meilleure accélération possible par la légèreté des pièces en mouvement et un dimensionnement plus flexible du moteur électrique à aimants permanents (Brunvoll 2005).

Nous n'étudierons durant cette thèse que l'hélice classique, car l'hélice RIM n'a pas encore une littérature suffisante pour permettre une modélisation fiable.

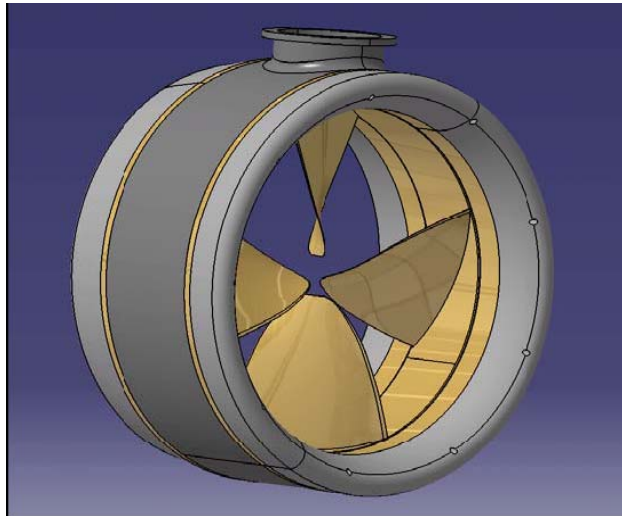


Figure 1. 3 : hélice RIM, illustration tirée de (Brunvoll 2005)

1.3.5 La voile

La voile est une part très importante d'un voilier, puisque c'est elle qui doit permettre le déplacement du bateau la plupart du temps. Il existe de nombreux types de voiles, de la voile carrée, à la voile bermudienne, en passant par le spinnaker. Il y a aussi des propositions de cerfs-volants pour permettre aux gros bateaux d'utiliser la force du vent, sans avoir à s'encombrer d'un mât et de la logistique associée.

Une autre voile technologique existe : la turbovoile, qui utilise un dérivé de l'effet Magnus. Le principe étant d'avoir un cylindre possédant un volet mobile disposé en saillie, et surtout un système d'aspiration permettant de créer une importante dépression perpendiculaire à la direction d'avance du navire pour propulser celui-ci.

Nous ne nous intéresserons qu'aux voiles classiques. Celles-ci ont été modélisées par différentes méthodes utilisant la dynamique des fluides (Hedges et al. 1996) et (Korpus 2007). D'autres articles présentent le dimensionnement et la commande de voilier pour les besoins d'une course avec skipper comme (Parolini et Quarteroni 2005) ou pour la mise en place d'un système autonome comme le présente (Abril et Salom 1997) ou (Stelzer et Pröll 2008). Il est donc envisageable de piloter un voilier de façon automatique. Une fois la carte météorologique récupérée il est simple de calculer le trajet idéal d'un point à un autre comme le présente (Moawad et al. 2008).

1.3.6 La coque

Qu'elle soit en bois, en acier, en aluminium, en ferrociment ou tout autre matériau composite, la coque assure la flottaison du bateau. Classiquement un bateau n'en a qu'une, de forme effilé pour fendre les eaux, mais il peut avoir jusqu'à 5 coques. Certaines coques sont modelées pour soulever le bateau lorsque la vitesse augmente, c'est le cas spectaculaire de la coque de l'hydroptère, capable d'aller à 41.5 nœuds (76.86km.h^{-1}) de moyenne sur un mille nautique à la seule force du vent. De la même façon que la voile, la coque a été modélisée pour permettre le calcul des efforts à l'avancement à partir de la dynamique des fluides. La modélisation se fait soit par éléments finis (Korpus 2007), soit par des équations (Pérez Arribas 2007). Une autre approche consiste à considérer la coque d'un bateau de façon globale comme (Blanke et al. 2000). C'est cette dernière méthode que nous développerons durant le chapitre 2.

1.4 Présentation du schéma d'une propulsion hybride navale

Cette thèse est développée autour du cas de la propulsion d'un voilier hybride série. Nous avons choisi ce type de motorisation pour la simplicité apportée par l'hybridation série, mais aussi par la conviction que l'hybridation série est plus facilement développable pour la propulsion de petite puissance. Il est possible de tirer partie de nouvelle motorisation comme le RIM, mais aussi d'installer le groupe propulseur sans contrainte à l'intérieur du bateau. De ce choix découle le schéma de la propulsion hybride navale de la figure 1.4.

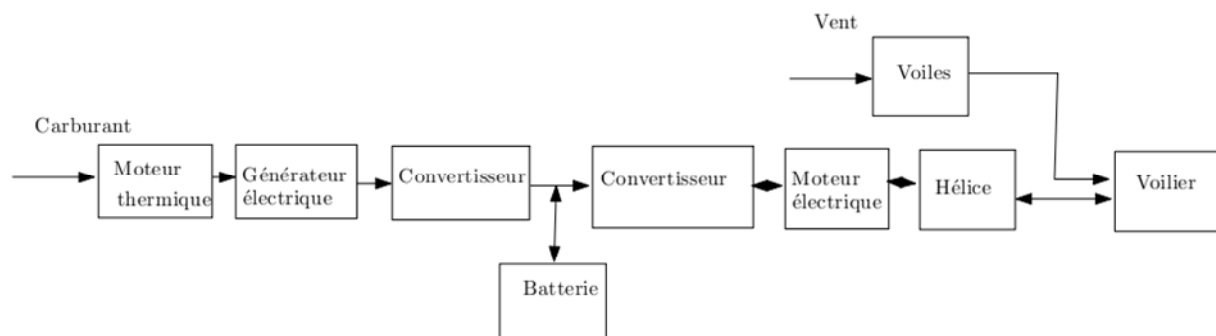


Figure 1. 4 : schéma de propulsion d'une propulsion hybride série navale

Les résultats de l'optimisation de cette architecture seront présentés durant le chapitre 5. Avant de présenter ces résultats, il faut introduire les outils utilisés pour modéliser (chapitre 2 et 3), puis pour dimensionner et optimiser la propulsion (chapitre 4).

Chapitre 2

Modélisation par la puissance

La modélisation permet, au travers de la simulation, de représenter le comportement du système pour une certaine utilisation. L'enjeu est ici de répondre à la question : le véhicule que je conçois est-il optimisé au sens des critères envisagés ? Pour ce faire, il est illusoire de modéliser au plus proche de la réalité le comportement de chaque composant d'une propulsion, et ce pour des raisons de :

- complexité et de temps de calculs excessifs ;
- erreurs cumulées qui annuleraient la précision élevée atteinte sur certains éléments ;
- modèle simulé sur une utilisation idéalisée.

La dernière raison est la plus forte. Un tel modèle est utilisé sur un cycle défini pour choisir la commande et pour calculer des indicateurs tels que la consommation de carburant. Ce cycle, aussi précis soit-il, ne représentera jamais la réalité dans le cas d'un système généralisé. Il est peu pertinent d'avoir un modèle parfait, le résultat ne sera exact que dans le cas unique du cycle d'utilisation. L'erreur, dans le cas d'une autre utilisation, n'est pas quantifiable. On peut donc d'ores et déjà oublier la recherche du modèle le plus fin possible.

Dans ce chapitre, nous présenterons la modélisation de chaque composant utilisé classiquement dans le cas d'une propulsion hybride. Nous porterons une attention particulière à la modélisation des organes spécifiques à la navigation et, notamment, l'hélice. Nous présenterons ensuite une nouvelle approche de modélisation au travers des flux de puissance.

2.1 Finalités d'une modélisation

Les contextes économiques et techniques actuels poussent les entreprises à réaliser des produits de plus en plus complexes, tout en réduisant les temps de conception. Dans cet environnement, l'utilisation de modèles à toutes les phases clés du cycle en V de conception et d'intégration des produits s'avère cruciale, par exemple, en lieu et place de l'utilisation de prototypes ou de maquettes.

Certaines questions se posent relativement aux modèles considérés : modèle discret ou continu (au sens des variables d'espace et/ou de temps) ? Degré de précision requis ? Dans (Lebrun 2003), M. Lebrun distingue 4 niveaux de détail pour la modélisation en s'appuyant sur le classique cycle en V de conception d'un produit. Prenant l'exemple d'une boîte de vitesse automatique, il définit ces quatre niveaux comme suit :

- Niveau fonctionnel : à ce niveau, apparaissent les stratégies de commande discontinue de pilotage de la boîte de vitesse.
- Niveau système : les organes de régulation sont modélisés sommairement ; c'est à ce niveau que les lois de commande sont élaborées.

Chapitre 2

- Niveau réseau : les composants et leurs interactions sont modélisés en couvrant l'ensemble des disciplines : électronique de puissance, électromagnétisme, mécanique, hydraulique et thermique. Les lois de commande synthétisées sont affinées et validées à ce niveau.
- Niveau géométrique : le détail des composants est abordé à ce niveau, tel l'optimisation de la forme des circuits magnétiques (techniques d'éléments finis), la forme des soupapes par des méthodes de calcul de mécanique des fluides (volumes finis, différences finies ou éléments finis), etc.

La figure 2.1 présente cette démarche.

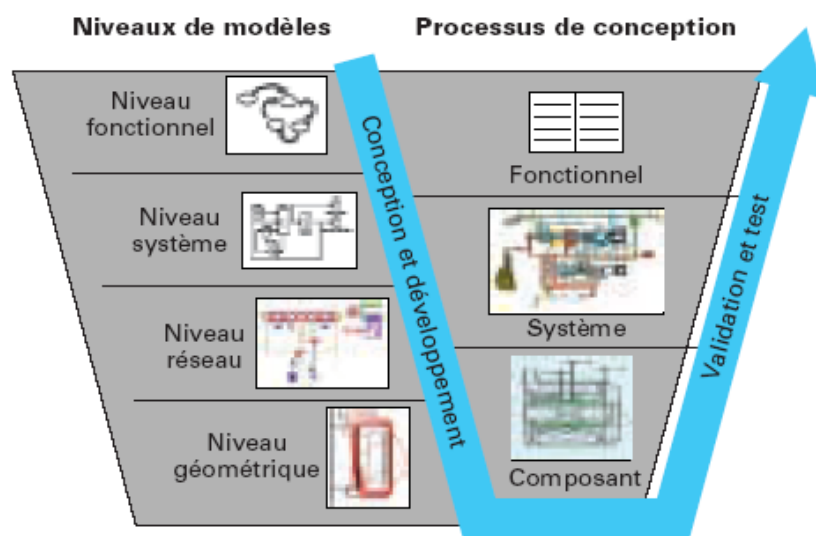


Figure 2.1 : Niveaux d'abstraction associés au cycle en V de conception tiré de (Lebrun 2003)

Les questions citées précédemment sont bien sous-jacentes dans cette décomposition. Ainsi, le niveau « réseau » est particulièrement intéressant dans le cadre de la conception de modèle de « validation » du système (ou pour valider une loi de commande conçue initialement sur un modèle moins précis) : il permet de représenter de manière unifiée des systèmes composites par agrégation de modèles de sous-systèmes de natures différentes (hydraulique, électronique...), tout en étudiant la dynamique des différents organes. Par contre, un tel modèle n'a aucun intérêt lors des phases de conception globale du système où l'on tente de définir les fonctions et états du système sur la base d'un cahier des charges émanant de spécifications techniques.

N. Scheffer dans son travail de DEA (Scheffer 2003) avait conclu de la manière suivante, au problème du choix d'un modèle : « on peut dire qu'un *bon* modèle est en première approximation le modèle le plus simple qui donne des informations comportementales

« suffisamment précises » sur le comportement du système, et ce compte tenu des objectifs liés à son utilisation ». S'accordant sur cette définition, et en adéquation avec la réflexion menée par M. Lebrun dans (Lebrun 2003), nous allons préciser les utilisations qui seront faites des modèles élaborés durant cette thèse.

La modélisation de la propulsion par les flux d'énergie a pour but de simplifier l'utilisation des modèles des différents composants pour permettre un dimensionnement et un calcul du rendement de la chaîne de traction, plus rapide.

Ce type de modélisation peut s'appliquer à d'autres systèmes que les bateaux hybrides. Nous présenterons aussi le cas d'une voiture hybride série. Même s'il y a des similitudes avec la propulsion hybride série d'un bateau, il y a également des différences importantes. Dans le cas de la voiture,

- il n'y a pas de troisième source d'énergie (vent) ;
- des normes contraignantes déterminent son dimensionnement ;
- l'aspect dynamique est plus présent.

La propulsion d'une voiture hybride série se compose schématiquement d'un groupe électrogène, d'un réseau électrique de bord avec des batteries, et d'un groupe propulseur électrique. A ces différents éléments, il faut ajouter la modélisation des efforts à l'avancement du véhicule (résistance au roulement et forces aérodynamiques).

2.2 État de l'art

Dans cette partie, nous présenterons les modèles couramment utilisés pour chaque composant d'une propulsion hybride, ainsi que les principaux logiciels utilisés pour la modélisation des véhicules hybrides.

2.2.1 Modélisation de moteur thermique

Comme annoncé au chapitre 1, nous ne nous intéresserons qu'à la motorisation thermique à explosion dont le carburant est le gasoil ou l'essence. La motorisation thermique est très complexe. Elle ne consiste pas uniquement en une chambre d'explosion et un axe de transmission du couple, mais il y a tout un ensemble de systèmes annexes : le refroidissement, la distribution, le post-traitement des gaz avec réinjection possible, les organes de transmission avec un embrayage et une boîte de vitesse, etc. La modélisation d'un ensemble aussi important d'organes est très complexe. Il existe des méthodes de modélisation de l'explosion, de la transmission mécanique, etc. mais ces modèles sont trop complexes et

requièrent un temps de calcul excessif pour la modélisation de chaque élément la propulsion à des fins d'optimisation.

Une autre approche présentée abondamment dans la littérature sur la propulsion hybride est l'utilisation de cartographies de rendement en fonction du couple et de la vitesse du moteur. Ces cartographies s'appuient sur des mesures sur banc. (Ripert 2003), (Delprat 2002) et (Scordia 2004) utilisent une telle méthode pour la représentation du groupe moto-propulseur. Chan, dans son article (Chan 2002) qui se veut généraliste sur la modélisation de la propulsion hybride et électrique, utilise également cette approche. A titre d'exemple, la figure 2.1 présente la cartographie d'un moteur thermique diesel de 75kW tirée du logiciel PSAT.

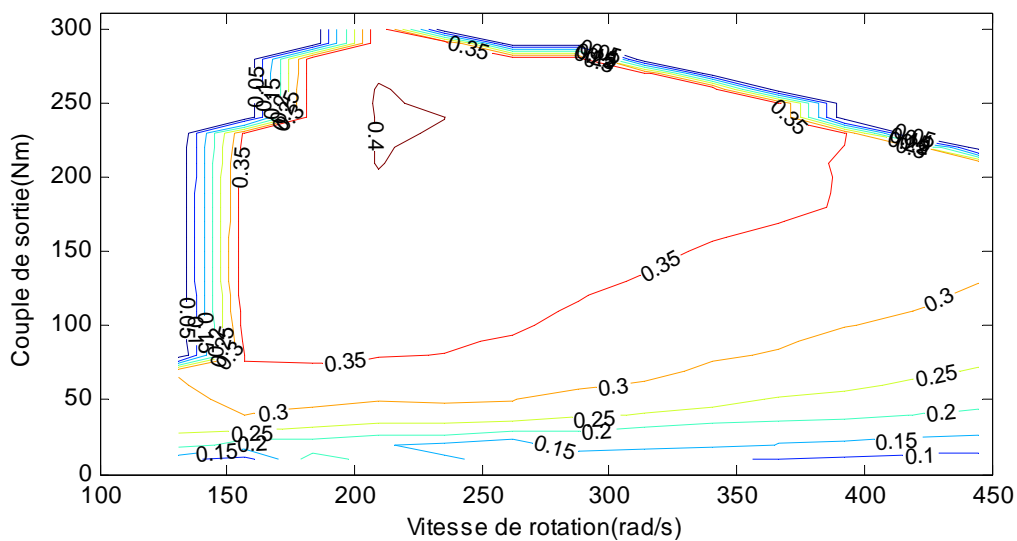


Figure 2.2 : cartographie de rendement d'un moteur thermique $\eta_{carto}^{mth}(C^{mth}, V^{mth})$

Cette cartographie ne couvre que la plage de fonctionnement normale du moteur : le rendement n'est pas connu en dessous de 130 rad/s ou au dessus de 445 rad/s. Idem au dessus de 300 Nm. Ces points de mesure sont exclus pour cause de fonctionnement instable ou dangereux.

L'utilisation de la cartographie présente l'avantage important d'être une méthode simple et rapide à exploiter, une fois le modèle mis en place. Mais son obtention nécessite un nombre important de mesures, et n'est valable que pour un moteur spécifique. Un autre inconvénient de cette modélisation est que l'aspect dynamique d'un changement de régime moteur n'est pas pris en compte. R. Crosnier (Crosnier 2009) aborde ce problème en utilisant cette fois un modèle dynamique du moteur. Néanmoins, il conclut que l'erreur liée à l'utilisation d'un modèle de cartographie statique n'entraîne qu'une erreur minimale de consommation (même si

Chapitre 2

elle peut changer les instants d'utilisation de la motorisation thermique et la sollicitation dynamique de la batterie).

La dernière approche est une approche basée sur des équations mécaniques, et consiste en une modélisation très générale de la motorisation thermique. Il existe plusieurs approches basées sur les équations mécaniques du moteur thermique. (Diop 2004) utilise un tel modèle, mais en prenant en compte un rendement global. A titre d'exemple, voici comment (Lhomme et al. 2004) modélise le moteur thermique :

$$p_{ess} = m_{mth} K_{mth} V_{mth}^{mth} \quad (2.1)$$

$$C^{mth} = m_{mth} K_{mth} d_{ess} \quad (2.2)$$

$$K_{mth} = \frac{\eta_{global}^{mth} \rho_{ess} P_c}{V_{max}^{mth}} \quad (2.3)$$

avec p_{ess} la pression d'injection de l'essence, d_{ess} le débit d'essence, η_{global}^{mth} le rendement maximal du moteur, ρ_{ess} la densité de l'essence, P_c son pouvoir calorifique et V_{max}^{mth} la vitesse de rotation maximale du moteur. m_{mth} est un paramètre lié au contrôle du moteur. Une autre approche est présentée dans (Guzzella et Sciarretta 2005) : elle s'appuie sur une approche thermodynamique du moteur thermique. Cette méthode suppose la connaissance du moteur utilisé, tout comme la cartographie associée, car il faut connaître les différents ratios propres à chaque moteur.

Dans le cadre de la méthode de modélisation par les flux d'énergie, nous allons chercher à synthétiser des modèles génériques approchés. Pour des raisons de facilité et d'accessibilité des données, nous avons utilisé des cartographies, mais nous aurions pu partir d'une autre méthode.

2.2.2 Modélisation du moteur électrique

De même que pour le moteur thermique, il existe plusieurs méthodes de modélisation du moteur électrique. La première est une approche analytique basée un modèle de connaissance électrotechnique, très proche de la réalité. Cette approche est utilisée dans la thèse (De Bernardinis 2000) qui présente l'optimisation d'un ensemble convertisseur/moteur électrique pour une application hybride, ainsi que celle de (Diop 2004). Elle permet d'optimiser le choix du moteur électrique pour cette application, mais suppose plusieurs choix technologiques, a priori, dont la tension du réseau de bord.

L'autre méthode consiste à utiliser une cartographie du même type que pour la modélisation du moteur thermique. C'est cette méthode qui est utilisée la majeure partie du temps dans la modélisation hybride, comme le rappellent (Chan 2002), (Bernard 2007), (Scordia 2004) et (Wenzhong Gao et al. 2007). La figure 2.3 présente la cartographie d'un moteur électrique synchrone à aimants permanents de 60kW. Cette cartographie ne fait pas apparaître les limites de fonctionnement du moteur.

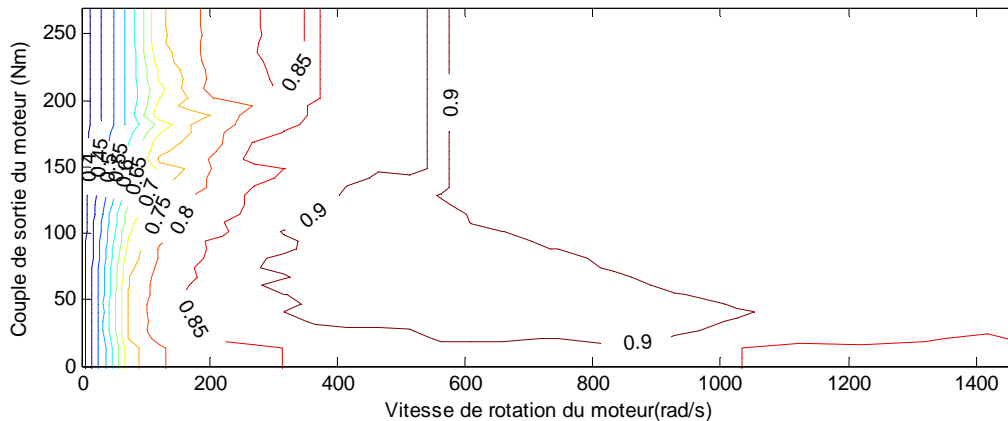


Figure 2.3 : cartographie de rendement d'un moteur électrique $\eta_{carto}^{mel}(C^{mel}, V^{mel})$

Le choix d'une cartographie ou d'un modèle analytique dépend de l'objectif de la modélisation : si l'objectif est d'optimiser le moteur électrique, il est essentiel d'avoir un modèle permettant de faire varier les paramètres internes du moteur. Si l'objectif est d'optimiser un autre élément de la propulsion ou encore la commande ou le dimensionnement global, alors il est plus efficace de passer par une cartographie.

2.2.3 Modélisation des convertisseurs d'électronique de puissance

La commande du moteur électrique suppose l'utilisation d'électronique de puissance. La modélisation de celle-ci accompagne celle des moteurs électriques, voire est incluse avec elle. Il y a en effet des cartographies globales réunissant le moteur électrique et son convertisseur. La méthode la plus simple est de considérer un convertisseur indépendant comme une source de pertes supplémentaires. Jérôme Bernard (Bernard 2007) les modélise par une courbe de rendement en fonction du rapport de la puissance délivrée et de la puissance maximale disponible. La figure 2.4 en est l'illustration.

C'est cette technique de modélisation des convertisseurs de puissance qui nous utiliserons, car nous verrons qu'elle est conforme à la modélisation par les flux d'énergie.

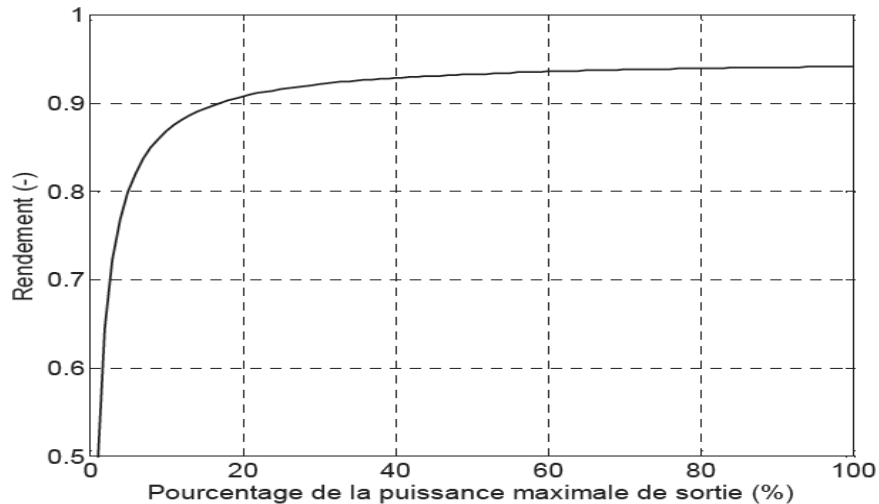


Figure 2. 4 : rendement d'un convertisseur en fonction de sa puissance de sortie (Bernard 2007)

2.2.4 Modélisation d'un pack de batteries

Une batterie est un ensemble d'accumulateurs reliés entre eux de façon à créer un générateur électrique de la capacité et de la tension voulues. Nous ne nous intéresserons ici qu'aux accumulateurs électrochimiques. Ces accumulateurs sont le lieu de réactions à l'interface de deux systèmes conducteurs (électronique et ionique). Ces réactions permettent un transfert de charges (génération de courant) qui s'accompagne de modifications de l'état d'oxydation des matériaux (oxydation et réduction), donc de leur nature physico-chimique. La difficulté de modélisation d'une batterie provient de :

- la complexité des réactions électrochimiques ;
- la complexité des modifications d'état de surface des jonctions durant les cycles de charge/décharge ;
- la présence de réactions parasites.

Il existe des méthodes de caractérisation du vieillissement des batteries (Montaru 2009), mais nous nous contenterons d'une méthode ne le prenant pas en compte.

Trois grandes familles de batteries sont utilisées actuellement :

- les batteries au plomb,
- les batteries au nickel,
- les batteries au lithium.

Chacune de ces familles possède ses avantages et ses inconvénients. La famille des batteries au plomb est la plus ancienne, la mieux documentée et la moins chère. C'est aussi celle qui a les plus mauvaises performances en termes de nombre de cycles et de densité de puissance. La famille des batteries au lithium est la famille la plus récente, la plus performante, la plus

Chapitre 2

chère. La famille des batteries au nickel est un intermédiaire entre ces deux familles, que cela soit en termes de performance et de prix. Le tableau 2.1 rappelle les avantages de chaque famille.

Attribute	Lead Acid	NiMH	Li-Ion
Weight (kg)	Poor	Fair	Good
Volume (lit)	Poor	Good	Good
Capacity/Energy (kWh)	Poor	Fair	Good
Discharge Power (kW)	Good	Fair	Good
Regen Power (kW)	Poor	Fair	Good
Cold-Temperature (kWh & kW)	Good	Fair	Poor
Shallow Cycle Life (number)	Fair	Good	Good
Deep Cycle Life (number)	Poor	Good	Fair
Calendar Life (years)	Poor	Fair	Fair
Cost (\$/kW or \$/kWh)	Good	Poor	Poor
Safety- Abuse Tolerance	Good	Good	Fair
Maturity - Technology	Good	Good	Fair
Maturity - Manufacturing	Good	Fair	Poor

Key
(relative to
each other)

Poor
Fair
Good

Source NREL – DOE – USA : Batteries choice for PHEV

Tableau 2.1 :Récapitulatif des capacités des différentes familles de batterie

Pour toutes ces familles une seule méthode de modélisation pour les batteries est utilisée pour la propulsion de véhicule : une représentation par schéma électrique de la batterie (Diop 2004). Le schéma le plus simple est celui de la figure 2.5.

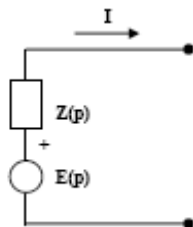


Figure 2.5 : Schéma électrique équivalent simplifié d'une batterie en Laplace

Dans ce schéma, $Z(p)$ désigne l'impédance complexe de la batterie et $E(p)$ sa tension à vide, exprimées dans le domaine de Laplace. $Z(p)$ et $E(p)$ varient en fonction de l'état de charge, de la température des cellules de la batterie et du vieillissement de celles-ci. Dans le cas d'une

modélisation simple, $Z(p)$ peut-être une simple résistance, mais il est possible de prendre en compte de nombreux paramètres, chaque niveau de complexité supplémentaire augmentant la difficulté pour identifier ses paramètres. Le logiciel PSAT présente différents types de batterie au travers d'un tel modèle.

2.2.5 Modélisation des efforts à l'avancement

Nous limiterons notre étude à l'avance d'un bateau dans des conditions de navigation idéale : sans courant, ni houle.

En effet, simuler l'avance d'un bateau est un problème complexe. Il existe deux approches pour sa modélisation. La première a pour fondement les équations de la mécanique des fluides et s'appuie sur un modèle de l'écoulement autour de la coque du bateau. Cette méthode donne de bons résultats à la fois en régimes dynamique et stationnaire. Le problème est sa complexité et un volume de calcul important. La seconde est basée sur une approximation qui ne prend en compte que la surface projetée de la coque relativement à l'avance du bateau, pour évaluer le volume d'eau déplacé. Cette méthode n'est pas satisfaisante en régime dynamique mais bien adaptée en régime stationnaire.

Un voilier est soumis à plusieurs forces :

- la force du vent sur les voiles T_V ;
- la force de propulsion due à l'hélice T_H ;
- la résistance au déplacement du navire R_N .

Étant donné les faibles accélérations d'un voilier et la durée importante des régimes permanents, nous ne travaillerons qu'en stationnaire. Nous considérerons que T_V et T_H sont appliquées directement sur le bateau et qu'elles s'additionnent. Par convention, le sens positif est celui de l'avance du navire.

D'après (Smogeli 2006) et (Blanke et al. 2000), pour le type de navires que nous allons considérer, les frottements visqueux sont négligeables et la résistance à l'avancement est proportionnelle au carré de la vitesse de l'eau par rapport au navire, selon :

$$R_N = \frac{1}{2} S_N \rho_{eau} V_N |V_N| \quad (2.4)$$

avec S_N la surface frontale de la partie immergée de la coque, ρ_{eau} , la densité de l'eau et V_N la vitesse du navire. Nous aurons donc à vitesse constante :

$$R_N = T_V + T_H \quad (2.5)$$

Nous aurons toujours T_V positif ou nul, par contre, T_H peut être négatif, si nous désirons faire fonctionner l'hélice en récupération d'énergie (régénération).

2.2.6 Modélisation de l'hélice

Bien que simple en apparence, une hélice est difficilement modélisable à partir de ses caractéristiques physiques. Les méthodes de modélisation usuelles s'appuient plus ou moins sur des approches expérimentales. Les deux modèles principaux sont les modèles $K_T K_Q$ et $C_T C_Q$. Le premier ne s'intéresse qu'à la modélisation de la poussée et pose des problèmes pour les faibles vitesses de rotation de l'hélice. Le second est exploitable dans les quatre quadrants Nous ne nous intéresserons donc qu'au second.

La modélisation $C_T C_Q$, qui est développée dans (Fossen 2002), (Smogeli 2006), (Pivano et al. 2006) et (Carlton 2007), est relativement simple à mettre en œuvre. Elle repose sur des mesures de la poussée T_a et du couple d'entraînement Q_a de l'hélice seule, en eau libre et en régime permanent. Ces mesures permettent d'évaluer les coefficients adimensionnels de poussée C_T et de couple C_Q , définis par :

$$C_T = \frac{T_a}{0.5\pi\rho_{eau}R_H^2V_{0.7}^2} \quad (2.6)$$

$$C_Q = \frac{Q_a}{\pi\rho_{eau}R_H^3V_{0.7}^2} \quad (2.7)$$

avec R_H le rayon de l'hélice et $V_{0.7}$, la vitesse de l'eau à 70% du rayon de l'hélice. Cette vitesse est la combinaison de V_a la vitesse axiale de l'eau au niveau de l'hélice et de la vitesse tangentielle de l'hélice (voir figure 2.6) :

$$V_{0.7}^2 = V_a^2 + (0.7R_H\Omega_H)^2 \quad (2.8)$$

où Ω_H désigne la vitesse de rotation de l'hélice (en rad/s). La valeur de $0.7R_H$ correspond au rayon où les phénomènes hydrodynamiques, responsables de la poussée et du couple, sont les plus importants.

Chapitre 2

C'est pour ce rayon qu'est également défini l'angle d'attaque β , selon :

$$\beta = \arctan\left(\frac{V_a}{0.7R_H\Omega_H}\right) \quad (2.9)$$

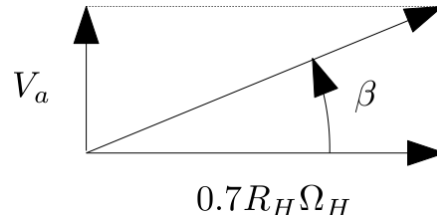


Figure 2. 6 : Combinaison de la vitesse d'avance et de la vitesse tangentielle

L'expérience montre que les coefficients adimensionnels C_T et C_Q ne sont fonctions que de l'angle β est de la géométrie de l'hélice et, notamment, de son pas P_H . La figure 2.7 présente un exemple de courbes, pour une hélice de rapport P/D unité (rapport du pas d'avancement de l'hélice P et de son diamètre D). Ces courbes, périodiques en β , sont généralement définies par leurs décompositions en séries de Fourier :

$$\begin{aligned} C_T(\beta) &= \sum_{k=0}^{k_{\max}} (A_T(k) \cos \beta k + B_T(k) \sin \beta k) \\ C_Q(\beta) &= \sum_{k=0}^{k_{\max}} (A_Q(k) \cos \beta k + B_Q(k) \sin \beta k) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Nous disposons ainsi de la décomposition, jusqu'à l'ordre 20, d'une l'hélice à pas variable qui correspond à la figure 2.7 et dont les caractéristiques sont présentées en annexe 2. Ces données seront exploitées dans les chapitres suivants. Le pas variable ne sera pas utilisé pour une adaptation de l'hélice en temps réel, mais comme un paramètre à déterminer lors du dimensionnement, les hélices à pas variable étant complexe et de moins bonne qualité.

Malheureusement, lorsqu'une hélice est installée sur un voilier ou un navire, plusieurs phénomènes hydrodynamiques, liés à la présence de la coque, viennent perturber son fonctionnement. Tout d'abord, la poussée réelle T_H sera légèrement inférieure à la poussée en eau libre T_a , à cause de la dépression que produit l'hélice à l'arrière de la coque :

$$T_H = (1 - t_T) T_a \quad (2.11)$$

Chapitre 2

Ensuite, en l'absence de courant marin, on pourrait supposer que la vitesse axiale de l'eau V_a est tout simplement la vitesse V_N du navire. Mais il faut tenir compte de la présence de la coque en introduisant un nouveau facteur correctif w_N :

$$V_a = (1 - w_N)V_N \quad (2.12)$$

Pour cette étude, nous considérerons que $t_T = 0.1$ et $w_N = 0.1$. Par contre, il n'y a pas lieu de corriger le couple appliqué à l'hélice. Nous aurons donc $Q_H = Q_a$.

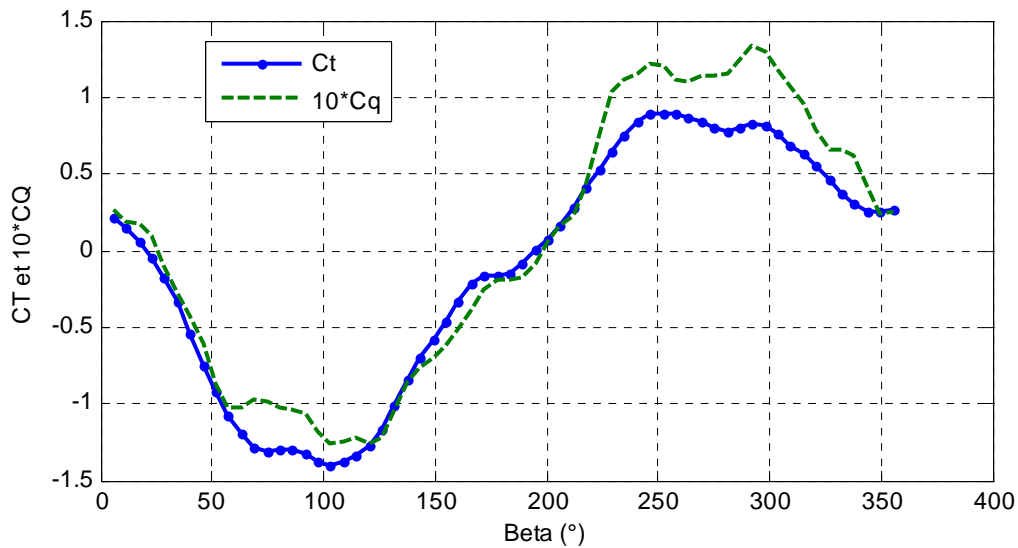


Figure 2. 7 : Exemple d'abaque de courbes C_t, C_q tiré de (Carlton 2007), pour un P/D de 1

Le rendement global de la propulsion est défini comme le rapport de la puissance fournie par l'hélice au navire, sur la puissance mécanique fournie par le moteur électrique :

$$\begin{aligned} \eta_H &= \frac{T_H V_N}{Q_a \Omega_H} = \frac{T_a (1 - t_H)}{Q_a \Omega_H} \frac{V_a}{(1 - w_N)} = \frac{(1 - t_H) C_T(\beta)}{(1 - w_N) C_Q(\beta)} \frac{V_a}{2R_H \Omega_H} \\ &= 0.35 \frac{(1 - t_H) C_T(\beta)}{(1 - w_N) C_Q(\beta)} \operatorname{tg}(\beta) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Cette expression montre que le rendement de la propulsion ne dépend que de l'angle d'attaque β . Il est important de noter que, contrairement aux autres organes, le rendement de l'hélice est indépendant de la puissance transmise. La figure 2.8 présente l'évolution du rendement de l'hélice, en propulsion et en régénération. On peut constater que cette hélice fonctionne beaucoup moins bien en régénération. Ceci est logique, puisqu'elle n'a pas été conçue pour cela.

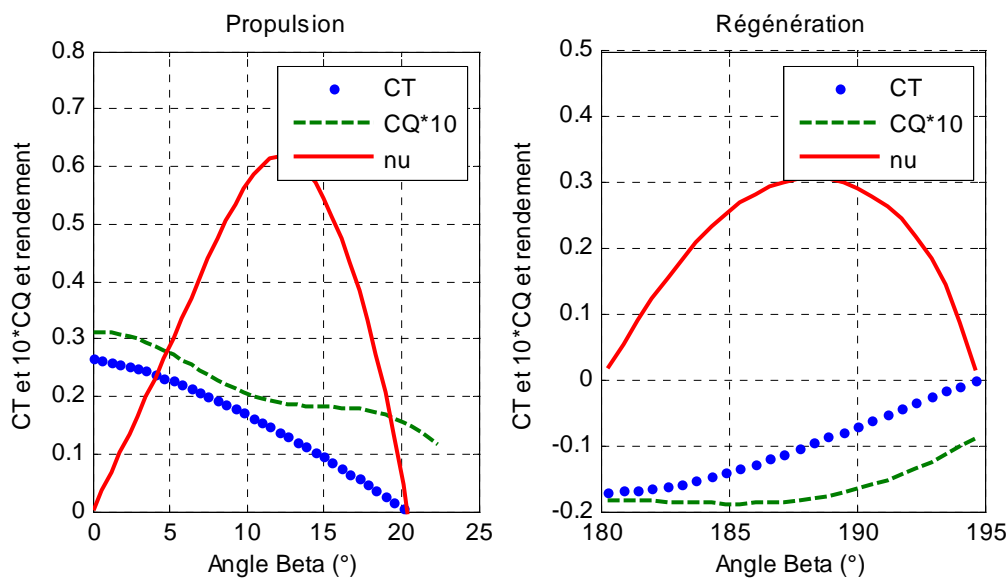


Figure 2. 8 : Rendement de l'hélice en propulsion et en régénération

Au chapitre 3, nous verrons comment utiliser ces courbes de rendement, en fonction de la puissance nécessaire à l'avance du navire.

2.2.7 Modélisation des voiles

Il ne manque plus, pour être complet, que la modélisation de la poussée des voiles. Cette poussée sera également déduite d'une cartographie : la "polaire de vitesse" (voir figure 2.9 et annexe 3). Cette cartographie représente la vitesse d'avance du voilier en fonction de l'incidence du vent (angle du vent par rapport à l'axe du navire). Cette cartographie est, soit expérimentale, soit réalisée par simulation comme dans (Korpus 2007). Ces courbes et le modèle d'un bateau permettent de calculer la puissance P_V fournie par les voiles. La cartographie de la puissance fournie, en fonction de la vitesse du vent et de l'angle du vent par rapport au bateau, est présentée en figure 2.10. Par souci de simplicité, nous considérerons que cette puissance est indépendante de la vitesse du navire, ce qui est le cas avec un génois et un vent de travers (incidence de 90°), comme le montre la figure 2.9. Chaque arc de cercle de la polaire représente une vitesse d'avance du bateau de 1 kn. La courbe en rouge indique la vitesse d'avance du bateau au génois avec une vitesse de vent donnée en fonction de l'angle d'incidence. La courbe en bleu indique la même chose au spi.

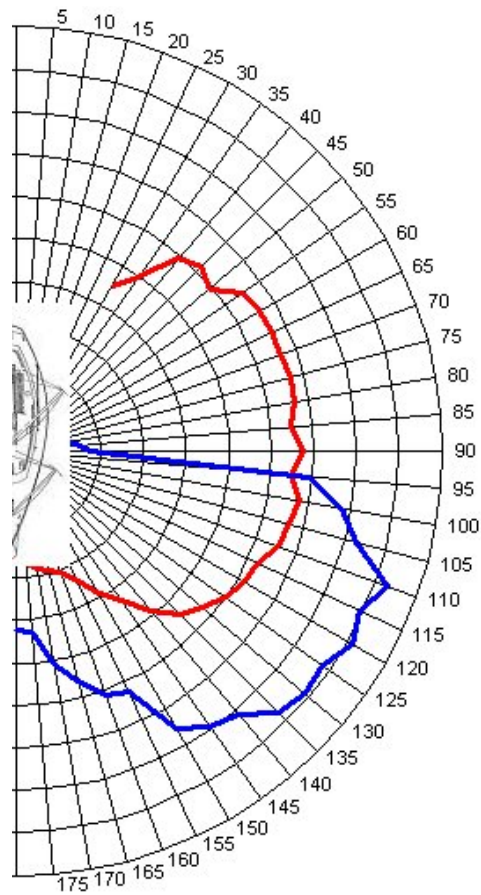


Figure 2. 9 : Polaire de vitesse du bateau VSK3

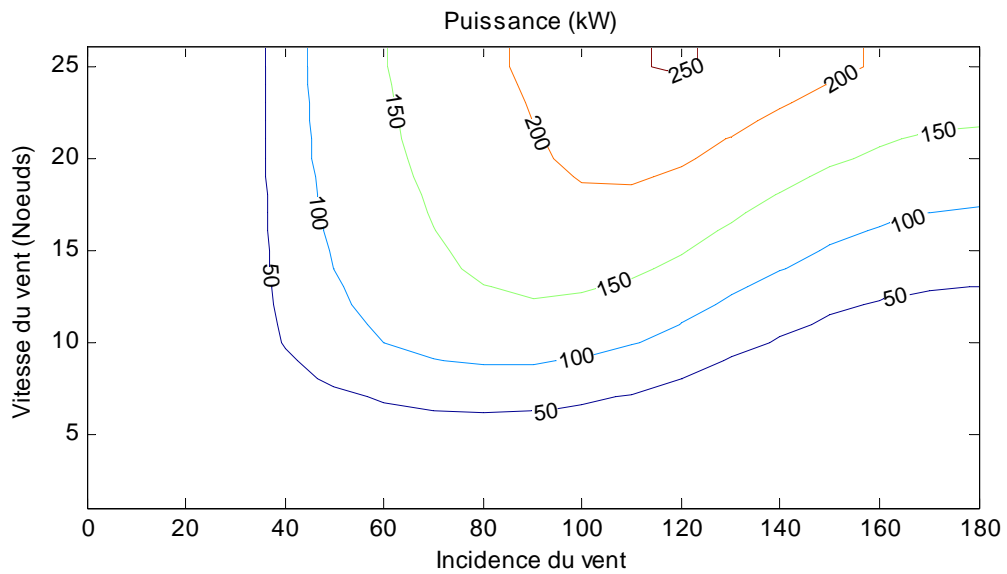


Figure 2. 10 : Puissance fournie en fonction de la vitesse et de l'incidence¹ du vent par rapport au bateau

¹ L'incidence est nulle pour un vent de face et vaut 180° en vent arrière.

2.2.8 Principaux logiciels de modélisation de propulsion hybride

L'article (Wenzhong Gao et al. 2007) présente les différents logiciels de simulation de propulsion hybride. Il y a actuellement quatre grands logiciels : ADVISOR, PSAT, PSIM et Virtual Test Bed (VTB), auxquels nous pouvons ajouter VEHLIB (Trigui et al. 2004) développé en France. ADVISOR et VEHLIB peuvent être qualifiés de modèles statiques, PSAT de modèle quasi-statique, PSIM et VTB de modèles dynamiques. Le fait de travailler sur des modèles statiques ou quasi-statiques permet un calcul rapide, mais il met de côté toute une partie du problème. Les logiciels sont aussi classés en fonction du type de résolution des équations :

- « inverse », si le point de départ est la vitesse de la roue. A partir de ce point, il est possible de calculer toutes les autres grandeurs. Ce type de représentation n'est pas fidèle à la réalité, mais il permet de simplifier la prise de décision sur la commande ;
- « direct », si le point de départ est la consigne du système en boucle fermée, avec pour objectif de suivre cette consigne. Cette modélisation est plus fidèle à la réalité, et peut-être adaptée simplement à une commande temps réel.

Ce choix détermine la liste des variables d'état. La vitesse, qui est la variable d'état que l'on essaie de piloter en « direct », est une entrée en « inverse ». Il ne faut donc pas qu'elle soit considérée comme une variable d'état dans ce cas, sous peine d'avoir des problèmes de résolution. Le tableau 2.2 présente le classement des logiciels en fonction de ces caractéristiques.

	Statique	Quasi-statique	Dynamique
Inverse	ADVISOR		
Direct	VEHLIB	PSAT	PSIM, VTB

Tableau 2.2 :Classement des logiciels de simulation hybride

Le fait d'imposer la vitesse peut entraîner certains effets de bord, soulignés par Julien Scordia (Scordia 2004). En effet, il est possible que le véhicule ne puisse respecter la consigne de vitesse dans des cas extrêmes (accélération trop importante, etc.).

Tous ces logiciels s'appuient sur une modélisation détaillée de chaque élément de puissance, ce qui peut entraîner :

- une limitation du panel de solutions, par des choix prématurés, lors du premier dimensionnement comme la tension du réseau de bord, le type de moteur, etc. ;

- un temps de calcul important, nécessaire pour simuler finement le comportement de chaque élément ;
- des choix de commande et de limites de commande qui peuvent influencer le résultat final.

Pour toutes ces raisons, nous développerons, dans le paragraphe suivant, une nouvelle approche. Sa mise en œuvre requiert des informations que nous extrairons de la bibliothèque de PSAT.

2.3 Modélisation par les flux d'énergie

2.3.1 Motivations et état de l'art

Nous nous orientons vers une stratégie de modélisation statique déduite de cartographies. Cette solution est traditionnelle dans la thématique de la commande « haut niveau » hors ligne des véhicules hybrides (Delprat 2002), (Scordia 2004), (Montazeri-Gh et al. 2006) et (Pérez et al. 2006). Plus précisément, ces cartographies s'appuient sur une représentation orientée effort-flux ; typiquement couple – vitesse, pour les organes mécaniques, tension – intensité pour les organes électriques. Cela permet ainsi de faire ressortir les points de fonctionnement de chacun des organes.

Toutefois, le point de vue adopté dans cette thèse sur le problème du dimensionnement d'une propulsion hybride se veut quelque peu différent de ce qui se fait généralement dans la littérature à ce sujet ; bon nombre de travaux partent d'une architecture matérielle (*i.e.* choix des différents moteurs, des batteries, etc.) déjà définie, par exemple sur la base d'un prototype. Le problème résolu est plus un problème de commande globale du système (recherche des points de fonctionnement optimaux) que celui du dimensionnement comme le présente (Delprat 2002). Dans ce contexte, l'espace de décision s'avère plus restreint que dans le cas d'un problème de dimensionnement nécessitant le parcours de banques de cartographies associées à chaque organe.

Souhaitant proposer une méthodologie dans le contexte du dimensionnement, il nous est apparu souhaitable de réduire l'espace de décision à parcourir par nos algorithmes d'optimisation. Nous proposons à cet effet de réaliser une « modélisation par les flux d'énergie » : au lieu de caractériser le comportement d'un organe via le couple effort – flux, nous considérons la puissance, produit des deux variables précédentes.

Quelques travaux font déjà le rapprochement entre dimensionnement et commande « haut niveau » en se basant sur la modélisation par la puissance :

- (Seiler et Schöder 1998) utilise une stratégie de minimisation des pertes (LMS) pour la commande d'un véhicule hybride parallèle. Cette stratégie consiste à minimiser les pertes de l'ensemble des composants à chaque instant. Pour cela, il faut connaître les pertes dans chaque organe et pouvoir comparer différentes stratégies de commande. C'est une méthode adaptée à la commande temps réel d'un système, qui nécessite d'utiliser des protections, entre autre, pour l'état de charge de la batterie ;
- (Schouten et al. 2002) présente une méthode se rapprochant de la modélisation par les flux d'énergie. Il s'agit de commander, grâce à une commande en logique floue, les différents composants de la propulsion pour que leur fonctionnement s'approche de la courbe de rendement maximum. Cette stratégie est adaptée à une commande en temps réel, mais ne permet pas d'évaluer la consommation minimale de carburant.
- (Pérez et al. 2006) présente une méthode assez proche de la notre. Ce sont les systèmes de stockage qui sont pris en compte, et la transformation de l'énergie stockée induit un rendement. Les différents organes sont regroupés en plusieurs ensembles (groupe électrogène, groupe électrique, véhicule) ce qui permet d'avoir un rendement pour chaque chaîne de transformation d'énergie. Les modèles utilisés, les raisons des choix de ces modèles et les méthodes de contrôle des différents organes du système ne sont pas explicités. L. Pérez reprend cette méthode dans (Pérez et Pilotta 2009), mais pour obtenir une commande optimale par programmation dynamique. L'article (Serrao et Rizzoni 2008) utilisant la même méthode sur un camion hybride série explique brièvement que le groupe électrogène est utilisé selon sa courbe de rendement maximum. Ils n'expliquent pas comment obtenir ce résultat.

Nous allons maintenant présenter notre propre contribution sur ce sujet.

2.3.2 Notations

L'objectif de la modélisation par la puissance est de représenter tous les composants sous la forme :

$$P_o^{el} = \eta^{el} (P_o^{el}) P_i^{el} \quad (2.14)$$

Chapitre 2

avec η^{el} le rendement de l'organe représenté associé à la puissance P_o^{el} requise. P_o^{el} découle du produit des efforts et flux en sortie de ce système, et est proportionnelle à la puissance d'entrée P_i^{el} par le facteur η^{el} (figure 2.11).

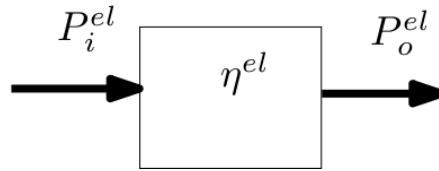


Figure 2. 11 : bloc transfert de puissance

Dans certains cas, le rendement en puissance d'un organe physique ne dépend pas uniquement de la puissance fournie en sortie. Ainsi une hélice voit son rendement varier en fonction de la vitesse d'avance du navire (voir chapitre 3). Une modélisation plus complète d'un organe peut être proposée comme suit :

$$P_o^{el} = \eta^{el} (P_o^{el}, S_{ext}) P_i^{el} \quad (2.15)$$

avec S_{ext} un phénomène énergétique influençant le rendement de l'organe modélisé. La figure 2.12 schématise un tel bloc.

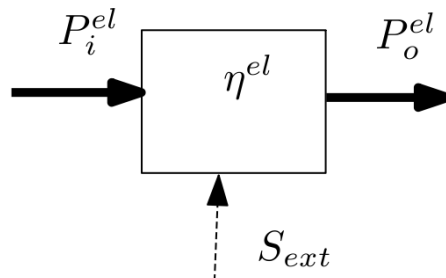


Figure 2. 12 : bloc transfert de puissance modulé

La méthodologie de construction des modèles (analytiques ou numériques) sera développée au chapitre 3, pour chacun des organes. En quelques mots, voici la démarche utilisée. Certains modèles statiques sont basés sur un ensemble d'équations (par exemple la modélisation de l'hélice ou de la coque du navire) issues des équations de la mécanique, d'autres sur une cartographie comme présenté par les parties 2.4.1 ou 2.4.2. Dans ce cas, ces modèles sont obtenus à partir de cartographies (disponibles dans la littérature) exprimant le rendement en fonction de la paire effort-flux en sortie de l'organe considéré (voir le paragraphe 3.1 pour un exemple).

La modélisation classique effort-flux correspond à une approche mesurable. Pour n'utiliser que la puissance, il faut un niveau de simplification supplémentaire. Ce niveau n'est parfois rendu possible qu'au prix de la concaténation de différents organes. Un exemple simple est celui du groupe électrogène. L'approche flux-effort classique modéliserait un groupe électrogène comme indiqué sur la figure 2.13. Cette modélisation peut être réalisée à partir de mesures directes sur les composants d'un tel groupe. Pour réaliser une modélisation des flux d'énergie, il n'est pas possible de considérer les composants un par un. En ne prenant en compte que la puissance, nous perdons une information. Si nous modélisons le moteur thermique par les flux d'énergies et en déduisons le modèle 2.13, nous ne pouvons pas relier le modèle du moteur thermique à celui du moteur électrique. La simplification écarte l'information « vitesse mécanique ». Il faut donc réaliser l'accouplement avant de passer au niveau de modélisation supérieur. Le passage à la modélisation des flux d'énergie après accouplement transforme le groupe électrogène en un système qui convertit une puissance entrante (chimique) en une puissance sortante (électrique). Le rapport de ces deux puissances donne le rendement global de la chaîne en fonction de la puissance électrique de sortie. La modélisation de ce groupe électrogène est donnée en figure 2.14.

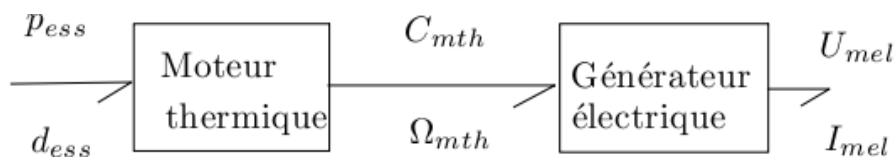


Figure 2. 13 : Présentation de la modélisation flux-effort d'un groupe électrogène

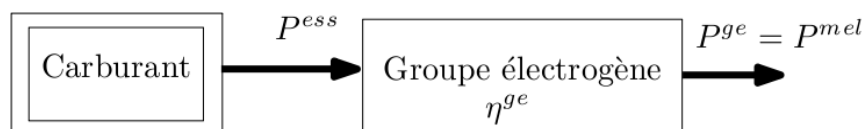


Figure 2. 14 : Présentation de la modélisation des flux d'énergie d'un groupe électrogène

2.4 Fondements théoriques : les Bond Graphs

Les Bond Graphs sont à la base de la modélisation par les flux d'énergie. Nous allons dans un premier temps présenter les Bond Graphs, puis le lien entre ceux-ci et la modélisation par les flux d'énergie.

2.4.1 Présentation succincte des Bond Graphs

Le Bond Graph est un outil de modélisation multiphysique défini par Paynter en 1961. (Karnopp et Rosenberg 1968) le présente de façon détaillée et de nombreux livres lui sont désormais consacré (cf. (Borne et al. 1992), (Dauphin-Tanguy 2000)). Son principe réside dans la description des flux énergétiques entre des éléments de bases. La connexion entre ces éléments est réalisée par des demi flèches appelés « bonds », ou « liens de puissance ». Pour chaque élément, les liens indiquent le sens positif des flux d'énergie. La formulation des interactions entre ces différentes variables permet de décrire le comportement énergétique d'un système en faisant abstraction de sa nature physique, ce qui permet d'unifier différents domaines de la physique. Nous avons déjà signalé les couples effort-flux qui concernent les systèmes électriques et mécaniques : tension-courant et force-vitesse, mais cette approche s'applique également à la thermodynamique ou à la chimie. (Ripert 2003) et (Scheffer 2003) utilisent ainsi les Bond Graphs pour réduire la complexité des modèles physiques. La figure 2.15 présente un lien reliant A et B. Le tableau 2.3 présente les variables d'effort et de flux en fonction du domaine traité.

$$A \begin{array}{c} \xrightarrow{e : \text{effort}} \\ \xleftarrow{f : \text{flux}} \end{array} B$$

Figure 2. 15 : représentation d'un lien dans le formalisme Bond Graph

Domaine	Effort e	Flux f	Moment $p = \int e dt$	Déplacement $q = \int f dt$
Mécanique Translation Rotation	force couple	vitesse vitesse angulaire	moment moment angulaire	déplacement angle
Electrique	tension	courant	flux magnétique	charge
Hydraulique	pression	débit volumique	moment de pression	volume
Chimique	potentiel chimique	flux molaire		nombre de moles
Thermodynamique	température	flux d'entropie		entropie

Tableau 2.3 : Variables d'effort et de flux en fonction du domaine considéré (Dauphin-Tanguy 2005)

Chapitre 2

A partir d'éléments actifs, passifs (Tableau 2.4) et de jonctions (Tableau 2.5), il est possible de décrire un grand nombre de systèmes physiques.






Elément	Symbole	Loi générique	Exemples	Comportement Energétique
Eléments actifs	Se 	e indep de f	gravité, générateur de tension	Apport de puissance
	Sf 	f indep de e	pompe générateur de courant	
Eléments Passifs	 R	$\Phi_R(e, f) = 0$	damping, friction, résistance électrique restriction hydraulique	<i>Dissipation d'énergie</i> (chaleur)
	 C	$\Phi_C(e, q) = 0$	ressort, réservoir condensateur élasticité, compressibilité	<i>stockage d'énergie</i> (potentielle, électrique)
	 I	$\Phi_I(p, f) = 0$	masse, inertie, bobine	<i>stockage d'énergie</i> (cinétique, magnétique)

Tableau 2.4 : éléments du Bond Graph (Dauphin-Tanguy 2005)

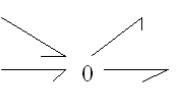
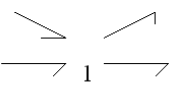
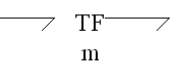
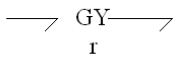
Elément	Symbole	Loi générique	Exemples
Eléments de Jonction	 0	$e_1 = e_2 = \dots = e_n$ $\sum a_i f_i = 0$	même force, pression, tension, ...
	 1	$f_1 = f_2 = \dots = f_n$ $\sum a_i e_i = 0$	même vitesse, débit vol, courant, ...
(conservative de puissance)	 TF m	$e_1 = m \cdot e_2$ $f_2 = m \cdot f_1$	levier, poulies embrayages, transfo elect. transducteur
	 GY r	$e_1 = r \cdot f_2$ $e_2 = r \cdot f_1$	moteur, capteur à effet Hall transducteur

Tableau 2.5 : jonctions du Bond Graph (Dauphin-Tanguy 2005)

Il est possible, par un Bond Graph de représenter un système aussi complexe qu'un moteur thermique, de l'injection du carburant à la rotation de l'arbre de sortie. Toutefois, ce n'est pas

l'application qui nous intéresse ici, car nous aurons une vision globale des composants d'une propulsion hybride.

Les Bond Graphs sont basés sur le principe de la conservation de l'énergie. Ils sont donc bien adaptés à notre problématique. Ils sont utilisés pour la représentation d'une propulsion depuis un certain temps (Hrovat et Tobler 1991). Nous nous intéresserons ici au Bond Graph pour exploiter les règles de causalité et pour le formalisme des lignes de puissance et de modulation que nous présenterons dans la section suivante. Mais avant cela, nous allons appliquer le formalisme du Bond Graph sur l'exemple d'une voiture hybride série.

La propulsion hybride série d'une voiture est assez simple mécaniquement. La figure 2.16 présente son Bond Graph à mots.

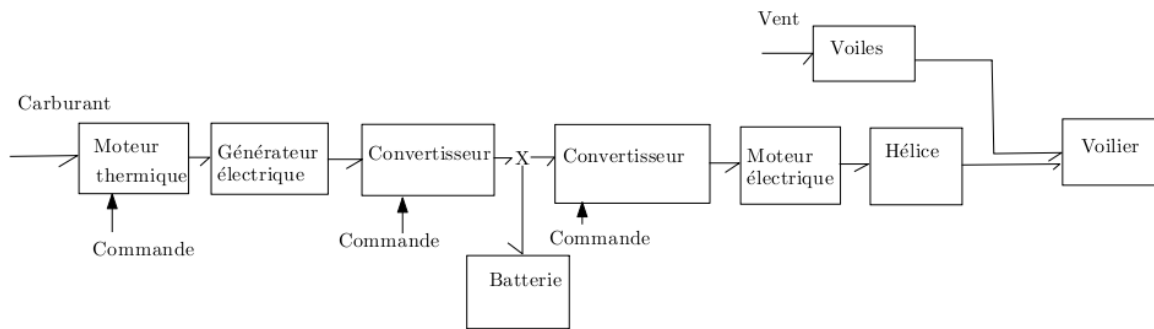


Figure 2. 16 : modélisation d'une propulsion hybride série selon le formalisme Bond Graph à mots

Les commandes apparaissent également, mais elles n'ont pas les mêmes représentations pour qu'il n'y ait pas de confusion possible entre un lien impliquant le passage d'énergie et un signal de commande.

2.4.2 Ligne de puissance et ligne de modulation

Le formalisme des lignes de puissance et des lignes de modulation a été proposé par (Wu et Youcef-Toumi 1995), puis appliqué au domaine automobile et au Bond Graph par (Ngwompo et al. 2005) et (Bideaux et al. 2006). Les lignes de puissance et lignes de modulation ne sont pas un concept uniquement appliqué au Bond Graph. Elles définissent l'existence de chemin entre une source d'énergie et un consommateur d'énergie. L'intérêt de s'appuyer sur le formalisme du Bond Graph est d'avoir une représentation graphique de ces connexions.

Un consommateur d'énergie ne peut être modifié que par le biais d'une source d'énergie. Il faut contrôler le transfert d'énergie entre la source et le consommateur pour contrôler cette

modification. Ce contrôle est réalisé par des éléments de modulation au niveau des sous-systèmes placés entre la source d'énergie et le consommateur d'énergie.

De ces remarques, émerge le concept de ligne de distribution de puissance et de ligne de modulation. Nous allons utiliser les définitions introduites dans (Bideaux et al. 2006) :

Définition 1 : Une ligne de fourniture d'énergie décrit le lien entre une source d'énergie, ou un élément de stockage d'énergie, et un lien associé à un élément en passant par différents liens de puissance.

Définition 2 : Une ligne de modulation de puissance décrit le lien entre un élément de modulation et un lien associé à un élément de commande en passant par différents liens de puissance.

Ces définitions sous-entendent que la ligne de puissance est un lien entre une source d'énergie et un consommateur/stockeur d'énergie et que ce lien s'exprime à travers des composants de puissance. Quant à la ligne de modulation, elle représente le lien entre la commande permettant la modulation (commande de l'injection pour un moteur thermique, commande de l'électronique rapprochée pour un moteur électrique, etc.) et le système qu'elle contrôle. L'examen de ces lignes permet de vérifier que tous les consommateurs/sources/stockeurs sont contrôlés.

2.4.3 Lignes de fourniture d'énergie et de modulation du Bond Graph de la voiture hybride série

Caractériser les lignes de fourniture d'énergie et de modulation à partir du Bond Graph d'une voiture hybride série suppose de faire des choix : une commande peut piloter via une ligne de modulation telle ou telle partie d'une ligne de fourniture d'énergie. La mise en place de lignes de modulation et de lignes de fourniture d'énergie permet donc de distinguer les groupes de composants commandés indépendamment et simultanément, et de représenter les flux d'énergie. Nous pouvons aussi établir les degrés de liberté et vérifier que les sorties peuvent être pilotées. La figure 2.17 présente les choix effectués pour la commande de la voiture hybride série.

Nous avons distingué deux systèmes pilotables séparément : le groupe électrogène et la motorisation électrique. Cette commande séparée est possible grâce à la présence de la batterie qui découple la puissance de sortie du groupe électrogène de la puissance d'entrée de la motorisation électrique.

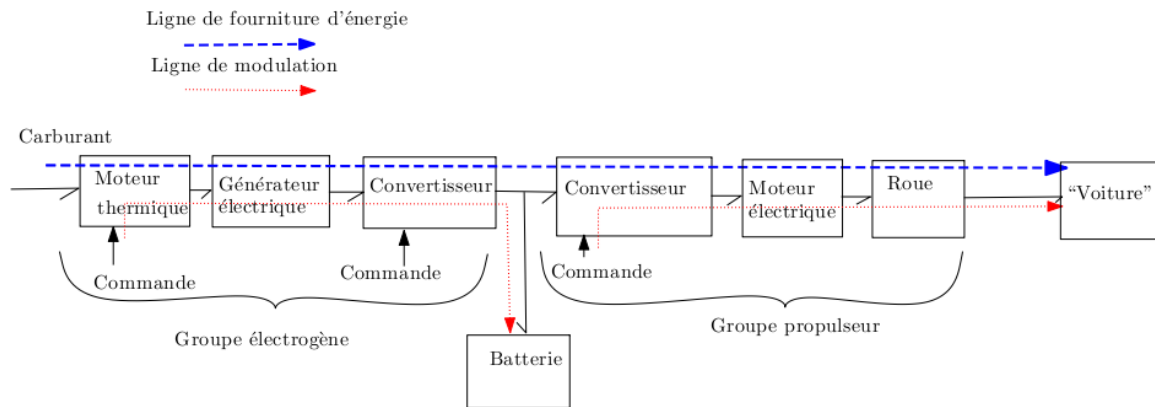


Figure 2. 17 : voiture hybride caractérisée par les lignes de fourniture d'énergie et de modulation

2.4.4 Modélisation d'un voilier hybride série

L'application de cette méthode à la propulsion d'un voilier hybride série permet d'en tirer la figure 2.18.

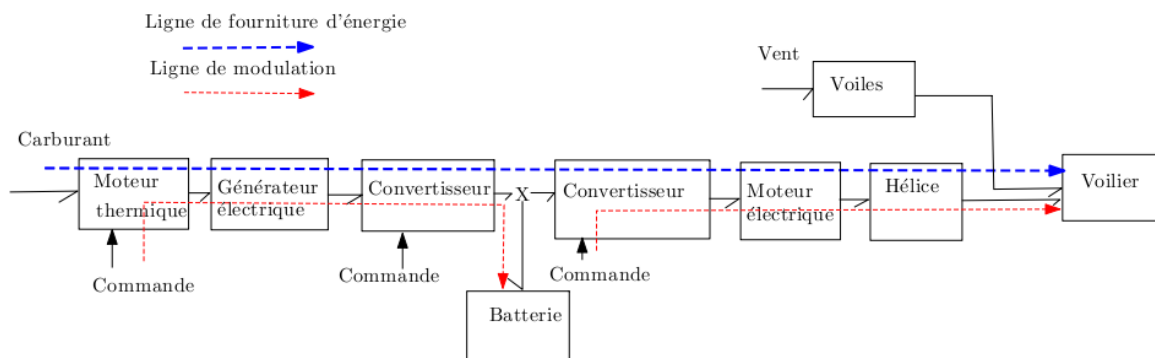


Figure 2. 18 : voilier hybride série hybride caractérisé par les lignes de fourniture d'énergie et de modulation

Cette propulsion est similaire à celle d'une voiture hybride série, mais avec l'ajout d'une source d'énergie et d'un groupe commandé : vent et voiles. Maintenant que nous avons séparé les différents groupes commandés, nous pouvons nous intéresser aux flux d'énergie, en utilisant les conventions graphiques définies ci-après.

2.5 Conventions graphiques de la modélisation par les flux d'énergie

L'intérêt d'une représentation graphique des flux d'énergie est évident. Nous allons, dans cette partie, présenter la convention graphique choisie, puis l'appliquer aux cas de la voiture hybride série et du voilier hybride série.

2.5.1 Blocs fondamentaux

Ayant en tête le concept de lignes de fourniture d'énergie et de modulation issu de (Bideaux et al. 2006), listons tout d'abord les différentes catégories d'organes pouvant être rencontrées. Nous avons d'ores et déjà distingué, au paragraphe 2.5.2, deux catégories d'organes : les organes dont le rendement ne dépend que de la puissance et les organes dont le rendement est modulé par une variable extérieure (*cf.* figure 2.11 et 2.12). En adéquation avec la modélisation par les Bond Graphs, il est nécessaire de modéliser aussi les organes « terminaux », pouvant servir de « source » ou de « récepteur » d'énergie. Nous distinguerons aussi les organes « réservoir d'énergie », qui peuvent fournir ou recevoir de l'énergie, et les organes « récepteur d'énergie », qui consomment l'énergie sans la stocker. 4 blocs distincts représenteront les 4 types d'organes différents, au travers de la charte graphique proposée en figure 2.19. Les arcs orientés qui relient les blocs représentent les flux d'énergie possibles et définissent la convention de signe retenue pour ces flux. Les sommes de puissances sont représentées par des cercles.

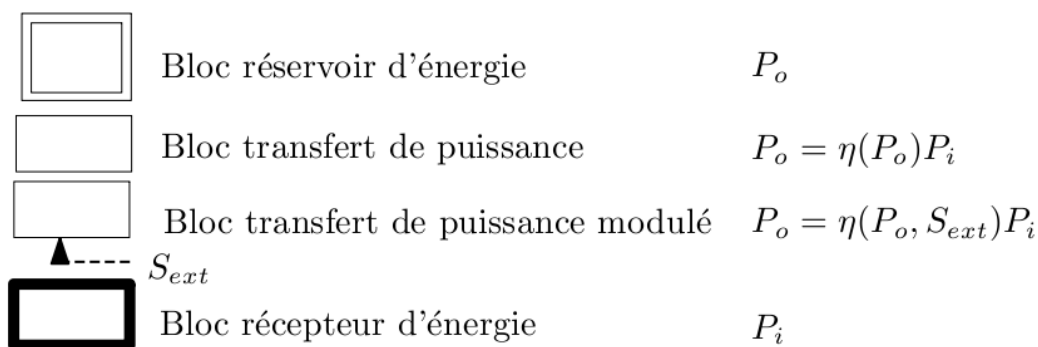


Figure 2. 19 : représentation des blocs utilisés pour la modélisation par les flux d'énergie

Il est maintenant possible de s'intéresser à la mise en œuvre de la modélisation par les flux d'énergie.

2.5.2 Exemples de modélisation par les flux d'énergie

Dans le cadre d'une modélisation par les flux d'énergie, le modèle de batterie (décrit dans la partie 2.4.4) dépend de l'état de charge de la batterie. Il faut donc le considérer comme un bloc de transfert de puissance modulé. Le groupe électrogène et la motorisation ne dépendent que de variables internes, ils sont donc représentés par un bloc de transfert de puissance. Dans le cas de la voiture, nous avons deux sources : le réservoir de carburant et la batterie, sachant que la batterie peut-être rechargée durant l'utilisation. Le seul bloc récepteur est le bloc « voiture » qui reçoit toute l'énergie mécanique fournie par la propulsion. La figure 2.20 présente la modélisation par les flux d'énergie de la voiture hybride série.

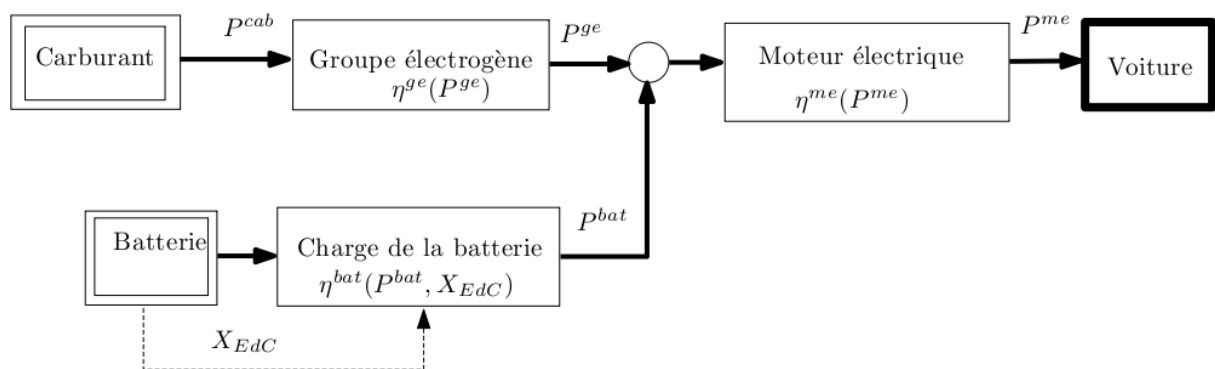


Figure 2. 20 : modélisation par les flux d'énergie de la voiture hybride série

On pourrait faire apparaître explicitement le stockage d'énergie cinétique dans la masse de la voiture elle-même. Pour notre étude, cela n'est pas utile, car par la suite, nous réaliserons des optimisations sur la base de cycles qui imposent la vitesse de la voiture.

La figure 2.21 présente la modélisation d'un voilier hybride série, telle qu'elle sera définie au chapitre 3. Cette modélisation est similaire à celle de la voiture, sauf que le bloc propulseur électrique est un bloc de transfert de puissance modulé et qu'il y a une source d'énergie supplémentaire : le vent.

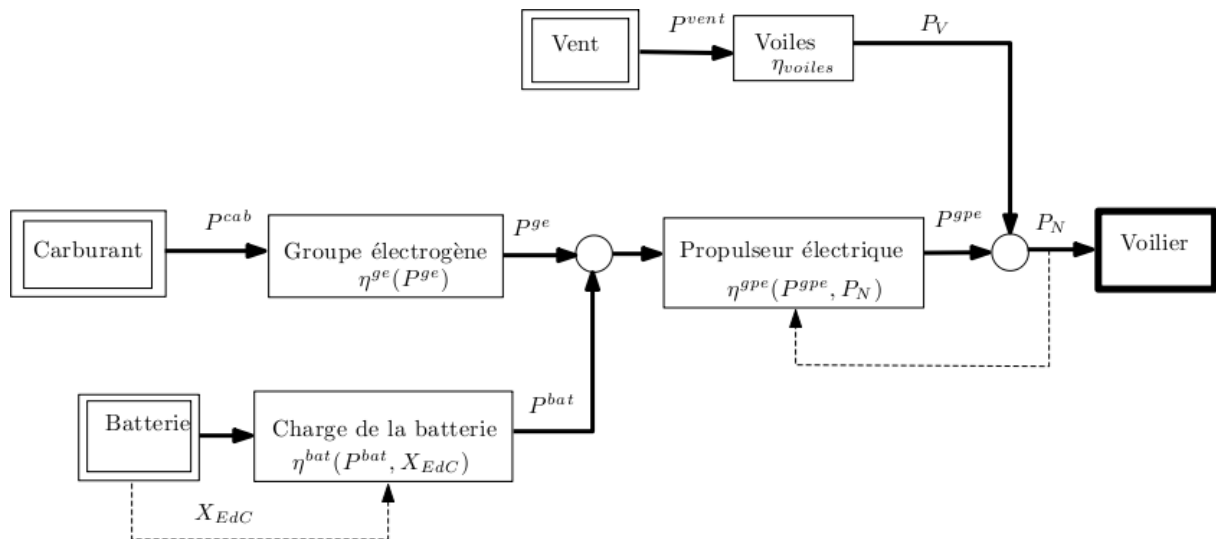


Figure 2. 21 : modélisation par les flux d'énergie du voilier hybride série

En synthèse, la modélisation par les flux d'énergie qui est proposée dans ces travaux de thèse s'appuie sur les différents concepts et outils présentés jusqu'alors :

- modélisation par un Bond Graph à mots (fonctionnel) du système à étudier ;
- mise en place des lignes de fourniture d'énergie et des lignes de modulation, s'appuyant sur un regroupement des différents organes en blocs de puissance ;
- classement parmi les quatre catégories des blocs ainsi constitués, en fonction de leur comportement : récepteur, réservoir, transfert de puissance modulable ou non.

Il faut bien sûr respecter les lois de la physique. Maintenant que la modélisation par la puissance est mise en place nous pouvons nous intéresser à la modélisation de chaque bloc.

Chapitre 3

Modélisation par les flux d'énergie d'un navire hybride

3.1. Modélisation générale des flux d'énergie des composants d'une propulsion hybride

La modélisation des flux d'énergie permet une modélisation juste nécessaire pour la formulation du problème de dimensionnement, la seule prise en compte des flux d'énergie permettant d'occulter certaines informations qui auraient complexifié inutilement ce problème. La modélisation par la puissance a été présentée dans le chapitre précédent. Nous avons développé deux approches possibles pour modéliser un système par les flux d'énergie :

- Une première approche où chacun des organes de puissance est modélisé d'emblée sur la base de ses flux d'énergie entrée / sortie, cela à partir d'un premier modèle physique de type phénoménologique, cartographie, etc. Ces modèles sont ensuite couplés les uns aux autres tout en respectant la nomenclature des blocs fondamentaux de la modélisation par la puissance (*cf.* paragraphe 2.5.1) ;
- Une seconde approche où le passage à la modélisation par la puissance ne se fait qu'à la fin, c'est-à-dire les organes étant d'abord modélisés indépendamment de manière « conventionnelle » (modélisation par cartographie ou phénoménologique prenant en compte flux et effort). Ensuite, le couplage des organes le nécessitant est modélisé, en cherchant à faire ressortir les blocs fondamentaux de la modélisation par la puissance. Ce n'est qu'à la fin que ces blocs de puissance sont réduits à la modélisation des flux d'énergie.

La première approche permet un travail plus rapide, car il est possible d'associer des modèles en grandeur relative. Ces modèles permettent d'agréer une famille d'organes (par exemple les moteurs thermiques, batteries, voiles, hélices) en un modèle unique. Cette méthode sera privilégiée dans le cas du dimensionnement global, au chapitre suivant. La seconde méthode permet une modélisation plus précise des organes, et est donc plus appropriée pour leur choix définitif. La figure 3.1 résume et met en parallèle les deux approches proposées.

La première approche (branche gauche sur la figure 3.1) est présentée au paragraphe 3.2 et la seconde au paragraphe 3.3 (branche droite du schéma).

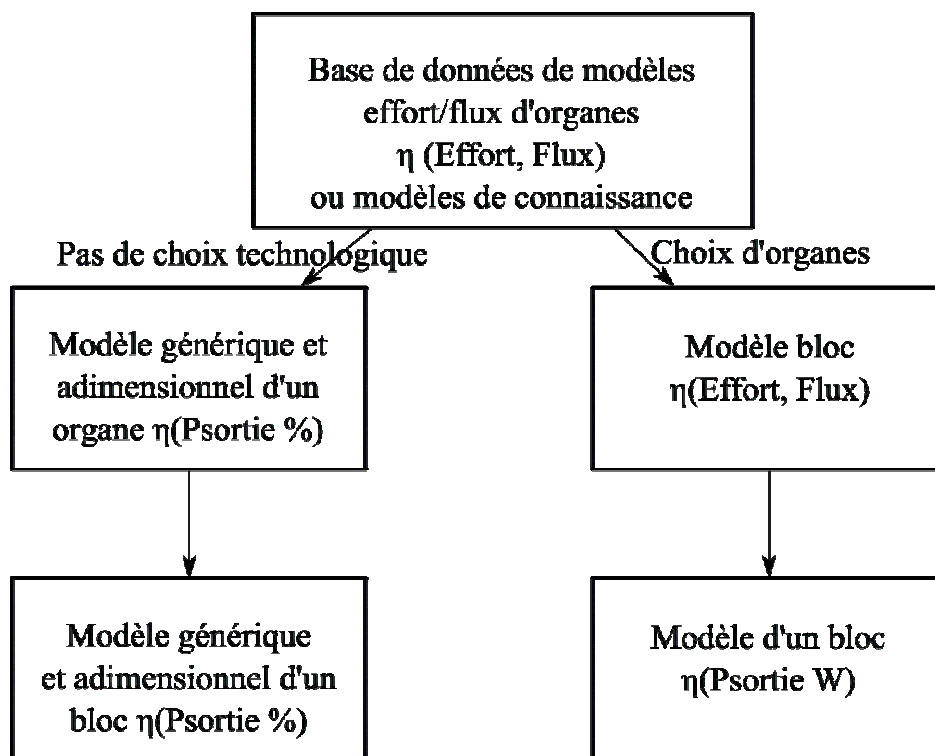


Figure 3. 1 : approches possibles pour l'utilisation de la modélisation par les flux d'énergie

3.2. Modélisation en grandeurs réduites

3.2.1. Modélisation des organes de puissance

Pour travailler en grandeurs réduites, il faut commencer par définir des grandeurs normatives, que nous appellerons « références » tout au long de ce mémoire. Dans le cas de la modélisation par la puissance, la référence préférable est la puissance nominale. Il est toutefois possible que cette solution ne soit pas viable (*cf.* paragraphe 3.2.1.4). Il y a deux types d'organes :

- ceux qui imposent l'effort ou le flux, en fonction de la puissance de sortie et de l'état de l'organe. C'est le cas de la batterie ou de l'hélice ;
- ceux dont le point de fonctionnement effort-flux en fonction de la puissance de sortie peut-être piloté. C'est le cas des moteurs.

Il n'y a pas de choix à effectuer dans le premier cas, le point de fonctionnement est imposé par l'organe et la puissance de sortie. Dans le second cas, il faut faire un choix pour la mise en place d'un modèle par le flux d'énergie. L'objectif de cette méthode est d'avoir un rendement maximal. Le transfert en puissance du système est alors défini par la courbe de rendement

Chapitre 3

maximal en fonction de la puissance de sortie. L'équation 3.1 présente la fonction utilisée pour ce calcul.

$$\eta^{el}(P_o^{el}) = \max_{E^{el}=0}^{\infty} \eta_{carto}^{el}(E^{el}, \frac{P_o^{el}}{E^{el}}) \quad (3.1)$$

avec η^{el} le rendement de l'élément « el » en fonction de sa puissance de sortie P_o^{el} , η_{carto}^{el} la cartographie classique du rendement en fonction de l'effort (E^{el}) et du flux. Lors de la recherche du maximum, pour une puissance donnée P_o^{el} , le flux F^{el} vaut P_o^{el} / E^{el} .

3.2.1.1 Stockage sur batterie

Une batterie est un système réversible de stockage de l'énergie électrique sous forme chimique. Une batterie est constituée d'un ensemble d'éléments, les cellules, mis en série ou en parallèle pour permettre une capacité de stockage et une puissance instantanée suffisantes. La modélisation du rendement d'une cellule en fonction de sa puissance de sortie est influencée par :

- l'état de charge des cellules ;
- le sens de conversion de l'énergie.

Le fait de charger, puis de décharger une cellule n'est pas une opération gratuite. Lors de ces opérations, l'énergie dissipée est significative et est elle-même fonction de l'état de charge. Il y a aussi une irréversibilité dans ces opérations : le vieillissement. Pour cette étude, nous avons utilisé le modèle développé par (Diop 2004).

Il n'est pas possible de faire des batteries de n'importe quelle capacité : l'ensemble (discret) des valeurs possibles pour une batterie donnée est conditionné par le type de cellule choisi. Le fait de raisonner en grandeurs réduites ne doit pas cacher cet état de fait. Toutefois, pour les systèmes à forte puissance embarquée, comme les véhicules hybrides, la capacité d'une cellule est suffisamment faible pour considérer que le spectre embarqué est continu.

Dans le cadre de ce mémoire, nous utiliserons une cellule dont les caractéristiques sont disponibles dans PSAT. Elle est de type Lithium-ion, et a pour capacité 6Ah, pour une tension nominale de 3.35V, soit 20Wh. La puissance de décharge nominale P_{1C}^{bat} est caractérisée « 1C » : si cette puissance de décharge est appelée pendant une heure, la batterie sera complètement déchargée. Ce raisonnement s'applique aussi pour la charge. Il est possible de

Chapitre 3

solliciter plus de puissance instantanée de la batterie, mais ceci n'est pas conseillé, pour des raisons de vieillissement prématuré.

L'extraction de données du logiciel PSAT a permis de tracer, à titre d'exemple, les cartographies de rendement en fonction de la puissance et de l'état de charge d'une cellule Lithium-ion de 6Ah en charge (figure 3.2) et en décharge (figure 3.3). Ces cartographies sont en grandeurs réduites, la puissance de référence étant la puissance P_{1C}^{bat} .

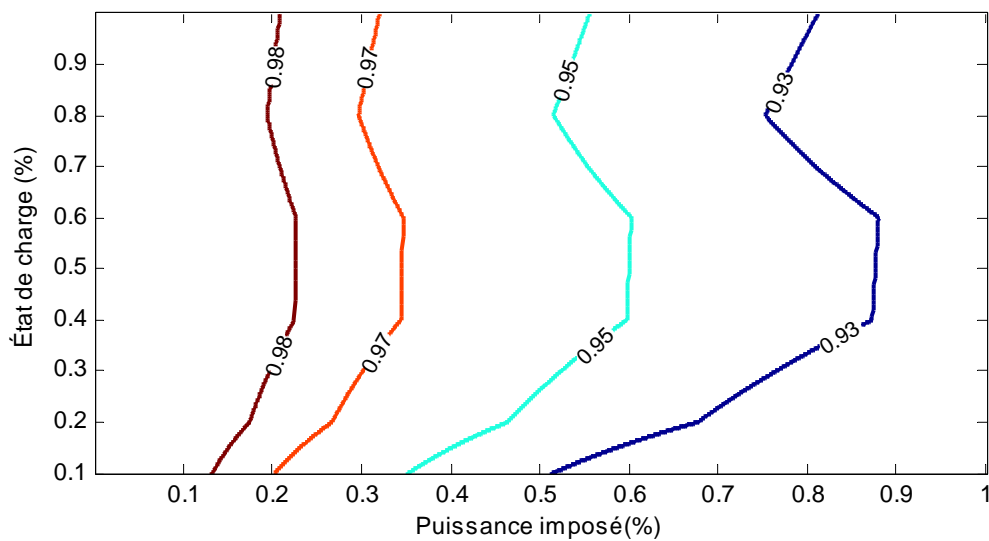


Figure 3.2 : rendement en charge d'une cellule Li-ion

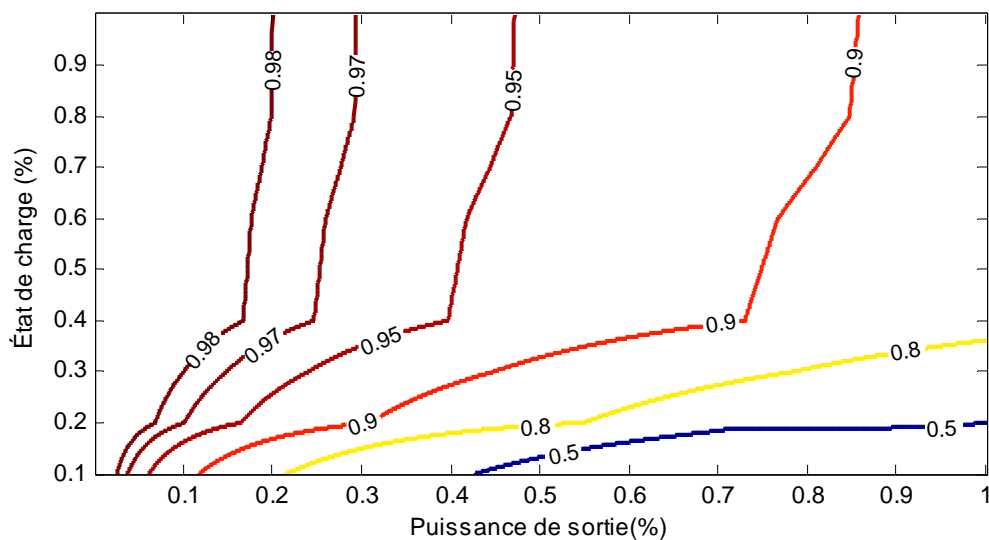


Figure 3.3 : rendement en décharge d'une cellule li-ion

Chapitre 3

Il est important de noter que ce rendement est le rendement de la transformation électrique/chimique. L'énergie d'une batterie est stockée sous forme chimique. Nous pouvons aussi remarquer qu'avec un état de charge supérieur à 40%, le rendement de charge ou de décharge est presque indépendant de l'état de charge. Cette limite de 40% est aussi une limite de protection des cellules pour qu'elles ne vieillissent pas prématurément. Il est possible de simplifier le modèle en considérant que l'état de charge des batteries reste toujours supérieur à 40%. La figure 3.4 présente cette simplification.

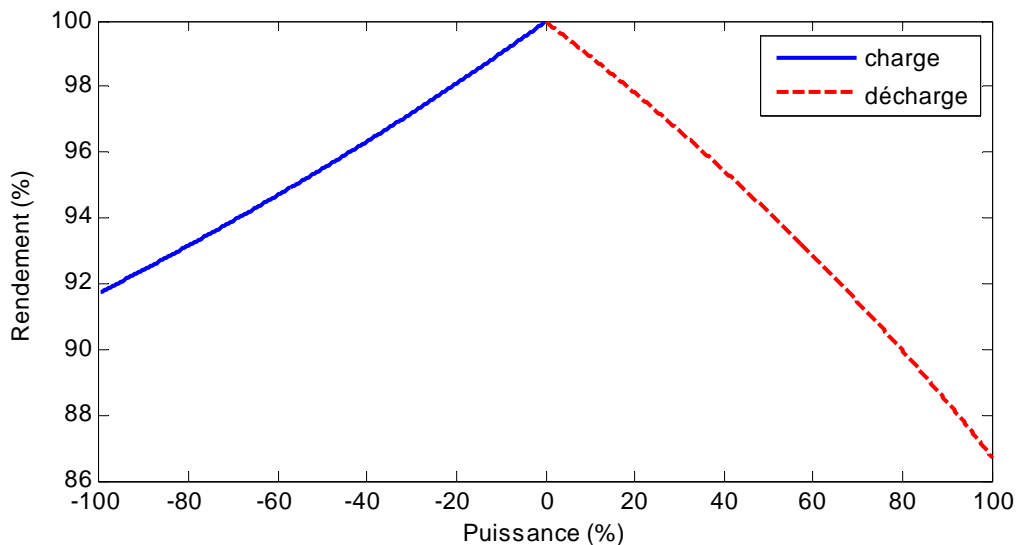


Figure 3. 4 : rendement des flux d'énergie d'une batterie Li-ion en grandeurs réduites

Conclusion

Les courbes de rendement, en charge ou en décharge, d'une batterie Lithium-ion de puissance quelconque seront toujours résumées dans nos travaux à la courbe 3.4 dans le cadre de la modélisation par les flux d'énergie en grandeurs réduites. Dans la suite du mémoire, il sera fait référence à la courbe de rendement $\eta^{bat}(P^{bat})$. P^{bat} est la puissance de sortie de la batterie en grandeurs réduites, la grandeur de référence étant sa puissance de charge P_{1C}^{bat} .

3.2.1.2 Moteurs électriques

Une machine électrique est une machine complexe, dont le rendement est déterminé par de multiples paramètres. Néanmoins, les courbes de rendement en fonction de la puissance dépendent essentiellement de la technologie employée. (Lukic & Emado 2003) présente

Chapitre 3

différentes courbes de rendement de moteurs électriques en fonction de leur technologie. Il est donc possible de tracer des courbes de rendement en puissance relative qui soient suffisamment représentatives du comportement d'un moteur électrique.

Dans cette étude, seul le moteur synchrone à aimants permanents est considéré, au motif qu'il conduit au meilleur rendement. Un exemple de modèle est présenté en figure 3.5. Il s'agit d'une cartographie en fonction de la paire couple / vitesse du moteur synchrone équipant la Toyota Prius. Nous considérerons que le moteur électrique utilisé présente le même rendement en moteur et en générateur.

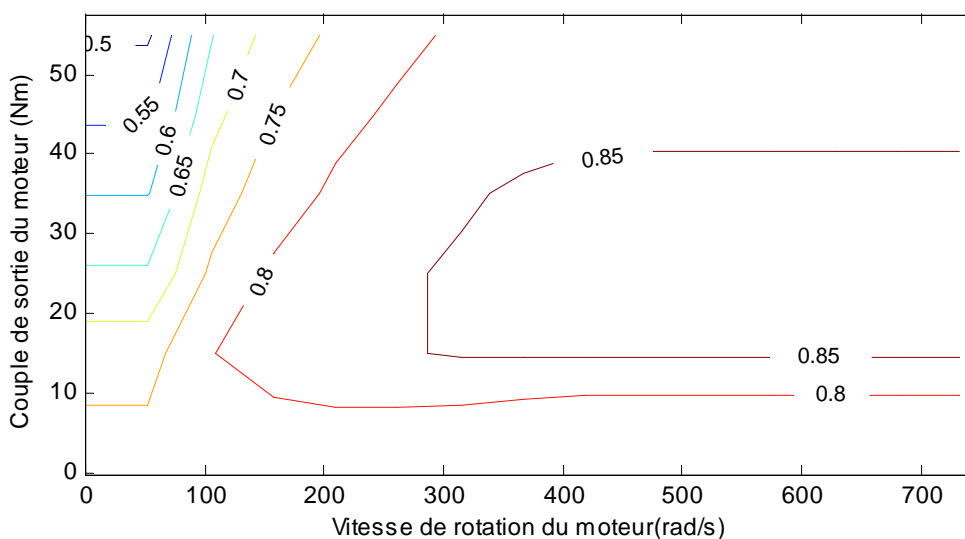


Figure 3.5 : cartographie de rendement du moteur à aimants permanents de la Toyota Prius

Il est possible de modéliser un moteur électrique par une courbe représentant son rendement en fonction uniquement de sa puissance de sortie. Cette approximation ne sera excessive que dans le cas d'une puissance faible, ou plus précisément que si le moteur est sollicité dans les zones de couple fort par rapport à la vitesse. Elle semble donc tolérable dans le cas d'une propulsion hybride où une erreur de modèle est prise en compte sur un cycle complet. Sur un cycle de fonctionnement d'un véhicule, le moteur électrique est principalement utilisé autour de sa valeur nominale, c'est donc autour de ce point que le modèle doit être le plus juste. En outre, cette modélisation a pour utilité première le calcul du rendement moyen sur un cycle. Les erreurs de modélisation sur les puissances faibles, multipliées par la faible durée de fonctionnement à ces puissances, ont de fortes chances d'avoir un impact négligeable sur le calcul de consommation du cycle complet.

Chapitre 3

Nous avons calculé ce modèle de rendement pour des moteurs synchrones à aimants permanents de différentes puissances maximales, tirés du logiciel PSAT. Le résultat est présenté figure 3.6.

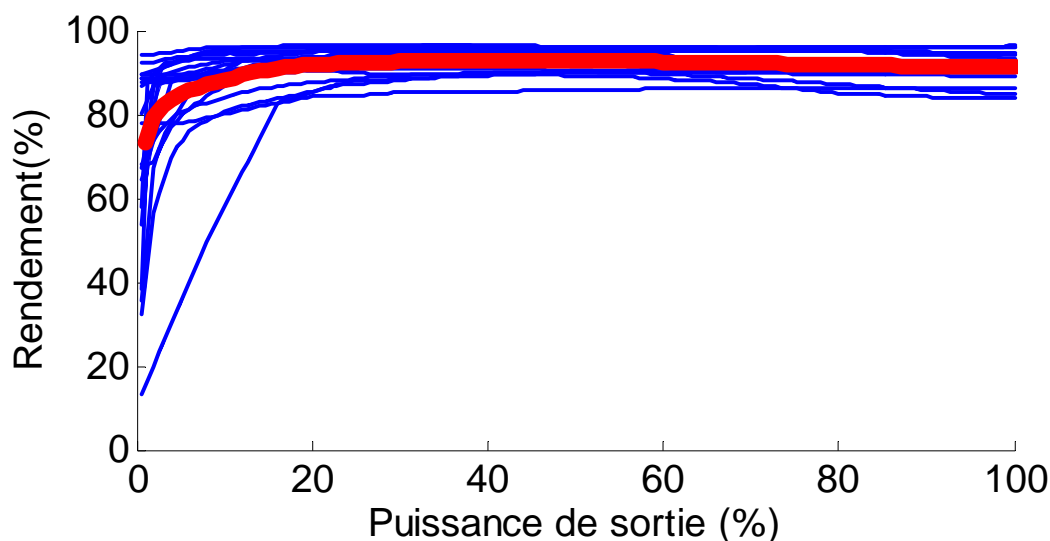


Figure 3. 6 : rendement de différents moteurs électriques de puissance de sortie maximale de 15kW à 105kW

Conclusion

Ces courbes sont très proches, alors que les puissances des moteurs sont bien différentes. La courbe de rendement d'un moteur synchrone à aimants permanents de puissance quelconque sera toujours résumée dans nos travaux à la courbe en gras, moyenne des courbes de la figure 3.6, dans le cadre de la modélisation par les flux d'énergie en grandeurs réduites. Dans la suite de la thèse, il sera fait référence à la courbe de rendement $\eta^{mel}(P^{mel})$, fonction de P^{mel} la puissance de sortie du moteur en grandeurs réduites, la grandeur de référence étant la puissance maximale P_{max}^{mel} du moteur.

3.2.1.3 Moteurs thermiques

La modélisation proposée est maintenant appliquée aux moteurs thermiques. La figure 3.7 présente la courbe de rendement de plusieurs moteurs thermiques tirés de PSAT en grandeur relative, la grandeur de référence étant la puissance maximale P_{max}^{mth} du moteur.

Les courbes de rendement en fonction de la puissance de sortie relative pour différents moteurs thermiques sont sensiblement identiques. Il n'est donc pas hors de propos d'approximer les courbes de rendement des différents moteurs (traits fin) de différentes

Chapitre 3

puissances par une unique courbe (en pointillés épais). Cette courbe conduit à une marge d'erreur de 4%, ce qui est raisonnable. Nous utiliserons dorénavant cette représentation de la motorisation thermique dans le cas de la modélisation en grandeur relative, ce qui nous garantit un modèle simple, qui résume correctement de nombreuses motorisations et que l'on peut adapter en puissance à une grande plage d'utilisation.

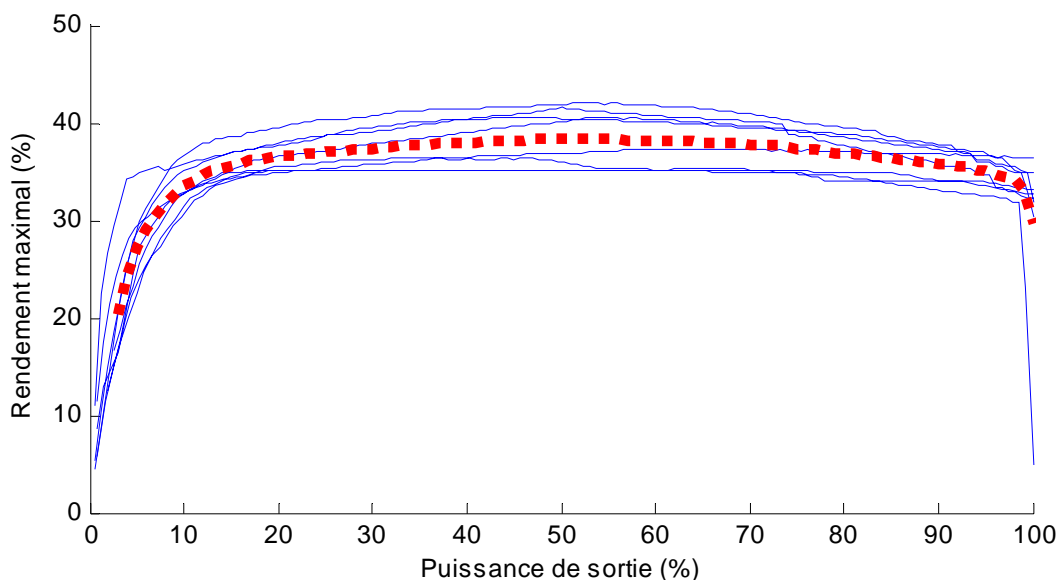


Figure 3.7 : Courbes de rendement de 8 moteurs thermiques de 60 à 200 kW en grandeur relative

Conclusion

La courbe de rendement d'un moteur thermique de puissance quelconque sera toujours résumée dans nos travaux à la courbe 3.7 dans le cadre de la modélisation par les flux d'énergie en grandeurs réduites. Il y sera fait référence via l'équation $\eta^{mth}(P^{mth})$, fonction de P^{mth} la puissance de sortie du moteur en grandeurs réduites, la grandeur de référence étant la puissance maximale P_{\max}^{mth} du moteur.

3.2.1.4 Hélices

Ce paragraphe présente les différentes situations d'utilisation d'une hélice, impliquant différentes modélisation. Durant ce mémoire nous ne travaillerons qu'avec l'hélice présentée au paragraphe 2.2.6. Nous pouvons faire varier des paramètres de cette hélice :

- le rapport P/D, de 0.6 à 1.4, par pas de 0.2 ;

Chapitre 3

- le diamètre de l'hélice, théoriquement de façon continue, en pratique nous nous contenterons d'une variation par pas de 5 cm.

La modélisation par la puissance en grandeurs réduites d'une hélice, en propulsion ou en régénération, s'avère relativement compliquée. Nous allons voir que ne pourrons pas utiliser la même approche que dans les cas précédents, lorsque le vent contribue à la propulsion. Une hélice a un point de fonctionnement imposé par la vitesse du navire et la puissance à transmettre pour maintenir cette vitesse. Il faut également tenir compte de l'influence des caractéristiques propres de la coque du navire (surface de contact avec l'eau) et, en théorie des courants marins et de l'état de la mer. Pour simplifier, nous ferons l'hypothèse que le courant est nul et que la mer est calme.

A partir des équations 2.4 à 2.7, présentées au chapitre 2, il est possible d'exprimer la puissance P_N , nécessaire à l'avancement du navire à la vitesse V_N , ainsi que P_H celle qui transite par l'hélice :

$$P_N = \frac{1}{2} S_N \rho_{eau} V_N^3 \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} P_H = T_H V_N &= T_a (1-t_H) \frac{V_a}{(1-w_N)} = \frac{1}{2} \pi R_H^2 \rho_{eau} \frac{(1-t_H)}{(1-w_N)} C_T(\beta) V_a^2 \\ &= \frac{1}{2} \pi R_H^2 \rho_{eau} (1-t_H)(1-w_N)^2 \frac{C_T(\beta)}{\sin^2(\beta)} V_N^3 \end{aligned} \quad (3.3)$$

En l'absence de vent, à vitesse stabilisée, on a simplement $P_H = P_N$, on déduit la valeur de l'angle d'attaque β de :

$$\frac{C_T(\beta)}{\sin^2(\beta)} = \frac{S_N}{R_H^2} \frac{1}{\pi(1-t_H)(1-w_N)^2} \quad (3.4)$$

Il suffit ensuite d'en déduire le rendement de l'hélice à partir de l'expression 2.13 (ou de la figure 2.8). Il est important de noter que l'angle β et donc le rendement ne dépendent pas de la puissance transmise par l'hélice, contrairement aux autres organes. En l'absence de vent, l'hélice peut donc être modélisée par un rendement constant.

Le problème est que nous avons également les voiles qui contribuent à la propulsion du navire. A vitesse stabilisée, nous avons alors :

Chapitre 3

$$P_N = P_V + P_H \quad (3.5)$$

avec P_V la puissance produite par les voiles. Nous supposons que cette puissance est imposée par les conditions de vent et qu'elle ne dépend pas de la vitesse du navire. Pour pouvoir travailler en grandeurs réduites, nous allons exprimer P_H comme une fraction de la puissance P_N :

$$P_H = \alpha_H P_N \quad (3.6)$$

Ce qui donne

$$P_H = \frac{\alpha_H}{2} S_N \rho_{eau} V_N^3. \quad (3.7)$$

Nous aurons deux cas à considérer :

- $0 < \alpha_H \leq 1 \Rightarrow P_H \geq 0$: l'hélice contribue à la propulsion du navire ;
- $\alpha_H < 0 \Rightarrow P_H < 0$: l'hélice travaille en régénération et freine le navire.

L'équation qui permet de déterminer l'angle d'attaque devient alors

$$\frac{C_T(\beta)}{\sin^2(\beta)} = \frac{S_N}{R_H^2} \frac{\alpha_H}{\pi(1-t_H)(1-w_N)^2}. \quad (3.8)$$

La figure 3.8 présente l'évolution de l'angle β et du rendement de l'hélice, pour α_H variant de 0 à 1 (mode propulsion). La figure 3.9 présente le même résultat en régénération pour α_H variant de -0.5 à -2. Ces courbes ont été obtenues pour un rapport $P/D=1$ et pour $S_N/R_H^2 = 19$.

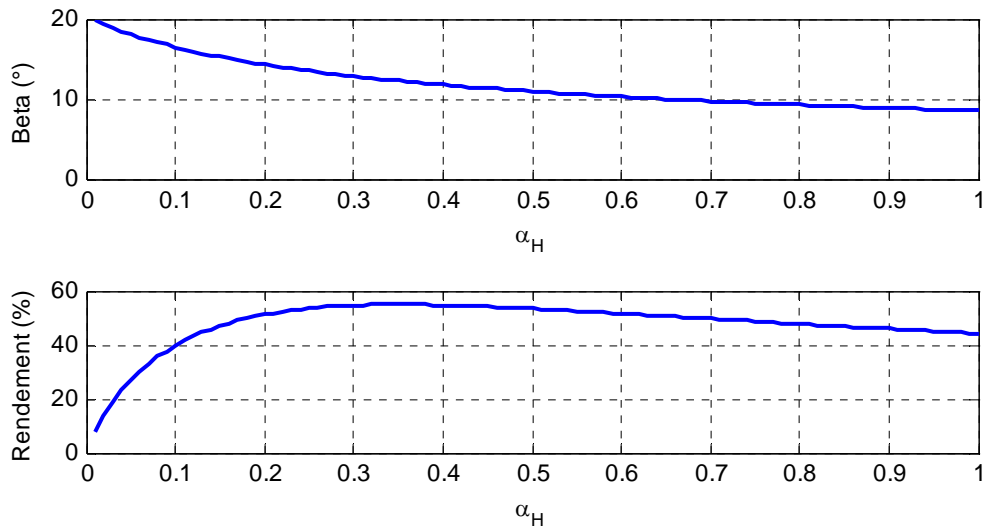


Figure 3.8 : évolution de β et de η^{hel} en fonction de α_H (propulsion)

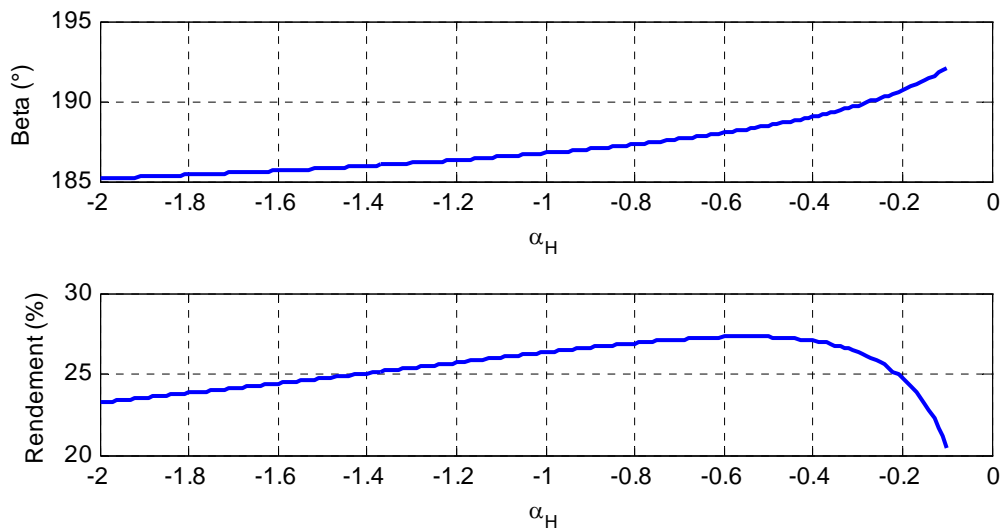


Figure 3.9 : évolution de β et de η^{hel} en fonction de α_H (régénération)

Conclusion

Pour une hélice donnée, il est donc possible de définir une courbe de rendement $\eta^{hel}(\alpha_H)$ en fonction de la puissance relative de l'hélice : $\alpha_H = \frac{P_H}{P_N}$.

3.2.2. Modélisation des blocs en grandeurs réduites

La modélisation des blocs en grandeurs réduites s'appuie sur la modélisation des organes en grandeurs réduites (*cf.* méthodologie figure 3.1, branche de gauche). Le principe de la méthode proposée est simple : les blocs étant composés des organes présentés précédemment, le couplage est pris en compte par la multiplication des rendements sur les courbes d'iso-puissance.

3.2.2.1 Modélisation du groupe électrogène

Le groupe électrogène est composé d'un moteur thermique et d'un moteur électrique. A titre d'exemple, considérons les deux organes modélisés aux paragraphes 3.2.1.2 et 3.2.1.3 (respectivement $\eta^{mel}(P^{mel})$ et $\eta^{mth}(P^{mth})$). L'équation 3.9 présente la multiplication des rendements des deux éléments. Le modèle du groupe électrogène en découlant, c'est-à-dire son rendement en fonction de sa puissance de sortie, est présenté en figure 3.10.

$$\eta^{ge}(P^{ge}) = \eta^{mel}(P^{ge}) \cdot \eta^{mth}\left(\frac{P^{ge}}{\eta^{mel}(P^{ge})}\right) \quad (3.9)$$

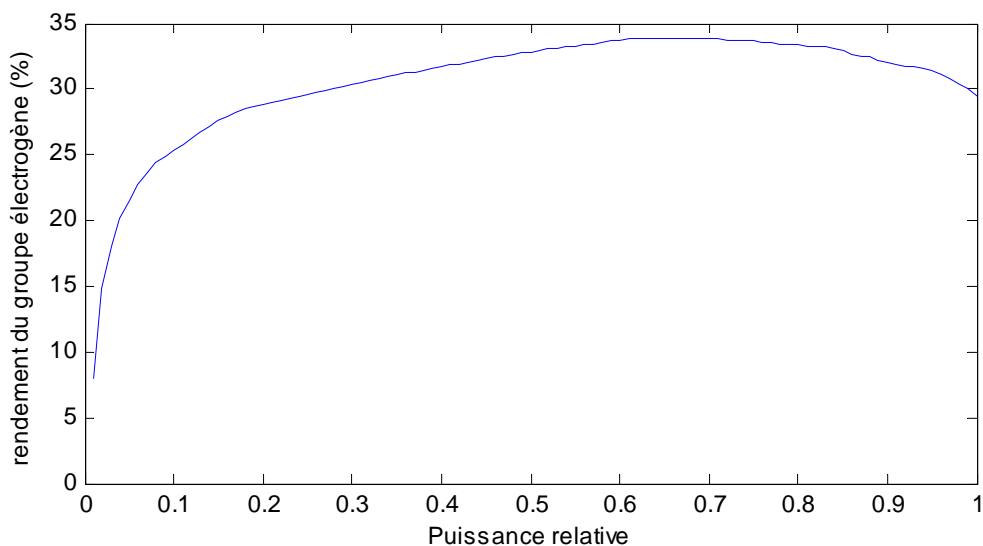


Figure 3. 10 : rendement d'un groupe électrogène général en fonction de sa puissance relative

Conclusion

En conclusion, la courbe de rendement d'un groupe électrogène de puissance quelconque sera résumée dans nos travaux à la courbe 3.10. Dans la suite du mémoire, il sera fait référence à la courbe de rendement $\eta^{ge}(P^{ge})$ en fonction de la puissance de sortie P^{ge} en grandeurs réduites. La grandeur de référence est la puissance maximale P_{\max}^{ge} du groupe.

3.2.2.2 Modélisation du groupe propulseur

Le groupe propulseur d'un navire hybride est composé d'un moteur électrique et d'une hélice. Dans un premier temps, nous considérerons que le moteur électrique est accouplé directement à l'hélice. Le rendement de l'hélice dépend uniquement de α_H , celui du moteur électrique de la puissance sa sortie. L'accouplement des deux dépendra de P^{spe} , la puissance de sortie du groupe propulseur électrique, et de α_H , rapport entre cette puissance et la puissance fournie par la voile. L'équation de rendement du groupe propulseur électrique est donc :

$$\begin{cases} \eta^{spe}(P^{spe}, \alpha_H) = \eta^{hel}(\alpha_H) \eta^{me}\left(\frac{P^{spe}}{\eta^{hel}(\alpha_H)}\right), & \text{pour } 0 < \alpha_H \leq 1 \\ \eta^{spe}(P^{spe}, \alpha_H) = \eta^{hel}(\alpha_H) \eta^{me}(P^{spe} \eta^{hel}(\alpha_H)), & \text{pour } \alpha_H < 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

Le cas $\alpha_H = 0$ n'est pas traité car alors l'hélice n'intervient pas dans la propulsion du bateau. La puissance de référence du moteur électrique étant la puissance maximale fournie par le groupe propulseur P_{\max}^{spe} multipliée par le rendement de l'hélice quand $\alpha_H = 1$, donc quand le moteur doit fournir le plus d'effort en propulsion. Les courbes 3.11 et 3.12 présentent le rendement du groupe propulseur électrique pour différents α_H .

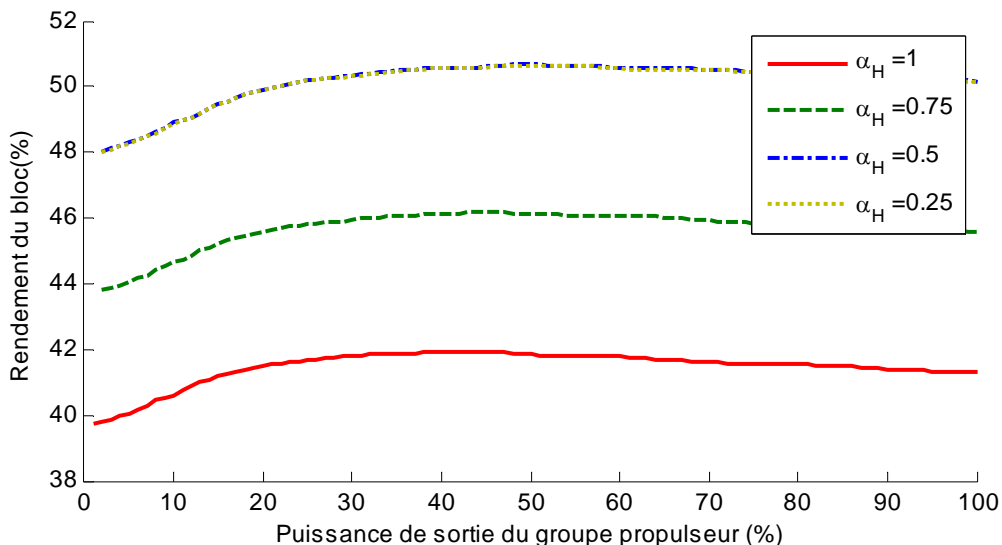


Figure 3. 11 : rendement du groupe propulseur électrique en propulsion pour différents α_H

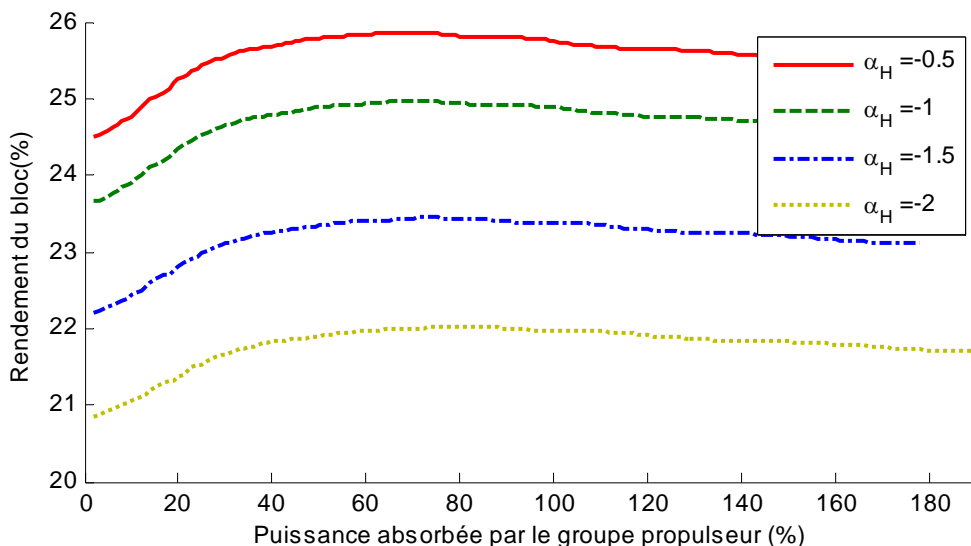


Figure 3. 12 : rendement du groupe propulseur électrique en régénération pour différents α_H

Les courbes pour $\alpha_H = 0.5$ et $\alpha_H = 0.75$ sont confondues. La puissance relative maximale absorbée par le groupe propulseur est supérieure à 1. Cette puissance n'est limitée que par la P_{\max}^{me} , et par P_V .

Conclusion

Il est possible de modéliser un groupe propulseur électrique en définissant sa caractéristique de rendement $\eta^{hel}(P^{hel}, \alpha_H)$ en fonction de la puissance relative de l'hélice: $\alpha_H = \frac{P_H}{P_N}$.

3.3. Modélisation en grandeurs réelles

La modélisation en grandeurs réelles des organes s'appuie sur la modélisation par cartographie effort / flux classiquement employée pour le dimensionnement des propulsions hybrides (Scordia 2004), (El Kadri et al.), (Guzzella et Sciarretta 2005), (Trigui et al. 2004). Une fois les organes modélisés, nous pouvons modéliser l'accouplement de ceux-ci, afin de calculer le rendement du bloc complet en fonction de la puissance de sortie de ce bloc (*cf.* branche droite du schéma de la figure 3.1).

Dans notre étude, la modélisation en grandeurs réelles n'est pas utilisée directement pour résoudre le problème de dimensionnement, mais uniquement à titre de vérification des résultats obtenus à l'aide de la modélisation en grandeurs réduites : après avoir calculé le meilleur dimensionnement selon la modélisation en grandeurs réduites, on applique à titre de validation ce résultat à un modèle plus proche de la réalité (*cf.* chapitre 4 pour une description complète de la méthodologie).

Nous ne reviendrons pas sur la modélisation de chacun des organes de puissance, thème développé au chapitre précédent. Rappelons juste que tous les modèles utilisés expriment des comportements en régime permanent.

3.3.1. Modélisation du groupe électrogène

Le groupe électrogène se compose d'un moteur thermique et d'un moteur électrique, choisis préalablement. Les deux moteurs sont reliés par un accouplement rigide, sans réduction donc sans pertes. L'objectif dimensionnant de cette association est de fournir le plus d'énergie électrique possible en consommant le moins de carburant. Pour résoudre ce problème local, il est nécessaire d'avoir la courbe de rendement maximal du groupe électrogène en fonction de sa puissance de sortie.

Méthodologie de modélisation du groupe électrogène

Le calcul du rendement du groupe électrogène en fonction du couple C^{ge} et de la vitesse Ω^{ge} de l'arbre d'accouplement entre le moteur thermique et le moteur électrique est présenté équation 3.11. Cette équation est à revoir s'il y a un réducteur.

$$\eta_{carto}^{ge}(C^{ge}, \Omega^{ge}) = \eta_{carto}^{mth}(C^{ge}, \Omega^{ge}) \cdot \eta_{carto}^{mel}(C^{ge}, \Omega^{ge}) \quad (3.11)$$

Chapitre 3

A titre illustratif, la figure 3.13 présente le résultant pour un moteur électrique de 59kW et un moteur thermique de 67kW. Nous ne nous préoccupons pas ici de la stratégie de choix des moteurs thermique et électrique, ceci faisant l'objet du paragraphe 4.4 (stratégie d'optimisation locale) de dimensionnement.

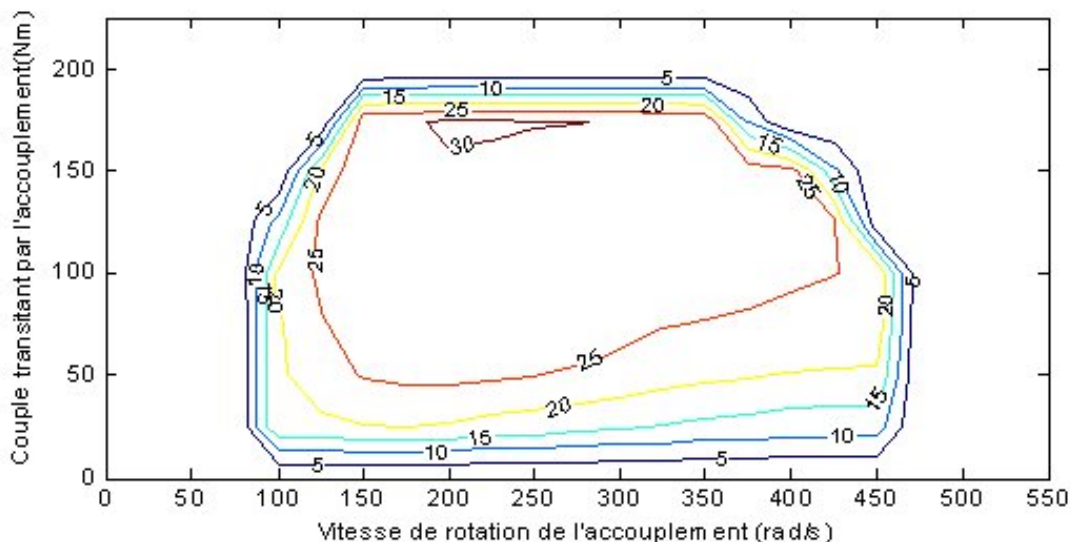


Figure 3. 13 : Cartographie de rendement d'un groupe électrogène composé d'un moteur électrique de 59kW et d'un moteur thermique de 67kW

Remarquons que c'est le moteur thermique qui impose la forme de la cartographie. La puissance de sortie du groupe électrogène modélisé par la cartographie P_{carto}^{ge} est donnée par :

$$P_{carto}^{ge}(C^{ge}, \Omega^{ge}) = C^{ge} \Omega^{ge} \eta_{carto}^{mel}(C^{ge}, \Omega^{ge}) \quad (3.12)$$

Notre objectif est d'obtenir la courbe de rendement maximal du groupe électrogène en fonction de sa puissance de sortie P_{carto}^{ge} (cette fois-ci non normalisée). Pour cela, la stratégie proposée est de parcourir les différentes courbes d'iso-puissance en sortie du groupe électrogène P_{carto}^{ge} et de chercher le rendement maximum η_{carto}^{ge} de chacune de ces courbes.

Nous cherchons ainsi à résoudre, pour chaque valeur dans l'ensemble de valeurs discrètes $P_i^{ge}, i \in \{1, \dots, N\}$ de puissance dans la plage considérée, le problème d'optimisation non-linéaire (critère et contraintes non-linéaires) :

$$\eta_i^{ge} = \max_{(C, \Omega)} \eta_{carto}^{ge}(C^{ge}, \Omega^{ge}),$$

sous la contrainte: $P_{carto}^{ge}(C^{ge}, \Omega^{ge}) = P_i^{ge}, i \in \{1, \dots, N\}.$

Chapitre 3

Ceci peut-être réalisé en utilisant la fonction `fminsearch` de Matlab[®], fonction basée sur la méthode de Nelder-Mead. Afin de fournir des points d'initialisation à cet algorithme, et dans l'idée de permettre un calcul plus rapide évitant les minimums locaux, le problème est dégrossi par une première recherche en calculant le rendement en différents points, le meilleur point étant fourni comme point de départ à la fonction « `fminsearch` ».

On peut ainsi tirer de la cartographie de la figure 3.13, la courbe de rendement maximal présentée par la figure 3.14.

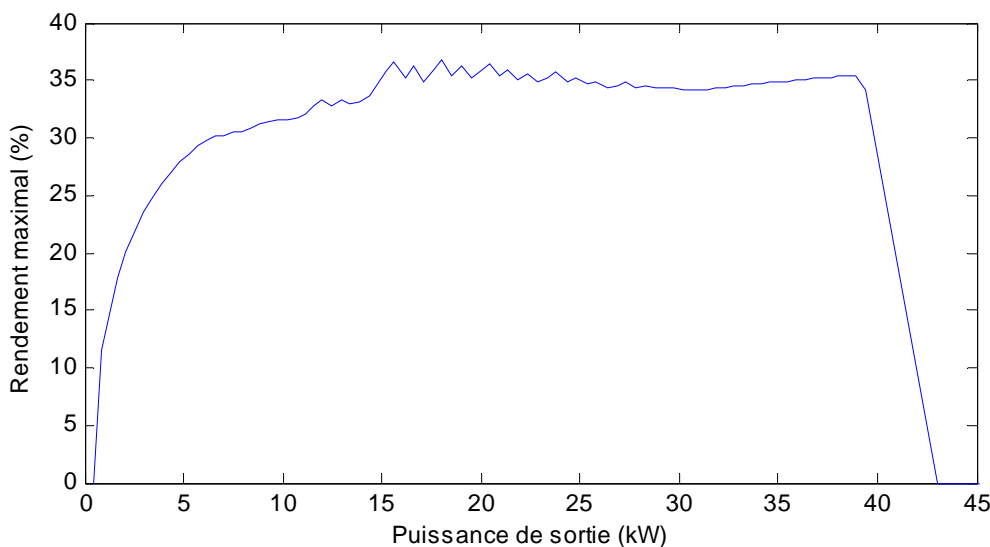


Figure 3. 14 : Courbe de rendement maximal en fonction de la puissance de sortie du groupe électrogène

Conclusion

Une méthodologie d'obtention de la courbe de rendement maximal du groupe électrogène en fonction de sa puissance de sortie a été proposée dans ce paragraphe. En résulte une courbe de même nature que celle issue de la modélisation en grandeurs réduites, sans la normalisation de la puissance de sortie P_{carto}^{ge} . On fera référence à ce modèle par la fonction : $\eta_{carto}^{ge} (P_{carto}^{ge})$.

Le problème du choix des moteurs thermiques et électriques reste évidemment en suspens. Ceci fera l'objet du paragraphe 4.4, dédié à l'optimisation locale des blocs de puissance.

3.3.2. Modélisation du groupe propulseur

De même que la modélisation du groupe électrogène, cette modélisation s'appuie sur la cartographie du moteur thermique et sur le modèle de l'hélice. Celui-ci impose une prise en compte de α_H pour la modélisation en grandeurs réelles, pour pouvoir utiliser le bloc en

Chapitre 3

propulsion partielle, ou en régénération. Contrairement au cas du groupe électrogène, le point de fonctionnement n'est pas choisi par la commande mais imposé par l'hélice, en fonction de la puissance de sortie P^{spe} et du rapport α_H . L'équation 2.7 permet de calculer le couple C^{hel} à appliquer sur l'hélice, la vitesse de rotation Ω^{hel} est déduite de l'équation 2.9. Les grandeurs à appliquer au moteur électrique étant exprimées en fonction de la puissance de sortie. Le rendement du bloc groupe électrogène est donné par l'équation suivante :

$$\eta_{carto}^{spe}(P_{carto}^{spe}, \alpha_H) = \eta^{hel}(\alpha_H) \eta_{carto}^{mel}(C^{hel}, \Omega^{hel}) \quad (3.13)$$

Il faut généralement ajouter un réducteur entre le moteur électrique et l'hélice, sinon le couple est trop important vis-à-vis des caractéristiques des moteurs électriques classiques. L'ajout de ce réducteur entraîne des pertes supplémentaires, que nous modéliserons par un rendement $\eta^{red} = 95\%$. Ces pertes se traduisent par une perte de couple. Le rendement avec un réducteur de rapport α_R devient :

$$\eta_{carto}^{spe}(P_{carto}^{spe}, \alpha_H) = \eta^{hel}(\alpha_H) \eta_{carto}^{mel}\left(\frac{C^{hel}}{\alpha_R \eta^{red}}, \Omega^{hel} \alpha_R\right) \quad (3.14)$$

Les figures 3.15 et 3.16 présentent le résultat de cette modélisation pour une hélice de rayon 45 cm, de rapport P/D de 1, pour une surface S_N de 4 m², avec un moteur électrique de 100 kW et un rapport de réduction de 15.

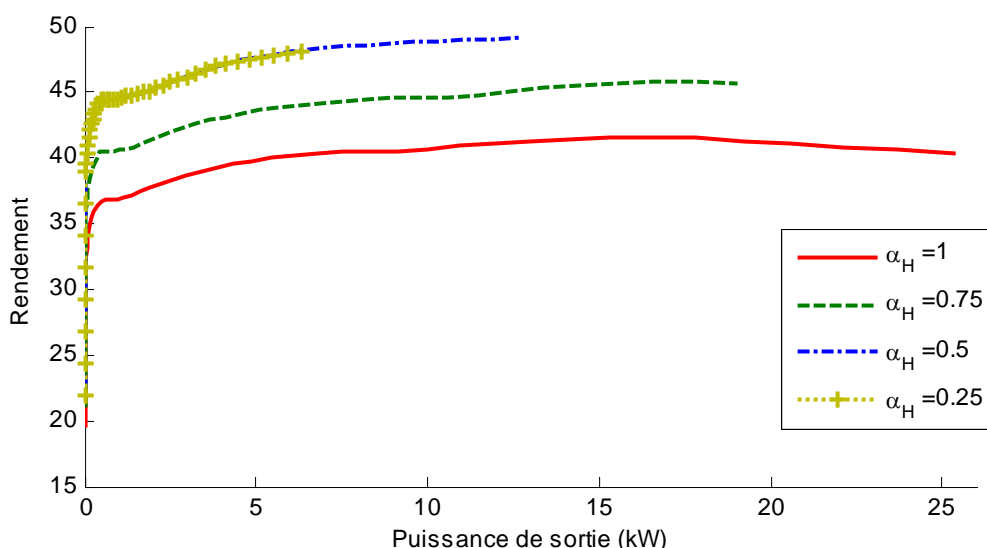


Figure 3. 15 : rendement du groupe propulseur électrique en propulsion en pour différents α_H

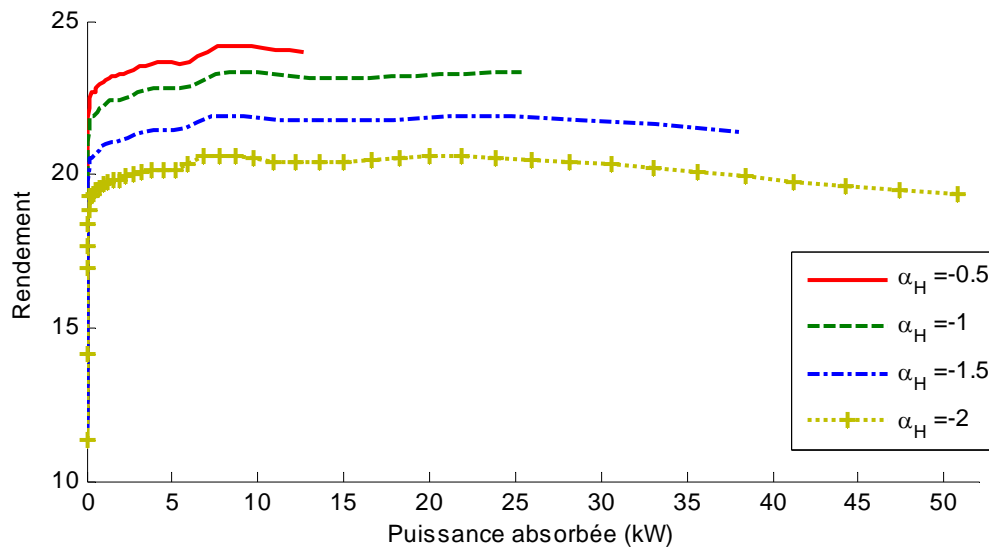


Figure 3. 16 : rendement du groupe propulseur électrique en régénération pour différents α_H

La puissance absorbée est importante, lorsque $\alpha_H = -2$, mais cette configuration sous-entend une puissance de vent 3 fois plus importante que nécessaire à la propulsion. Par contre, la puissance reçue par le moteur électrique n'est pas supérieure à sa puissance maximale.

Conclusion

Une méthodologie d'obtention de la courbe du groupe propulseur électrique en fonction de sa puissance de sortie a été proposée dans ce paragraphe. En résulte une courbe de même nature que celle issue de la modélisation en grandeurs réduites. On fera référence à ce modèle par la fonction : $\eta_{carto}^{spe}(P_{carto}^{spe}, \alpha_H)$.

Le problème du choix des moteurs thermiques et électriques fera l'objet du paragraphe 4.4, dédié à l'optimisation locale des blocs de puissance.

3.4. Conclusion sur la modélisation

Le tableau 3.1 présente la comparaison entre les modélisations en grandeurs réduites et en grandeurs réelles. Ces deux modélisations ont chacune leur utilité, selon les différentes phases du problème de dimensionnement. Cela sera illustré au cours du chapitre 4.

	Grandeurs réduites	Grandeurs réelles
Modélisation des éléments de puissance	Modélisé de façon générique	Modélisé de façon précise
Complexité pour la mise en place d'une simulation	Mise en place simple et rapide	Nécessite de connaître beaucoup d'éléments pour une mise en place exhaustive
Complexité de l'exploitation de la simulation	Exploitation non immédiate car ce sont des éléments généraux	Exploitation simple et directe
Avantage principal	Simplicité et généralité du modèle	Réponse réelle du modèle

Tableau 3.1 : comparaison des modélisations en grandeurs réduites et en grandeurs réelles

Chapitre 4

Problème de dimensionnement

4.1 Définition du problème

Le dimensionnement des organes d'un véhicule est un problème complexe. De ce dimensionnement résulte le comportement du véhicule, mais aussi son efficacité énergétique ainsi que sa durée de vie. La méthode la plus simple consiste à définir les limites maximales d'utilisation du système : couple de démarrage, vitesse maximale, puissance maximale etc., puis à choisir un moteur qui réponde à tous ces critères. Cette méthode permet un pré-dimensionnement simple et rapide, mais elle est perfectible. Un premier reproche possible est la difficulté d'établir un classement qualitatif entre deux motorisations. En effet, nous attendons maintenant d'une propulsion non des valeurs limites, mais des valeurs optimales.

Pour pouvoir répondre à ces questions, et surtout pour établir un étalon commun aux différents constructeurs, le domaine automobile a mis en place des cycles routiers. Un cycle décrit un parcours « type » que doivent suivre les véhicules, parcours en général constitué de phases urbaines et extra-urbaines. Ils sont construits en imposant vitesse, accélération, couple aux roues et rapport de boîte de vitesses. Il existe de nombreux cycles en fonction de l'utilisation du véhicule (urbain, extra-urbain, mixte), mais aussi en fonction des pays (européens, américains, japonais etc.). (Andre 2002), par exemple, définit le cycle ARTEMIS pour la mesure de l'émission de polluant. (Pérez et al. 2006) l'utilise dans le cadre de l'optimisation de la gestion de l'énergie d'une propulsion hybride série.

Cette méthode est intéressante, car elle permet de tester un dimensionnement, une commande, une architecture, et de comparer le résultat sans qu'un facteur non reproductible entre en jeu. Par contre, elle a un désavantage majeur : il est très difficile, voire impossible, qu'un cycle aussi riche soit-il, puisse être représentatif de toutes les situations qu'un véhicule pourra rencontrer.

Nous emploierons nous aussi des cycles comme support de dimensionnement. Nous définirons nos propres cycles, répondant aux exigences particulières de la propulsion navale, et présentant en particulier plus de degrés de liberté que dans le cas automobile.

Une fois ces cycles définis, il restera à définir la méthodologie et les outils d'optimisation pour résoudre le problème de dimensionnement. L'objectif de cette thèse est d'optimiser à la fois la commande et le dimensionnement des composants du véhicule. En effet, le dimensionnement des organes est intimement lié à sa commande : sans pré-dimensionnement des organes, il est impossible de vérifier que la commande est correcte, mais sans définition de la commande il est impossible de dimensionner les organes.

Dans ce chapitre, seront présentés dans un premier temps les cycles utilisés, puis la méthodologie d'optimisation mise en œuvre pour répondre à la double interrogation de l'optimisation de la commande et du dimensionnement du véhicule.

4.1.1 Stratégie d'optimisation sur cycle

L'optimisation liée au problème de dimensionnement s'effectuant sur un cycle, il est donc important de bien soigner ce cycle pour qu'il soit représentatif de la réalité. (Scordia 2004) propose par exemple de réaliser l'optimisation sur une famille de cycles et en tester le résultat sur une autre famille. Parfois, l'optimisation se fait aussi sur un ensemble de cycles générés par méthodes stochastiques (tirage de Monte-Carlo par exemple).

Nous introduirons tout d'abord un cycle automobile, le cycle MVEG, pour mettre en place notre exemple, puis ceux que nous avons mis en place pour la propulsion navale.

Le cycle MVEG est un cycle normalisé européen mixte, c'est-à-dire qu'il regroupe des parties urbaines avec des vitesses limitées à 50km/h, et des parties extra-urbaines avec des vitesses de 70 puis de 120km/h. Ce cycle est la concaténation de deux cycles : le cycle ECE (cycle urbain) et le cycle EUDC (cycle extra-urbain). Il comporte quatre cycles ECE puis un cycle EUDC. Ce cycle impose la vitesse du véhicule, mais aussi le couple aux roues et le rapport de boîte de vitesses. Il est présenté en figure 4.1 (sans les changements de rapport, sans objet pour notre étude).

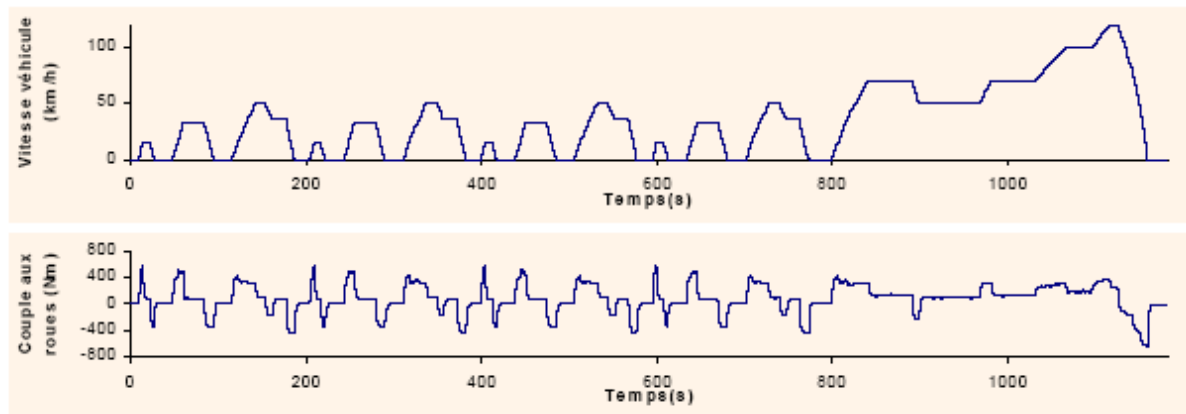


Figure 4. 1 : cycle MVEG

Il est important de noter que le cycle MVEG ne laisse que très peu de liberté : sur une propulsion classique, le régime moteur est imposé par le cycle et par le rapport de boîte de vitesses. Dans le cas d'une propulsion hybride parallèle, la commande doit choisir les proportions de l'énergie qui proviennent de la motorisation thermique et de la motorisation électrique. Ce choix est déterminant pour le dimensionnement des moteurs. Dans le cas d'une propulsion hybride série, la question du dimensionnement de l'élément de stockage de l'énergie est primordiale pour permettre une utilisation optimale de celui-ci.

4.1.2 Cycle pour les bateaux

L'aspect dynamique est négligé pour l'étude des bateaux : les durées de déplacement sont telles que les phases transitoires deviennent négligeables.

Il n'existe pas de cycle défini pour les bateaux. Nous avons donc élaboré plusieurs cycles, selon deux catégories. Les premiers reprennent l'idée des cycles automobiles : une vitesse imposée et une puissance de vent imposée par le cycle. Ces cycles sont simples à réaliser, mais il est difficile de leur faire représenter une situation réaliste. La figure 4.2 présente un de ces cycles.

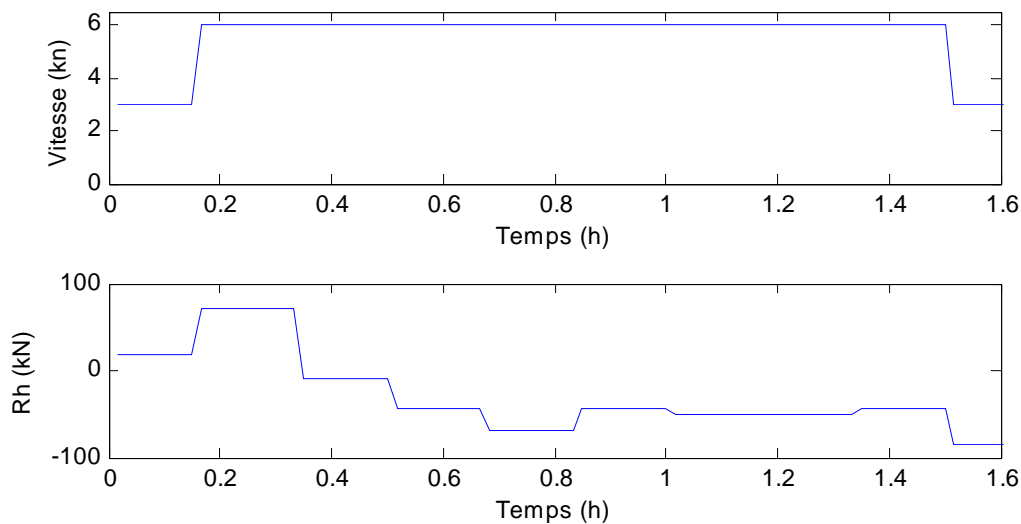


Figure 4. 2 : cycle pour voilier avec vitesse imposé et participation de l'hélice à la poussée

Le seconde type de cycle est plus simple à mettre en place, mais il est plus contraignant en terme d'optimisation : la vitesse du bateau n'est plus imposée, seule la vitesse moyenne est contrainte par le choix d'une distance et d'une durée maximale de parcours. Le vent est par contre imposé, et le bateau n'est pas libre de sa direction : il ne peut pas virer de bord, l'angle entre le vent et le bateau est donc aussi imposé. Cette seconde méthode de mise en place de cycle est plus pertinente : la vitesse d'avance d'un bateau n'est pas contrainte comme celle d'une voiture (trafic). Par contre, le fait d'ajouter un degré de liberté complexifie le problème d'optimisation à résoudre. Nous avons élaboré trois scénarios selon cette approche. Chacun de ces trois scénarios simule le déplacement d'un bateau sur 33 milles en 8h, la force du vent changeant entre ces trois scénarios. La figure 4.3 présente ces trois cycles. Le cycle 1 étant sans vent, la puissance de voile est nulle.

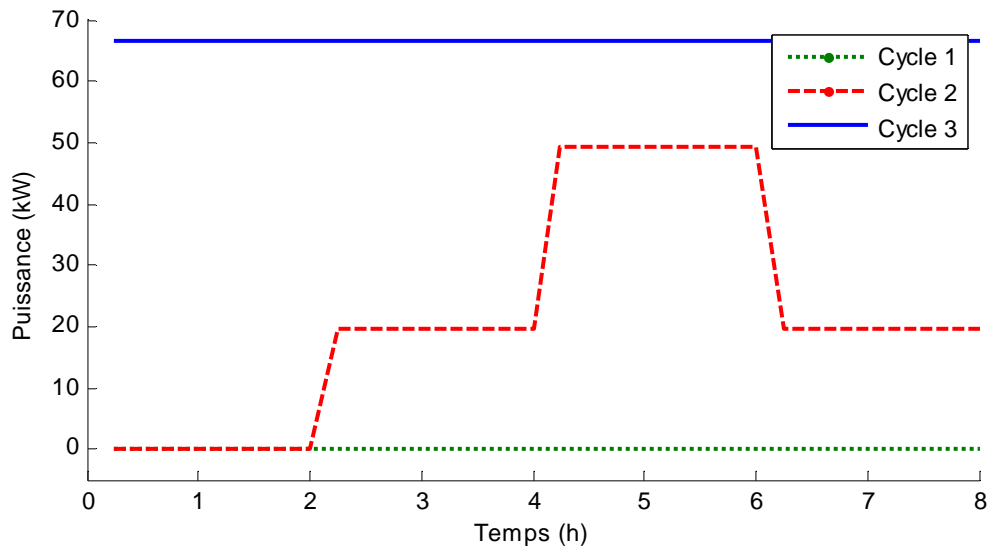


Figure 4. 3 : puissance de voile P^v en fonction des trois cycles

L'intérêt majeur des cycles à vitesse imposée est une simplicité d'optimisation. En effet, libérer la vitesse entraîne une complexification du problème d'optimisation, et surtout une explosion potentielle du temps de calcul en introduisant une variable d'état supplémentaire.

L'utilisation de tels cycles n'est donc envisageable qu'avec une méthode de dimensionnement permettant un calcul rapide de chaque point de puissance consommée.

4.2 Méthodologie par itération

La méthodologie utilisée pour répondre au problème de dimensionnement découle directement de la méthode choisie pour modéliser le système considéré. La modélisation des échanges de puissance part d'une représentation des éléments de puissance, puis réunit ces éléments en blocs de puissance pilotables séparément. Sommairement, notre méthode consiste à optimiser les échanges de puissance entre ces blocs, puis à dimensionner chacun des organes de puissance en fonction des échanges de puissance trouvés précédemment.

Voici les différentes étapes de la méthodologie de dimensionnement proposée qui s'appuie sur la modélisation des flux d'énergie.

1. La première étape consiste à faire des regroupements d'organes, en sous ensembles pilotés, à partir de l'analyse des lignes de modulation et de fourniture d'énergie (voir chapitre 2). Ceci nous a conduit par exemple dans le chapitre précédent, à considérer le bloc groupe électrogène regroupant les moteurs thermique et électrique. Afin de ne pas trop réduire l'espace des solutions pour le problème de dimensionnement considéré, des modèles génériques pour chacun des organes sont proposés. Le véhicule

est tout de même défini dans ses grandes lignes (poids, pénétration dans l'air, caractéristiques spécifiques, etc.). La première étape de la méthodologie proposée est donc celle du « pré-dimensionnement » ; le choix de la famille de modèles en grandeurs réduites utilisée est alors réalisé en fonction du cahier des charges : type de moteur thermique, de machine(s) électrique(s) (e.g. synchrone, ou asynchrone), de batteries...

2. Une fois le système modélisé, les échanges de puissance optimaux vis-à-vis du cycle demandé sont calculés. De cette optimisation globale, résultent les informations suivantes : la valeur optimale du critère, la stratégie de commande haut-niveau en cohérence avec la solution optimale, mais également les échanges de puissance entre les différents blocs. Dans ce mémoire, et sans que cela nuise à la généralité du propos, nous chercherons à optimiser la consommation globale de carburant.

3. Chaque bloc fonctionnel défini à la 1^{ère} étape est dimensionné à partir de la répartition des puissances (issue de l'étape 2) qu'il doit fournir. Ce dimensionnement résulte d'une optimisation locale visant ici la moindre consommation énergétique (d'autres critères pertinents pourraient être utilisés telle la quantité de polluant ou un critère multi-objectif). Cette optimisation est réalisée à partir d'un catalogue de caractéristiques statiques d'organes réels.

4. Une fois le dimensionnement local réalisé en première instance, on réévalue le critère global afin de vérifier qu'il diffère peu de celui obtenu à partir des modèles génériques. Si tel n'est pas le cas, il faut reconsidérer l'étape 3 afin de diagnostiquer les raisons de cet écart et obtenir finalement l'adéquation avec le résultat de l'optimisation globale.

Cette approche itérative est rendue possible par l'utilisation des modèles très simplifiés, ne s'intéressant qu'aux flux d'énergie et qui permettent de réduire fortement la complexité numérique du problème d'optimisation global.

Pour résumer, l'optimisation globale calcule, en fonction d'une mission¹ à réaliser, les flux d'énergie qui minimisent le critère considéré (ici la consommation de carburant), ainsi que la valeur minimale de ce critère. Les prochains paragraphes présentent la formulation du

¹ Mission générique définie par le cahier des charges.

problème d'optimisation globale, ainsi que les outils employés pour le résoudre. La figure 4.4 décrit sa mise en œuvre au sein de la démarche globale.

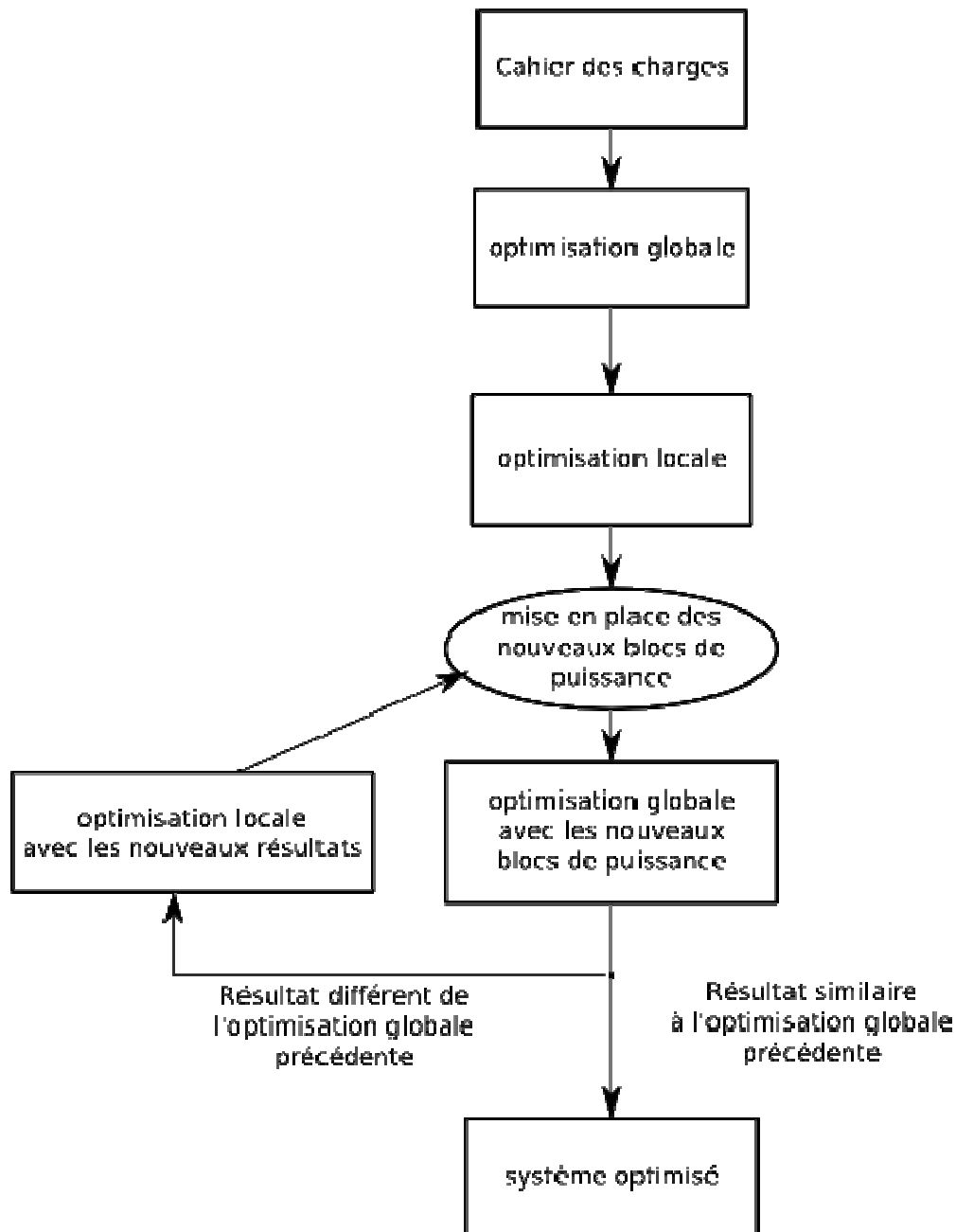


Figure 4. 4 : méthodologie d'optimisation utilisée pour l'optimisation par les flux d'énergie

La modélisation des échanges de puissance supporte l'utilisation des outils algorithmiques de dimensionnement en ce qu'elle simplifie les modèles manipulés par l'optimisation et déporte une partie du problème sur un travail de dimensionnement local. Son intérêt réside donc dans le faible temps de calcul résultant de leur simulation au sein de l'algorithme d'optimisation, mais aussi dans une simplicité conceptuelle accrue pour l'utilisateur. D'autant qu'elle permet

de travailler de manière intermédiaire sur une modélisation en grandeurs réduites qui permet une évaluation efficace de la consommation de carburant d'un véhicule mû par un groupe motopropulseur optimisé.

4.3 Optimisation globale

On peut résumer la phase d'optimisation globale du système de propulsion par les étapes suivantes :

- Définition du critère : ici la consommation énergétique
- Définition des états du système
- Choix des variables de décision
- Construction, à partir des modèles génériques normalisés de chaque organe, du modèle support de l'optimisation
- Optimisation du critère
- Déduction des profils de puissance en fonction du temps, et au final de la répartition de puissance par organe

Elle est abordée dans ce qui suit par le biais de la programmation dynamique.

4.3.1 Calcul du meilleur chemin

Notre objectif dans ce mémoire est simplement de minimiser la consommation de carburant du véhicule, donc de minimiser le critère

$$J = \min \sum_{t=0}^{N-1} P^{ge} \cdot \eta^{ge} (P^{ge}) \cdot Te, \quad (4.1)$$

où la variable temporelle t est échantillonnée, sur N pas, à la période Te .

En plus de la variable à optimiser, il faut définir les variables de décision. Il y a autant de variables de décision que de degrés de liberté, et la commande de celles-ci doit suffire à imposer un état du système. Il faut aussi identifier les variables d'état du système qui répondent à une équation du type :

$$x(t+1) = x(t) + \Delta x(t) \quad (4.2)$$

avec $x(t)$ l'état de cette variable au temps t . Ces variables d'état auront une valeur initiale et une valeur finale à définir. Il faut aussi définir les variables imposées par le cycle. Pour le cycle MVEG il y a une variable imposée : la puissance de sortie de la motorisation électrique P^{me} . Enfin, il faut mettre en lumière les contraintes du système. Par exemple l'état de charge

Chapitre 4

de la batterie ne peut varier qu'entre certaines limites : de 0 à 100% en théorie, mais nous limitons cet état de charge à la plage 40 à 95%, comme expliqué au paragraphe 2.2.4.

Il faut maintenant choisir la méthode d'optimisation à utiliser pour résoudre ce problème. D'après (Scordia 2004), il existe deux familles d'approche de l'optimisation hors ligne :

- les méthodes exactes de commande optimale,
- les méthodes heuristiques.

Les premières méthodes permettent d'atteindre l'optimum global au prix d'une complexité et d'un temps de calcul qui devient prohibitif dès que le temps de calcul d'un point de consommation devient important. Les secondes ne garantissent pas l'optimalité de la solution, tout en demandant un temps de calcul important. Ces dernières méthodes d'optimisation sont basées sur le calcul de nombreuses solutions, puis sur la comparaison et la concaténation de ces solutions pour affiner le résultat et trouver la meilleure. A titre d'exemple, Montazeri et ses collègues, dans (Montazeri-Gh et al. 2006) utilisent les algorithmes génétiques. Les méthodes heuristiques présentent souvent la difficulté du choix des réglages, qui peuvent en étant trop optimistes conduire à un minimum local et alternativement à un temps de calcul élevé.

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés aux méthodes exactes. D'autres auteurs ont travaillé sur ce type d'algorithme pour l'optimisation de la commande de voiture.

Dans (Delprat 2002), S. Delprat applique le calcul variationnel à la commande optimale d'un véhicule hybride parallèle. Cette méthode impose d'approximer les cartographies des moteurs par des arcs de paraboles. Cette méthode est ensuite exploitée pour permettre une commande en temps réel.

Dans (Dubray 2002), A. Dubray applique le principe du maximum de Pontryaguine au cas d'un bus hybride série. Cette méthode est développée pour répondre à la problématique d'un trajet maîtrisé.

Dans (Scordia 2004), J. Scordia utilise la programmation dynamique pour calculer la commande optimale hors ligne d'un véhicule hybride parallèle, puis s'appuie sur les résultats de cette commande optimale pour réaliser une commande temps réel se basant sur des réseaux de neurones.

Nous travaillerons sur la programmation dynamique pour trouver la commande optimale de notre propulsion pour plusieurs raisons :

- sa mise en œuvre est simple ;
- les modèles utilisés, par leur simplicité, lui sont bien adaptés ;
- le seul réglage porte sur le pas de discrétisation des variables d'état ;

- la solution obtenue est nécessairement un optimum global.

4.3.2 Programmation dynamique

La programmation dynamique est basée sur l'équation de Hamilton-Bellman-Jacobi qui est tirée du principe d'optimalité de Bellman. En voici l'énoncé tel que présenté par (Culioli 1994) :

«Dans un processus d'optimisation dynamique, une suite de décisions est optimale si, quels que soient l'état et l'instant considérés sur la trajectoire qui lui est associée, les décisions ultérieures constituent une suite optimale de décisions pour le sous-problème dynamique ayant cet état et cet instant comme conditions initiales.»

La programmation dynamique est adéquate quand il s'agit de trouver la commande optimale d'un système. Ce système doit pouvoir être régi par un modèle d'état, en temps discret, du type :

$$\begin{cases} x(t+1) = f(x(t), u(t), t) \\ y(t) = g(x(t), u(t), t) \end{cases} \quad (4.3)$$

Avec $u(t)$ la commande du système et $x(t)$ le vecteur d'état retenu. A chaque instant il est possible de choisir la commande afin de faire évoluer le système d'un état initial $x(0)$ à un état final $x(N)$. Dans le cas du calcul de la consommation sur un cycle l'état initial, l'état final et le nombre de pas de calcul N sont connus. Il faut donc définir la commande pour chaque instant, la variable temps étant discrétisée en pas de calcul. Si nous repartons de l'équation du critère à minimiser 4.1, nous pouvons la réécrire ainsi :

$$J(u) = \min_{u(0), \dots, u(N-1)} \sum_{t=0}^{N-1} g(x(t), u(t), t) \quad (4.4)$$

Ou encore, dans notre contexte :

$$J(u) = \min_{u(0), \dots, u(N-1)} \sum_{t=0}^{N-1} P^{ge}(t) \cdot \eta^{ge}(P^{ge}(t)) \cdot Te . \quad (4.5)$$

Comme le précise le principe d'optimalité de Bellman dans un problème de décision tout sous-ensemble de décisions optimales est optimal dans les mêmes conditions. Dans le cas présent la décision optimale $u^*(N-1)$ de $N-1$ à N peut-être calculée, puis celle de 0 à $N-1$:

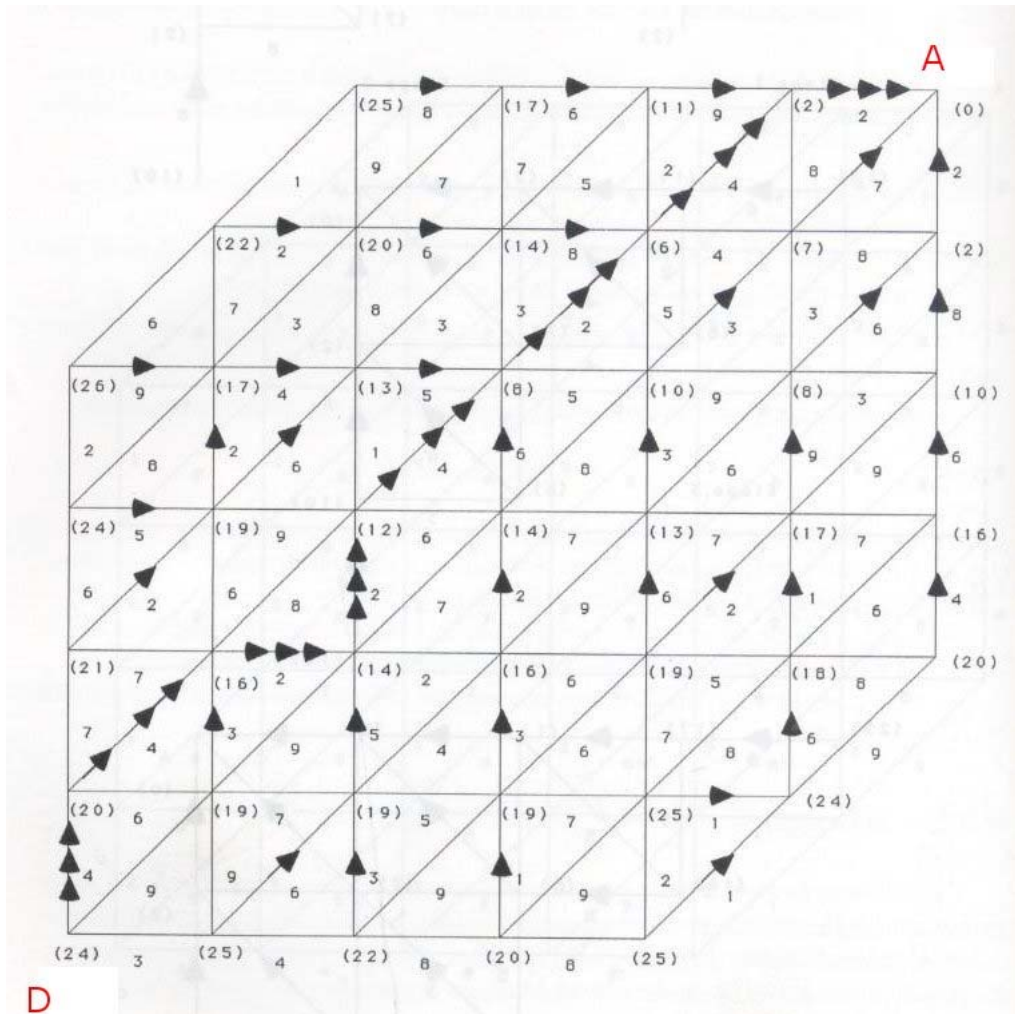


Figure 4.7 : solution par la programmation dynamique de l'exemple

4.3.4 Application à une voiture hybride série

4.3.4.1 Définition du problème

Nous allons maintenant appliquer cette méthodologie sur le cas du dimensionnement d'une voiture hybride série. La figure 4.8 rappelle son modèle par les flux d'énergie (voir le chapitre 2 paragraphe 2.5.2).

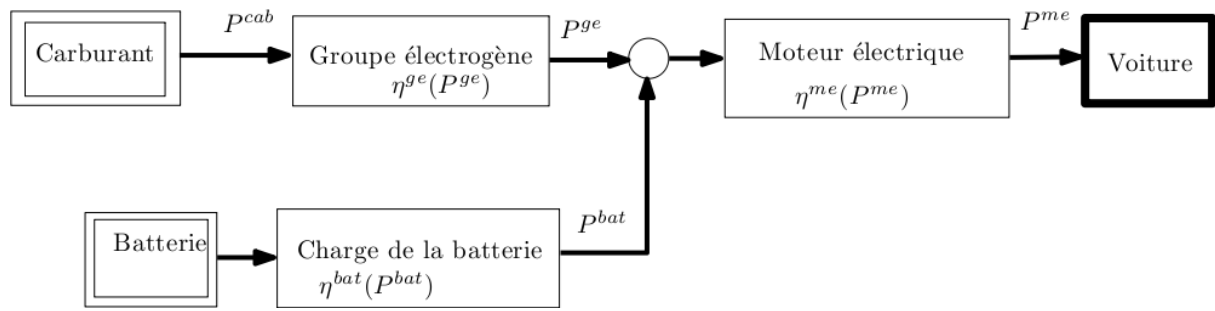


Figure 4. 8 : modélisation des flux d'énergie d'une voiture hybride série

La modélisation en grandeurs réduites du groupe électrogène, de la motorisation électrique et de la batterie a été proposée au chapitre 3.2.1.1. Il reste à modéliser les efforts nécessaires pour faire avancer la voiture. D'après (Guzzella et al 2005), l'effort à fournir pour faire avancer une voiture dépend de la résistance au roulement et de la résistance de pénétration dans l'air comme le présente l'équation 4.7.

$$F_{av} = f_{voit} m_{voit} g + \frac{1}{2} \rho_{air} S_{voit} Cx V_{voit}^2 + m_{voit} A_{voit} + R_{frein} \quad (4.7)$$

Avec F_{av} la résistance à l'avancement en N, f_{voit} le coefficient de résistance au roulement des roues sur la route (sans unité), m_{voit} la masse du véhicule en kg, g l'accélération de la gravité en $m.s^{-2}$, ρ_{air} la densité de l'air en $kg.m^3$, S_{voit} la surface frontale du véhicule en m^2 , Cx le coefficient de traînée (sans dimension), V la vitesse d'avance du véhicule en $m.s^{-1}$, A son accélération en $m.s^{-2}$, et R_{frein} la force de freinage en N. Le véhicule étudié est un petit véhicule biplace :

- $m_{voit} = 1000kg$, poids en ordre de marche
- $Cx = 0.37$,
- $S_{voit} = 1.69m^2$,
- $f_{voit} = 0.011$,

Dans le même ordre d'idée, nous avons fixé des valeurs limites pour le fonctionnement de la batterie :

- la puissance de charge est au maximum égale à 1C, (cf. paragraphe 3.2.1.1), ceci dans le but de limiter le vieillissement de la batterie ;
- l'état de charge maximal autorisé est de 95% de la charge maximale ;
- l'état de charge minimal autorisé est de 40%.

A partir de ces données, nous pouvons imposer les puissances nominales des différents composants :

- la puissance maximale de sortie du moteur électrique de propulsion P_{\max}^{spe} doit être au minimum égale à la puissance maximale nécessaire pour faire accélérer la voiture jusqu'à 120 km/h selon l'accélération imposée par le cycle ;
- la puissance de la batterie P^{bat} n'est pas imposée, elle va influencer de manière importante la consommation de carburant.

Nous pouvons maintenant passer au calcul de l'optimisation globale.

4.3.4.2 Application de l'optimisation globale

Le cycle MVEG, présenté figure 4.1, impose la vitesse, donc la puissance nécessaire à chaque instant. De cette puissance et du modèle du moteur électrique de propulsion, nous déduisons la puissance électrique consommée. L'équation (4.8) rappelle la relation liant la puissance consommée par le moteur électrique, la puissance produite par ce groupe électrogène et la puissance fournie par la batterie (cf. figure 4.8).

$$\frac{P^{me}}{\eta^{me}(P^{me})} = P^{ge} + P^{bat} \quad (4.8)$$

Nous devons choisir maintenant une variable de décision. La puissance P^{me} est imposée par le cycle et le rendement η^{me} est fonction de la famille de motorisation choisie. Nous ne disposons que d'un seul degré de liberté pour régler simultanément les puissances fournies par le groupe électrogène et par la batterie. Par ailleurs, la puissance fournie par la batterie P^{bat} présente des contraintes dynamique et elle est liée à l'état de charge qui est une variable d'état de notre système. Celle-ci sera donc notre variable de décision pour l'optimisation du système. Les critères du système sont :

- Variable imposée : P^{me} ;
- Variable de décision : $P^{bat}(t)$;
- Variable d'état : $X_{EdC}(t)$, l'état de charge de la batterie ;

$$- X_{EdC}(t+1) = \begin{cases} X_{EdC}(t) + P^{bat} \eta^{bat}(P^{bat}) & \text{en charge} \\ X_{EdC}(t) + \frac{P^{bat}}{\eta^{bat}(P^{bat})} & \text{en décharge} \end{cases} ;$$

Chapitre 4

- Contraintes : $40\% < X_{EdC}(t) / X_{EdC}^{\max} < 95\%$ et $X_{EdC}(t+1) - X_{EdC}(t) \leq P_{1C}^{bat} \cdot T_e$;
- Valeur initiale : $X_{EdC}(t_{init}) = 90\%$;
- Valeur finale : $X_{EdC}(t_{fin})$ non imposée.

Les freins sont considérés comme suffisant pour ralentir la voiture en plus de la régénération possible. Les figures 4.9 et 4.10 présentent le résultat de l'optimisation globale du problème de dimensionnement précédemment présenté dans le cas d'une batterie de 5kWh. La quantité de carburant consommée sur un cycle est de 147ml, soit 1.3l/100km.

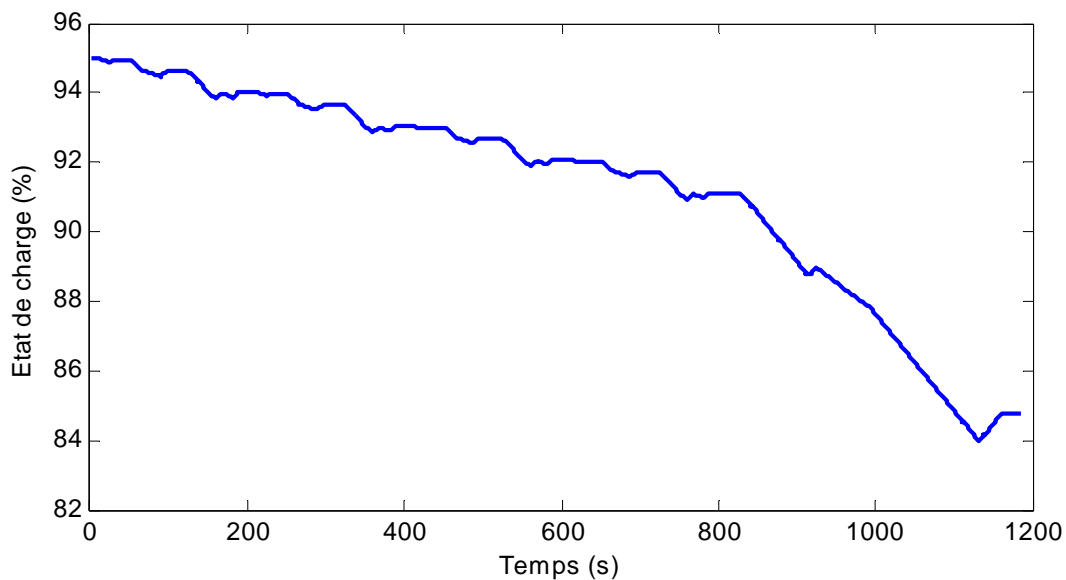


Figure 4.9 : État de charge de la batterie

De la figure 4.9, nous pouvons constater que la batterie reste bien dans la zone définie : son état de charge passe de 95% à 83%. Il est important de constater que ce n'est pas l'état de charge minimal qui restreint l'utilisation de la batterie (et donc la capacité de la batterie), mais la vitesse de charge/décharge imposée à 1C. En fait, ainsi dimensionné et pour ce cycle très court, le véhicule réagit comme un véhicule hybride série plug-in.

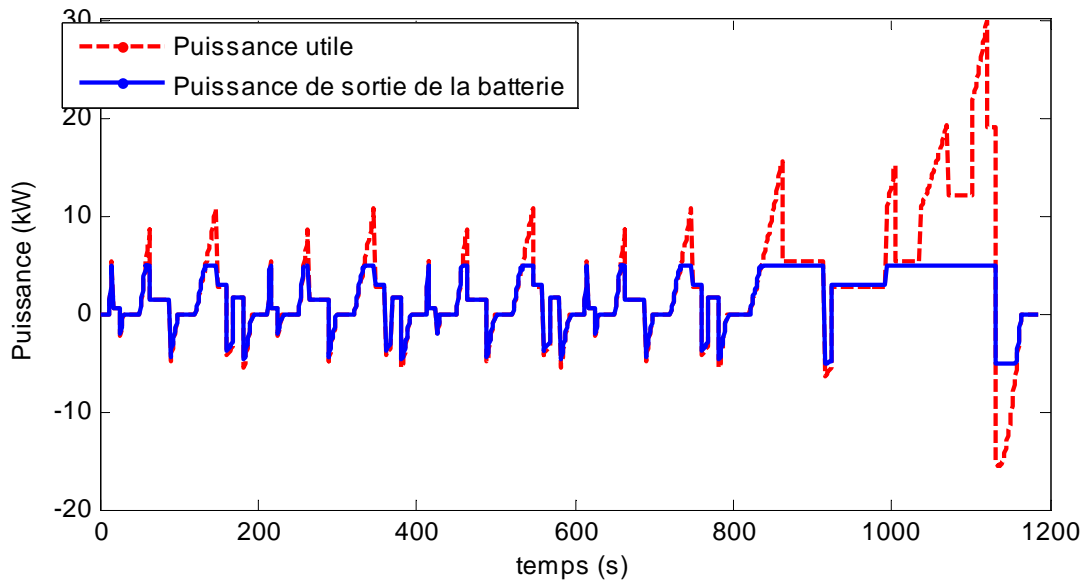


Figure 4. 10 : résultats de l'optimisation dynamique sur une voiture hybride série

De la figure 4.10, nous pouvons déduire que le groupe électrogène ne se déclenche que pour les accélérations durant les quatre cycles ECE, et qu'il fonctionne constamment quand la vitesse dépasse les 70 km/h. De même, la batterie ne peut récupérer qu'une partie de l'énergie de freinage lors du passage de 120 km/h à l'arrêt. Par ailleurs, le groupe électrogène ne recharge jamais la batterie car :

- la puissance consommée par la batterie n'est pas prise en compte pour le calcul de la consommation, et il n'y a pas de contrainte sur l'état final de la batterie. Il faut recharger la batterie pour refaire un cycle ;
- la batterie n'a pas besoin d'être rechargée durant le cycle, car elle n'atteint jamais son état de charge minimal. Ce qui explique la faible consommation obtenue.

Cet exemple simpliste souligne bien l'importance du choix du cycle. Il n'a pas d'autre ambition que d'illustrer la méthode proposée.

Il y a plusieurs méthodes pour diminuer le temps de fonctionnement du groupe électrogène :

- augmenter la capacité de la batterie, ce qui augmente son coût et son poids ;
- permettre une vitesse de charge/décharge plus importante, au détriment du vieillissement de la batterie ;
- ajouter un élément de stockage rapide comme des super-capacités.

La troisième solution apporte un changement important d'architecture. La seconde nécessite de connaître précisément le choix technologique de la batterie pour ne pas envisager une vitesse de charge/décharge excessive. La figure 4.11 présente le résultat de la diminution de la

consommation de carburant en fonction de l'augmentation de la capacité, et donc de la puissance, de la batterie, sans prise en compte du poids des batteries.

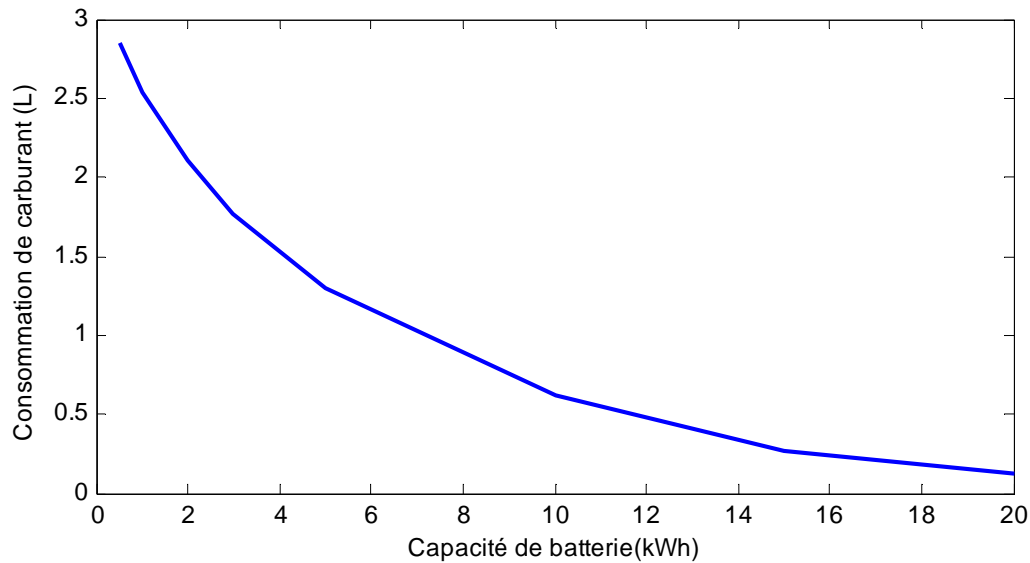


Figure 4. 11 : Consommation de carburant en fonction de la capacité de la batterie

Cette figure confirme la solution proposée en amont pour diminuer la consommation de carburant. Nous retiendrons pour cet exemple les résultats obtenus pour une capacité de batterie de 5kWh.

L'optimisation globale du cycle est maintenant réalisée. De cette optimisation nous pouvons en déduire une commande optimale, mais surtout nous pouvons choisir les différents organes du système réel les plus appropriés, grâce à l'optimisation locale.

4.4 Optimisation locale

Une fois l'optimisation globale réalisée, nous avons à notre disposition différentes informations discriminantes sur les organes, nécessaires à la mise en œuvre de la commande idéale de notre système, pour le cycle choisi.

La première est la consommation de carburant, ou tout du moins le critère J . Il peut être utilisé pour éliminer les architectures dont la consommation serait trop importante : le résultat de l'optimisation globale est proche du meilleur résultat possible. Si celui-ci est mauvais, il ne sera pas possible de l'améliorer significativement par l'optimisation locale, lors de la seconde phase.

Le second résultat est la sollicitation de chaque bloc de puissance. A partir de ces informations, il est possible de tracer un histogramme des puissances de sortie de chaque bloc

de puissance en fonction de leur durée d'apparition durant le cycle (voir figure 4.12, par exemple). C'est ce résultat qui servira d'entrée pour les différents problèmes d'optimisation locale : à partir de la connaissance de la puissance de sortie de chaque bloc, il est possible de choisir parmi une base de données l'organe le plus approprié.

4.4.1 Optimisation de chaque bloc

Il n'est pas possible d'améliorer le rendement d'un bloc d'échange de puissance pour toutes ses valeurs de puissance de sortie. Notre objectif est simplement de minimiser l'énergie totale consommée. Les résultats de l'optimisation globale sont sous la forme d'une puissance de sortie de bloc en fonction d'une durée. Or, pour chaque bloc, il est possible de calculer sa puissance d'entrée en fonction de sa puissance de sortie. L'équation 4.9 présente l'énergie totale consommée E_c^i par le bloc i qu'il s'agit de minimiser :

$$E_c^i = \sum_{P=-\infty}^{+\infty} \frac{P}{\eta^i(P)} T^i(P) \quad (4.9)$$

P représente la puissance de sortie du bloc considéré et prend un ensemble de valeurs discrètes. La fonction $T^i(P)$ est l'histogramme qui résulte de l'optimisation globale et qui indique la durée pendant laquelle le bloc i délivre la puissance de sortie P .

C'est cette fonction que l'optimisation locale évalue pour minimiser la puissance consommée par le bloc. Pour réaliser cette optimisation, il faut revenir à la modélisation de chaque élément de puissance selon une approche classique flux/effort. Une modélisation classique des blocs est donc utilisée pour réaliser cette optimisation qui s'appuie sur une base de données d'organes réels. Dans cette base, nous allons d'abord sélectionner les éléments qui sont compatibles avec les puissances à transmettre. Pour les blocs composés de plusieurs organes comme le groupe électrogène, nous recherchons ensuite la combinaison optimale en associant les éléments entre eux. On peut éventuellement introduire des interfaces supplémentaires, tels que des réducteurs ou des transformateurs. Pour réaliser la recherche de cet accouplement optimum la méthode s'appuie sur la modélisation en grandeurs réelles de bloc présentée paragraphe 3.3. Elle permet d'obtenir une courbe de rendement en fonction de la puissance de sortie pour n'importe quel assemblage d'organes de puissance, donc de calculer l'énergie d'entrée du bloc évalué E_c^i . A partir de celle-ci, il est possible d'utiliser de nombreux outils mathématiques pour sélectionner les organes optimaux.

Durant cette thèse, nous avons utilisé PSAT comme une banque de cartographies d'organes de puissance. Il contient la cartographie d'une quarantaine de moteurs thermiques et d'une

vingtaine de moteurs électriques. Les organes de cette base de données étant réels, nous nous sommes contentés de comparer le résultat de l'accouplement de chaque organe pour la mise en place des blocs. Eventuellement, il est possible d'introduire un accouplement lui aussi optimisé entre les organes d'un bloc. Il est aussi possible de réaliser une mise à l'échelle des moteurs de cette base, mais utiliser une telle fonction sous-entend la conception d'un moteur uniquement pour cette propulsion. L'utilisation d'un accouplement autre que direct est envisageable, mais augmente fortement le temps de calcul, si on le réalise sur l'ensemble des moteurs.

La configuration optimale est déterminée par une simple comparaison des performances des différentes solutions compatibles avec le cahier des charges.

4.4.2 Application à un véhicule hybride série

4.4.2.1 Données de l'optimisation globale

L'optimisation globale réalisée en 4.3.4 définit la durée de fonctionnement de chaque sous-système en fonction de la puissance fournie. La figure 4.12 présente ainsi les sollicitations du groupe propulseur, *i.e.* le moteur électrique en propulsion (*cf.* figure 4.8). A partir de ces données, il est possible d'optimiser le moteur électrique en choisissant le moteur qui répond avec le meilleur rendement à ces couples Puissance/Durée.

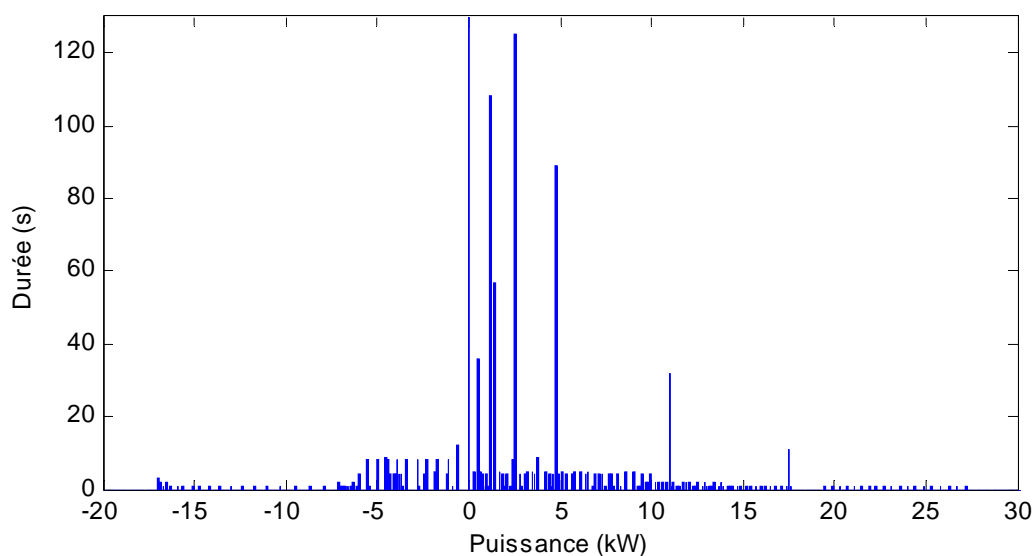


Figure 4. 12 : Durée de fonctionnement en fonction de la puissance de sortie du bloc de propulsion

Les figures 4.13 et 4.14 présentent les couples Puissance/Durée pour le groupe électrogène et pour la batterie. Nous pouvons remarquer que le groupe électrogène a un pic de

Chapitre 4

consommation à 6.5kW et un autre à 14.5kW. Il faut donc un groupe électrogène dont le fonctionnement soit optimal pour ces puissances.

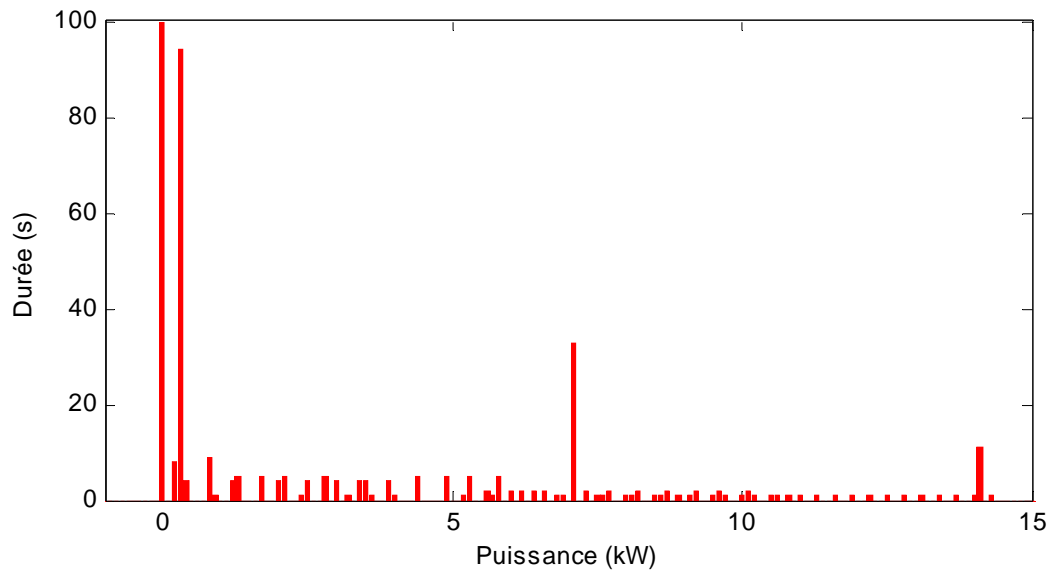


Figure 4.13 Durée de fonctionnement en fonction de la puissance de sortie du bloc groupe électrogène

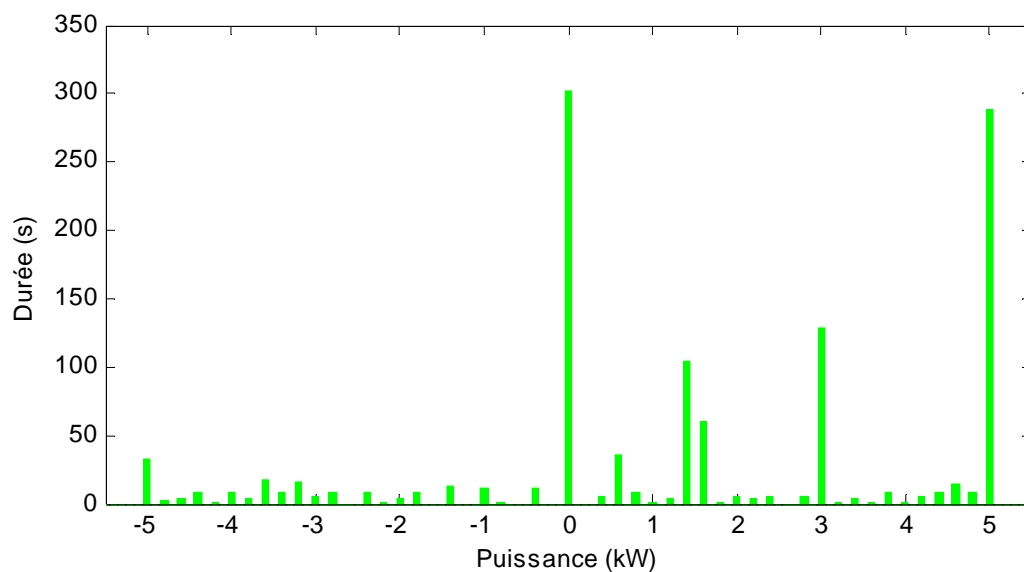


Figure 4.14 Durée de fonctionnement en fonction de la puissance de sortie du bloc batterie

La batterie, quant à elle, est souvent utilisée à 5kW, le maximum de sa puissance, mais elle est aussi utilisée à 1.5kW et 3kW, ainsi qu'en freinage régénératif. Nous ne pouvons pas optimiser la consommation de la batterie autrement qu'en augmentant le nombre de cellules, nous ne nous y intéresserons donc plus durant ce chapitre.

4.4.2.2 Optimisation locale

Maintenant que nous avons les sorties de puissance par organe, nous pouvons les utiliser pour choisir les composants les plus appropriés. Pour cela nous utilisons la bibliothèque de composants du logiciel PSAT. De cette bibliothèque, nous tirons tous les moteurs thermiques et tous les moteurs électriques dont la puissance convient. Le choix se base sur le calcul de la modélisation en grandeurs réelles de chaque bloc, puis sur le calcul de l'équation (4.9).

Comme nous l'avons déjà dit dans le paragraphe 4.4.1, nous nous contenterons de comparer l'énergie consommée E_c^i pour chaque composant possible de la bibliothèque PSAT. Cette bibliothèque étant orientée propulsion hybride, elle comprend un grand nombre de composants déjà utilisés dans la propulsion de voiture.

Le choix optimal des composants du groupe électrogène donne :

- un moteur thermique diesel de 50kW ;
- un moteur synchrone de 47kW.

La figure 4.15 présente la courbe de rendement du nouveau groupe électrogène. Nous pouvons remarquer que cette courbe est moins constante que la courbe générique. On peut notamment remarquer que le rendement chute sensiblement à partir de 25 kW, c'est-à-dire bien au dessus des puissances les plus sollicitées (6.5kW et 14.5kW).

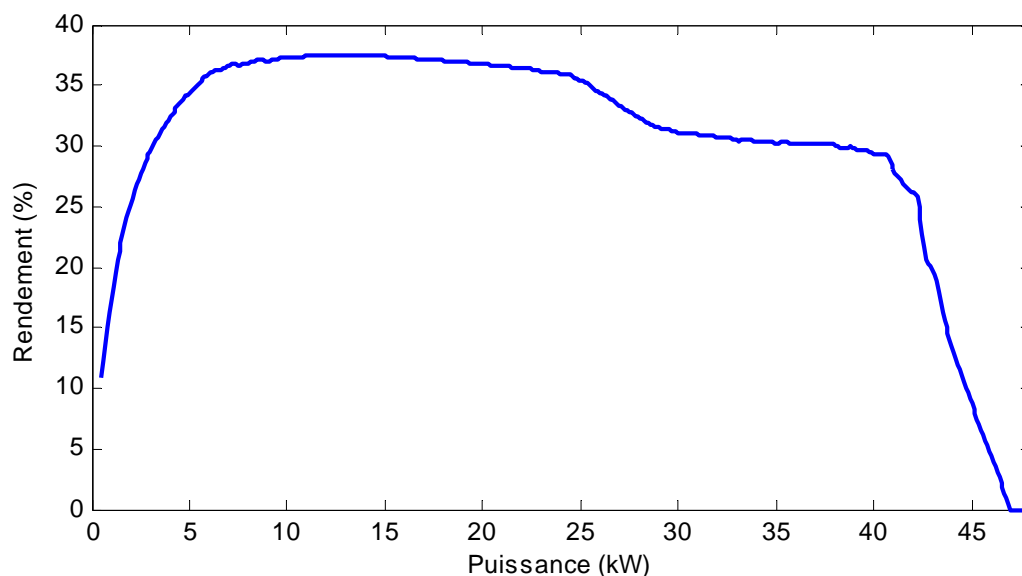


Figure 4. 15 : rendement du groupe électrogène optimisé localement

La courbe 4.16 présente le rendement du moteur électrique de propulsion choisi par l'optimisation locale.

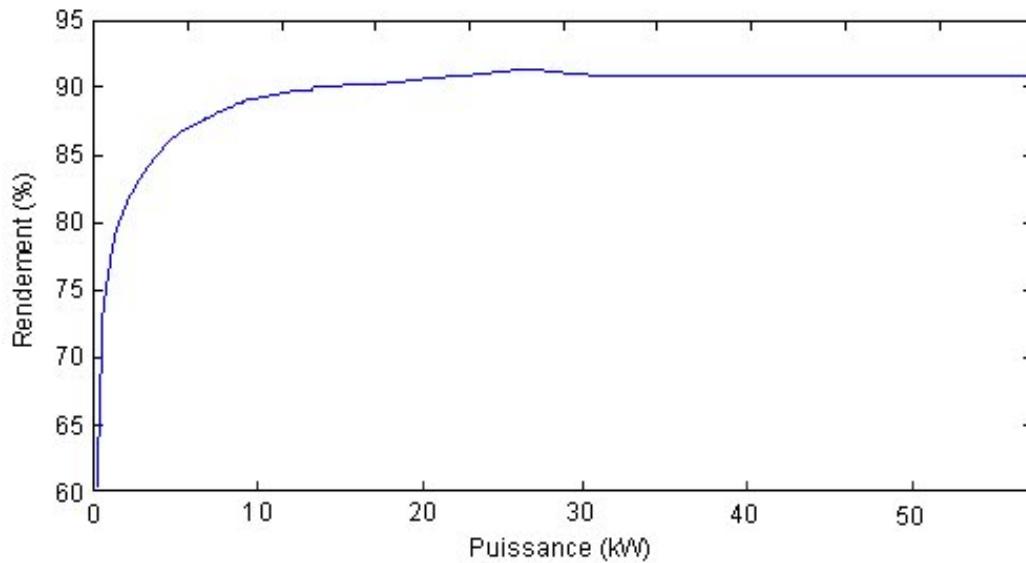


Figure 4. 16: rendement du moteur de propulsion optimisé localement

4.4.2.3 Optimisation globale de vérification

Une nouvelle optimisation globale, avec ces composants, donne pour consommation 126ml pour un cycle de 11 km soit 1.12l/100km. La différence entre le modèle en grandeurs réduites et le modèle en grandeurs réelles, optimisé localement, n'est donc que de 15%. Nous pouvons conclure que le modèle générique en grandeurs réduites permet d'avoir une bonne idée de la consommation générale du système, sans avoir à réaliser un choix technologique. La figure 4.17 présente la nouvelle répartition des puissances, après l'optimisation locale. Les résultats sont très proches des précédents.

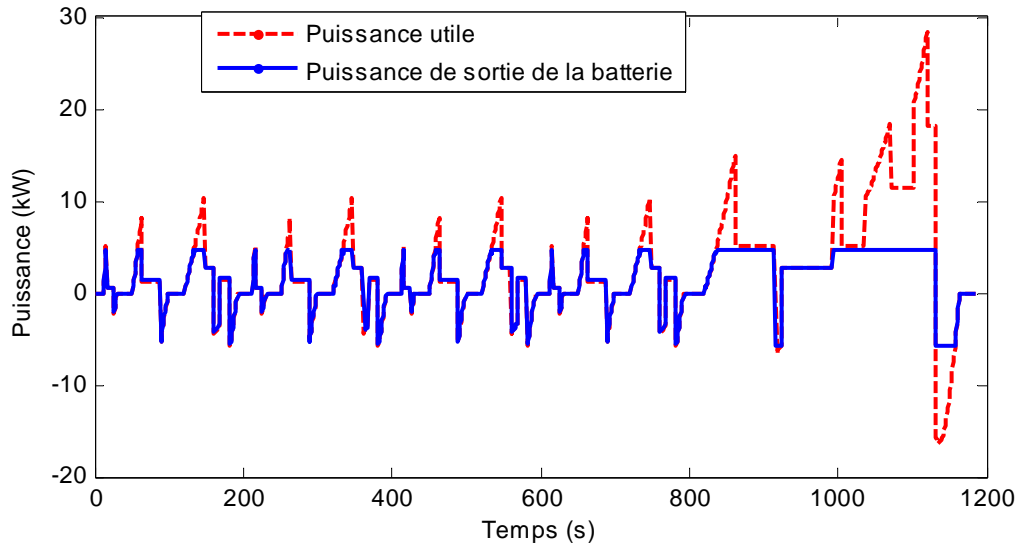


Figure 4. 17 : résultats de l’optimisation dynamique sur une voiture hybride série optimisée localement

La figure 4.18 présente la variation de la puissance consommée (et donc indirectement de la consommation de carburant), entre les deux configurations.

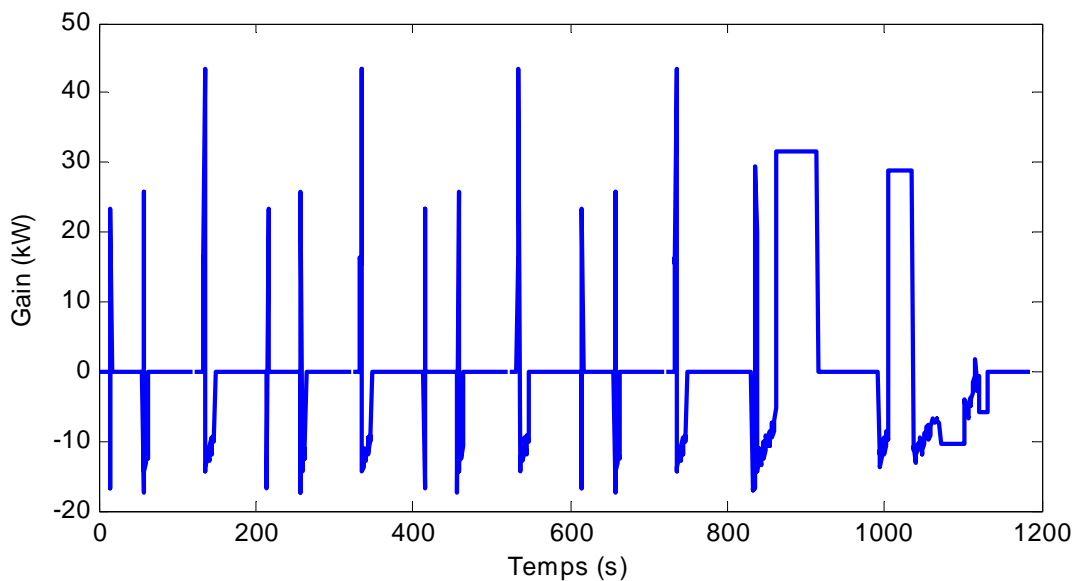


Figure 4. 18 : Gain de consommation de carburant entre l’optimisation globale en grandeurs réduites et l’optimisation globale optimisée localement

Le groupe électrogène élu a un fonctionnement moins bon sur certains points que le modèle normalisé, mais meilleur sur d’autres et surtout lorsque le véhicule roule à plus de 70km.h⁻¹.

4.5 Conclusion sur la méthode d'optimisation

Nous avons présenté dans ce chapitre une méthode d'optimisation originale s'appuyant sur une modélisation par les échanges de puissance. Cette méthode permet de repousser le choix de la technologie après le calcul d'une commande globale. Le fait de repousser ce choix permet de ne pas présumer de la solution optimale.

L'utilisation, sur l'exemple de la voiture hybride, de cette méthode d'optimisation, associée à l'utilisation de modèles statiques génériques, a permis de souligner certains points forts et limites. Nous profiterons du chapitre suivant pour utiliser cette méthode sur un système plus complexe, de manière à bien mettre en évidence son intérêt et ses faiblesses.

Chapitre 5

Dimensionnement d'un navire hybride

Dans ce dernier chapitre, nous allons appliquer, point par point, la méthodologie présentée au chapitre 4, au dimensionnement d'une propulsion navale de petite puissance sur un bateau de type voilier. Nous comparerons deux solutions : la première, hybride, et la seconde, conventionnelle (le moteur thermique entraînant directement l'hélice).

La figure 5.1 présente le plan du chapitre, superposé à l'organigramme de la méthodologie. .

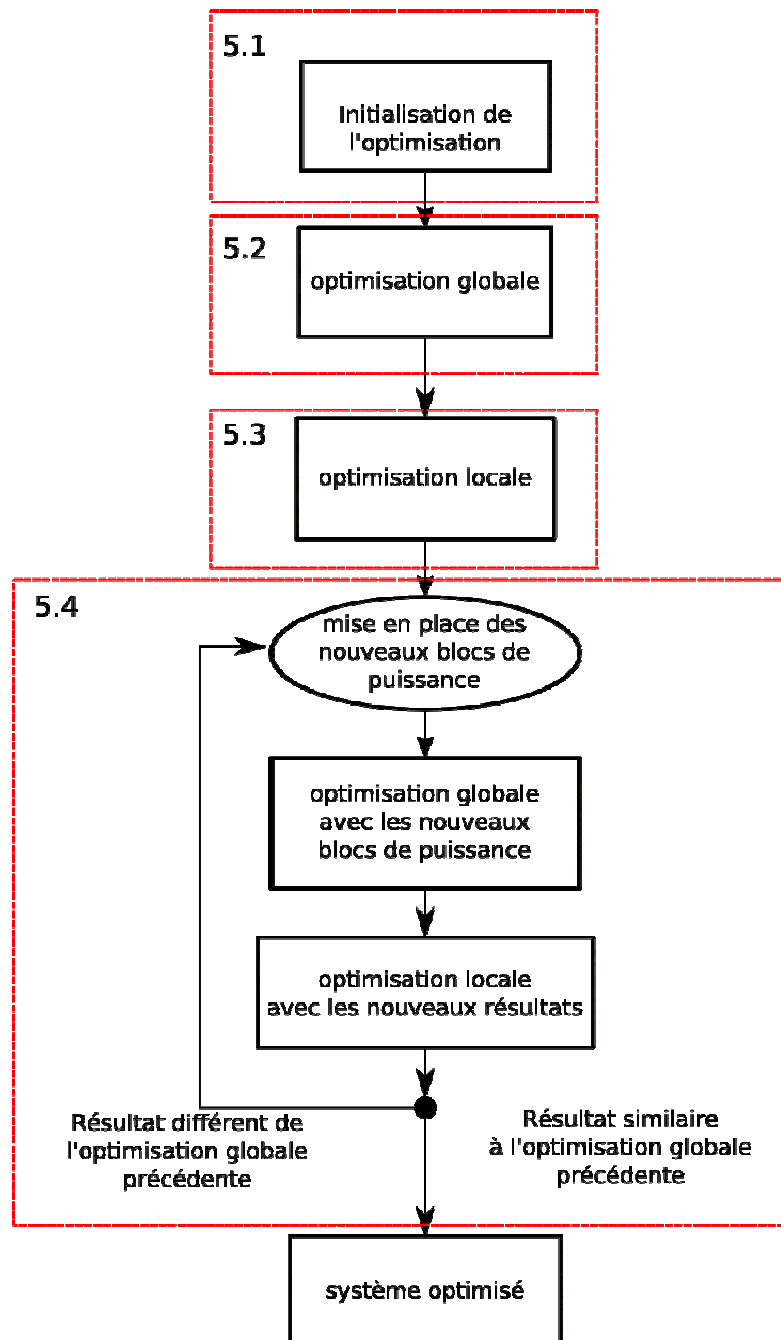


Figure 5. 1 : méthodologie d'optimisation simultanée du dimensionnement et de la commande

5.1 Cahier des charges

La première phase de la méthodologie consiste en l'écriture du cahier des charges du voilier. Nous pourrions envisager différents types de voiliers, mais il nous semble que le concept hybride prend tout son sens pour un voilier habitable, réellement destiné au voyage. Un tel bateau doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Une dimension suffisante pour l'habitabilité et la sécurité en haute mer. De toute manière, il n'est pas envisageable d'implanter une architecture hybride dans une petite unité, que ce soit pour des raisons de poids ou de coût. Nous avons retenu une longueur de 14m.
- Une grande autonomie énergétique. Pour un voilier conventionnel, cela signifie un grand réservoir de carburant, utilisé pour les déplacements et la production d'énergie électrique. Une petite éolienne ou des panneaux solaires permettent de réduire l'usage du moteur thermique. Pour un voilier hybride, la production d'énergie électrique peut être réalisée en navigation à la voile.
- Une construction robuste (aluminium) et dérive escamotable (voilier échouable).

De tels voiliers existent aujourd'hui sur le marché de la plaisance, mais avec une propulsion conventionnelle (non hybride). La société Alubat implantée en Vendée construit ainsi la gamme des voiliers OVNI. Au cours de cette thèse, nous avons eu le plaisir de rencontrer M. Vincelot Benoit, Ingénieur chez AluBat qui nous a accueillis et qui nous a fourni de nombreux renseignements sur ces voiliers. Certaines de ces informations vont être utilisées dans ce chapitre, notamment celles qui concernent le voilier OVNI445.

5.1.1 Principales caractéristiques du voilier

Le cahier des charges d'un voilier hybride doit définir :

- L'architecture de la chaîne de propulsion.
- Les principales dimensions du voilier et surtout S_N , la projection de la surface d'avance du voilier (cf. paragraphe 2.2.5).
- La puissance que peuvent fournir les voiles, celle-ci peut être déduite des polaires de vitesse d'un bateau existant.
- Les vitesses de croisière et maximale au moteur.

Chapitre 5

- Eventuellement, l'autonomie désirée en propulsion électrique pure (sur batterie). Cela permet de naviguer en silence et sans polluer (ni l'air, ni l'eau), en l'absence de vent.
- L'autonomie apportée par le groupe électrogène ne sera pas considérée ici. Elle permet simplement de déterminer le volume du réservoir de carburant (qui peut atteindre 500 l sur ce type de voiliers) ;
- la puissance de bord utilisée pour faire fonctionner les équipements autres que la propulsion (désalinisateur, pilote automatique, équipements de navigation, éclairage, éléments de confort, électroménager et notamment le réfrigérateur...). Pour simplifier, nous supposons que cette puissance absorbée est constante. En réalité, elle varie en fonction de l'utilisation des différents appareils. Nous avons retenu une valeur de 1 kW, qui correspond à une situation défavorable.

Le tableau 5.1 récapitule les données les plus importantes pour le dimensionnement de la propulsion. Pour choisir ces valeurs, nous nous sommes inspirés des caractéristiques des voiliers existants et notamment de l'OVNI 445 construit par Alubat.

Description	Symbole et valeur
Longueur du voilier	$L_N = 14 \text{ m}$
Surface frontale de la partie immergée	$S_N = 3 \text{ m}^2$
Consommation des équipements de bord	$P^{bord} = 1 \text{ kW}$
Polaire de vitesse des voiles	Figure 2.9
Vitesse maximale du voilier en propulsion par l'hélice	$V_{Nmax} = 7 \text{ kn} (3.6 \text{ m/s})$
Vitesse maximale du voilier sur batterie	$V_{Nbat} = 3 \text{ kn} (1.54 \text{ m/s})$
Autonomie (distance) minimale sur batterie à V_{Nbat}	$D_{Nbat} = 3 \text{ Nq}(5.5 \text{ km})$

Tableau 5.1 : principales caractéristiques du voilier

Selon l'équation 3.7 et en considérant un rendement global moteur électrique-hélice de 50%, nous avons besoin d'une puissance électrique de 11 kW environ pour déplacer le navire à $V_{Nbat} = 3 \text{ kn}$. Si on veut parcourir $D_{Nbat} = 3 \text{ Nq}$ à cette vitesse, il faut une batterie de 20 kWh (que l'on décharge de 95% à 40%). Nous évaluerons l'influence de la batterie sur la consommation du voilier hybride.

5.1.2 Cycles de vent

Les trois cycles que nous avons envisagés se déroulent sur 8h, avec une distance à parcourir de 33 Nq (mille marin, soit 61 km). Seule la vitesse du vent est imposée sur ces cycles. Le premier cycle est sans vent, le second a un vent variable et le troisième, un vent constant. La consommation du premier cycle sera nécessairement importante, une telle utilisation pour un voilier n'est pas courante. Les voiles étant connues a priori, nous supposons que la puissance du vent dans les voiles est imposée, comme l'indique la figure 5.2.

Cette approche est assez simpliste, car elle considère que la puissance P_V est toujours au maximum de ce que le vent peut apporter en fonction de la polaire de vent de la figure 2.9.

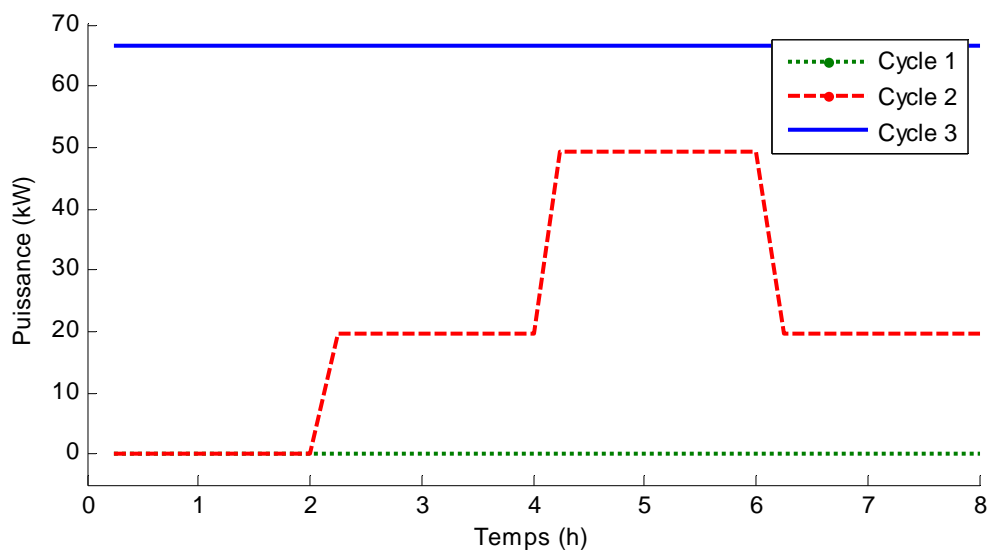


Figure 5. 2 : puissance de voile P^V pour chacun de cycles

5.1.3 Architectures étudiées

Afin d'évaluer l'intérêt d'une propulsion hybride pour notre voilier, nous allons comparer ses performances avec celles d'une solution traditionnelle.

5.1.3.1 Propulsion hybride série

La propulsion hybride série d'un voilier a été présentée au cours des chapitres précédents. La figure 5.3 rappelle le schéma de modélisation par les flux d'énergie d'une telle propulsion. Nous avons ajouté un bloc récepteur d'énergie (« Bord ») pour représenter les consommateurs de bord qui absorbent une puissance P^{bord} constante.

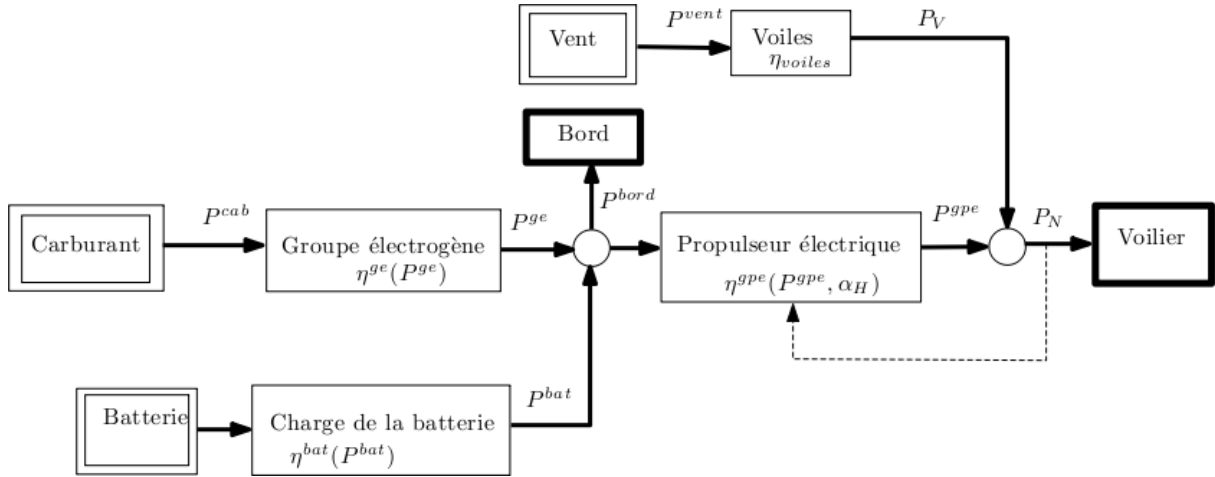


Figure 5.3 : modélisation par les flux d'énergie d'une propulsion hybride navale.

Lors de la modélisation de la batterie au paragraphe 3.2.1.1, nous avons obtenu un modèle en grandeurs réduites $\eta^{bat}(P^{bat})$ qui ne dépend pas de l'état de charge $x_{EdC}(t)$. Par contre, pour le groupe propulseur, il y a effectivement une variation induite par la vitesse du bateau, même si la courbe de rendement est de la forme $\eta^{gpe}(P^{gpe}, \alpha_H)$. Les relations de puissance entre les différents blocs sont :

$$P_N = P_H + P_V = P^{gpe} + P_V \quad (5.1)$$

$$\begin{cases} \frac{P^{gpe}}{\eta^{gpe}(P^{gpe}, \alpha_H)} = P^{ge} + P^{bat} - P^{bord} & \text{pour } 0 < \alpha_H \leq 1 \\ P^{gpe} \eta^{gpe}(P^{gpe}, \alpha_H) = P^{ge} + P^{bat} - P^{bord} & \text{pour } \alpha_H < 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

5.1.3.2 Propulsion traditionnelle

La propulsion classique d'un bateau est composée d'un moteur thermique entrainant directement l'hélice, ainsi que d'une génératrice électrique pour alimenter un réseau de bord qui comprend des batteries. Nous considérerons que ces batteries ont une capacité de 4 kWh, ce qui correspond à ce que l'on trouve sur les voiliers de ce type.

Pour cette étude, nous avons fait les hypothèses suivantes.

- La gestion de l'énergie par la génératrice est également optimisée par la programmation dynamique : il n'est pas question de produire constamment de l'énergie, mais de gérer l'état de charge des batteries, pour optimiser la consommation globale d'énergie. N'ayant pas de modèle réel de génératrice électrique de faible puissance, et au vu des

puissances transitant (1 kW soit 8 kWh maximum consommés par le réseau de bord sur le cycle) son rendement ne sera pas optimisé (nous le supposons fixe est égale à 80%). Le moteur thermique peut recharger les batteries indépendamment de la propulsion, si sa puissance minimale d'utilisation le permet.

- L'accouplement des modèles du moteur thermique et de l'hélice (identique à celle de l'architecture hybride) est réalisé de la même façon que pour le groupe propulseur électrique, en supposant donc que le moteur thermique est toujours au rendement maximum, pour la puissance fournie. Ce choix est plus critiquable que dans le cas hybride, car le point de fonctionnement (couple-vitesse) dépend également des caractéristiques de l'hélice. La première optimisation globale sera donc basée sur une estimation optimiste du rendement du moteur thermique. Par contre, après optimisation locale et sélection des organes réels, nous utiliserons la cartographie du moteur retenu.
- Pour s'approcher de la réalité du pilotage d'un voilier, la motorisation ne sera pas utilisée en même temps que les voiles, sauf pour alimenter le réseau électrique ou recharger les batteries. Lorsque le navire avance au moteur, l'hélice fournit donc 100% de la propulsion, ce qui correspond à $\alpha_H=1$, sur les courbes de rendement en propulsion.

La figure 5.4 présente le modèle par les flux d'énergie de cette propulsion.

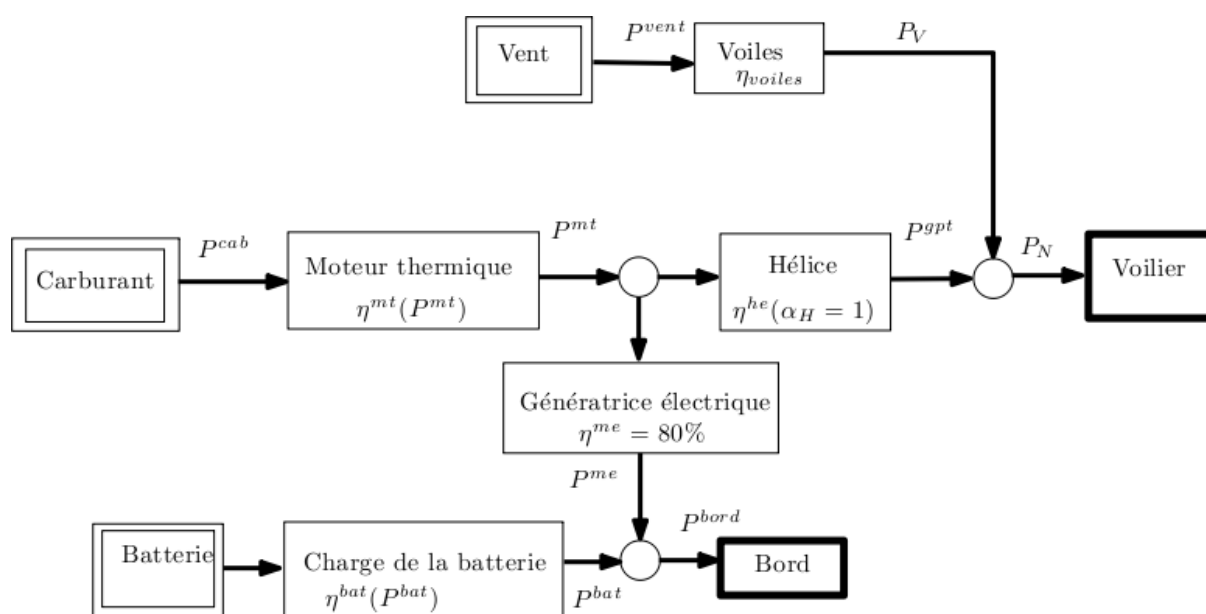


Figure 5.4 : modélisation par les flux d'énergie d'une propulsion traditionnelle.

La modélisation par les flux d'énergie du groupe propulseur thermique est réalisée par la méthode présentée au paragraphe 3.2.2.2. Les rendements sont ceux qui ont été définis au

chapitre 3, pour le moteur thermique (figure 3.7), l'hélice (figure 3.11, avec $\alpha_H=1$) et la batterie (figure 3.4).

Les relations de puissance entre les différents blocs sont :

$$P_N = P_H + P_V = P^{spt} + P_V \quad (5.3)$$

$$\frac{P^{he}}{\eta^{he}} = P^{mt} + \frac{P^{bat} - P^{bord}}{\eta^{me}} \quad (5.4)$$

5.2 Optimisation globale en grandeurs réduites

De même que pour le dimensionnement de la voiture hybride présentée au chapitre 4, celui d'un voilier s'effectue en se référant à un cycle d'utilisation. Par contre, les cycles mis en place sont moins contraignants, dans la mesure où la vitesse instantanée du navire V_N n'est pas imposée par le cycle. Le problème d'optimisation est donc plus complexe que dans le cas de la voiture hybride, car il nécessite la prise en compte d'un degré de liberté supplémentaire.

Rappelons que la résolution du problème d'optimisation globale :

- est effectuée avec les outils de la programmation dynamique (*cf.* paragraphe 4.3.2),
- est ramenée à un problème de commande globale, interprété en termes de dimensionnement (recherche du point de fonctionnement optimal de l'ensemble).

5.2.1 Formulation du problème d'optimisation

Nous nous plaçons dans le cadre d'une optimisation monocritère : seule la consommation de carburant est à optimiser :

$$J(u) = \min_{u(0), \dots, u(N-1)} \sum_{t=0}^{N-1} \frac{P^{ge}(t)}{\eta^{ge}(P^{ge}(t))} T_e, \quad (5.5)$$

où t est une variable de temps discrétisée, de pas d'échantillonnage T_e , considérant N pas. Nous allons maintenant distinguer le cas de la propulsion hybride et celui de la propulsion conventionnelle.

5.2.1.1 Propulsion hybride série

Pour la propulsion hybride série, nous avons deux degrés de liberté :

- le premier correspond à la répartition de puissance entre le groupe électrogène P^{ge} et la batterie P^{bat} .
- le second correspond à la vitesse d'avance du bateau V_N , toujours positive ou nulle.

Ces deux degrés de liberté sont liés à deux variables d'état :

- l'état de charge de la batterie $x_{EdC}(t)$ qui évolue selon les lois suivantes :

$$X_{EdC}(t+1) = \begin{cases} X_{EdC}(t) + P^{bat}(t)\eta^{bat}(P^{bat}(t)) & \text{en charge} \\ X_{EdC}(t) + \frac{P^{bat}(t)}{\eta^{bat}(P^{bat}(t))} & \text{en décharge} \end{cases} \quad (5.6)$$

- la position du bateau $x_V(t)$ qui se déduit de sa vitesse par intégration :

$$x_N(t+1) = x_N(t) + V_N(t) \cdot T_e \quad (5.7)$$

Pour des raisons de commodité, les variables de décision choisies sont P^{bat} et V_N . Les contraintes imposées sur la batterie sont :

- un état de charge compris entre 40% et 95% ;
- une variation maximale de 1C (cf. paragraphe 3.2.1.1).

5.2.1.2 Propulsion conventionnelle

Dans ce cas, nous avons également deux degrés de liberté et les mêmes variables d'état : l'état de charge de la batterie x_{EdC} et la position du bateau x_N . Nous utiliserons donc les mêmes variables de décision : P^{bat} et V_N . Nous conserverons également les contraintes de fonctionnement de la batterie.

5.2.2 Discrétisation du temps et des variables d'état

La modélisation par les flux d'énergie a pour objectif de simplifier la prise de décision durant l'optimisation de la commande. Couplée à des modèles simples de chaque organe, nous devrions avoir des temps de calcul de cycle très rapides. Cette rapidité dépend bien sûr de la méthode d'optimisation utilisée. Nous avons choisi une méthode garantissant un optimum global, au prix d'un nombre important d'évaluations du critère. Cette méthode implique la discrétisation de notre espace de prise de décisions. Nous avons trois variables à discrétiser : les deux variables d'état présentées précédemment et le temps. Le choix du pas de discrétisation est fondamental dans un tel problème :

- trop petit, il y aura des calculs et un encombrement mémoire superflus ;
- trop grand et la réponse sera biaisée.

Nous avons dû trancher pour que le nombre de sommets et de liens entre ces sommets ne deviennent pas trop grand. La durée du cycle étant de 8h et la dynamique d'un voilier de croisière étant assez lente, nous avons proposé un pas de temps $Te = 15\text{min}$.

La discrétisation de la position est plus complexe. La vitesse varie de 0 à 7 kn (3.6 m/s), il faut un pas assez faible pour avoir une bonne résolution de vitesse, mais pas trop pour ne pas avoir trop de calculs. Nous choisissons un pas $\Delta x_N = 0,0625$ Nq marin (120 m), ce qui donne une résolution sur la vitesse $\Delta V_N = \Delta x_N / Te = 0,25$ kn (0.13 m/s). Il ne faut pas oublier que nous avons pour objectif de piloter un voilier en mer : une précision plus importante est de toute façon peu réaliste.

La discrétisation de l'état de charge de la batterie est également délicate. Il faut pouvoir prendre en compte les faibles consommations, comme la consommation de l'électricité de bord. Nous avons choisi comme valeur de pas de charge $\Delta x_{EdC} = 125$ Wh, ce qui correspond à une puissance de 500W durant Te . Cette valeur est la moitié de la puissance de bord.

Le graphe de résultat a donc :

- 33 pas de temps ;
- 530 pas de trajet ;
- 89 pas de charge (les pas en dessous de 40% et au-delà de 95% ne sont pas pris en compte).

Soit 1 556 610 sommets. Cette valeur n'est pas remarquable, J. Scordia (Scordia 2004) en manipule jusqu'à près de 20 millions, et pour la résolution du dimensionnement de la voiture hybride, nous avons eu à manipuler le même ordre de grandeur de sommets. Par contre, notre

Chapitre 5

système a 2 variables de décision. Il faut donc sauvegarder plus d'informations, et surtout calculer plus de liens. Avec les limitations actuelles, un sommet a des liens vers :

- $7/0.25 = 28$ autres lieux accessibles ;
- de 40 à 80 autres états de charge atteignables, en fonction de la proximité d'une limite ou non.

C'est ce nombre important de liens qui différencie notre étude des études réalisées sur un véhicule terrestre autour d'un cycle imposant la vitesse d'avance.

Le temps de calcul moyen du rendement d'un bloc est égal à $0.11\mu\text{s}$ ¹. Nous pouvons comparer avec le temps moyen du calcul d'un point de cartographie² qui se situe à 4.6ms. Nous avons gagné un facteur 40000 en temps de calcul en passant d'une méthode à l'autre.

Ce gain direct n'est pas le seul. En effet nous nous affranchissons d'un certain nombre de choix en passant en modélisation par les flux d'énergie. Un exemple flagrant se situe au niveau du choix de points de fonctionnement du groupe électrogène. Un modèle classique effort/flux devrait calculer différents points de fonctionnement pour assurer se trouver au meilleur point de rendement lors de l'exécution. La modélisation par les flux d'énergie permet de limiter ce calcul à celui d'un seul point de fonctionnement, le choix du meilleur point de fonctionnement étant réalisé en amont de l'optimisation globale.

Il en résulte un temps de calcul de près de 7 min pour un cycle complet, soit pour chaque sommet un temps de calcul de 0.35 ms de moyenne. Le temps de calcul moyen d'un lien est de $1\mu\text{s}$. Ce temps de calcul est presque dix fois supérieur au temps de calcul d'un point de fonctionnement : le programme d'optimisation n'est pas uniquement composé de ce calcul.

Si nous avons mis en place une optimisation globale avec la même discrétisation et un modèle effort/flux, nous aurions eu un minimum de 20 jours de calcul, en considérant qu'il n'y a pas d'autres choix à effectuer. Ce temps de calcul aurait sans doute pu être diminué en optimisant le temps de calcul d'un point de fonctionnement, mais sans doute pas suffisamment pour avoir une durée de calcul raisonnable.

Dans le cas de la propulsion conventionnelle, nous avons également trois variables discrétisées, car la puissance de la batterie reste une variable de décision pour la gestion du groupe électrogène.

¹ Calcul effectué sur un Pentium D 3GHz avec 2Go de mémoire vive.

² Calcul effectué avec la fonction « interp2 » de MatLab.

5.2.3 Résultats de l'optimisation globale

Nous pouvons maintenant présenter les résultats de l'optimisation globale pour le voilier d'un voilier hybride et le voilier conventionnel.

5.2.3.1 Propulsion hybride série

Pour le voilier hybride série, la consommation de carburant est :

- de 126 l, pour le cycle sans vent (cycle 1) : la propulsion a constamment besoin du groupe électrogène ;
- de 7,4 l, pour le cycle vent variable (cycle 2) : le vent n'est pas suffisant pour faire avancer le voilier jusqu'à l'arrivée ;
- nulle, pour le cycle vent constant (cycle 3) : la présence des voiles suffit à la propulsion et à la consommation P^{bord} .

La figure 5.5 présente la vitesse du voilier, tandis que la figure 5.7 présente la gestion de l'état de charge de la batterie. Ce sont les meilleures commandes aux hypothèses près, avec la limitation de la discrétisation. Celle-ci est visible sur la courbe de vitesse du cycle 1 : la vitesse moyenne est de 4.13 kn pour parcourir les 33 milles en 8 h. La vitesse est déterminée avec une résolution de 0.25 kn, il est donc impossible d'avoir exactement la vitesse idéale. Ceci explique le léger changement de la vitesse sur le cycle 1, vers 5h30. La vitesse du cycle 2 est directement influencée par le vent. Le résultat du cycle 3 est plus surprenant. Ce comportement est dû à la contrainte de charge de la batterie en fin de cycle, combinée à la consommation de bord de 1 kW. Il faut donc recharger la batterie par des sauts de puce pour finir le cycle alors que la batterie retrouve son état de charge initial.

L'état de charge de la batterie varie de façon logique vis-à-vis de la vitesse (cf. figure 5.6) : le cycle 1 voit la batterie ne servir que ponctuellement, pour assurer la « pointe de vitesse » autour de 3h, et pour cela elle est rechargée en amont. Pour le cycle 2, la batterie est utilisée comme tampon pour soulager le groupe électrogène durant les phases de propulsion à l'hélice. Le cycle 3 voit même la batterie se recharger : nous sommes dans un cas idéal où le vent est suffisant pour assurer la propulsion et la consommation des systèmes de bord, le cas idéal pour un voilier hybride, même si la solution présentée est surprenante.

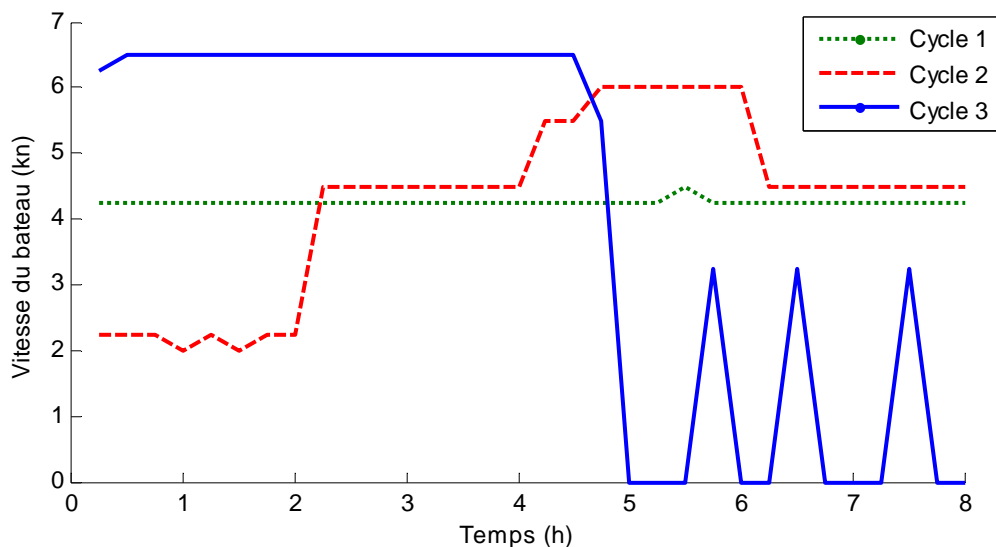


Figure 5.5 : vitesse optimisée d'un voilier hybride série

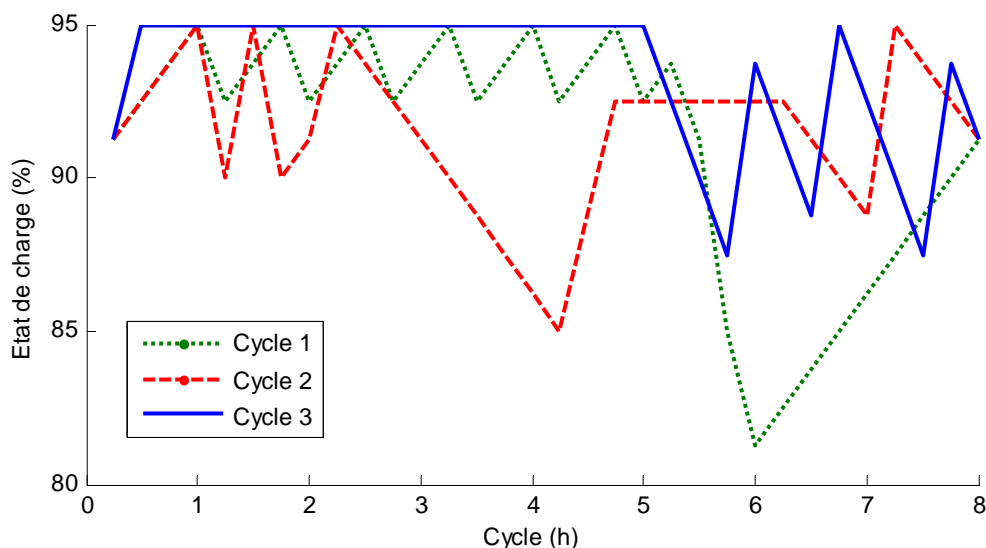


Figure 5.6 : État de charge optimisé d'un voilier hybride série

La figure 5.7 présente le rendement du groupe propulseur dans ces trois cas. Le rendement le plus important est celui du cycle 1, puisque nous sommes en propulsion intégrale sur l'hélice. Il est de 40%, ce qui est bon pour un groupe propulseur. Nous sommes dans le cas d'un système dont le groupe propulseur est bien dimensionné pour cette vitesse. Pour le cycle 2, on remarque les phases de propulsion, avec un rendement égal à 40% et des phases de régénération où le rendement chute à 25%, voire moins. Le rendement (en régénération) du cycle 3 est médiocre, mais ce n'est pas impactant car l'énergie est gratuite.

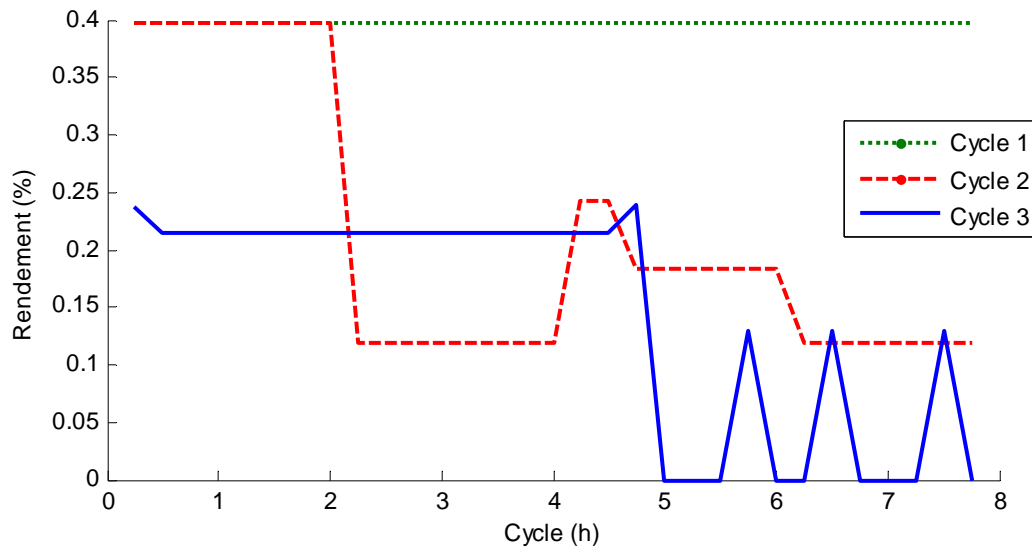


Figure 5.7 : rendement du groupe propulseur du voilier optimisé par la méthode d'optimisation globale

La figure 5.8 présente la courbe de rendement du groupe électrogène, pour les cycles 1 et 2. Le rendement au cours du cycle 2 est mauvais. Ce constat est à pondérer par le fait que les puissances en jeu n'étant pas les mêmes entre les deux cycles, le rendement du premier cycle a plus de poids.

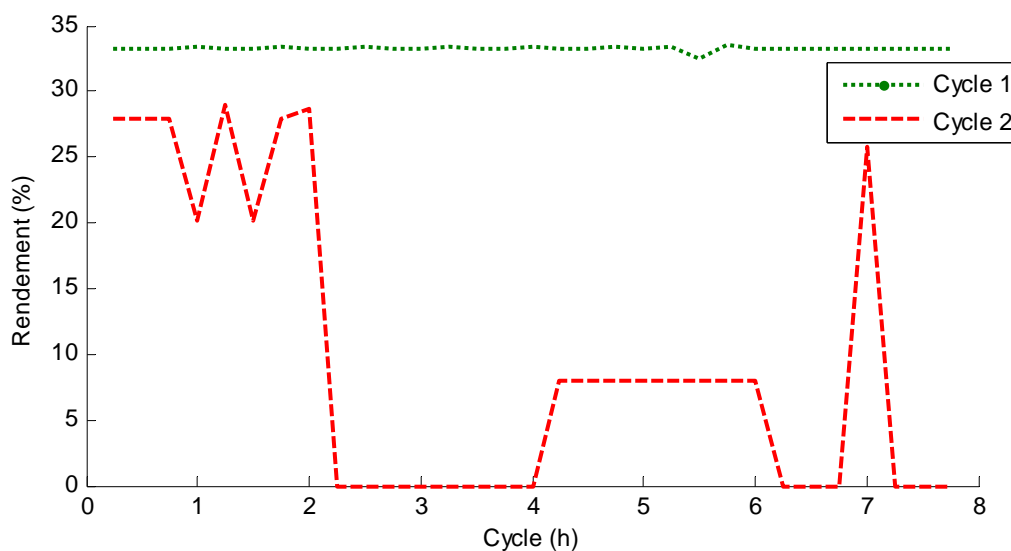


Figure 5.8 : rendement du groupe électrogène pour le cycle 1

Dans les résultats précédents, la batterie possédait une capacité de $Q^{bat} = 20$ kWh. Nous avons procédé à plusieurs optimisations, en faisant varier la valeur de Q^{bat} sur le cycle 2. La figure

5.9 montre qu'une diminution de Q^{bat} augmenterait sensiblement la consommation de carburant. Par contre, il n'est pas intéressant d'augmenter Q^{bat} .

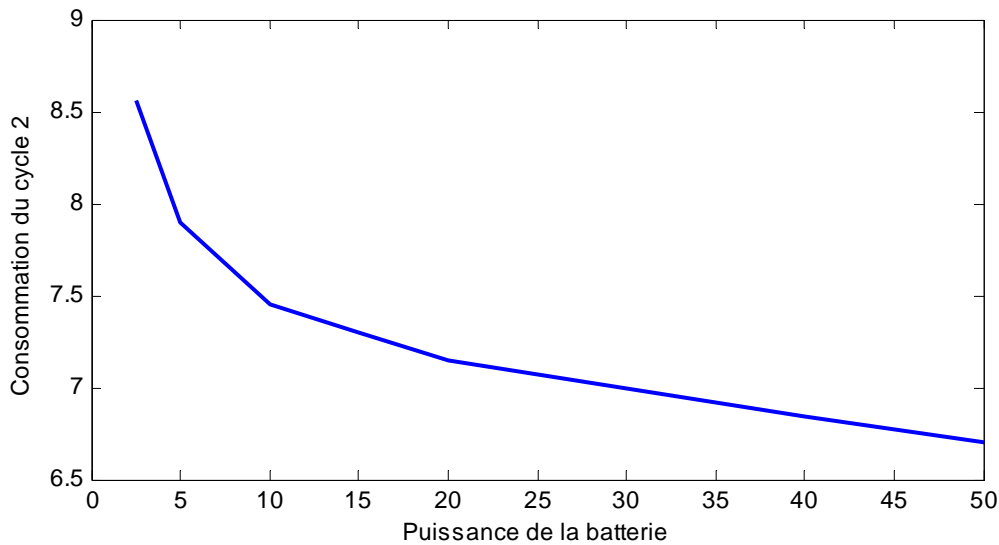


Figure 5. 9 : Consommation sur le cycle 2 en fonction de Q^{bat} la capacité de la batterie

5.2.3.2 Propulsion conventionnelle

Pour la propulsion conventionnelle, la consommation de carburant est :

- de 89 l sur le cycle 1, soit 40 % de moins que la propulsion hybride série. Ce résultat est logique, car la chaîne de propulsion, qui comporte moins d'organes en cascade, présente un meilleur rendement ;
- de 16 l sur le cycle 2. La consommation est deux fois supérieure à celle du voilier hybride sur ce cycle ;
- de 12 l sur le cycle 3, au lieu d'une consommation nulle en hybride.

Les figures 5.10 et 5.11 présentent la gestion optimale de la vitesse et de l'état de charge de la batterie, sur les trois cycles. Les évolutions de vitesse sont assez proches pour les deux types de motorisation. Le cycle 2 est un peu modifié car le moteur ne peut-être utilisé en complément de la voile. Contrairement au cycle 3 hybride, le bateau peut atteindre directement son objectif, la charge de la batterie étant réalisée par le moteur thermique. Pour le voilier classique, la gestion de la batterie est beaucoup moins importante, car elle ne fait que 4 kWh et ne sert qu'à alimenter le réseau de bord.

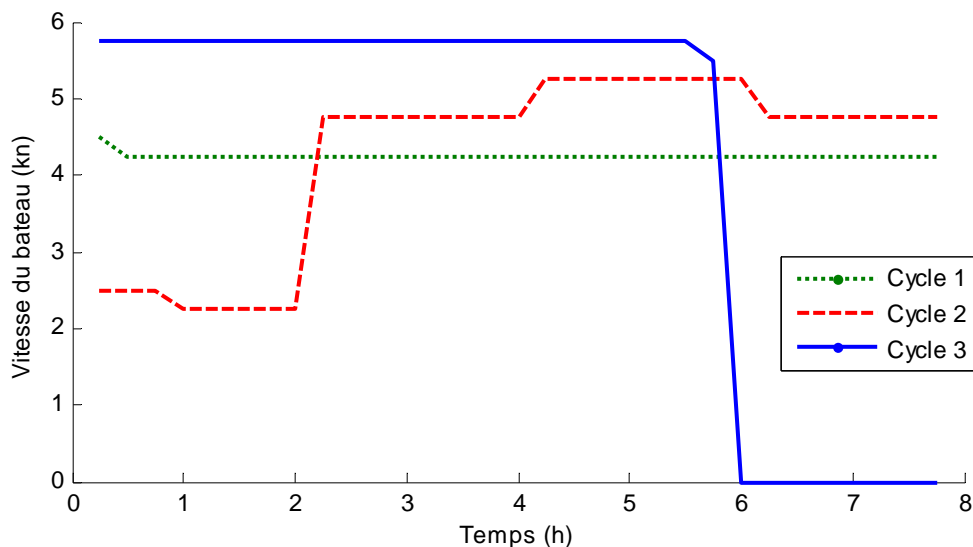


Figure 5.10: vitesse optimisée pour un voilier classique.

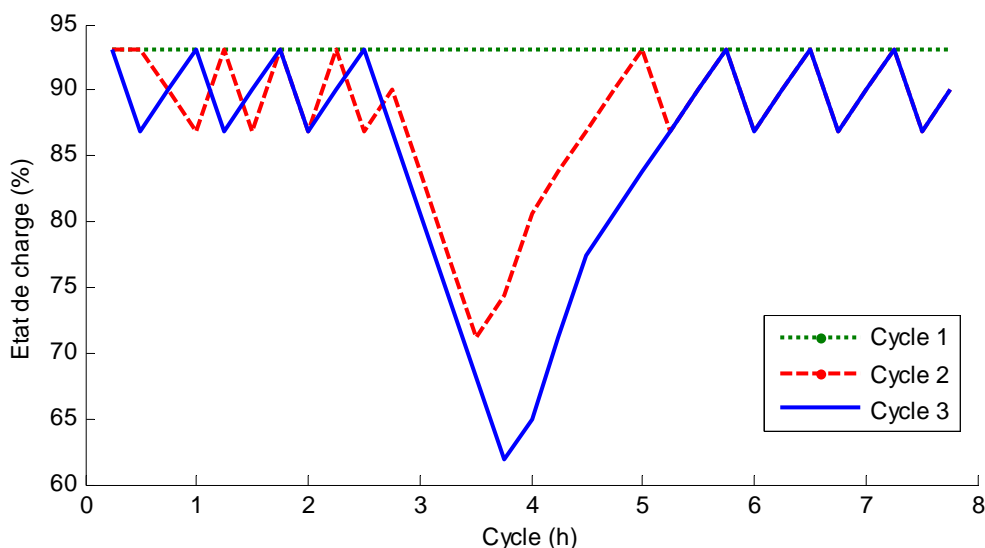


Figure 5.11 : État de charge optimisé pour un voilier classique.

5.2.4 Conclusions

L'optimisation globale nous permet d'avoir une idée de l'utilisation optimale d'un voilier hybride sur la base d'organes génériques. Elle a permis de déceler les points faibles de la propulsion hybride série vis-à-vis de la propulsion classique, notamment dans le cas sans vent (mais ce n'est pas le cas d'utilisation usuel d'un voilier). Par contre, la propulsion hybride est intéressante dans un cycle avec un vent variable, et surtout avec un vent suffisant pour propulser le voilier. Ces résultats sont évidemment dépendants des cycles considérés. Les cycles retenus ici sont assez exigeants vis-à-vis de la distance à parcourir.

A partir des résultats de l'optimisation globale il va maintenant être possible de choisir des composants réels sans a priori. Ce choix est effectué durant l'optimisation locale.

5.3 Optimisations locales et sélection d'organes réels

L'optimisation locale est décrite au chapitre 4. L'équation 4.4 présente la puissance à minimiser. La base de données du logiciel PSAT est utilisée pour sélectionner les moteurs électriques et thermiques (voir annexes 4 et 5). Nous allons réaliser l'optimisation sur l'ensemble des trois cycles. Le problème de cette concaténation est qu'elle va favoriser l'optimisation sur le cycle le plus exigeant pour la propulsion : le cycle sans vent. Une pondération entre les trois cycles pourrait éventuellement être utilisée pour favoriser les autres cycles.

5.3.1 Optimisation du groupe propulseur (hybride série)

La figure 5.12 présente l'histogramme des durées d'utilisation du groupe propulseur en fonction de la puissance P_H . Cet histogramme est la somme des durées obtenues avec l'optimisation de chaque cycle. Il aurait fallu tracer ce graphique en trois dimensions pour prendre en compte la liaison entre α_H et P_H , mais pour la clarté ; seule P_H est représentée.

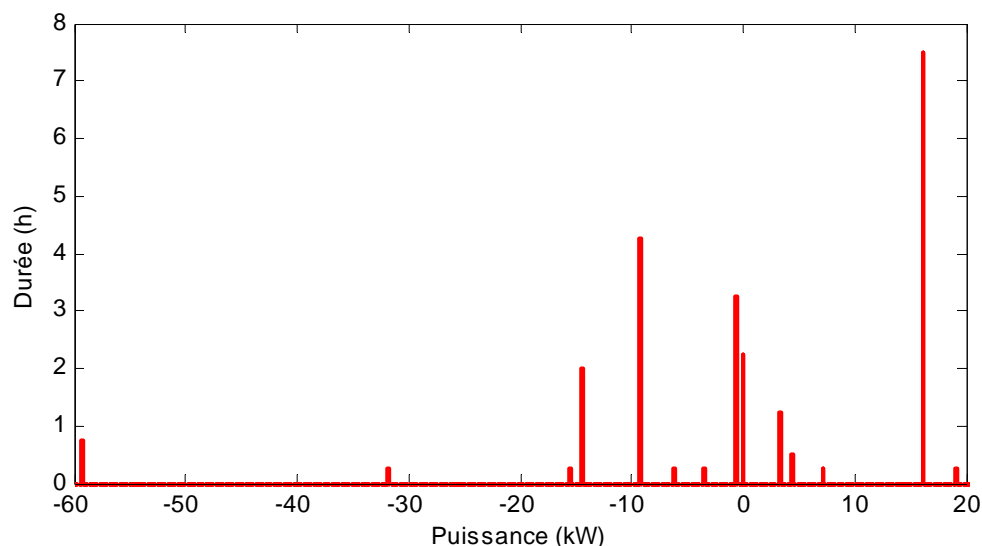


Figure 5. 12 : Durée de fonctionnement en fonction de la puissance de sortie de la propulsion électrique

Chapitre 5

Le point de fonctionnement préférentiel sur cette courbe, à savoir 16 kW, correspond à la propulsion à 4.25 kn du cycle 1. La régénération la plus fréquente absorbe 9 kW au cours du cycle 2 (vent variable). Le point à -60 kW correspondant aux trois impulsions de vitesse en fin de cycle 3 (avec un rendement de 10 %). Notre objectif est de minimiser la puissance d'entrée du groupe propulseur, la puissance de sortie étant imposée par le cycle.

Nous avons appliqué la méthode d'optimisation locale présentée au chapitre 4 et obtenu différentes consommations, en fonction des organes retenus : un moteur électrique, une hélice et un réducteur. Lors de l'optimisation globale, l'énergie consommée par le groupe propulseur électrique modélisé en grandeurs réduites était de 288kWh. Voici les trois meilleurs résultats fournis par l'optimisation locale :

- 270kWh, soit 6.6 % d'amélioration, avec
 - un moteur électrique de 66kW (moteur 3),
 - une hélice de rayon $R_H = 0.5m$ et de rapport P/D=1,
 - un rapport de réduction $\alpha_R = 15$.
- 272kWh, soit 6 % d'amélioration, avec
 - un moteur électrique de 66kW (moteur 3),
 - une hélice de rayon $R_H = 0.5m$ et de rapport P/D=1,
 - un rapport de réduction $\alpha_R = 17.5$.
- 277kWh, soit 4 % d'amélioration, avec
 - un moteur électrique de 49kW (moteur 18)
 - une hélice de rayon $R_H = 0.5m$ et de rapport P/D=1,
 - un rapport de réduction $\alpha_R = 20$.

L'optimisation locale permet donc d'améliorer légèrement l'efficacité du groupe propulseur. Le meilleur compromis est certainement la troisième configuration qui utilise un moteur sensiblement moins puissant, pour une consommation presque inchangée.

On peut noter que l'on trouve un diamètre exagéré d'hélice. Ceci est certainement dû à notre modèle de calcul de la résistance à l'avancement du bateau qui est trop élémentaire et qui majore la puissance de propulsion. Si l'on impose un rayon d'hélice plus raisonnable : $R_H = 0.25m$, on dégrade sensiblement son rendement et on obtient une consommation plus forte : 557kWh, avec un moteur de 105kW (moteur 20).

Les figures 5.13 et 5.14 présentent le rendement de la première configuration en propulsion et en régénération.

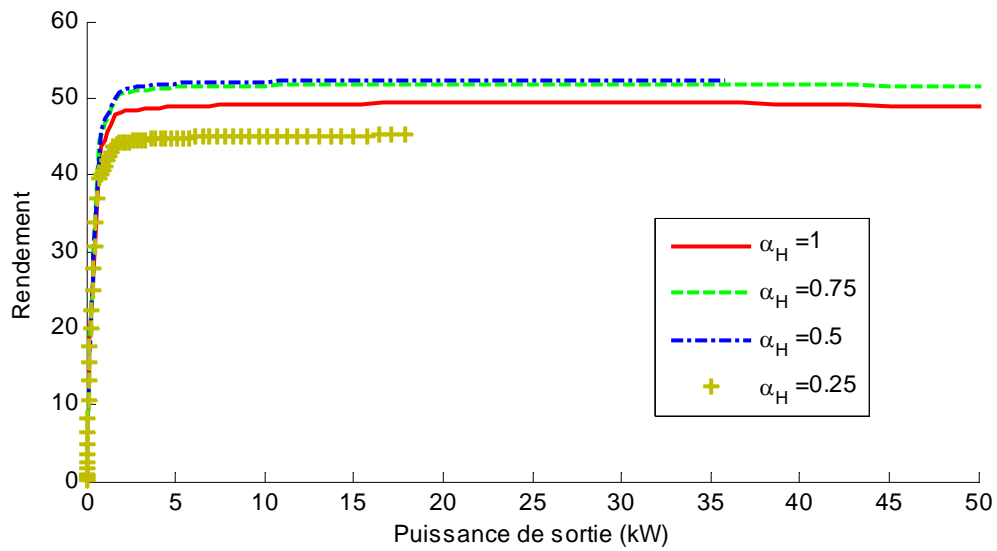


Figure 5. 13 : rendement du groupe propulseur électrique optimisé en propulsion

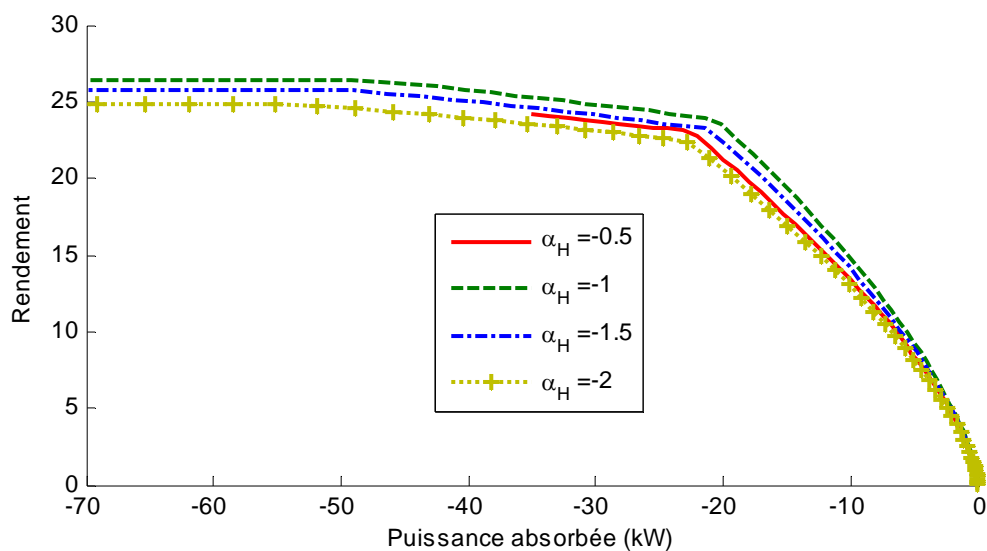


Figure 5. 14: rendement du groupe propulseur électrique optimisé en régénération

5.3.2 Optimisation du groupe électrogène (hybride série)

Pour le groupe électrogène, l'histogramme des durées en fonction de la puissance de sortie est présenté par la figure 5.15.

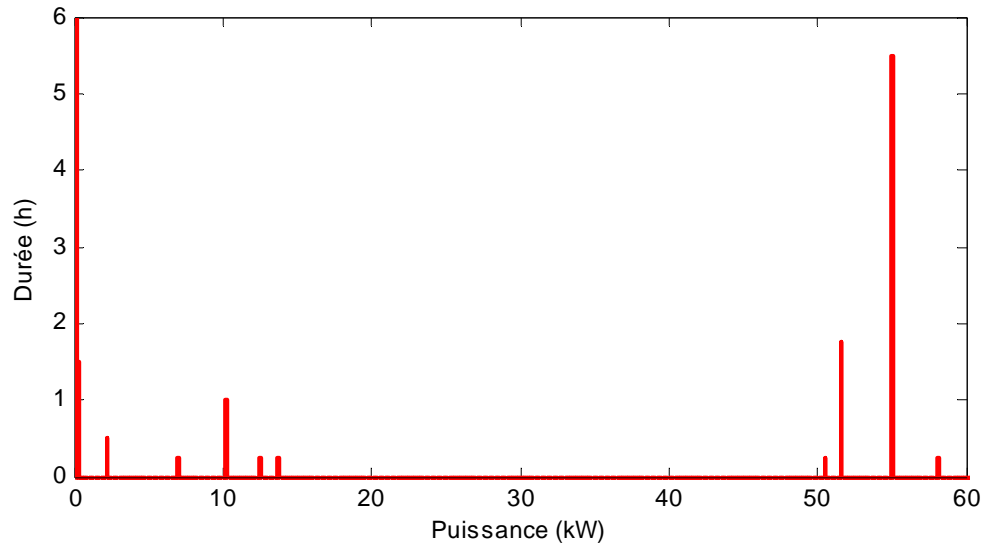


Figure 5. 15: Durée de fonctionnement en fonction de la puissance de sortie du bloc groupe électrogène.

Le groupe électrogène reste majoritairement arrêté. Les puissances autour de 55 kW correspondent au cycle sans vent, celles proches de 10 kW, aux quelques instants de propulsion à l'hélice durant le cycle 2.

Pour le groupe électrogène, la consommation estimée par l'optimisation globale était de 1.33MWh. Les trois meilleures configurations fournies par l'optimisation locale sont :

- 1.12 MWh, soit 17 % d'amélioration, pour un moteur thermique de 75kW (moteur 3) et une génératrice de 100kW (moteur 19) ;
- 1.12 MWh, soit 17 % d'amélioration, pour un moteur thermique de 75kW (moteur 4) et une génératrice de 100kW (moteur 19) ;
- 1.16 MWh, soit 15 % d'amélioration, pour un moteur thermique de 75 kW (moteur 4) et une génératrice de 58kW (moteur 21).

Cette fois encore, la troisième solution est sans doute la plus intéressante économiquement. La figure 5.16 présente le rendement de ce groupe.

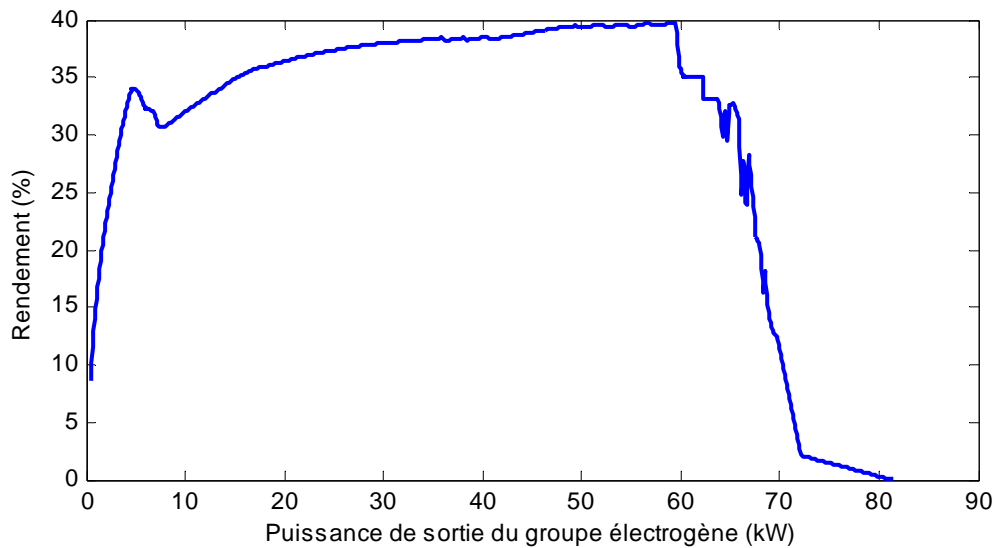


Figure 5.16 : rendement du groupe électrogène optimisé

5.3.3 Propulsion conventionnelle

La même méthode d'optimisation locale est utilisée sur les résultats de l'optimisation globale d'une propulsion thermique. Les résultats de l'optimisation globale du groupe propulseur thermique sont présentés figure 5.17.

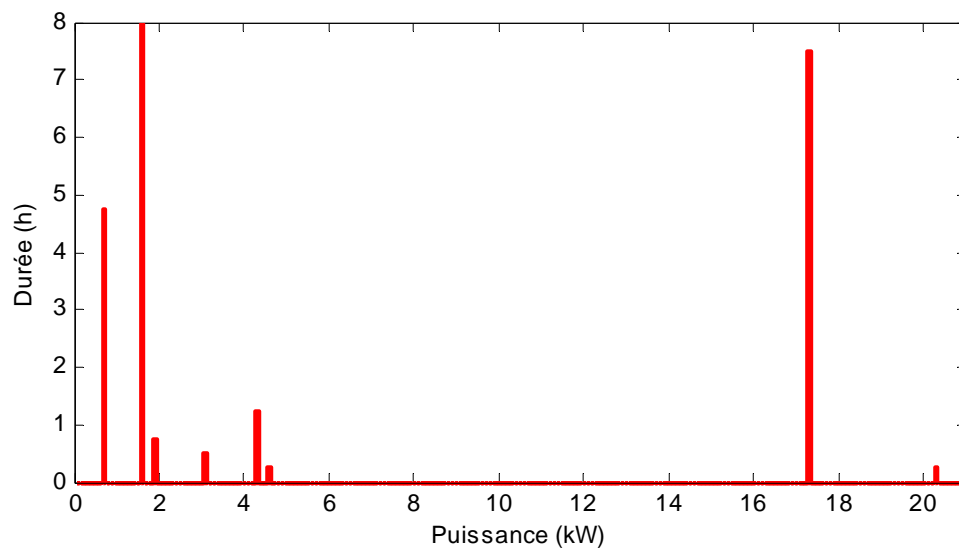


Figure 5.17 : Durée de fonctionnement en fonction de la puissance de sortie du groupe de propulsion thermique

Le groupe propulseur est principalement utilisé à une puissance de sortie de 17kW (vitesse d'avance 4.3 kn). Le groupe propulseur devra donc avoir un rendement optimal à cette

puissance. L'optimisation globale a évalué la consommation du moteur de propulsion à 1.17MWh. Nous avons retenu les deux meilleurs résultats d'optimisation pour les comparer :

- 876 kWh, soit 33 % d'amélioration, avec
 - un moteur électrique de 81kW (moteur 9),
 - une hélice de rayon $R_H = 0.5m$, et de rapport P/D=1,
 - un rapport de réduction $\alpha_R = 7.5$.
- 933 kWh, soit 25 % d'amélioration, avec
 - un moteur électrique de 75kW (moteur 3),
 - une hélice de rayon $R_H = 0.5m$ et de rapport P/D=1,
 - un rapport de réduction $\alpha_R = 10$.

Les gains en efficacité sont relativement importants, mais cela est essentiellement dû à l'utilisation du hélice très grande. Nous pouvons choisir la seconde configuration car la consommation est proche, mais la motorisation est un peu moins puissante, donc moins chère. La courbe de rendement de ce groupe propulseur est présenté en figure 5.18.

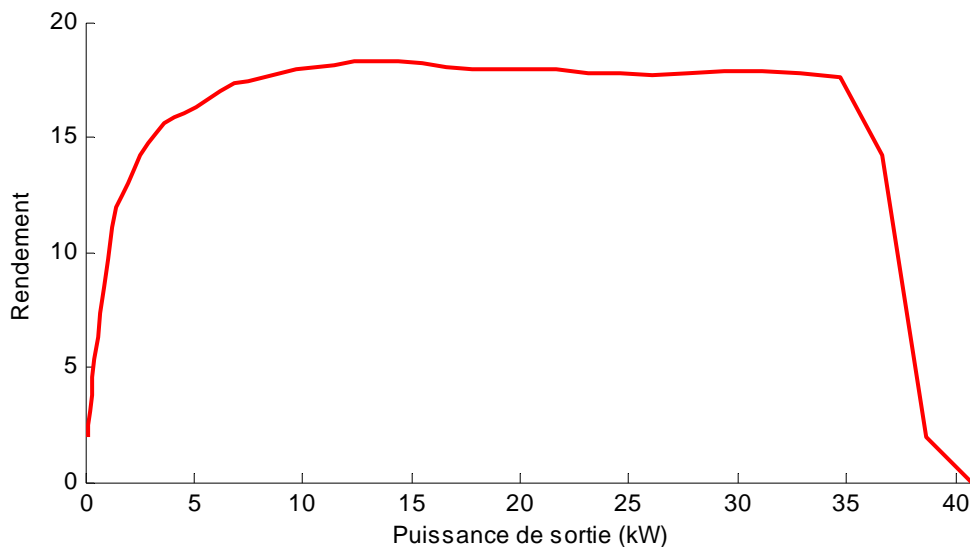


Figure 5.18 : rendement du groupe propulseur thermique optimisé

Le rendement de l'ensemble ne dépasse pas les 18%, et la valeur maximale de la courbe est décalée vers les puissances plus élevées par rapport à la courbe en grandeurs réduites.

5.4 Seconde optimisation globale et validation des choix

Nous arrivons maintenant à la dernière étape de la méthodologie. Nous disposons maintenant d'une configuration matérielle optimisée. Nous allons ré-appliquer l'optimisation globale avec cette configuration particulière et non les modèles génériques, afin d'obtenir de nouvelles répartitions de puissance et un nouvel histogramme temps-puissance pour chaque bloc. Il ne restera plus qu'à vérifier que l'optimisation locale nous sélectionne les mêmes organes que précédemment.

5.4.1 Propulsion hybride

La seconde optimisation globale, appliquée aux configurations retenues en section 5.3.1 et 5.3.2, aboutit à une consommation :

- de 87 l pour le cycle 1, soit 32 % d'amélioration ;
- de 5.6 l pour le cycle 2 soit 10 % d'amélioration ;
- toujours nulle, pour le cycle 3.

Le choix des organes du groupe électrogène, mais aussi du groupe propulseur, permet une amélioration importante de la consommation de carburant sur le cycle 1. Le résultat est légèrement supérieur à l'amélioration seule du groupe électrogène, ce qui indique que les organes sont meilleurs, et que la commande est adaptée à ceux-ci. L'optimisation est moins importante pour le cycle 2, ce qui sous-entend une optimisation moins poussée pour ce cycle. Ceci est logique, car la méthode d'optimisation tend à minimiser la consommation du cycle le plus consommateur.

Les figures 5.19 et 5.20 présentent la vitesse et l'état de charge de la batterie sur ce cycle optimisé. Les courbes de vitesse sont très proches de celle de la première optimisation globale. Les courbes d'état de charge sont plus délicates à interpréter. La décharge de la batterie sur le cycle 1 est plus importante, mais c'est un choix de placement du point de fonctionnement du groupe électrogène. Pour le cycle 2, la batterie est utilisée, puis rechargée en partie à la voile. Pour le cycle 3, il n'y a pas de différence.

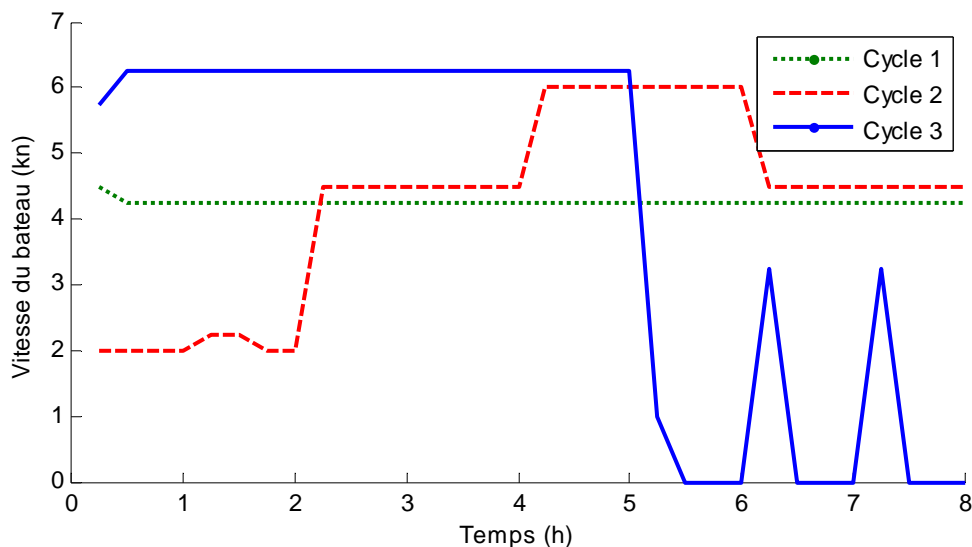


Figure 5.19 : vitesse optimisée par programmation dynamique sur le voilier hybride série optimisé localement

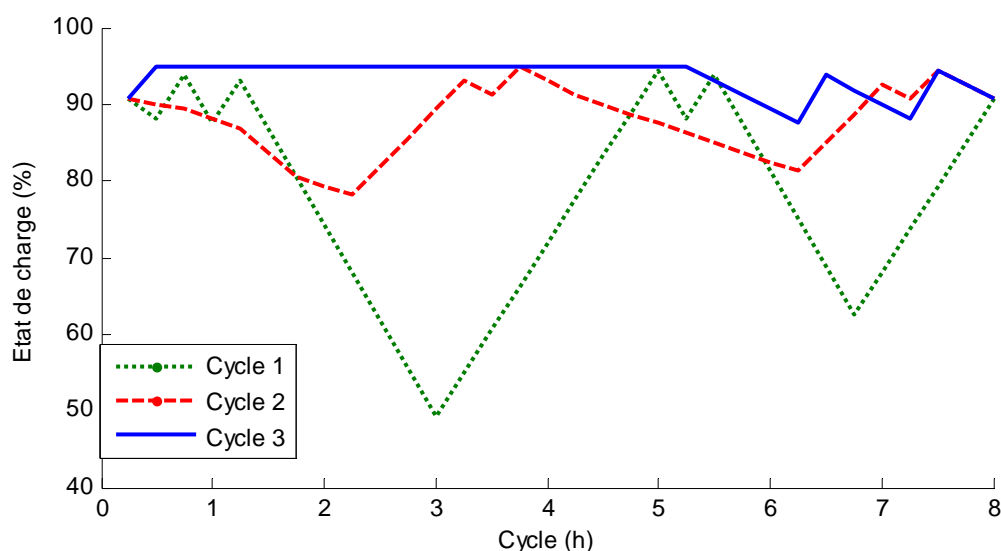


Figure 5.20 : état de charge optimisé par programmation dynamique sur le voilier hybride série optimisé localement

Il ne reste plus qu'à refaire une optimisation locale basée sur les histogrammes durée-puissance déduits de la seconde optimisation globale. En fait, cette nouvelle optimisation locale pointe sur les mêmes organes de puissance que précédemment, ce sont donc définitivement les meilleurs organes de puissance pour répondre à ces trois cycles.

5.4.2 Propulsion conventionnelle

Pour la propulsion classique, la seconde optimisation globale, appliquée à la configuration retenue en section 5.3.3, aboutit à une consommation :

- de 72 l pour le cycle 1, soit 23 % d'amélioration ;
- de 9.2 l pour le cycle 2 soit 73 % d'amélioration ;
- de 6.5 l pour le cycle 3 soit 45 % d'amélioration.

Le fonctionnement est donc meilleur pour les trois cycles, ce qui peut s'expliquer par l'augmentation de la taille de l'hélice, et par un moteur répondant mieux aux sollicitations.

Pour le cycle 1, la propulsion conventionnelle reste donc la meilleure : 72 l au lieu de 87 l. Par contre, dans les deux autres cas, la propulsion hybride est supérieure.

5.5 Conclusions

Grâce aux exemples présentés dans ce chapitre, nous avons pu illustrer la méthodologie proposée et montrer son efficacité. Dans le cas de la propulsion hybride série, le découplage introduit par la batterie permet de faire fonctionner le groupe électrogène et le bloc de propulsion à leur rendement optimum. L'optimisation globale en grandeurs réduites peut donc délivrer une bonne estimation des performances finales. Ceci est moins vrai pour la propulsion conventionnelle pour laquelle le point de fonctionnement du moteur thermique est déterminé par les caractéristiques de l'hélice. Mais, même dans ce cas, une seule optimisation locale est suffisante pour définir les organes les mieux adaptés.

Nous avons également pu constater l'intérêt de la propulsion hybride. Bien que celle-ci s'avère un peu moins performante en l'absence de vent, elle devient très intéressante dès qu'il se lève, qu'il soit variable ou non. Elle évite notamment de démarrer le groupe électrogène pour alimenter le réseau de bord, mais elle nécessite de voir l'acceptabilité de la régénération et de la perte de vitesse associée. D'autres solutions existent (panneaux solaires, éoliennes) pour réaliser une alimentation complémentaire, mais elles n'offrent pas tous les avantages d'une propulsion hybride et notamment la possibilité de naviguer au moteur, en mode électrique pur.

Conclusion générale

La question de la mobilité durable se pose avec une acuité sans précédent, que ce soit vis-à-vis du réchauffement climatique qui se trouve amplifié par l'émission de gaz à effet de serre, ou encore de la raréfaction des énergies fossiles. Le voilier hybride, constitue selon nous, pour la plaisance ou pour d'autres secteurs d'activité comme la pêche, un élément de réponse concret sur ce sujet. Les sources d'énergie sont en ce cas multiples : énergies fossile, électrique et éolienne. Il s'agit de dimensionner le groupe électrogène, la machine électrique assurant la propulsion, et l'unité de stockage (batterie) pour obtenir le meilleur rendement. Il faut noter que la batterie peut se recharger de différentes manières : 1/ par simple branchement au port, 2/ par le biais de l'alternateur mû par le moteur thermique et 3/ par l'hélice fonctionnant comme une hydrolienne lorsque la voile entraîne le bateau et donc l'hélice (contrairement au cas standard où l'hélice propulse le navire).

De nombreux travaux sur la propulsion hybride appliquée au domaine automobile présentent l'optimisation de la commande ou du dimensionnement d'une propulsion hybride. Mais à notre connaissance, ils ne traitent pas les deux problèmes simultanément. Pour permettre cela, la modélisation par les échanges de puissance a été développée. Applicable dans le contexte de l'optimisation hors ligne, cette méthode autorise une prise en compte du système dans son ensemble tout en assurant un calcul de dimensionnement et les points de commande associés optimaux en un faible temps de calcul. Appliquée au domaine naval, cette nouvelle méthode permet la résolution d'une commande avec deux degrés de liberté.

En plus d'une accélération importante de la vitesse de résolution, la modélisation par les échanges de puissance permet de mettre en place une modélisation générique des différents éléments d'une propulsion. Cette modélisation permet de ne pas devoir faire de choix technologiques limitants. Enfin, cette modélisation permet la sélection des éléments réels de puissance qui optimisent globalement le résultat sans « *a priori* », mais avec une préférence justifiée par la réponse de l'optimisation globale sur les modèles généraux.

Appliquée sur deux cas d'étude que sont la voiture hybride série et la propulsion hybride navale, cette méthodologie a de plus permis de valider l'utilité de l'hybridation sur les

Conclusion

voiliers. En effet, en plaçant constamment le moteur thermique à son point de rendement optimal, elle ne dégrade pas le comportement du navire dans le cas le plus défavorable, la propulsion sans vent, et elle peut permettre, selon les scénarios avec vent que nous avons envisagés, une propulsion sans consommation de carburant, ce qui n'est pas possible avec une propulsion classique. Cette réponse est très intéressante car elle justifie l'emploi d'une propulsion hybride série ou parallèle comme développée par la Fondation Bénéteau.

L'approche originale proposée dans cette thèse doit être renforcée sur plusieurs aspects pour être réellement opérationnelle. Tout d'abord, en ce qui concerne l'optimisation globale, il s'agira d'analyser l'impact de la discrétisation des variables d'état, afin de proposer une méthodologie rationnelle de réglage des pas de discrétisation. Il serait également intéressant de mettre ne place une optimisation multi-critères, pour prendre en compte d'autres caractéristiques de la solution (coût, poids,...). Cette prise en compte pourrait être faite durant l'optimisation locale en modulant le choix des composants réels. Le choix des scénarios de fonctionnement est également un point délicat à creuser. Mais surtout, les modèles hydrodynamiques actuellement utilisés pour représenter la résistance à l'avancement et la poussée produite par les voiles ou l'hélice sont trop simplistes pour permettre d'obtenir des dimensionnements réalistes de propulsions navales. Il s'agira donc de les affiner.

Plusieurs perspectives peuvent être envisagées suite à cette thèse, dont :

- le développement de modèles génériques adimensionnels puissance / rendement pour une classe d'organes élargie, et le développement d'un outil de CAO abouti destiné à un usage industriel ;
- la conception des lois de commande temps réel fonctionnant sur l'architecture du groupe moto-propulseur retenue, en s'appuyant sur les profils de puissance résultant de la mise en oeuvre de la méthodologie de dimensionnement proposée ;
- l'élargissement des applications considérées au cas de systèmes de production d'énergie multi-sources complexes, en se penchant davantage sur le noyau d'optimisation.

Bibliographie

- Abril, J., & Salom, J. 1997. Fuzzy Control of a Sailboat. *International Journal of Approximate Reasoning* 16: 359-375.
- Alaphilippe, M., Bonnet, S. & Stouffs, P. 2004. Moteurs ERICSSON: Intérêt, état de l'art. Dans Journées Société Française de Thermique : Machines thermiques exotiques, proceedings. Paris.
- Andre, M., 2002. The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. Dans *Proc. Highway and urban pollution. International symposium No7*. Barcelona, Espagne. Mai 2002
- André, M. 2002. *The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions*. Science of The Total Environment, 334-335:73-84.
- Anon 2005. *Scénario négaWatt 2006 pour un avenir énergétique sobre, efficace et renouvelable*. Document de Synthèse de l'Association Negawatt, Paris. <http://www.negawatt.org/>
- Bernard, J. 2007. *Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande*. Thèse de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis.
- Bideaux, E., Laffite, J., Marquis-Favre, W., Scavarda, S., & Guillemard, F. 2006. *Design of a Hybrid Vehicle Powertrain using an Inverse Methodology*. Journal européen des systèmes automatisés, 40(3): 269-290.
- Blanke, M., Lindegaard, K.P., & Fossen, T.I. 2000. Dynamic Model for Thrust Generation of Marine Propellers. Dans *Proc. IFAC Conference Manoeuvring and Control of Marine Craft (MCMC'2000)*, 23-25.
- Bonnet, S. 2005. *Moteurs thermiques à apport de chaleur externe : étude d'un moteur STIRLING et d'un moteur ERICSSON*. Thèse de doctorat de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- Borne, P., Dauphin-Tanguy G., Richard J.P., Rotella F., & Zambettakis I. 1992. *Modélisation et identification des processus : Tome 2*. Editions technip., Collection Méthodes et Techniques de l'Ingénieur, Paris.
- Brunvoll 2005. *Brunvoll presents a "Rim driven thruster" (RDT)*. Brunvoll Thruster, Septembre 2005.
- Carlton, J.S. 2007. *Marine Propeller & Propulsion*. Second Edition. Butterworth-Heinemann, Elviesier Ltd..
- Chan, C.C. 2002. The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles. *Proceedings of the IEEE* 90(2):247-275.
- Crosnier, R. 2009. Prise en compte de la dynamique d'un moteur thermique dans la modélisation d'un système hybride. Présentation aux Réunions PERLE, Nantes.
- Culioli, J.C. 1994. *Introduction à l'optimisation*. Éditions Ellipses.
- Dauphin-Tanguy, G. 2000. *Les bond graphs*. Paris: Hermès Science Publication.
- Dauphin-Tanguy, G. 2005. *La méthodologie bond-graph - Principes et applications. Présentation au Laboratoire d'Automatique Génie Informatique et Signal*.
- De Bernardinis, A. 2000. *Etude et optimisation d'un ensemble alternateur a aimants redresseur commande. Application a un véhicule hybride*. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine.

Bibliographie

- Delprat, S. 2002. *Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybride parallèles*. Thèse de Doctorat de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis.
- D'Espagnier, P., Chung, H.L., Stanway, M.J., & Kimball, R.W.. An Open Source Parametric Propeller Design Tool. Dans *Proc. OCEANS*, Vancouver, Canada.
- Diop, D. 2004. *Contribution a la gestion de l'énergie d'un vehicule hybride serie*. Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comte.
- Dubray, A. 2002. *Adaptation des lois de gestions d'énergie des véhicules hybrides suivant le profil de mission suivi*. Thèse de Doctorat de l'Institut Polytechnique de Grenoble.
- El Kadri, K., Bouquain, D., Diop, D., Pusca, R., Aït-Amirat, Y., Berthon, A., & Kauffmann, J.M. 2002, Test Hybrid Vehicle Management: Energy and Piloting. Dans *Proc. AEVC*.
- Fossen, T.I. 2002. *Marine control systems: Guidance, navigation & control of ships, rigs & underwater vehicles*. Marine Cybernetics, 1st. Ed., 3rd. Printing.
- Guzzella, L., & Sciarretta, A. 2005. *Vehicule Propulsion Systems. Introduction to Modeling and Optimization*. Editions Springer-Verlag, Berlin.
- Hedges, K.I., Richards, P.J., & Mallinson, G.D. 1996. Computer modelling of downwind sails. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 63: 95-110.
- Hrovat, D., & Tobler, W.E. 1991. Bond graph modeling of automotive powertrains. *Journal of the Franklin Institute*, 328(5): 623-662.
- Jancovici, J.M., & Grandjean, A. 2009. *C'est maintenant! 3 ans pour sauver le monde*. Editions Seuil, Collection Sciences.
- Karnopp, D.C., & Rosenberg, R.C. 1968. *Analysis and simulation of multiport systèmes: the bond graph approach to physical system dynamics*. Cambridge, Massachussets: London: MIT Press.
- Korpus, R. 2007. Performance Prediction without Empiricism: A RANS-Based VPP and Design Optimization Capability. Dans *Proc. 18th Chesapeake Sailing Yacht Symposium*. Annapolis, USA.
- Lagoon 2007. *Lagoon 420*. Lagoon éd..
- Lateb, R., Takorabet, N., Meibody-Tabar, F., Mirzaian, A., Enon, J., & Sarribouette, A. 2005. Performances comparison of induction motors and surface mounted PM motor for POD marine propulsion. Dans *Proc. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference*, 1342-1349. Hong Kong, China.
- Lebrun, M. 2003. *Simulation et CAO en automatique et mécatronique*. Traité Informatique Industrielle, Technique de l'ingénieur.
- Lhomme, W., Bouscayrol, A., & Barrade, P. 2004. Simulation of a series hybrid electric vehicle based on energetic macroscopic representation. Dans *Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Ajaccio, France.
- Lukic, S. & Emado, A., 2003. Modeling of electric machines for automotive applications using efficiency maps. Dans *Proc. Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference*, 543-550. Indianapolis, USA.
- McDonald, J.R., Apsley, J.M., Villasenor, A.G., Barnes, M., Smith, A.C., Williamson, S., Schuddebeurs, J.D., Norman, P.J., Booth, C.D., & Burt, G.M. 2007. Propulsion

Bibliographie

- Drive Models for Full Electric Marine Propulsion Systems. Dans *Proc. Electric Machines & Drives Conference, IEMDC '07*, ou *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45(2):676-684.
- Moawad, A., Marnay, D., & Le Gac, N. 2008. *Régulation de la vitesse d'un voilier utilisant un système de propulsion hybride et optimisation de sa trajectoire*. Rapport de projet d'option AII de l'Ecole des Mines de Nantes.
- Montazeri-Gh, Amir Poursamad, M., & Ghalichi, B. 2006. *Application of genetic algorithm for optimization of control strategy in parallel hybrid electric vehicles*. *Journal of the Franklin Institute*, 343(4-5):420-435.
- Montaru, M. 2009. *Contribution à l'évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages*. Thèse de Doctorat de l'Institut Polytechnique de Grenoble.
- Nanni-Diesel, *Site internet Nanni-Diesel*. <http://www.nannidiesel.com/>.
- Ngwompo, R.F., Bideaux, E., & Scavarda, E. 2005. On the Role of Power Lines and Causal Paths in Bond Graph based Model Inversion. Dans *Proc. International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation*. New Orleans, USA.
- Orberger, T. 2008. Is it the Answer? Hybrid Marine Propulsion. *Maritime Reporter*, Septembre.
- Pant, P., Schoder, K., & Feliachi, A. 2007. An Integrated Electric Shipboard Power System Testbed. Dans *Proc. IEEE Electric Ship Technologies Symposium, ESTS '07*, Arlington, USA.
- Parolini, N., et Quarteroni, A. 2005. *Mathematical models and numerical simulations for the Americas Cup*. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 194: 1001-1026.
- Pérez Arribas, F. 2007. *Some methods to obtain the added resistance of a ship advancing in waves*. *Ocean Engineering*, 34: 946-955.
- Pérez, L. V., Bossio, G. R., Moitre, D., & García, G. O. 2006. *Optimization of power management in an hybrid electric vehicle using dynamic programming*. *Math. Comput. Simul.*, 73(1): 244-254.
- Pérez, L. V., & Pilotta, E. A. 2009. *Optimal power split in a hybrid electric vehicle using direct transcription of an optimal control problem*. *Mathematics and Computers in Simulation* 79,(6): 1959-1970.
- Pivano, L., Smogeli, N., Johansen, T.A., & Fossen, T.I. 2006. *Marine Propeller Thrust Estimation in Four-Quadrant Operations*. Dans *Proc. 45th IEEE Conference on Decision and Control*, San Diego, USA
- Ravon, D. 2010. *Lancement d'un moteur «vert» par Bénéteau et le Groupe ZF*. Ouest-France, Février.
- Ripert, P.J. 2003. *Méthodologie de construction de modèles physiques juste nécessaires. Génération/simplification du modèle d'une chaîne de traction automobile*. Rapport de DEA AIA IRCCyN - Ecole des mines de Nantes.
- Scheffer, N. 2003. *Vers une méthodologie de réduction de modèles physiques et son application à la chaîne de traction d'un véhicule automobile*. Rapport de DEA AIA IRCCyN - Ecole des mines de Nantes.
- Schouten, N.J., Salman, M.A., & Kheir, N.A. 2002. *Fuzzy logic control for parallel hybrid vehicles*. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 10(3):460 - 468.
- Scordia, J. 2004. *Approche systématique de l'optimisation du dimensionnement et de*

Bibliographie

- l'élaboration de lois de gestion d'énergie des véhicules hybrides.* Thèse de l'Université Henri Poincaré Nancy 1.
- Seiler, J., & Schöder, D. 1998. Hybrid vehicle operating strategies. Dans *Proc. Electric Vehicle Symposium, EVS15*. Bruxelles, Belgique.
- Shu Hau, L. 2006. *Design Optimisation of a Slotless Brushless Permanent Magnet DC Motor with Helically-Wound Laminations for Underwater Rim-Driven Thrusters.* Thèse de doctorat de l'University of Southampton, Grande Bretagne.
- Skinner, B. A., Palmer, P. R., & Parks, G. T. 2007. Multi-Objective Design Optimisation of Submarine Electric Drive Systems. Dans *Proc. IEEE Electric Ship Technologies Symposium, 65-71*. Arlington, USA.
- Serrao, L., & Rizzoni, G. 2008. Optimal Control of Power Split for a Hybrid Electric Refuse Vehicle. Dans *Proc. IEEE American Control Conference*. Seattle, USA.
- Seatronic. *Calcul d'un bilan énergétique sur un voilier, influence de l'optimisation de la consommation.* http://www.seatronic.fr/conseil/bilan-energie.php#sans_opti.
- Smogeli, Ø.N. 2006. *Control of Marine Propellers From Normal to Extreme Conditions.* Thèse de doctorat de la Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- Stelzer, R., & Pröll, T. 2008. *Autonomous sailboat navigation for short course racing.* *Robotics and Autonomous Systems*, 56:604-614 .
- Sunmachine 2005. *Fiche technique pour la Sunmachine® Pellet.* Sunmachine.
- Takinaci, A. C., & Altar, M. 2002. *Performance assessment of a concept propulsor: the thrust-balanced propeller.* *Ocean Engineering*, 29:129-149.
- Trigui, R., Jenneret, B., & Badin, F. 2004. Modélisation systémique de véhicules hybrides en vue de la prédiction de leurs performances énergétiques et dynamiques Construction de la bibliothèque de modèle VEHLIB. *Recherche, Transports, Sécurisé*, 83:129-150.
- Wenzhong Gao, D., MI, C., & Emadi, A. 2007. *Modeling and Simulation of Electric and Hybrid Vehicles.* *Proceedings of the IEEE*, 95(4):729-745.
- Wu, S.T., & Youcef-Toumi, K. 1995. *On relative degrees and zero dynamics from physical system modeling.* *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and control*, 117:205-217.

Annexes

Annexe 1 : Notice du Lagoon 420

- Le fonctionnement peut être résumé à 5 situations principales sélectionnées par le commutateur de mode situé sur le tableau électrique

Mode 1 : L'énergie est fournie par la prise de quai.

Mode 2 : Arrêt sous voile, les hélices tournent librement, bateau au port sans personne à bord

Mode 3 : Démarrage du groupe électrogène, pour fournir le réseau de bord.

Le mode 4 et 5 sont deux modes de propulsion, opérationnels uniquement avec la clé intérieure sur «on» et le contact sur le tableau extérieur.

Mode 4 : Démarrage instantané du groupe électrogène en fonctionnement propulsion et réseau de bord alimenté : environ 60% de la puissance du groupe électrogène est dédiée aux utilisations du bord, tandis que 40% est destinée à la propulsion et/ou recharge des batteries de propulsion.

Mode 5 : Propulsion, réseau 220V (ou 110V) de bord non alimenté, navigation sous voile.

- La régénération est activée automatiquement si les commandes moteurs sont sur neutre
- Navigation au moteur. L'énergie nécessaire à la propulsion est fournie par les batteries. Quand leur état de charge devient insuffisant (80% du niveau de charge), le groupe électrogène démarre automatiquement ;

Fonctionnement en mode régénération en mode 4 & 5 uniquement ;

- Pour ne pas freiner le bateau à basse vitesse, le variateur se cale sur la vitesse de rotation de l'hélice à 4,5 nœuds, soit 150 t/min ;

- En dessous de cette vitesse, pas de régénération, l'hélice tourne librement en fonction de la vitesse du bateau ;

- A partir de 5 nœuds le variateur «freine» la rotation de l'hélice pour produire de l'énergie: à 5 nœuds au lieu d'une rotation libre à 230 t/min, l'hélice est freinée à 150 t/min, produisant environ 3 Ampères (par moteur) ;

- Jusqu'à ce que la régénération atteigne sa valeur optimum (en sortie de variateur), l'hélice est bloquée à 150 t/min; une fois cette valeur atteinte, l'hélice accélère progressivement (le variateur relâche la pression sur l'hélice). La valeur optimum est

Annexes

calibrée à 18 ampères par moteur, ce qui pénalise la vitesse à 9,5 nœuds d'environ 1 nœud ;

- En très haute vitesse (autour de 18 nœuds) la régénération se désamorce automatiquement pour ne pas surcharger ;
- Les batteries de propulsion chargent les batteries du bord via deux chargeurs convertisseurs 72/12V de 2 x 25 ampères. Ainsi les batteries du bord sont-elles toujours chargées, et profitent de la régénération pour maintenir leur charge lorsque le bateau navigue. Au mouillage ou si les besoins du bord sont importants, la décharge à 80% des batteries déclenche automatiquement le démarrage du groupe électrogène : les deux parcs sont donc parfaitement protégés.
- Il est toujours possible de quitter le mode régénération en appuyant sur le bouton OFF du tableau moteur ou en tournant le sélecteur situé sur le tableau électrique (mode 1, 2, 3) pour ne plus freiner le bateau ;
- Lorsque les batteries sont chargées, l'hélice est libérée ;
- Le système de régénération gère la charge de manière entièrement automatisée (comme un chargeur de batterie standard) ;
- La vitesse du bateau n'est jamais freinée de plus d'un nœud en mode de régénération.

Annexe 2 : Caractéristiques de l'hélice

```
function [resultat] = ctqbeta(beta,P_D,K)

% qp : vitesse de rotation (rad/s)
% Va : vitesse d'avance (m/s)
% beta : angle d'avance (rad)
% P_D : rapport pas géométrique sur diamètre de l'hélice (-, 0.6:0.2:1.4)
% K : nombre (+1) de coefficients de Fourier utilisés pour le calcul de Cq, Ct
% et Ctn (-, <21)

%% P/D = 0.6 à 1.4

%% Coefficients de Ctn (seulement pour P/D = 1)

Atnk = [
    -0.11257e0
    0.93340e-2
    0.13788e0
    0.33223e-1
    0.12672e-1
    0.14250e-1
    -0.30407e-3
    0.19888e-1
    0.48334e-2
    0.28427e-2
    0.32326e-2
    0.97673e-2
    -0.28378e-3
    0.29395e-2
    0.53177e-3
    0.16229e-2
    -0.27265e-3
    0.20276e-2
    0.35477e-3
    0.39082e-3
    -0.92513e-3
];

Btnk = [
    0
    -0.26265e0
    0.27587e-1
    0.65262e-1
    -0.40234e-2
    0.10255e-2
    0.32045e-2
    -0.21752e-2
    -0.59535e-2
    0.90664e-3
    -0.10222e-2
    -0.48133e-2
    -0.56355e-2
    -0.18248e-2
    -0.20263e-2
    -0.30282e-2
    -0.11128e-2
    -0.15327e-2
    -0.12433e-2
    -0.20069e-2
];
```

Annexes

```
-0.48842e-3  
];
```

```
%% Coefficients de Ct
```

```
Atk = [  
-0.14825e0      -0.13080e0      -0.10985e0      -0.90888e-1     -0.73487e-1  
0.84697e-1      0.10985e0      0.14064e0      0.17959e0      0.22861e0  
0.16700e0      0.15810e0      0.15785e0      0.14956e0      0.14853e0  
0.96610e-3      0.18367e-1      0.45544e-1      0.65675e-1      0.75328e-1  
0.14754e-1      0.16168e-1      0.51639e-2      0.52107e-2      0.34084e-2  
-0.11806e-1     -0.37402e-2     -0.25560e-2     -0.68232e-2     -0.11643e-2  
-0.14888e-1     -0.11736e-1     -0.60502e-2     -0.62896e-2     0.18576e-3  
0.73311e-2      0.25483e-2      0.67368e-2      0.18178e-1      0.26970e-1  
0.75022e-2      0.12350e-2      0.68571e-2      0.60694e-2      0.20616e-2  
-0.15128e-1     -0.20772e-2      0.47245e-2      0.61942e-2      0.78666e-2  
0.33002e-2      0.69749e-2      0.23591e-2      0.26482e-2      0.46912e-2  
0.31416e-2      0.59838e-2      0.87912e-2      0.12137e-1      0.14771e-1  
-0.21144e-2     -0.14599e-2      0.11968e-2      -0.35705e-2     -0.75056e-2  
0.29438e-2      0.83533e-2      0.83808e-2      0.32985e-2      0.14983e-2  
0.33857e-3      0.11093e-2      -0.82098e-2     -0.88652e-3      0.24058e-2  
0.41236e-2      0.41885e-2      0.27371e-2      0.69807e-2      0.55647e-2  
0.16259e-2      -0.12438e-3     -0.26121e-3     -0.17560e-3     -0.38178e-2  
0.12759e-2      0.38034e-2      0.19133e-2      0.21643e-2      0.26704e-2  
0.20647e-2      0.90073e-3      0.32290e-3      0.35362e-3      0.15745e-2  
0.34157e-2      0.31147e-2      0.15223e-2      0.25772e-2      0.24500e-3  
-0.58703e-3     -0.10633e-3     -0.10151e-2     -0.18279e-2     -0.42370e-4  
];
```

```
Btk = [  
0                0                0                0  
0  
-0.10838e1      -0.10708e1      -0.10583e1      -0.11026e1      -0.98101e0  
0.18023e-1      0.24163e-1      0.47284e-1      0.61459e-1      0.71510e-1  
0.11825e0      0.12784e0      0.13126e0      0.13715e0      0.14217e0  
-0.70713e-2     -0.14064e-2     -0.77539e-2     -0.17280e-1     -0.22675e-1  
0.62894e-1      0.76213e-1      0.93507e-1      0.96579e-1      0.91082e-1  
0.11519e-1      0.13259e-1      0.92520e-2      0.58809e-2      -0.40283e-2  
0.17070e-2      -0.42300e-2     -0.14828e-1     -0.22587e-1     -0.22759e-1  
0.22990e-2      -0.26246e-2     -0.96554e-2     -0.14819e-1     -0.16727e-1  
0.13458e-1      0.16328e-1      0.96216e-2     -0.10398e-1     0.86970e-2  
0.54810e-3      -0.33979e-3     -0.75453e-3     -0.29324e-2     -0.47515e-2  
0.42076e-2      0.23506e-2      0.24453e-2      0.40913e-2      0.22828e-2  
-0.57232e-2     -0.69497e-2     -0.87981e-2     -0.44436e-2     -0.49383e-2  
0.74689e-2      0.61925e-2      0.18184e-2      -0.12190e-2     -0.25924e-2  
-0.84815e-4     0.35046e-3      0.20077e-2      -0.22551e-2     -0.25143e-2  
-0.13374e-2     -0.11571e-2      0.33070e-2      -0.32272e-2     -0.33659e-2  
-0.91934e-3     -0.38566e-3     -0.79201e-3      0.17553e-2      0.28153e-2  
0.27412e-2      0.63420e-3      -0.36311e-3     0.14875e-2      -0.22162e-3  
-0.10198e-2     -0.22749e-2     -0.19377e-2      0.45353e-4      -0.53749e-3  
0.19845e-2      -0.36805e-3     -0.12135e-2     -0.88702e-3     -0.35190e-2  
-0.13980e-2     -0.12350e-2     -0.31678e-3     -0.94609e-3     -0.42846e-3  
];
```

```
%% Coefficients de Cq
```

```
Aqk = [  
0.17084e-1      0.19368e-1      0.35189e-1      0.43800e-1      0.73202e-1  
0.10550e0      0.17050e0      0.24406e0      0.35299e0      0.47301e0  
-0.27380e-1     -0.11901e-1     -0.73880e-2     -0.10917e-1     -0.33300e-1  
-0.11827e-1     -0.25601e-2      0.28260e-1      0.47062e-1      0.62786e-1
```

Annexes

```

0.28671e-1    0.17763e-1    -0.55959e-2  -0.10779e-1  -0.19511e-1
0.42504e-2    0.82085e-2    0.26558e-3   -0.10193e-1  -0.27569e-1
-0.78835e-2   -0.34336e-2   0.11368e-1   -0.88824e-3  -0.38296e-2
-0.70981e-2   -0.24534e-1  -0.47401e-1  -0.37893e-1  -0.23310e-1
0.76691e-2    -0.10289e-2  -0.65686e-2  -0.70346e-2  -0.84525e-2
-0.12506e-1   -0.74938e-2  -0.74990e-2  -0.81030e-2  -0.48956e-2
0.70343e-2    0.15444e-2   0.12873e-2   0.72622e-2   0.48544e-2
-0.10254e-1  -0.14173e-1  0.46502e-2   -0.54390e-2  -0.71945e-2
0.25186e-2    -0.28034e-2  -0.46676e-2  -0.20060e-2  -0.53185e-2
0.96613e-2    0.14246e-1   0.33438e-2   0.39281e-2   0.13281e-2
0.14934e-2    0.34663e-2   0.22046e-2   -0.65256e-3  0.68695e-2
-0.28323e-2   0.20764e-2   0.70034e-2   0.15414e-1   0.18071e-1
-0.30360e-2   -0.29424e-2  0.39147e-1   0.30356e-2   -0.15725e-2
0.20889e-2    0.30149e-2   0.73719e-2   0.59073e-2   0.11527e-1
0.31929e-2    0.27714e-2   -0.94083e-3  0.41433e-2   0.10168e-1
-0.91635e-3   0.18423e-3   0.60560e-2   0.46102e-2   0.81504e-3
-0.23922e-2   -0.81634e-4  -0.42390e-3  -0.57423e-3  0.14501e-2
];

Bqk = [
0          0          0          0
0
-0.78070e0  -0.99912e0  -0.11717e1  -0.12949e1  -0.14062e1
0.38134e-1  0.31924e-1  0.51155e-1  0.59030e-1  0.71683e-1
0.74292e-1  0.81384e-1  0.89069e-1  0.93540e-1  0.11449e0
-0.13568e-1 -0.35096e-3 -0.65670e-2 -0.61148e-2 -0.13400e-1
0.66595e-1  0.10631e0   0.14204e0   0.16121e0   0.17547e0
0.10330e-1  0.15116e-1  0.77052e-2  0.14624e-1  0.25715e-1
-0.17885e-1 -0.27045e-1 -0.36091e-1 -0.53549e-1 -0.54967e-1
-0.36187e-2 -0.59389e-2 0.42036e-2  -0.31589e-2 -0.12576e-1
0.10015e-1  0.11085e-1 0.21139e-2  0.14382e-1 0.13084e-1
0.55926e-2  0.83787e-2 0.13095e-1  0.99836e-2 0.10733e-1
0.69688e-2  0.15192e-1 0.30961e-1  0.38781e-1 0.44142e-1
-0.47676e-2 -0.51507e-2 -0.99459e-2 -0.46749e-2 -0.10945e-2
0.88889e-2  0.14836e-1 0.17921e-1  0.14944e-1 0.12209e-1
0.49081e-2  0.25041e-2 -0.81917e-2 -0.63253e-2 -0.14074e-2
-0.58150e-4 -0.78615e-3 -0.78428e-3 0.22275e-2 0.17837e-2
0.52044e-2  -0.24526e-2 0.72661e-2  0.71826e-2 0.37948e-2
0.12522e-2  -0.32187e-3 -0.47316e-2 0.10229e-2 0.49971e-2
0.33109e-2  -0.48551e-3 -0.25731e-2 -0.59201e-2 -0.42398e-2
0.52446e-2  0.35455e-2 0.11136e-2  -0.14814e-2 -0.77298e-2
-0.20591e-2 -0.34936e-3 -0.15470e-2 -0.43092e-2 -0.34485e-2
];

%% Calcul de Ct et Cq
ind = 5*P_D-2;
ind = int16(ind);
k = (0:20).';
Ct = Atk(1:K+1,ind).'*cos(k(1:K+1)*beta) + Btk(1:K+1,ind).'*sin(k(1:K+1)*beta);
dCt = (k(1:K+1).*Atk(1:K+1,ind)).'*cos(k(1:K+1)*beta+pi/2) +
(k(1:K+1).*Btk(1:K+1,ind)).'*sin(k(1:K+1)*beta+pi/2);

Cq = Aqk(1:K+1,ind).'*cos(k(1:K+1)*beta) + Bqk(1:K+1,ind).'*sin(k(1:K+1)*beta);
dCq = (k(1:K+1).*Aqk(1:K+1,ind)).'*cos(k(1:K+1)*beta+pi/2) +
(k(1:K+1).*Bqk(1:K+1,ind)).'*sin(k(1:K+1)*beta+pi/2);

resultat = [Ct, Cq];

```


Annexe 3 : Caractéristiques de la voile

Puissance de la voile, à multiplier par 10^5 , en fonction de l'incidence et de la vitesse du vent en noeuds

	0	10	20	30	40	50	60	70	80
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0010	0.0015	0.0017	0.0018
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0048	0.0083	0.0117	0.0139	0.0147
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0160	0.0279	0.0394	0.0468	0.0495
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0380	0.0661	0.0934	0.1110	0.1173
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0754	0.1283	0.1766	0.2072	0.2182
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1316	0.2207	0.2987	0.3474	0.3647
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1960	0.3160	0.4169	0.4809	0.5061
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2786	0.4354	0.5629	0.6450	0.6799
9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3389	0.5164	0.6623	0.7600	0.8022
10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4074	0.6069	0.7728	0.8879	0.9384
11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4465	0.6553	0.8273	0.9495	1.0138
12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4880	0.7061	0.8844	1.0138	1.0932
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5134	0.7378	0.9183	1.0511	1.1449
14	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5397	0.7705	0.9532	1.0892	1.1981
15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5577	0.7954	0.9794	1.1178	1.2309
16	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5760	0.8208	1.0061	1.1470	1.2642
17	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5874	0.8375	1.0255	1.1681	1.2890
18	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5989	0.8544	1.0451	1.1895	1.3142
19	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6105	0.8715	1.0650	1.2112	1.3396
20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6223	0.8889	1.0851	1.2331	1.3654
21	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6251	0.8966	1.0965	1.2472	1.3834
22	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6280	0.9044	1.1079	1.2615	1.4016
23	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6308	0.9122	1.1195	1.2759	1.4199
24	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6336	0.9200	1.1311	1.2904	1.4384
25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6364	0.9279	1.1428	1.3050	1.4571
26	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6364	0.9279	1.1428	1.3050	1.4571

Annexes

Puissance de la voile, à multiplier par 10^5 , en fonction de l'incidence et de la vitesse du vent en noeuds

	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
1	0.0017	0.0015	0.0011	0.0008	0.0005	0.0004	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
2	0.0139	0.0118	0.0091	0.0063	0.0042	0.0028	0.0020	0.0016	0.0014	0.0014
3	0.0468	0.0398	0.0305	0.0213	0.0141	0.0096	0.0068	0.0055	0.0048	0.0046
4	0.1110	0.0942	0.0723	0.0504	0.0333	0.0226	0.0162	0.0130	0.0114	0.0108
5	0.2086	0.1809	0.1418	0.1007	0.0671	0.0458	0.0324	0.0261	0.0228	0.0216
6	0.3512	0.3091	0.2456	0.1766	0.1185	0.0809	0.0569	0.0458	0.0402	0.0380
7	0.4916	0.4398	0.3598	0.2673	0.1844	0.1287	0.0918	0.0737	0.0646	0.0613
8	0.6652	0.6030	0.5049	0.3846	0.2710	0.1924	0.1387	0.1110	0.0974	0.0926
9	0.7940	0.7378	0.6393	0.5036	0.3657	0.2662	0.1954	0.1575	0.1387	0.1321
10	0.9384	0.8914	0.7956	0.6450	0.4802	0.3569	0.2657	0.2154	0.1903	0.1815
11	1.0294	0.9927	0.9039	0.7632	0.5894	0.4517	0.3436	0.2819	0.2502	0.2389
12	1.1261	1.1014	1.0216	0.8950	0.7141	0.5620	0.4354	0.3608	0.3215	0.3073
13	1.1917	1.1831	1.1096	0.9889	0.8184	0.6657	0.5308	0.4443	0.3980	0.3816
14	1.2597	1.2687	1.2025	1.0892	0.9323	0.7815	0.6393	0.5397	0.4857	0.4670
15	1.3096	1.3350	1.2800	1.1724	1.0216	0.8767	0.7394	0.6364	0.5774	0.5551
16	1.3607	1.4035	1.3607	1.2597	1.1164	0.9794	0.8495	0.7441	0.6799	0.6536
17	1.3915	1.4521	1.4289	1.3338	1.1942	1.0587	0.9283	0.8256	0.7624	0.7363
18	1.4228	1.5019	1.4993	1.4107	1.2754	1.1421	1.0119	0.9129	0.8512	0.8256
19	1.4546	1.5527	1.5721	1.4906	1.3603	1.2298	1.1004	1.0061	0.9467	0.9220
20	1.4868	1.6047	1.6471	1.5734	1.4489	1.3218	1.1938	1.1055	1.0491	1.0255
21	1.5099	1.6343	1.6957	1.6450	1.5254	1.4003	1.2714	1.1784	1.1211	1.0973
22	1.5332	1.6643	1.7452	1.7187	1.6047	1.4818	1.3522	1.2544	1.1964	1.1724
23	1.5568	1.6946	1.7958	1.7946	1.6866	1.5665	1.4365	1.3336	1.2750	1.2508
24	1.5806	1.7253	1.8472	1.8727	1.7713	1.6542	1.5241	1.4160	1.3569	1.3326
25	1.6047	1.7564	1.8997	1.9531	1.8588	1.7452	1.6152	1.5019	1.4423	1.4180
26	1.6047	1.7564	1.8997	1.9531	1.8588	1.7452	1.6152	1.5019	1.4423	1.4180

Annexe 4 : Moteurs Thermiques

Moteur 1	Moteur Diesel 1,7 l de puissance 75kW de la Mercedes Classe A
Moteur 2	Moteur Diesel 1,7 l de puissance 75kW de la Mercedes Classe A
Moteur 3	Moteur Diesel 1,8 l de puissance 75kW
Moteur 4	Moteur Diesel 1,8 l de puissance 75kW
Moteur 5	Moteur TDI 1.9 l de puissance 66kW de Volkswagen
Moteur 6	Moteur Diesel 1.9 l de puissance 60kW
Moteur 7	Moteur TDI 1.9 l de puissance 67kW de Volkswagen
Moteur 8	Moteur Diesel 1.9 l de puissance 110kW de General Motor
Moteur 9	Moteur HDI 2 l de puissance 81kW de PSA
Moteur 10	Moteur CIDI 2,2 l de puissance 92kW de Mercedes OM611
Moteur 11	Moteur TDI 2,5 l de puissance 88kW d'Audi
Moteur 12	Moteur Diesel 6.5 l de puissance 120kW en fonte
Moteur 13	Moteur Diesel 7,2 l de puissance 205kW Caterpillar
Moteur 14	Moteur Diesel 7,3 l de puissance 171kW de Detroit Diesel Corp.
Moteur 15	Moteur Diesel 8,5 l de puissance 205kW de Detroit Diesel Corp.
Moteur 16	Moteur Diesel 10,8 l de puissance 246kW de Cummins.
Moteur 17	Moteur Diesel 12 l de puissance 321kW de Caterpillar.
Moteur 18	Moteur Diesel 12,7 l de puissance 330kW de Detroit Diesel Corp.
Moteur 19	Moteur Diesel 15 l de puissance 324 kW de Caterpillar
Moteur 20	Moteur Diesel 8.1 l de puissance 186 kW de John Deere
Moteur 21	Moteur hydrogène de puissance 67kW
Moteur 22	Moteur GPL de puissance 224kW
Moteur 23	Moteur Essence 1 l de puissance 30kW
Moteur 24	Moteur Essence 1 l de puissance 41kW
Moteur 25	Moteur Essence 1 l de puissance 50kW de la Honda Insight
Moteur 26	Moteur Essence 1,5 l de puissance 57kW de la Toyota Prius US
Moteur 27	Moteur Essence 1,5 l de puissance 43kW de la Toyota Prius Japonaise
Moteur 28	Moteur Essence 1,5 l de puissance 52kW de la Toyota Prius US MY01
Moteur 29	Moteur Essence 1,6 l de puissance 85kW de la Toyota Civic
Moteur 30	Moteur Essence 1,8 l de puissance 90kW de la Toyota Corolla
Moteur 31	Moteur Essence 1,8 l de puissance 99kW de Ford
Moteur 32	Moteur Essence 1,8 l de puissance 99kW de Ford à chaud
Moteur 33	Moteur Essence 2,3 l de puissance 99kW de la Ford Escape Hybride
Moteur 34	Moteur Essence 3 l de puissance 115kW de la Ford Taurus
Moteur 35	Moteur Essence 3 l de puissance 150kW de la Honda Accord
Moteur 36	Moteur Diesel 3 l de puissance 150kW de la Ford Taurus
Moteur 37	Moteur Diesel 3,8 l de puissance 132kW de la Caravan
Moteur 38	Moteur Essence 4 l de puissance 120kW de l'Explorer
Moteur 39	Moteur Essence 4 l de puissance 160kW de l'Explorer SOHC
Moteur 40	Moteur Essence 4,8 l de puissance 201kW de la Silverado

Annexe 5 : Moteurs Electriques

Moteur 1	Moteur asynchrone de 40kW
Moteur 2	Moteur asynchrone de 81kW
Moteur 3	Moteur asynchrone de 66kW
Moteur 4	Moteur asynchrone de 70kW
Moteur 5	Moteur asynchrone de 59kW
Moteur 6	Moteur asynchrone de 62kW
Moteur 7	Moteur asynchrone de 83kW
Moteur 8	Moteur synchrone à aimant permanent de 14.2kW de l' Accord
Moteur 9	Moteur synchrone à aimant permanent de 15kW de la Prius
Moteur 10	Moteur synchrone à aimant permanent de 10kW de la Insight
Moteur 11	Moteur synchrone à aimant permanent de 30kW de la Prius
Moteur 12	Moteur synchrone à aimant permanent de 33kW de l'Escape MG2
Moteur 13	Moteur synchrone à aimant permanent de 50kW de la Prius
Moteur 14	Moteur synchrone à aimant permanent de 45kW
Moteur 15	Moteur synchrone à aimant permanent de 65kW de l'Escape MG1
Moteur 16	Moteur synchrone à aimant permanent de 70kW
Moteur 17	Moteur synchrone à aimant permanent de 75kW
Moteur 18	Moteur synchrone à aimant permanent de 49kW de Honda
Moteur 19	Moteur synchrone à aimant permanent de 100kW
Moteur 20	Moteur synchrone à aimant permanent de 105kW
Moteur 21	Moteur synchrone à aimant permanent de 58kW