Optimisation collaborative multi-sites : application à la conception de navires

FOUAD BENNIS¹, ALESSANDRO GIASSI^{1,2,a} ET JEAN-JACQUES MAISONNEUVE²

¹ IRCCYN, École centrale de Nantes, 1 rue de la Noë, BP 92101, 44321 Nantes Cedex 03, France

² SIREHNA, 1 rue de la Noë, BP 42105, 44321 Nantes Cedex 3, France

Reçu le 4 décembre 2002, accepté le 23 octobre 2003

Résumé – Le travail présenté dans cet article a pour objectif la création d’une procédure d’optimisation à distance appliquée à la conception de navires. La démarche doit prendre en compte les contraintes industrielles actuelles liées au déploiement de l’ingénierie concourante. Cette optimisation doit être réalisée dans le cadre d’une conception collaborative et multi-sites, en plus elle doit être opérationnelle sans demander des changements importants dans l’organisation de l’entreprise. Elle doit prendre en compte les coûts importants de calcul et les expertises nécessaires à l’évaluation des critères et des contraintes. La solution proposée dans cet article couple un algorithme génétique d’optimisation multi-objectif avec un outil de communication asynchrone. Les avantages des approches abordées et des solutions apportées sont présentés dans le cadre d’une application industrielle. Il s’agit de l’optimisation multi-objectif de la carène d’un navire rapide. L’expérience a été réalisée en grandeur nature entre trois entreprises européennes spécialisées dans l’étude et la conception de navires. L’approche a mis en évidence la possibilité d’améliorer de façon importante les méthodes de travail industrielles existantes.

Mots clés : Conception / collaborative / multi-objective / multi-sites / navire / optimisation

Abstract – Collaborative and multi-sites optimisation applied to ship design. This paper presents the implementation of a distributed optimisation method applied to the ship design domain. The approach takes into account the present industrial requirements linked to the concurrent engineering deployment. This optimisation method has to be suited to the collaborative and multi-sites design context, besides it has to work without requiring significant changes in the company organisation. The method has also to take into account the computational cost and the human expertise required by the constraints and the objective functions evaluation. The described solution couples a multi-objective genetic algorithm with an asynchronous communication tool. An industrial application is presented as an example of this methodology. The test case is a ship hull optimisation distributed among three European companies. The results of this real scale experiment suggest that significant improvements of the present industrial design method are possible.

Key words: Collaborative / design / multi-objective / multi-sites / optimisation / ship

1 Introduction

La phase de développement est une période cruciale dans le cycle de création des produits industriels. La réduction du temps de développement, la maîtrise des coûts et de la qualité des produits sont des objectifs primordiaux dans l’industrie. L’ingénierie intégrée [1] permet de répondre à ces objectifs en parallélisant les tâches et en intégrant, à tous les niveaux de développement, les

différentes considérations relatives au cycle de vie du produit. L’activité de l’ingénierie est multidisciplinaire ; elle fait appel à plusieurs métiers qui partagent des données et des variables communes. Les acteurs doivent alors communiquer et échanger les informations relatives à la résolution du problème traité pour obtenir la solution optimale.

Le processus de conception de navire est un processus complexe, interactif et dynamique. C’est une activité multidisciplinaire, multi-acteurs, et souvent multi-sites. La complexité est liée à la quantité, souvent trop

^a Auteur correspondant :

alessandro.giassi@irccyn.ec-nantes.fr

importante, d'informations à manipuler. Le caractère dynamique du processus est dû à l'évolution des critères et des contraintes qui s'adaptent et se précisent pendant le cycle de développement du produit. Chaque solution proposée à un problème de conception permet d'ouvrir de nouvelles voies de développement et met en évidence de nouveaux problèmes. L'interactivité entre les acteurs qui concourent à la conception et à la réalisation du produit est souvent à l'origine de l'émergence de solutions innovantes. Celles-ci résultent des négociations entre les acteurs et de compromis vis-à-vis des critères initiaux.

Le regroupement des entreprises ou des services en plateau projet favorise les interactions opportunistes et la communication directe entre les partenaires. Par contre, ce regroupement oblige certains acteurs à s'éloigner (momentanément) de leur entreprise ou service d'origine. De plus, certains acteurs participent à plusieurs projets à la fois, ils doivent être disponibles pour répondre aux attentes des partenaires de chaque projet. L'éloignement ne facilite pas cet aspect.

D'un autre côté, le regroupement de toutes les ressources matérielles et logicielles peut être très coûteux et très peu rentable. Par exemple, certains logiciels sont nécessaires pendant une phase très courte du processus de conception. L'achat, la maintenance et le salaire de l'expert spécialisé peuvent augmenter le coût du produit. La maîtrise des coûts et la bonne gestion des ressources et des compétences entraînent souvent les entreprises à faire appel à des sous traitants spécialisés.

De nos jours, le marché est devenu mondial : les clients, les sous-traitants, les fournisseurs spécialisés, les partenaires, etc., peuvent être géographiquement distribués. L'entreprise virtuelle est un partenariat d'entreprises pour atteindre un objectif fixé dans le cadre d'un projet à durée limitée. L'entreprise se désagrège à la fin du projet pour reconstituer éventuellement une autre entreprise virtuelle. Cette distribution géographique des sites et des partenaires de l'entreprise étendue introduit des contraintes supplémentaires lors de la définition, la conception, et la réalisation du produit ou du service. Dans ce cadre, le concepteur est amené à prendre des décisions qui peuvent avoir des conséquences très importantes sur le développement du produit. Pour maîtriser le processus de conception et consolider le lien entre les acteurs et les outils de conception, l'entreprise doit exploiter les outils de communication et de partage des logiciels et des données. Elle doit également mettre en place de nouvelles méthodes d'organisation.

Par ailleurs, la recherche d'une solution optimale à un problème de conception est un problème bien connu en conception intégrée. Le problème général est multi-critères et multi-variables. Il est souvent difficile, voire impossible, de le résoudre globalement. De nombreuses approches ont été abordées, entre autres, par Pahl et Beitz [2] avec une approche séquentielle, par Wooldridge [3] avec une approche multi-agents, par Chen et Rao [4], Sakawa [5] et Bennis et Chedmail [6] avec une approche utilisant la logique floue.

Le problème de conception peut être généralement formalisé sous la forme suivante :

trouver les variables de conception $\mathbf{x}$ qui minimisent $F(\mathbf{x}) = (F_1(\mathbf{x}), F_2(\mathbf{x}), \dots, F_m(\mathbf{x}))$ $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ sous les contraintes :

$$\begin{aligned} G_i(\mathbf{x}) &= 0, & i &= 1, \dots, k_e \\ G_i(\mathbf{x}) &\leq 0, & i &= k_e + 1, \dots, k \\ x_l &\leq x \leq x_u \end{aligned}$$

Le co-domaine (ensemble image) de la fonction objectif $F(\mathbf{x})$, dite aussi fonction critère, est multidimensionnel pour décrire la multiplicité des objectifs qui caractérise les problèmes de conception. En effet, une modélisation efficace des problèmes réels doit très souvent utiliser une approche multi-objectif.

Les fonctions objectif $F_i(\mathbf{x})$, ainsi que des contraintes $G_i(\mathbf{x})$, peuvent être implicites ou explicites. Dans la majorité des problèmes de définition de forme, les fonctions sont implicites, elles nécessitent l'utilisation en série ou en parallèle de plusieurs logiciels spécifiques de modélisation et d'analyse. Les fonctions sont alors évaluées localement pour chaque point $\mathbf{x}$ de l'espace de conception. Pendant tout le processus d'optimisation, il est important de maîtriser la cohérence des données échangées entre ces logiciels ainsi que la validité du modèle de représentation du problème considéré. De plus, compte tenu de la complexité des calculs sous-jacente aux problèmes de dimensionnement, il est important de minimiser le nombre d'appels à l'évaluation des critères et des contraintes. La procédure d'optimisation doit également être automatique et robuste vis-à-vis des éventuelles erreurs sur les points problématiques de l'espace de conception.

Le présent travail illustre cette approche au travers de la mise en œuvre d'un processus d'optimisation de forme de navire pour un sous-problème particulier de conception. Ceci est basé sur une distribution automatique des calculs dans le cadre d'une conception collaborative et multi-sites.

Les étapes nécessaires à la réalisation de la boucle d'optimisation sont :

- le paramétrage : définition collaborative des paramètres décrivant la forme de la coque et sélection des variables de conception (paramètres libres) ;
- la maquette numérique : génération automatique des modèles CAO correspondant aux valeurs courantes des variables de conception ;
- la vérification de la validité des entités géométriques représentées : une entité est valide si elle est réalisable physiquement et gérable par le logiciel d'analyse ;
- la génération et l'extraction des données d'entrée et de sortie des logiciels de calcul spécifiques. Nous nous intéressons essentiellement aux problèmes qui nécessitent une coopération entre plusieurs métiers et outils d'analyse ;
- l'interfaçage : un choix judicieux du format d'échange doit permettre de réduire les problèmes d'interfaçage entre les logiciels de la boucle d'optimisation ;

- la réalisation des calculs ;
- l'agrégation de tous les résultats et l'évaluation des critères et des contraintes ;
- la sélection d'un nouveau point ou d'une nouvelle série de points dans l'espace de conception.

L'automatisation de la procédure impose la réduction, voire l'élimination, de toutes les étapes de vérification interactive. À notre connaissance, il n'existe pas de méthode générale permettant de détecter la validité d'un modèle CAO ni de méthode générale pour garantir l'interface. Il faut prévoir des contrôles adaptés au genre d'erreurs spécifiques que la procédure peut générer. De plus, la vérification des opérations d'échange est rendue difficile par le fait que les logiciels opèrent sur des sites distants.

2 Contexte et spécifications du projet

Le projet que nous décrivons ci-dessous a été réalisé entre trois entreprises européennes dans le cadre du projet européen Flowmart¹. Ce projet vise le développement d'un critère à suivre en phase de projet pour la minimisation des vagues créées par les navires et pouvant provoquer des dommages à l'environnement. Pour cela nous nous intéressons à l'optimisation de forme de la carène d'un navire, de manière à minimiser les vagues qu'il crée en avançant. Afin de pouvoir évaluer correctement les performances de notre approche, nous avons choisi de traiter un type de navire existant. Le navire sélectionné pour l'étude a été conçu et réalisé par les Chantiers de l'Atlantique Alstom. Il s'agit du Corsaire 11 000, un ferry rapide monocoque de 102 mètres avec une capacité de 148 véhicules et une vitesse maximale de 40 nœuds. Nous cherchons donc à améliorer les performances de ce navire en modifiant la forme de la coque. Les deux performances retenues pour l'étude sont la résistance à l'avancement du navire et l'amplitude des vagues générées (« Wash Effect »). Ces deux critères peuvent être de nature antagoniste.

Le problème d'optimisation de la forme de la carène que nous avons considéré est un problème multi-variables et multi-objectif. Il est formulé de la façon suivante.

Trouver les variables de conception $\mathbf{x}$ qui minimisent : $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = (F_1(\mathbf{x}), F_2(\mathbf{x}))$ sous les contraintes :

$$1,0 \times 10^6 \text{ kg} \leq \Delta(x_1, \dots, x_n) \leq 1,2 \times 10^6 \text{ kg}$$

$$4,155 \text{ m}^2 \leq \text{TSA}(x_1, \dots, x_n)$$

$$0,25 \text{ m} \leq \text{GM}(x_1, \dots, x_n) \leq 6 \text{ m}$$

où $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ est le vecteur des variables de conception. Elles doivent permettre de décrire au mieux la forme de la coque du navire.

L'optimisation doit donc respecter des contraintes sur les valeurs de la surface du tableau arrière (TSA), du déplacement (Δ) et du critère de stabilité hydrostatique (GM) [7].

La fonction multi-objectif $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ est composée de deux critères. Le premier $F_1(\mathbf{x})$ est relatif à la résistance à l'avancement du navire et le second $F_2(\mathbf{x})$ est relatif à l'énergie des vagues générées : « Wash Effect ».

Nous avons considéré la résistance totale à l'avancement R_t comme la somme de la résistance visqueuse réduite à une simple résistance de frottement sans coefficient de forme et de la résistance de vagues due au système de vagues créées par le navire. La fonction objectif $F_1(\mathbf{x})$ est alors obtenue à partir de la relation suivante :

$$F_1(\mathbf{x}) = R_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot \left(c_w + \frac{0,075}{(\log \Re_e - 2)^2} \right) [\text{N}]$$

où V et $\Re_e$ désignent respectivement la vitesse d'avance en m.s^{-1} (fixé à 37 nœuds soit $\sim 19 \text{ m.s}^{-1}$) et le nombre de Reynolds de l'écoulement. S et c_w désignent respectivement la surface mouillée de la coque en m^2 et le coefficient de résistance de vague. Ces deux propriétés dépendent des variables de conception définissant la forme de la coque du navire : $S = S(\mathbf{x})$ et $c_w = c_w(\mathbf{x})$. Compte tenu de la complexité de la forme des coques et de l'écoulement, il n'existe pas d'expression analytique décrivant les fonctions $S(\mathbf{x})$ ou $c_w(\mathbf{x})$. Par contre, pour chaque point $\mathbf{x}$ de l'espace de conception, il est possible d'évaluer ces fonctions à l'aide du logiciel spécialisé NAPA.

Le deuxième critère quantifie la vague générée et il est évalué à partir de la hauteur des vagues ξ calculée à une distance donnée de la coque. La hauteur des vagues est évaluée par le logiciel ShipFlow et elle permet de calculer le deuxième critère avec la relation suivante :

$$F_2(\mathbf{x}) = \text{Wash} = \sqrt{\frac{1}{u_2 - u_1} \int_{u_1}^{u_2} \xi(u, \mathbf{x})^2 du} [\text{m}]$$

où :

- u désigne l'abscisse parallèle à la direction de l'avancement. L'intersection de l'étrave avec la ligne d'eau est choisie comme origine des abscisses ($u = 0$) ;
- u_1 et u_2 désignent les bornes inférieure et supérieure de u ;
- ξ désigne la hauteur de la vague correspondant à l'abscisse u (Fig. 1). La forme du profil de la vague dépend de la forme de la coque (donc de $\mathbf{x}$).

¹ Le projet FLOWMART (Fast Low Wash MARitime Transportation), en partie financé par la Commission européenne, est une collaboration entre 11 partenaires européens : FBM Marine Ltd., ALSTOM Leroux Naval, University of Strathclyde – Ship Stability Research Centre, National Technical University of Athens – Ship Design Laboratory, Alpha Marine Ltd., Sirehna, SSPA Maritime Consulting AB, Marintek, Tjärnö Marine Biological Laboratory, Department of Marine Technology – University of Newcastle upon Tyne et LMG Marin AS. L'objectif de ce projet est le développement d'un critère de minimisation du « wash effect » et de son impact environnemental. Réf. EC Growth project GRD1-1999-10959.

Fig. 1. Profil de la vague.

Ce critère, choisi pendant la première phase de l'étude, n'est pas forcément satisfaisant vis-à-vis de l'objectif réel recherché (réduction des effets du Wash sur l'environnement). Il pourra cependant être remplacé par des critères plus pertinents lorsqu'ils seront disponibles, sans que les conclusions du présent travail soient remises en cause.

La méthode utilisée est basée sur la résolution de l'écoulement potentiel à surface libre non linéaire. Selon les conseils d'utilisation du logiciel d'analyse hydrodynamique, le domaine fluide est modélisé par un maillage qui couvre la surface libre sur une demi-longueur du navire (LPP) avant l'étrave, six longueurs derrière l'étrave et une longueur dans la direction transversale à l'avancement. Le calcul est effectué en profondeur infinie, à la vitesse de 37 nœuds et avec liberté d'assiette et d'enfoncement.

3 Répartition des tâches entre les partenaires du projet

Les fonctions critère et les contraintes du problème d'optimisation peuvent être évaluées localement pour chaque point $\mathbf{x}$ à l'aide de logiciels spécialisés. Pour cela il a été fait appel à trois entreprises européennes spécialisées dans la conception, l'optimisation et la réalisation des navires. Les tâches ont été assignées aux entreprises selon la disponibilité et les compétences.

- L'entreprise Chantiers de l'Atlantique, site de St. Nazaire en France, a géré la représentation paramétrique de la carène avec le logiciel NAPA, spécifique aux projets de navires, à partir du modèle numérique de la carène originale.
- La société SSPA, site de Goeteborg en Suède, a garanti l'évaluation des performances hydrodynamiques du navire en exploitant le logiciel ShipFlow.
- Enfin, la Société SIREHNA, site de Nantes en France, a géré et coordonné le processus d'optimisation en utilisant le logiciel *modeFrontier*.

Notons que les tâches attribuées à ces entreprises sont interdépendantes. À chaque étape de la procédure d'optimisation et en fonction de l'étape précédente, le logiciel *modeFrontier* génère un nouveau point $\mathbf{x}$ ou ensemble de

points de l'espace de conception décrivant la forme de la carène. Le logiciel NAPA permet alors de représenter la carène et d'évaluer la surface mouillée $S(\mathbf{x})$ et les autres caractéristiques géométriques impliquées dans des contraintes ou simplement intéressantes de suivre lors du processus. Le logiciel ShipFlow calcule le coefficient $c_w(\mathbf{x})$ et la fonction objectif $F_2(\mathbf{x})$ relative à l'énergie des vagues. ShipFlow utilise le modèle numérique de la carène représentée par NAPA pour générer le maillage nécessaire aux calculs des performances. Une interaction entre les trois sites distants est indispensable à chaque pas de l'optimisation.

4 Outils de communication à distance pour l'échange des données

L'utilisation des applications distantes et l'accès à des bases de données partagées sont les éléments principaux du travail à distance [8]. Afin d'automatiser la procédure d'optimisation faisant appel aux trois logiciels distants, il est nécessaire de prévoir des outils et des méthodes capables de gérer la fragmentation spatiale et disciplinaire des acteurs et des outils. Un outil de communication asynchrone a été mis en place.

Les outils de collaboration à distance peuvent être classés selon la nature de la connexion, i.e. synchrone ou asynchrone [9]. La première permet un échange en temps réel, c'est le cas par exemple d'une vidéoconférence. Le travail asynchrone consiste généralement en un échange non simultané de requêtes et réponses, comme l'e-mail, par exemple.

Le travail synchrone est sans doute plus approprié pour l'échange immédiat d'informations et d'idées et aussi plus puissant pour l'utilisation des ressources distantes. Cependant, il nécessite des structures de standardisation et de gestion de la sécurité plus complexes. Par exemple, l'accès à distance aux ressources d'un ordinateur demande la connaissance de l'adresse IP, l'existence d'un compte spécifique et une gestion de la sécurité de la connexion. Les entreprises sont particulièrement sensibles aux problèmes de sécurité, en particulier lorsque la communication est externe au réseau interne de l'entreprise. Plusieurs solutions sont actuellement développées pour s'affranchir de ces problèmes de sécurité sur les réseaux non internes ou privés. Par exemple, une solution propose de coupler les VPN (Virtual Private Network) avec des ordinateurs externes à l'entreprise et destinés exclusivement à la collaboration avec l'extérieur [10, 11].

Toutefois, notre solution doit être opérationnelle sans demander des changements importants dans l'organisation de l'entreprise. Pour cette raison nous avons décidé de tester un outil asynchrone développé par SIREHNA : Asydas (Asynchronous Distributed Application System).

Le logiciel Asydas est constitué d'une partie Client et d'une partie Serveur. L'application Client permet d'envoyer des requêtes de calcul au Serveur via e-mail en joignant les fichiers des données d'entrées et en spécifiant l'adresse du Serveur, le nom du script qui lance le calcul

Fig. 2. Chaîne de calcul.

et les fichiers attendus en sortie. L'application Serveur identifie le Client et vérifie son autorisation de lancer le calcul. Ensuite, elle lance le script et retourne automatiquement les fichiers contenant les résultats des calculs. Lors de cette procédure, le Client n'accède pas directement aux ressources du Serveur, son action est limitée à l'indication du nom du calcul requis. Le script qui lance le calcul est écrit et exécuté par le Serveur qui garde un contrôle complet de ses ressources. Une vérification de la signature électronique permet de garantir que le contenu de la requête du Client et de la réponse du Serveur n'a pas été modifié pendant le transfert. Un éventuel intrus simulant le processus Client pourrait seulement obtenir l'exécution du script autorisé.

Cette application permet donc d'utiliser des logiciels de calcul installés sur ordinateurs distants. Son architecture basée sur le protocole e-mail permet d'éviter les difficultés de communication entre les entreprises imposées par les pare-feu et d'éviter les procédures complexes comme l'ouverture de ports spécifiques.

L'application a été réalisée en Java, donc elle garantit l'indépendance par rapport au système d'exploitation. Son installation est très simple et nécessite seulement l'ouverture d'un compte e-mail.

Donc le logiciel Asydas, permet d'établir les liens entre les trois sites d'une façon asynchrone et automatique. Les données transitent par courrier électronique selon le schéma en figure 2.

Le caractère ouvert de *modeFrontier* et la légèreté de Asydas nous ont permis d'intégrer Asydas à la chaîne d'optimisation directement dans *modeFrontier*. Ce dernier gère à la fois l'optimisation et le flux des données, jouant ainsi le rôle de Client par rapport aux deux Serveurs distants.

À notre connaissance, il n'existe pas d'autres études sur l'optimisation collaborative menée de façon asynchrone et automatique sur plusieurs sites.

5 Définition de la forme de carène

Le processus d'optimisation prévoit la modification contrôlée de la forme de la carène originale. L'algorithme d'optimisation doit pouvoir établir une relation entre la variation de la forme et l'évolution des performances. De plus, le caractère distant de notre démarche impose d'adopter des solutions robustes pour limiter le plus possible les interruptions de la boucle de calcul.

La forme initiale de la carène a été fournie par les Chantiers de l'Atlantique qui ont aussi défini la paramétrisation. La forme de la partie concernée par l'écoulement a été modélisée à l'aide de 18 paramètres qui constituent les variables de conception du problème d'optimisation considéré. La figure 3 et le tableau 1 donnent la signification de chaque variable, de leurs bornes ainsi que les relations entre ces variables.

Les solutions du problème d'optimisation dépendent fortement du choix du paramétrage. Ce choix définit la nature et la dimension de l'espace de conception à explorer. Il doit établir la relation entre l'espace décrit par les spécifications fonctionnelles et celui des variables du problème d'optimisation. Toutefois le point de vue du concepteur est très « géométrique » et ne tient pas forcément compte de l'aspect mathématique de la stratégie d'optimisation². Nous avons donc conservé la paramétrisation, qui a une signification fonctionnelle pour

² La méthode de paramétrisation des carènes proposée par Harries [12, 13] est à notre avis très efficace et facilement gérable par les algorithmes d'optimisation.

Fig. 3. Paramétrage de la coque.

Tableau 1. Liste des paramètres.

Paramètre	Description	Valeur Initiale	Valeur MIN	Valeur MAX
LPP	longueur entre perpendiculaires	87,50	83,12	91,88
TDWL	tirant d'eau = tirant d'eau AV	4,2		4.20
BMAX	largeur maximale du navire	15	13,50	15,00
HMAX	hauteur maximale au BMAX	5,52		5.52
TAR	tirant d'eau au tableau arrière	2,059	1,85	2,26
BWLA	demi-ouverture de la <i>wl</i> au tableau arrière	6,195	6,10	6,50
BHCA	demi-ouverture du bouchain haut au tableau arrière	6,039	5,54	BWLA
BICA	demi-ouverture du bouchain inférieur au tableau arrière	1,258	1,13	1,38
ZHCA	hauteur du bouchain haut au tableau arrière	4,129	3,72	4,20
ZICA	hauteur du bouchain inférieur au tableau arrière	2,42	> 4,20 – TAR	2,66
TMI	tirant d'eau au couple milieu	2,171	1,95	2,39
BWLM	demi-ouverture de la <i>wl</i> au couple milieu	6,195	6,10	6,50
BHCM	demi-ouverture du bouchain haut au couple milieu	6,039	5,54	BWLM
BICM	demi-ouverture du bouchain inférieur au couple milieu	1,28	1,15	1,41
ZHCM	hauteur du bouchain haut au couple milieu	4,013	3,61	4,20
ZICM	hauteur du bouchain inférieur au couple milieu	2,42	> 4,20 – TMI	2,66
SANG	angle d'étrave	73,22	65,90	80,54
EAWL	angle d'entrée d'eau à la <i>wl</i>	12,88	11,59	14,17
TAV	tirant d'eau avant de l'étrave	2,28	2,05	2,28

les experts, en apportant des adaptations pour la rendre gérable par le logiciel d'optimisation et les logiciels de calcul.

La paramétrisation proposée initialement avait un domaine de variation large dans l'objectif d'explorer des solutions très variées. Toutefois un tel paramétrage produit un nombre trop élevé de configurations non réalisables, i.e. dont la géométrie ne peut pas être générée ou n'est pas acceptable ou dont les performances ne peuvent pas être calculées par les solveurs. En effet, les calculs de l'écoulement nécessitent un maillage qui évolue avec la carène, donc des variations trop importantes des paramètres peuvent produire des maillages inadéquats. Pour ces raisons le paramétrage initial doit évoluer avec des variations plutôt faibles (5 %) autour des valeurs qui décrivent la carène initiale. Après une première optimisation et analyse de sensibilité par rapport aux variables, la solution peut être raffinée en fixant les variables peu significatives et en élargissant les bornes des variables qui migrent fortement vers les valeurs limites.

Par ailleurs, nous avons assigné à certaines variables des limites en fonction d'autres variables (Tab. 1). Il s'agit d'une solution aux problèmes de cohérence dans le domaine des fonctions objectif. Elle permet de fournir à l'algorithme d'optimisation un espace de conception compact et homogène. En fait, si toutes les variables étaient libres de varier sans aucune limitation réciproque, ils existeraient des zones du domaine qui ne seraient pas calculables (par exemple des carènes non physiques ou non réalisables).

Pour garder des variables avec des bornes indépendantes on pourrait imposer des contraintes géométriques. Faire respecter ce genre de contraintes permettrait d'éliminer les formes incohérentes, mais ce contrôle est fait a posteriori et génère beaucoup de calculs inutiles.

Le choix d'imposer des bornes en fonction d'autres variables réduit remarquablement le nombre d'échecs de la CAO (de 95 % à 5 %), par contre la fonction objectif devient plus compliquée. Donc cette solution est déconseillée si les calculs sont très rapides³ ou si la fonction à optimiser est déjà très compliquée. Toutefois notre problème demande des évaluations qui durent plus de 40 minutes⁴ et les fonctions objectif ne présentent vraisemblablement pas d'irrégularités⁵.

³ Dans ce cas nous pouvons faire face aux « trous » dans le co-domaine avec une forte densité des calculs qui permettra de bien définir les frontières des parties faisables.

⁴ La génération automatique de la forme avec CAO demande environ 2 minutes, les échanges asynchrones des données durent en moyenne 10 minutes (pour les deux aller-retour), enfin, les calculs hydrodynamiques demandent 30 minutes (nombre total de facettes 1967 dont 600 pour le maillage de la surface libre).

⁵ Une indication peut être donnée par la difficulté à construire une fonction d'approximation (surface de réponse) qui utilise des méthodes de auto-apprentissage (Neural Networks, Gaussian Process).

Donc nous avons choisi d'augmenter la complexité des fonctions objectif pour augmenter considérablement l'homogénéité de l'espace de conception.

Ces choix sur le paramétrage sont basés sur des réflexions de caractère général, mais dans notre cas ils sont particulièrement appropriés, puisqu'ils permettent de réduire le nombre d'évaluations infaisables. Le caractère distant de notre démarche impose d'adopter des approches robustes pour limiter le plus possible les interruptions de la boucle de calcul.

6 Nature et format des données échangées

Chaque ensemble de paramètres, identifiant une carène, est considéré comme un point dans l'espace de conception multidimensionnel. À chaque étape de l'optimisation, le logiciel *modeFrontier* évalue le point qui vient d'être calculé et décide un nouveau point ou un ensemble de points à calculer. Ensuite, le vecteur $\mathbf{x}$ est généré et transmis au logiciel NAPA à l'aide de l'application Asydas (Asynchronous Distributed Application System). L'application NAPA est alors lancée automatiquement et la forme de la coque correspondante au nouveau vecteur de conception est créée. L'application évalue les contraintes et les éléments nécessaires au calcul des fonctions critère et génère les données géométriques nécessaires à la réalisation du maillage qui sera générée par le logiciel ShipFlow. Asydas récupère ces données et lance automatiquement à distance l'application ShipFlow. Les résultats sont ensuite récupérés dans *modeFrontier* qui continue la recherche de la solution optimale. Le parcours évolue progressivement vers une amélioration des performances identifiées comme objectifs.

Dans le cas d'un processus d'optimisation en local, i.e. avec accès direct aux ordinateurs et aux logiciels, il est possible d'utiliser un format standard d'échange de données (par exemple un format step, iges ou directement le format NAPA pour la génération du maillage). Le cas échéant, l'utilisateur, qui a facilement accès aux données échangées, peut d'abord constater l'erreur, puis éventuellement apporter les corrections appropriées. Dans le contexte de l'optimisation à distance, le réglage est plus compliqué. En effet, les composants de la chaîne de calcul sont moins accessibles et les configurations des calculs ne sont pas visibles à tous les partenaires. Par exemple si le Client détecte des anomalies dans les sorties du Serveur, il n'a pas toujours l'expertise et surtout l'accès pour intervenir directement.

Pour garantir la pleine indépendance entre les logiciels utilisés et pour laisser la liberté à chaque partenaire d'accomplir sa tâche, nous avons décidé d'échanger les informations avec le format le plus élémentaire possible. Les données échangées doivent être neutres, ainsi les anomalies sont facilement détectables et communicables. De plus, chaque acteur doit être responsable de la transposition des données entre le format échangé et celui requis par son logiciel. La démarche mise en place est générale et peut être appliquée pour chaque problème

Fig. 4. Formats ASCII pour les paramètres, les couples de la carène et le profil de la vague.

qui nécessite une chaîne de calculs distribués. Les logiciels utilisés doivent seulement garantir le fonctionnement en mode batch et la lecture-écriture des données en format ASCII.

Les paramètres qui décrivent la carène sont contenus dans un simple fichier ASCII avec indication à chaque ligne du nom de la variable et de sa valeur correspondante. La forme de la carène obtenue est définie par le plan des couples décrit en format ASCII par les coordonnées des points des couples. Enfin les performances obtenues après l'évaluation de l'écoulement sont aussi échangées en format ASCII. Par exemple l'information sur la vague générée par le navire est donnée par les coordonnées des points qui définissent le profil de la surface libre. La figure 4 donne un exemple des formats utilisés et des données correspondantes.

Après avoir défini la nature des informations échangées, chaque partenaire a développé les interfaces nécessaires et a testé l'échange des fichiers et le lancement automatique des logiciels. L'action des deux partenaires du côté Serveur est nécessaire seulement en phase de réglage. Après le lancement de la procédure d'optimisation, le Client garde le contrôle total de l'évolution du processus et fait appel aux partenaires uniquement en cas d'anomalie ou pour commenter les résultats.

7 Choix de l'algorithme et des paramètres opératoires d'optimisation

Nous avons choisi l'algorithme génétique (MOGA : Multi-Objective Genetic Algorithm) [14–17] disponible

dans *modeFrontier*. Ce choix est motivé par la robustesse de l'algorithme, caractéristique indispensable pour l'optimisation à distance. Comme nous l'avons déjà souligné dans les paragraphes précédents, la boucle de calcul est moins fiable qu'un simple calcul local. L'algorithme d'optimisation doit se confronter à des interruptions ou des retards sur la ligne de communication, des erreurs dans la génération automatique du maillage, des erreurs dans les codes de calcul, des coupures de courant chez l'un des partenaires, etc.

Donc les conditions de continuité et de dérivabilité pour les objectifs et les contraintes (ces fonctions ne sont pas explicites) dans ce contexte multi-site ne sont pas assurées sans interruptions. Ainsi nous avons exclu les algorithmes d'optimisation traditionnels qui utilisent le gradient [18].

D'autre part, l'algorithme génétique est capable de gérer l'échec de certaines évaluations sans compromettre l'évolution et la continuité du processus d'optimisation. Les points de discontinuité n'interrompent pas la recherche, ils sont considérés comme un bruit de l'évaluation de la fonction objectif.

La méthode de recherche du MOGA a aussi deux autres aspects très intéressants : elle favorise l'obtention de solutions globales et garantit une optimisation réellement multi-objectif. Les algorithmes d'optimisation déterministes classiques abordent le problème d'optimisation en réduisant les objectifs à une combinaison pondérée des objectifs. D'autre part les plus récents algorithmes stochastiques globaux, comme le MOGA, permettent de conduire une véritable optimisation multi-objectif avec définition finale de la frontière de Pareto [19].

Ces algorithmes demandent un nombre plus élevé de calculs, mais permettent d'avoir une idée complète de l'espace de conception et de tous les possibles compromis optimaux entre les objectifs.

La réduction des objectifs de conception à une combinaison pondérée limite l'optimisation à une recherche du meilleur compromis selon les poids fixés en avance. D'autre part la frontière de Pareto regroupe tous les compromis optimaux et l'ingénieur peut choisir a posteriori la combinaison la plus appropriée en connaissant les gains et les pertes. Tous les points sur la frontière de Pareto sont équivalents du point de vue de l'optimisation. C'est l'expert qui doit choisir le ou les points qui lui conviennent, selon des critères ultérieurs qui lui sont propres (par exemple la simplicité de réalisation).

Sans perte de généralité, nous pouvons donner de brèves indications sur le fonctionnement de l'algorithme génétique utilisé.

L'algorithme procède par évaluations de populations successives. Chaque nouvelle population contient des individus qui sont le résultat de l'évolution des générations précédentes. L'évolution est conduite par sélection-reproduction et par sélection-mutation.

L'algorithme gère les points qui ne respectent pas les contraintes en les pénalisant de manière proportionnelle à leur écart.

Pour commencer l'optimisation un premier groupe de carènes est calculé, cette première population doit fournir les informations initiales sur l'espace de conception du problème. L'algorithme pour le choix des premiers individus est un simple générateur aléatoire. La dimension des populations a été fixée à 40 individus⁶.

Pour limiter le temps CPU, nous évaluons l'écoulement seulement si les carènes respectent les contraintes géométriques sur le déplacement, le GM et la surface du tableau arrière. Donc, parmi les formes générées par les Chantiers de l'Atlantique, seulement celles qui respectent les contraintes seront expédiées à SSPA pour l'évaluation des objectifs. Les données qui manquent pour la définition complète des carènes qui ne respectent pas les contraintes sont fournies par une surface de réponse qui en extrapole les valeurs (RSM : Response Surface Method).

Le schéma en figure 5 représente plus en détail la gestion des échecs, des contraintes et des extrapolations par surface de réponse.

L'information fournie par les solutions qui dépassent les limites n'est pas moins importante que celle donnée par les carènes correctes. Toutefois, l'algorithme d'optimisation pénalise ces solutions infaisables en modifiant la valeur des fonctions objectif. La précision demandée pour les valeurs à pénaliser est donc inférieure. Pour ces raisons les individus sont conservés, mais les objectifs associés sont extrapolés. Seule la population initiale a été calculée

Fig. 5. Gestion des contraintes et des surfaces de réponse.

entièrement : il s'agit de la génération qui explore largement l'espace et qui est utilisée pour la première construction des surfaces de réponse.

Pour réduire ultérieurement le temps de calcul, les surfaces de réponse sont également utilisées pour l'extrapolation de 40 %⁷ des individus de chaque nouvelle génération. Les surfaces de réponse sont mises à jour après l'évaluation des points réels de chaque génération.

L'utilisation des surfaces de réponse est aussi très adaptée au caractère spécifiquement distant de notre optimisation. En effet, cette technique permet de « boucher les trous » causés dans le domaine par les éventuels échecs. Avec cette procédure de reconstruction par extrapolation, les carènes qui ont échoué pour des raisons non liées à la forme géométrique ne sont pas excessivement pénalisées.

Pendant une optimisation en local il est possible de vérifier tous les cas d'échec et d'éliminer ceux qui ne sont pas causés par de mauvaises géométries. Dans notre cas, un processus de réglage plus fin aurait demandé trop de temps, nous avons donc préféré remplacer les points problématiques par des points virtuels.

⁶ La dimension conseillée est de deux fois le nombre d'objectif fois le nombre des variables, mais nous avons considéré que les deux objectifs ne seront pas trop conflictuels, donc la dimension de la population peut être proche à seulement deux fois le nombre des variables [15].

⁷ Les évaluations de l'écoulement ont été effectuées pendant la nuit, donc, si on considère que chaque carène demande environ 40 minutes, le maximum des individus réellement calculables est de 24 par nuit, soit 60 % d'une génération.

Les techniques utilisées pour les surfaces de réponse sont une méthode de Processus Gaussien [20] pour les objectifs⁸ et une méthode de Kriging [15] pour les caractéristiques géométriques.

La première méthode est très robuste en extrapolation car elle utilise un algorithme d'optimisation interne pour définir les paramètres qui lui permettent d'assimiler les données fournies et d'extrapoler ensuite les points inconnus.

Puisque les caractéristiques géométriques sont calculées pour 60 % des évaluations et qu'elles n'ont pas d'influence directe⁹ sur les choix de l'algorithme pendant l'optimisation, la surface de réponse sert simplement à conserver les valeurs connues et les sortir au moment de l'extrapolation. Pour ces tâches l'algorithme de Kriging est parfait.

8 Résultats

Nous avons configuré le processus d'optimisation pour garantir surtout la robustesse de la boucle de calcul. Toutefois l'optimisation a donné des résultats très intéressants après seulement quatre générations. Donc la qualité de la recherche n'a pas été pénalisée par ces choix.

Les évaluations effectuées ont permis d'établir une tendance générale et de définir l'influence de chaque paramètre sur les performances. En outre, la résistance totale a été réduite de 10,8 % et le « Wash Effect » de 7,9 % par rapport à la forme originale.

Les deux objectifs n'ont pas présenté une conflictualité excessive. La frontière de Pareto est très courte, comme on peut le remarquer sur la figure 6.

L'évolution de l'optimisation peut être résumée en trois étapes : dans la population initiale, les individus étant choisis aléatoirement, certaines contraintes (en particulier GM) ne sont pas respectées (zone des points réels non faisables en haut à gauche de la Fig. 6) et le nuage de points est reparti dans toutes les directions. La deuxième et la troisième génération commencent à créer des améliorations en faisant varier les paramètres. Cette recherche conduit progressivement à des carènes à faible déplacement, donc cette contrainte devient active. Enfin, la dernière génération contient des solutions nettement meilleures que la carène originale, même si cette dernière fait partie de la zone des carènes à performances élevées.

Les statistiques du processus d'optimisation peuvent être résumées par le tableau 2.

À l'issue de ces résultats, l'optimisation a été poursuivie en virtuel (100 % des individus extrapolés par les surfaces de réponse) et nous avons remarqué que l'algorithme

⁸ La surface de réponse extrapole directement la valeur de Wash et celle de C_w avec laquelle nous évaluons ensuite la résistance totale.

⁹ Par contre la dimension de la surface mouillée a beaucoup d'importance pour l'évaluation de la résistance totale, pour cette raison elle a été extrapolée avec le « Gaussian Process » comme le Wash et le C_w .

Fig. 6. Les deux objectifs confrontés.

Tableau 2. Résultats du processus d'optimisation.

Nombre de générations	4
Nombre total d'individus	160
Nombre d'appels aux logiciels d'analyse	112
Nombre de points évalués avec surfaces de réponse	54
Nombre d'échecs	6
Réduction de l'objectif $F_1 = (R_t)$	-10,8 %
Réduction de l'objectif $F_2 = (Wash)$	-7,9 %
Temps CPU total	75 h

allait vers un affinement des carènes 143 et 151 sans changements importants sur la forme.

Les Chantiers de l'Atlantique ont alors visualisé les résultats et ont choisi la forme 151 qui présentait des caractéristiques géométriques intéressantes et des performances élevées, tout en conservant un déplacement, et donc une fonctionnalité, proche de l'originale.

Les Chantiers de l'Atlantique ont ensuite lissé la carène 151 et modifié légèrement les formes pour améliorer la connexion avec les superstructures. La carène modifiée a alors été calculée pour vérification.

La figure 6 présente le nuage de points dont font partie la carène originale et les deux solutions de la frontière de Pareto.

Sur la figure 7 les deux carènes et la carène originale sont visualisées avec les performances respectives.

9 Conclusions

Dans ce papier, nous avons présenté une expérience particulière d'une approche novatrice pour l'automatisation de l'optimisation multi-sites.

Le contexte multi-sites de l'environnement industriel a orienté une grande partie des choix et des stratégies illustrées [21]. Malgré toutes les contraintes imposées par ce contexte, une amélioration notable des performances du navire a été obtenue. La résistance à l'avancement est réduite de 10,8 % et la vague de 7,9 %, par rapport aux performances de la configuration initiale. De plus, l'exploration d'un nombre important de configurations a généré une capitalisation de connaissances pour les experts qui

Fig. 7. Comparaison entre les carènes.

ont participé au projet, notamment pour ce qui concerne la dépendance entre la forme et les performances [14].

Ce travail a permis également de recenser les conditions nécessaires à la mise en place d'une optimisation multi-sites et des solutions spécifiques ont été testées et validées.

L'étape d'optimisation pourrait être poursuivie par une analyse de sensibilité et de robustesse de la solution obtenue.

L'objectif principal de cette étude était de démontrer la faisabilité d'une d'optimisation multi-sites dans un contexte industriel.

Les avantages d'une telle démarche sont nombreux :

- les logiciels de calcul sont utilisés chez les partenaires sans changement de machines, de licences ou de modalités d'emploi. La phase de réglage des logiciels

est donc menée localement par des utilisateurs experts ;

- la méthode de communication est complètement générale et peut être appliquée à d'autres problèmes qui demandent des évaluations isolées, en série ou faisant partie d'un processus d'optimisation ;
- la méthode de communication nécessite un simple accès à une messagerie électronique et donc sans fortes contraintes pour la gestion de la sécurité de l'entreprise ;
- la méthode de conception est améliorée car les échanges d'informations et d'expertise interviennent très tôt dans la phase de projet et ils sont guidés par le processus d'optimisation. Donc notre stratégie associe les éléments positifs de la collaboration aux bénéfices d'une solution finale optimisée.

Remerciements. Les auteurs désirent remercier la Commission européenne pour le financement du projet FLOWMART et de la bourse Marie Curie Host Fellowship DCOPT. Sont aussi remerciés MM. Florent Longer et Loïc Morand de Alstom Marine et M. Michael Leer-Andersen de SSPA pour leur contribution à cette recherche.

Références

- [1] R.I. Winner, J.P. Pennel, H.E. Bertrand, M.M.G. Slusarezuk, The Role of Concurrent Engineering in Weapons System Acquisition, IDA Report R-388, Institute for Defence Analyses, Alexandria VA, 1988
- [2] G. Pahl, W. Beitz, Engineering Design. A Systematic Approach, Springer Editor, 1996
- [3] M. Wooldridge, Agent-Based software Engineering, IEEE Proceeding in Software Engineering 144 (1997), 26–37
- [4] L. Chen, S. S. Rao, A fuzzy kinetostatic analysis of imprecisely-defined mechanism, Journal of Mechanical Design 120 (1998), 377–380
- [5] M. Sakawa, Fuzzy sets and interactive multi-objective optimization, Plenum Press, New York, 1993
- [6] F. Bennis, P. Chedmail, Toward the use of the fuzzy approach in mechanical design, IEEE International Conference of Intelligent Engineering Systems, StaraLesna, Slovakia, 1999, 363–368
- [7] D. Paulet, D. Presles, Architecture Navale, Les Éditions de la Vilette, Paris, 1998
- [8] V. Jagannathan, K.J. Cleetus, R. Kannan, A.S. Matsumoto, J.W. Lewis, Computer Support for Concurrent Engineering: Four Strategic Initiatives, Concurrent Engineering, September–October, 1991, pp. 14–30
- [9] A.V., Travail Collaboratif, Industries et Techniques 828 (2001), 111–118
- [10] S. Meinecke, F. Féru, Advanced Product Data Management Concept, Enhance Forum 3, Toulouse, 2002
- [11] L. Van Rijn, G. Hameetman, Secure Distributed Collaboration with Heterogeneous Product Data Management, Enhance Forum 3, Toulouse, 2002
- [12] S. Harries, Parametric Design and Hydrodynamic Optimisation of Ship Hull Forms, Mensch & Buch Verlag, Berlin, 1998

- [13] S. Harries, F. Valdenazzi, C. Abt, U. Viviani, Investigation on Optimisation Strategies for the Hydrodynamic Design of Fast Ferries, 6th International Conference on Fast Sea Transportation, Southampton, 2001
- [14] C. Poloni, A. Giurgevich, L. Onesti, V. Pediroda, Hybrization of a Multi-Objective Genetic Algorithm, a Neural Network and a Classical Optimizer for Complex Design Problem in Fluid Dynamics, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Elsevier Science Ltd., North-Holland, 1999
- [15] Manuel de l'utilisateur *modeFRONTIER* : <http://www.esteco.it>
- [16] D. Quagliarella, J. Periaux, C. Poloni, G. Winter, Genetic Algorithms and Evolution Strategies in Engineering and Computer Science, John Wiley & Sons, England, 1997
- [17] G. Mosetti, C. Poloni, Aerodynamic Shape Optimization by Means of a Genetic Algorithm, 5th International Symposium on Computational Fluid Dynamics, Sendai, Japan, 1993
- [18] D.E. Goldberg, M. Kelsey, C. Tidd, Genetic Algorithm: A Bibliography, (IlliGAL Report No. 92208), University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois Genetic Algorithm Laboratory, Urbana, USA, 1992
- [19] H. Eschenauer, J. Koski, A. Osyczka, Multicriteria Design Optimisation Procedures and Applications, Springer-Verlag, Berlin, 1990
- [20] D.J.C. MacKay, Introduction to Gaussian Process, Neural Networks and Machine Learning, NATO Asi Series, Series F, Computer and Systems Sciences 168 (1998)
- [21] F. Mistree, D. Muster, W. F. Smith, B. Bras, J.K. Allen, Decision-Based Design: A Contemporary Paradigm for Ship Design, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City, New Jersey 18 (1990) 1–28