



Conception d'un grand multicoque de course au large : l'exemple d'ORANGE 2

Franck Martin, Bertrand Alessandrini, Laurent Gornet, Gilles Marckmann,
Philippe Rolland

► To cite this version:

Franck Martin, Bertrand Alessandrini, Laurent Gornet, Gilles Marckmann, Philippe Rolland. Conception d'un grand multicoque de course au large : l'exemple d'ORANGE 2. ATMA, 2006, Paris, France. hal-01156152

HAL Id: hal-01156152

<https://hal.science/hal-01156152>

Submitted on 4 Nov 2016

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.

CONCEPTION D'UN GRAND MULTICOQUE DE COURSE AU LARGE - L'EXEMPLE D'« ORANGE II »

Par

Franck MARTIN
Architecte naval

Gilles Ollier Design Team / MULTIPLAST

Ont également contribué à la rédaction de ce mémoire :

- Bertrand ALESSANDRINI, chercheur au laboratoire d'hydro de l'Ecole Centrale de Nantes
- Laurent GORNET, chercheur au laboratoire matériaux de l'Ecole Centrale de Nantes
- Gilles MARCKMANN, chercheur au laboratoire matériaux de l'Ecole Centrale de Nantes
- Philippe ROLLAND, gérant de la société Avantage Service Contrôle

Sommaire

Le 24 janvier 2005, le catamaran « Orange II » franchissait la ligne de départ du trophée Jules Verne au large d'Ouessant. En recoupant cette ligne 50 jours 16 heures 20 minutes et 4 secondes plus tard, le maxi-multicoque établissait un nouveau temps de référence en battant de plus d'une semaine le record du tour du monde. L'objet de ce mémoire est d'exposer la démarche architecturale qui a permis d'aboutir à cette performance. Quelques aspects particuliers concernant les matériaux et la mise en œuvre de grandes pièces composites seront abordés. Il sera aussi fait mention de la méthode d'analyse des données recueillies pendant cette circumnavigation.

Summary

The 24th of January 2005, the catamaran « Orange II » crossed the starting line of the Jules Verne Trophy at Ushant Island. By cutting the ligne 50 days 16 hours 20 minutes and 4 seconds later, the maxi-multihull set up a new reference time beating by more than a week the former round the world record. The goal of this paper is to outline the architectural process which could lead to this performance. Some particular aspects concerning the materials and the construction of large composite parts will be discussed. The method of analysis of the data collected during the circumnavigation will also be exposed.

1. LE CAHIER DE CHARGES :

a) Les bateaux existants

Le problème se pose de manière simple : concevoir et construire un voilier capable de battre le record du tour du monde qui était de 64 jours à l'époque. Ce record était détenu par « Orange I », catamaran Gilles Ollier Design Team de 32.60 mètres sister-ship de Club Med.

b) La hiérarchie des critères de conception

Un tour du monde est avant tout un parcours d'endurance. Le bateau, bien que soumis à des conditions de navigation très difficiles, particulièrement dans les mers du sud, doit franchir la ligne d'arrivée. Le premier critère de conception est donc la **fiabilité**, c'est-à-dire que la tenue aux charges doit être suffisante pour éviter toute rupture d'équipement ou de pièce de structure.

Pour battre un record, il faut bien sûr aller vite. La **performance** est donc naturellement notre second critère. La recherche de performance consistera surtout à chercher à améliorer la vitesse moyenne sur un parcours donné et non pas la vitesse de pointe dans des conditions particulièrement favorables qui ne seraient pas représentatives de l'ensemble du parcours.

Pour pouvoir utiliser tout le potentiel du bateau, toutes les manœuvres doivent pouvoir être effectuées par un équipage. La **manœuvrabilité** vient compléter cette hiérarchie. La manœuvrabilité, outre le fait qu'elle participe à la performance, est aussi un élément de sécurité. En effet, quand le vent monte, l'équipage ne doit pas attendre pour réduire la surface de voile et il ne doit donc pas être rebuté par la difficulté de la manœuvre.

c) Bateau de records / bateaux de course

Il existe une différence d'approche entre la conception d'un bateau de course et la conception d'un bateau de record. En effet, ne connaissant pas a priori les conditions météorologiques qui règneront pendant la course, le concepteur doit privilégier la polyvalence, même si l'accent peut-être mis sur telle ou telle condition en fonction de données statistiques. En ce qui concerne les records, ils sont de deux sortes : les records plutôt courts dont la durée est au maximum de l'ordre de quelques jours. Pour un tel record, le navigateur aura tendance à attendre une météo favorable pour l'ensemble du parcours puis à privilégier l'orthodromie. La stratégie va être un peu différente pour un record long tel que le tour du monde. La fenêtre météo favorable ne concerne que le début du parcours jusqu'à l'équateur. Ensuite, le navigateur s'attachera à placer le bateau de telle sorte que la météo lui reste favorable, et ce au prix d'une augmentation de la distance parcourue. Dans les deux cas, le concepteur devra privilégier les allures rapides tout en gardant un potentiel correct dans des conditions plus lentes telles que le passage du pot-au-noir.

d) Les améliorations à apporter à la génération précédente :

Deux ans après la mise à l'eau de Club Med, un certain nombre d'équipements avait progressé de manière significative et nous permettait de concevoir un catamaran à la fois plus long et plus puissant sans diminuer la fiabilité ou la manœuvrabilité. Par exemple, la matière servant à fabriquer les nouvelles voiles nous a permis de dessiner un plan de voilure de plus grande surface sans augmenter la masse des voiles.

Une augmentation des francs-bords a trois avantages :

- Gagner en raideur longitudinale de plate-forme,
- Mieux protéger l'équipage des embruns,
- Réduire l'impact des vagues sur les bras de liaison plus hauts.

En revanche, une augmentation des francs-bords accroît la masse des coques et leur fardage.

L'un des paramètres stratégiques est constitué par la vitesse théorique de vent réel suffisante pour que le bateau navigue sur une seule coque. Ce paramètre est un bon indicateur de la vitesse de vent dans laquelle le catamaran sera le plus performant. Il a été décidé d'abaisser cette vitesse de vent de lever de coque. Cette modification va dans le sens de l'augmentation de la vitesse moyenne, mais n'a quasiment pas d'influence sur la vitesse de pointe.

Comme pour tous les voiliers, la raideur de la structure est un élément de performance important. Elle permet par exemple de minimiser les déformations du plan de voilure. Plus particulièrement, un dévers d'étai minimum permettra à la voile d'avant de garder sa meilleure forme, quels que soient les mouvements de la plate-forme dus aux vagues. L'ajout de renforts longitudinaux dans les coques et les bras augmentera cette raideur à moindre coût en terme de poids.

Le confort de l'équipage est un élément de sécurité et de vitesse. Un équipage en pleine forme et se sentant à l'aise sera plus concentré et plus performant. Les retours d'expérience des équipages sont particulièrement utiles pour améliorer ce point. Il est toutefois intéressant de noter qu'après l'arrivée de The Race, les équipages ayant navigué sur trois sister-ships n'avaient pas tous les mêmes commentaires quant à cette question.

Pendant toute la durée de la conception d'« Orange II », toute l'équipe n'a pas relâché son attention en ce qui concerne la chasse à la matière surabondante, donc au poids inutile. La vitesse des multicoques est très sensible au poids, surtout dans des vents portants.

L'équipage adapte le plan de voilure en fonction de la vitesse et de l'angle du vent réel. L'étagement de la réduction du plan de voilure doit être aussi régulier que possible afin d'éviter que le catamaran se trouve dans des conditions de vent pour lesquelles il ne dispose pas de voiles parfaitement adaptées. Cet étagement, qui peut d'une certaine façon se comparer à une boîte de vitesse, est fonction du moment de gîte, c'est-à-dire de la surface de voilure et de la hauteur de son centre d'effort.

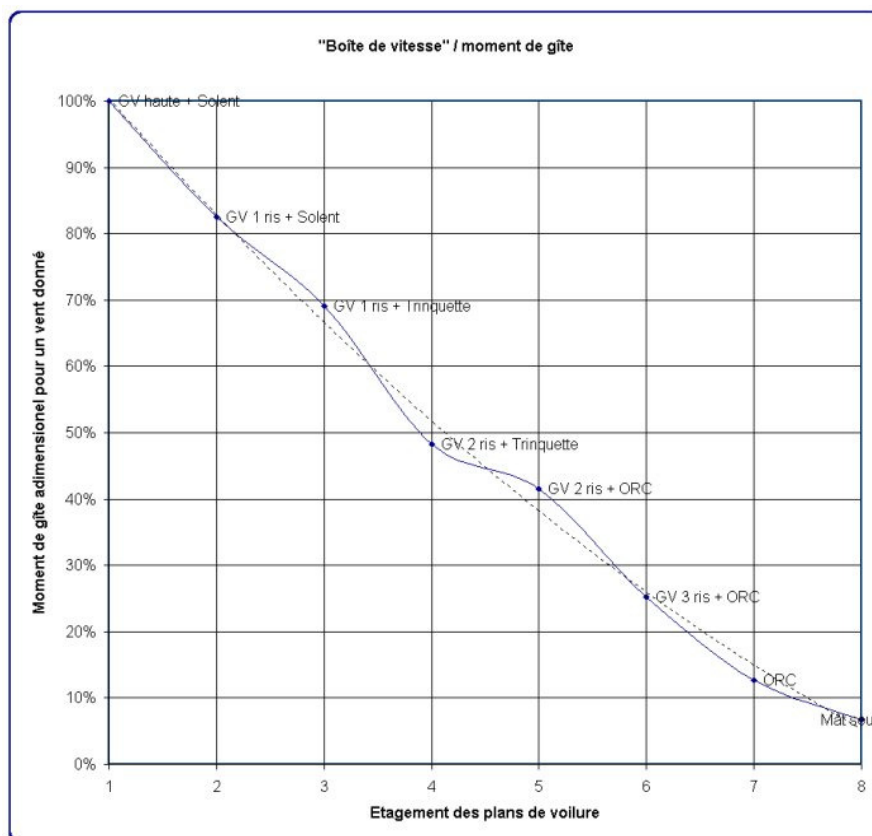


Figure 1 : Exemple de tracé de « boîte de vitesse »

2. AVANT PROJET :

a) Paramètres principaux

Un multicoque de compétition peut se résumer en une cinquantaine de paramètres principaux, dimensionnels ou non, tels que la surface de chaque voile ou le coefficient $(\text{surface de voilure})^{1/2}/(\text{Déplacement})^{1/3}$.

Chacun de ces paramètres est crucial tant pour estimer le potentiel de vitesse du bateau que pour le situer par rapport à la concurrence. Un bateau de records se situe par rapport à ses concurrents plutôt que dans l'absolu. La connaissance, ou au moins l'estimation, des paramètres de ces bateaux permet la constitution d'une base de données et donc de situer stratégiquement tout nouveau projet par rapport à ce qui existe.

b) Structure préliminaire

Les informations découlant des paramètres principaux sont suffisantes pour dessiner les premiers plans généraux, estimer les efforts, dessiner une première carène. On peut alors établir un pré échantillonnage des composants principaux de la plate-forme et du gréement. Ce pré-échantillonnage s'appuie sur des méthodes de calcul simplifiées, mais aussi en grande partie sur l'expérience des réalisations précédentes.

c) 1^{ère} boucle de devis de poids

Un modèle 3D encore assez simple combiné avec les éléments de structures déjà définis nous permettent de calculer un devis de poids pour lequel le niveau de confiance est suffisant pour entreprendre des simulations. Ce devis de poids est constitué de plusieurs milliers de ligne correspondant à autant de plis de carbone ou d'éléments d'équipement.

3. LES SIMULATIONS :

Un V.P.P. (Velocity Prediction Program) est un programme de simulation dédié à la prédiction des performances de vitesse du voilier. On renseigne ce programme avec toutes les caractéristiques d'un bateau propres à influencer ses performances (forme de carène, dimensions du plan de voilure, etc.). Le V.P.P. va résoudre l'équilibre des forces et des moments et renseignera l'utilisateur sur les performances d'une plate-forme en fonction de l'angle et de la force du vent.

Selon le temps et les moyens dont on dispose, plusieurs avant projets peuvent voir le jour. Chaque avant projet pourra être une déclinaison d'un concept global. Par exemple, on peut envisager plusieurs catamarans de 37 mètres dont les plans de voilure seront différents. On peut aussi envisager plusieurs avant projets de nature très différente comme un catamaran, un trimaran, etc.. Les bateaux de record ne s'inscrivant pas dans le cadre d'une jauge spécifique, il est important pour l'architecte de se créer ses propres règles afin de comparer des choses comparables. On peut imaginer par exemple de comparer des bateaux dont la longueur est la même ou plus prosaïquement dont le budget global est équivalent.

La gestion des efforts développés par les voiles passe par l'utilisation de winches et d'accastillage. On peut dire que la limite de savoir-faire concernant les grands multicoques dépend en grande partie du savoir-faire en matière d'équipement de pont et de voiles. Pour « Orange II », il nous a semblé judicieux de chercher à raisonner à moments de redressement maxima ($MR_{\max}$) constants, c'est-à-dire à stabilité constante. En effet, le $MR_{\max}$ a une influence directe sur les efforts développés par le plan de voilure, et donc sur la fiabilité et la manœuvrabilité. Le $MR_{\max}$ d'un multicoque est à peu près égal

à sa masse multipliée par sa demi-largeur. A longueur égale, un trimaran est plus large qu'un catamaran, donc plus stable. Par conséquent, à MR_{max} égal, un trimaran devra être plus petit. Le choix du MR_{max} est directement lié aux efforts capables d'être gérés par un équipage d'environ douze à quinze personnes et par l'équipement de pont disponible sur le marché.

Nous avons donc créé deux avant projets : un catamaran plutôt long et un trimaran plutôt large. Il nous semble illusoire de chercher des voies révolutionnaires supposées détrôner tout ce qui existe. Nul ne peut dire aujourd'hui avec certitude ce que seront les bateaux de records dans trente ans. Ils seront peut-être des évolutions des bateaux actuels. Ils pourront aussi être basés sur un concept complètement différent comme un hydrofoil ou un prao. Cependant, une entreprise liée par contrat à un client identifié avec des obligations de délais de livraison et de budget ne peut pas se permettre de proposer une solution qui n'a pas encore été éprouvée sur des tailles plus petites.

Ces deux avant projets étant définis, nous avons procédé aux simulations des deux plates-formes tri et cata avec l'aide de notre V.P.P.. Il en est sorti pour chaque solution un tableau à deux entrées dont chaque colonnes est un force de vent et chaque ligne est un angle de vent, chaque case de ce tableau contenant une vitesse. Ce tableau est souvent représenté sous forme de graphique polaire. De manière synthétique, on peut résumer le débat trimaran/catamaran à un débat entre le choix de la légèreté pour le tri contre le choix de la longueur pour le cata.

Nous disposons à ce moment de données statistiques de météo concernant le tour du monde. Ces données statistiques sont représentées sous la forme d'un tableau de même format que celui des performances mais dans lequel chaque case contient un pourcentage de temps passé pendant un tour du monde. En couplant un tableau de performance avec un tableau de données météo, on obtient la distance parcourue, et donc un classement des avant projets.

Les choses ne sont cependant pas si simples car les V.P.P. sont encore aujourd'hui très imparfaits. Même si la partie solveur est à peu près maîtrisée, il n'en demeure pas moins que les modèles physiques sont eux approximatifs. Un grand nombre de variables reste à ce jour mal évalué. On pourra citer :

- La réduction des performances due à l'état de la mer,
- La traînée additionnelle due aux embruns,
- L'influence de la souplesse de la plate-forme,
- Les polaires aérodynamiques des plans de voilure.

Cette liste n'est pas exhaustive.

Les résultats issus de V.P.P. sont donc à considérer avec beaucoup de circonspection. Il est essentiel de connaître les limites d'un programme de simulation afin de déterminer le crédit à apporter à ses résultats. Concrètement, le V.P.P. est surtout utilisé de manière relative, c'est-à-dire que l'on cherche à obtenir une hiérarchie de performances pour plusieurs projets qui se différencient par un nombre minimum de paramètres. Même si les vitesses prédites sont quelque peu différentes des vitesses mesurées en navigation, on espère au moins que la valeur optimale théorique d'un paramètre donné sera la même qu'en pratique.

Quoiqu'il en soit, les résultats de V.P.P. combinés avec l'expérience des concepteurs, les témoignages des navigants mais aussi avec les convictions du client, nous ont amenés, comme pour la génération précédente, à choisir l'option du catamaran long et plutôt étroit.

4. ETUDES HYDRODYNAMIQUES :

Le processus du dessin d'une coque d'un navire est immuable et est composé des trois étapes suivantes : dessin de la carène, évaluation, puis analyse de ses performances, qui s'enchaînent tant que le projet dispose de temps et d'argent.

L'optimisation des formes de carène est quant à elle aussi ancienne que la construction des navires. Même sans outils d'évaluation hydrodynamique, les premiers architectes essayaient de comprendre les phénomènes et de dessiner des formes de carènes performantes. Leur retour d'expérience basé sur le réel leur permettait alors de dessiner de nouvelles formes, et ainsi de suite, mais avec un temps de réponse très long.

L'arrivée des essais en bassin de traction a été une révolution : il était enfin possible de tester plusieurs concepts de formes de carènes et de retenir le plus performant avant la construction.

Depuis le début des années 80, des méthodes numériques permettant de calculer la résistance à l'avancement des navires sont apparues. Ces méthodes ont constamment évolué pour atteindre actuellement une certaine maturité. Ces calculs sont maintenant intensivement utilisés dans les phases de design de la plupart des projets. Cependant, la manière d'utiliser les calculs a été calquée sur la façon de réaliser des essais en bassin, et les méthodes de design n'ont que très peu évolué, ne tirant pas parti du principal atout du calcul sur les essais : la capacité d'automatisation complète de toute la chaîne de calcul.

Si l'étape d'évaluation décrite précédemment a énormément progressé, les deux autres étapes que sont le dessin de la carène et l'analyse des performances sont restées quant à elles entièrement manuelles, et n'ont que très peu évolué. Ces deux étapes sont dès lors devenues les points faibles de la méthode de design traditionnelle.

- Le premier point faible de ce processus est le temps passé à dessiner les nombreuses carènes ainsi que les pertes de temps liées aux échanges de fichiers et de résultats entre architectes et hydrodynamiciens. Il est en effet préjudiciable de passer plusieurs jours à dessiner une carène, et à transmettre le fichier, alors que seulement quelques heures suffisent à l'évaluer dans un processus automatique.
- Le second point faible est l'analyse des performances. En effet, les points de fonctionnement sont de plus en plus nombreux, et les géométries évaluées se sont multipliées, rendant la quantité d'information à traiter beaucoup trop volumineuse sans outils performants d'analyse. Il faut rappeler que cette étape de la boucle de design n'a pour seul but que la génération d'une nouvelle forme issue de l'analyse des résultats précédents. Cette carène devant être globalement plus performante compte tenu des objectifs et des contraintes du projet. Les algorithmes d'optimisation permettent de compléter avantageusement l'analyse de l'expert humain lorsque le nombre de paramètres et le volume des résultats deviennent très importants.

Description de la chaîne d'optimisation :

Afin de lever ces deux points faibles, et ainsi réduire le temps de conception et rendre le processus le plus efficace dans le temps de design imparti, une chaîne de design et d'optimisation complètement automatique a été mise en place en collaboration avec le Bassin d'Essais des Carènes (DGA-DCE) et MULTIPLAST. Ce processus repose sur un ensemble d'outils qu'il a fallu interfacer les uns avec les autres :

- Le début de la boucle est initié par le **modeleur**. Un modeleur paramétrique spécifique a été développé. Ce modeleur est une application capable de modéliser automatiquement des carènes à partir de formules mathématiques paramétrées. Les fonctions mathématiques dépendent du type de formes que l'on souhaite étudier et sont choisies de manière à s'adapter au mieux au type de formes souhaité. L'une des originalités de ce modeleur est que les fonctions mathématiques choisies peuvent évoluer suivant des lois de variations elles-mêmes paramétrées le long de l'axe longitudinal de la coque. Une forme de carène peut être caractérisée par quelques dimensions et coefficients comme par exemple la surface mouillée ou le coefficient prismatique. Cet outil sera particulièrement utile pour générer efficacement un très grand nombre de familles de carènes, chaque famille étant caractérisée par une gamme d'un ou plusieurs de ces coefficients en minimisant les variations de tous les autres coefficients et/ou grandeurs dimensionnelles comme le déplacement et le centre de carène, ce qui est très difficile avec les méthodes habituelles.

- Le modeler fournit généralement une description CAO de la géométrie de la carène. Un maillage volumique compatible avec la discrétisation des équations est ensuite généré à l'aide d'un *mailleur*.
- Le *solveur*, fondé sur la résolution des équations de Navier Stokes simule ensuite l'écoulement autour de la carène et permet d'accéder aux valeurs à optimiser (résistance à l'avancement, mouvement, position de lignes de courant...).
- Enfin le *logiciel d'optimisation*, intégrant les objectifs et les contraintes, qui gère l'ensemble du processus sur la base d'algorithmes permettant d'obtenir les extremums locaux ou globaux des fonctions considérées.

5. MATERIAUX :

a) Choix des fibres de carbone et des âmes

MULTIPLAST a été le premier chantier à concevoir et construire un multicoque de course au large entièrement en carbone. C'était en 1983. La technique utilisée à l'époque était la voie humide sur une mousse non-réticulée pour les coques et sur nid d'abeille aluminium pour les bras. Depuis, un certain nombre d'améliorations a vu le jour, tant dans les caractéristiques des matériaux que dans leur mise en œuvre. La technique retenue aujourd'hui est celle du pré-imprégné carbone/époxy sur une âme en nid d'abeilles Nomex®. Dans le domaine du composite, cette technique est certainement celle qui offre le meilleur rapport performance/poids. De plus, le pré-imprégné est la meilleure méthode pour obtenir des taux volumiques de fibres constants, donc un contrôle des poids le plus strict possible et une plus grande fiabilité puisqu'on évite les manques de résine toujours possibles avec d'autres méthodes telles que l'infusion ou la voie humide. La plate-forme du voilier subit des fortes sollicitations de type flexion ou torsion lors de la navigation. L'âme de la structure sandwich résiste principalement aux contraintes de cisaillement, de traction et de compression hors plan, les peaux en carbone époxy inférieures et supérieures supportent quant à elles les efforts dans leur plan. Un exemple de structure sandwich à peaux de carbone et âme Nomex® hexagonale est considérée sur la figure 2 :

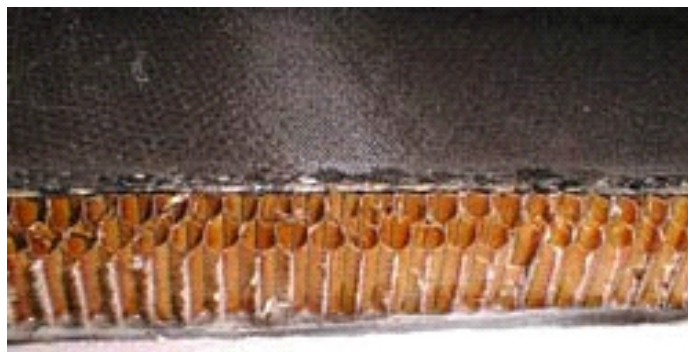


Figure 2 : Structure sandwich, peaux carbone époxy et âme Nomex®

Les éléments pour choisir les types de fibres de carbone qui seront utilisés pour réaliser chaque partie de la plate-forme sont principalement :

- La résistance à la rupture des matériaux envisagés (traction, compression, cisaillement),
- Les propriétés mécaniques élastiques ou raideur,
- Le coût des matériaux.

Il faut savoir que la fibre la plus résistante ne peut pas être la plus raide et que le coût d'une fibre croît de manière quasi exponentielle avec son module de raideur ou sa résistance.

Les éléments constitutifs des bordés de coques et de bras doivent résister à l'impact des vagues. D'autre part, d'un point de vue statique, les fibres drapées à $\pm 45^\circ$ sont soumises à un effort de traction et de compression dû à l'effort de torsion appliqué aux coques et aux bras. On choisira donc une fibre à haute résistance pour ces éléments.

La raideur d'une plate-forme est obtenue par le drapage de bandes de renforts longitudinaux situés le plus loin possible des axes d'inertie afin d'obtenir la plus grande raideur possible. En ce qui concerne les coques, ces renforts sont situés dans les livets d'une part et le long de la ligne de quille d'autre part. La fibre retenue est une fibre à haut module.

Le mât est sans conteste la pièce composite du bateau qui demande le plus d'attention. Sa raideur autant que sa masse ont beaucoup d'influence sur les performances. En effet, l'élasticité du mât en compression aura un effet néfaste direct sur le dévers d'étai. D'autre part, l'un des critères de dimensionnement du mât étant le flambement, on cherche à maximiser la valeur de la rigidité EI (module $\times$ inertie) en minimisant la prise de poids. Le mât est l'élément pesant dont le centre de gravité propre est le plus éloigné du centre de gravité global, donc il contribue beaucoup à l'amplification des mouvements dus aux vagues. Par conséquent, ce mât sera construit en fibre à très haut module.

b) Les âmes nids d'abeilles Nomex®

L'étude des propriétés mécaniques des constituants élémentaires est une étape primordiale dans la phase de validation des structures. Le comportement mécanique des différents matériaux élémentaires constituant le voilier doit être vérifié afin d'intégrer dans les simulations des données expérimentales en adéquation avec les structures fabriquées par les chantiers. Les catalogues des fabricants indiquent uniquement les propriétés mécaniques les plus importantes vis-à-vis du dimensionnement. Elles sont définies généralement à partir d'essais mécaniques réalisés pour des hauteurs de nid d'abeilles de 12,7 mm. Certaines caractéristiques mécaniques ne peuvent cependant pas être déterminées expérimentalement de manière simple. Elles sont alors calculées à l'aide de simulations éléments finis.

Ainsi, les propriétés mécaniques des âmes nids d'abeilles Nomex® constituant les sandwichs des voiliers sont évaluées à l'aide du logiciel NidaCore développé au GeM, UMR CNRS de l'Ecole Centrale de Nantes. Ce logiciel est fondé sur la mise en œuvre de la théorie de l'homogénéisation des milieux périodiques dans le cadre éléments finis. Outre la détermination des propriétés mécaniques tridimensionnelles des âmes Nomex®, le logiciel permet de déterminer toutes les contraintes ultimes et ainsi de créer une enveloppe de stabilité en rupture. Ces contraintes sont déterminées à partir des modes de flambement du volume élémentaire représentatif sous l'ensemble des sollicitations élémentaires. À titre d'illustration, le flambement du Volume Élémentaire Représentatif sous l'action des chargements de cisaillement est présenté sur la figure ci-dessous.

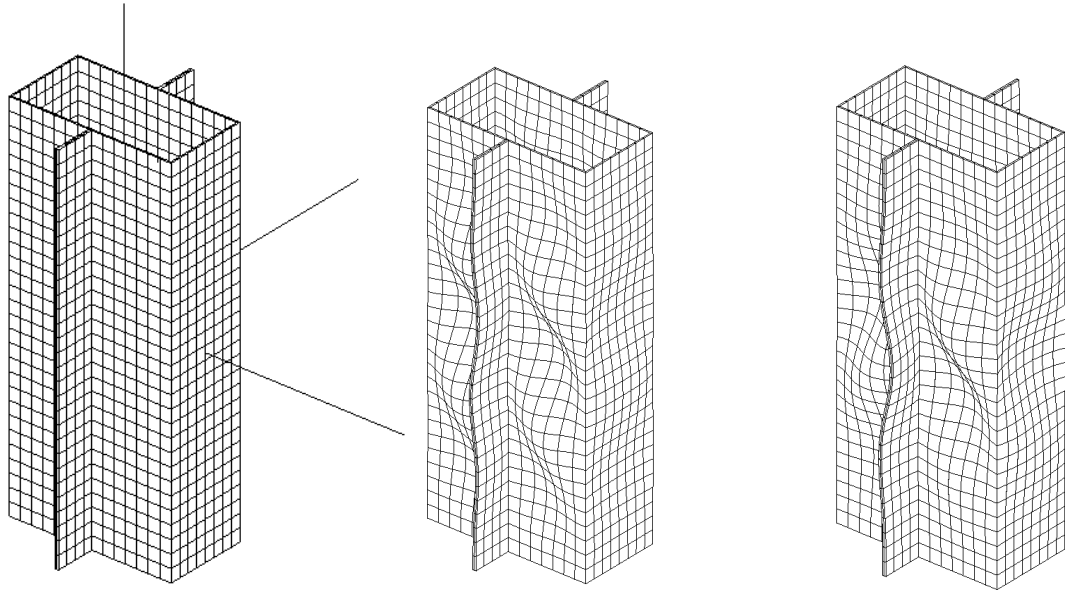


Figure 3 : Flambement du Nomex ECA-R Déformée de flambement du VER sur-expansé sous l'action des chargements de cisaillement hors plan E_{13} et E_{23} .

Les caractéristiques mécaniques du papier utilisé dans la fabrication des nids d'abeilles sont déterminées de manière inverse par recalage des modules de cisaillement hors-plan. Les modules de cisaillement hors plan, les contraintes de rupture de cisaillement associées ainsi que la contrainte d'écrasement sont les seules données usuellement fournies par les constructeurs. Ces seules données sont insuffisantes. Le logiciel permet d'obtenir l'ensemble des caractéristiques mécaniques des âmes Nomex® permettant ainsi de nourrir des modèles éléments finis.

c) Méthodologie expérimentale d'identification des carbone époxy

Il convient de rappeler que l'échelle microscopique est liée aux dimensions et à l'arrangement des fibres dans la matrice alors que l'échelle mésoscopique est liée à celle de la couche élémentaire. La modélisation des matériaux composites stratifiés carbone époxy est effectuée à l'échelle du pli élémentaire. Une fois déterminé le comportement mécanique du pli, le comportement de n'importe quel stratifié peut être établi. L'essai de traction simple sur un composite stratifié impose en fait un chargement complexe au niveau du pli élémentaire. On exploite différentes séquences d'empilement afin de modifier la valeur des termes entrant dans le calcul de l'énergie de déformation. Pour caractériser les matériaux, des essais de traction sont menés sur des empilements de type $[0]_8$, $[+45/-45]_{2S}$, $[+67.5/-67.5]_{2S}$. L'identification complète des propriétés mécaniques du pli élémentaire en traction et en cisaillement plan est uniquement réalisée à partir de ces trois essais. Les éprouvettes sont soumises à des cycles de charge-décharge. Les endommagements qui naissent à l'intérieur des plis de carbone sont de trois types. On observe des micro-fissurations dans la matrice parallèlement aux fibres, des décohésions entre les fibres et la matrice et la rupture de fibres. L'enchaînement des mécanismes de dégradations est le suivant. En premier lieu, une dégradation de l'interface entre les fibres et la matrice au sein du pli est observée. Des décohésions diffuses des couches communément appelé délaminage sont généralement présentes. L'enchaînement des mécanismes entre la fissuration transverse et le micro délaminage en pointe de micro fissure est fonction des matériaux. Généralement la micro fissuration s'impose et génère une saturation du nombre de fissures. En conséquence une évolution rapide du délaminage apparaît.

La démarche développée consiste également à observer au Microscope Electronique à Balayage les faciès d'éprouvettes vierges et dégradées après essais. Cette méthode permet de dégager les principaux mécanismes d'endommagement initiaux et ultimes et par conséquent de vérifier la corrélation entre les micrographies et les propriétés mécaniques mesurées à l'échelle du pli élémentaire.

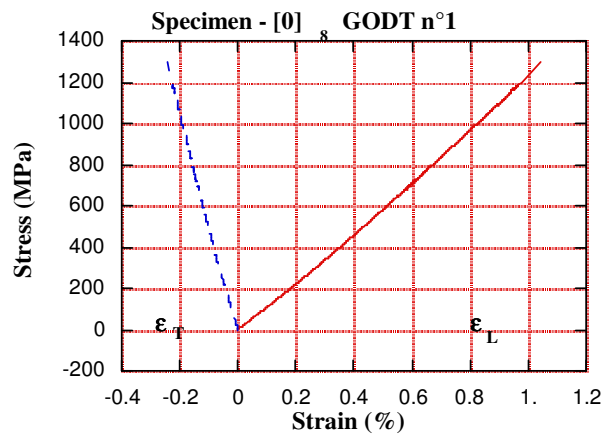


Figure 4 : courbe de traction sur un unidirectionnel [0]₈

d) Tests de caractérisation normalisés

Une fois que nous avons déterminé les références des fibres et des âmes, on peut lancer la fabrication d'éprouvettes afin de tester les caractéristiques mécaniques de chacune d'entre elles lorsqu'elles seront mises en œuvre dans les conditions de l'atelier. Cette caractérisation est confiée à un organisme certifié comme le CETIM. Les caractéristiques mécaniques se révèlent bien souvent inférieures à celles fournies par les fabricants car ces derniers réalisent leurs éprouvettes dans des conditions optimales de laboratoire. Néanmoins, ce sont les valeurs mesurées par le CETIM que nous utiliserons lors des calculs de structure car les conditions dans lesquelles nos éprouvettes ont été réalisées sont reproductibles tout au long de la construction.

6. ETUDE DE STRUCTURE :

La validation de la conception d'un maxi catamaran repose sur une connaissance précise des sollicitations sur le voilier et des caractéristiques mécaniques des âmes et des matériaux composites carbone époxy le constituant. Les efforts extérieurs sur la structure du voilier sont dus au vent et aux forces hydrodynamiques.

Lorsque le voilier est posé sur l'eau, à l'arrêt il est soumis à l'équilibre de deux forces, celle de la pesanteur, dont la résultante est appliquée au centre de gravité, à laquelle s'oppose la force hydrostatique appliquée au centre de carène. La force propulsive d'origine vélique générera une force de résistance d'origine hydrodynamique sur les coques et appendices du voilier. L'ensemble mât-gréement-voilure soumis aux effets du vent joue le rôle du moteur. Les coques assurent la flottabilité et sont soumises aux efforts hydrostatiques, hydrodynamiques et d'anti-dérive.

a) Les cas de charges

A ce stade de l'étude, nous disposons d'un plan de plate-forme général, d'un plan de voilure, d'un devis de poids et d'un pré-échantillonnage dépendant des matériaux retenus. Il faut maintenant définir les cas de chargements. On peut distinguer quatre types de cas de chargement :

- Chargement statique équivalent correspondant à un régime de navigation établi à vitesse constante avec efforts hydrodynamiques figés à différentes phase de la houle ou sur mer plate,
- Chargement dynamique : Le bateau, toujours navigant à son MR_{max} , est soumis à des accélérations dues aux vagues,
- Chargement exceptionnel : Le bateau est dans une situation non-désirée par l'équipage comme par exemple une situation d'enfournement,

- **Chargement normalisé :** Il s'agit de cas de chargement définis par des sociétés de classification qui ne correspondent pas forcément à des situations réelles. Ils sont généralement sévères et présentent l'avantage de pouvoir faire des comparaisons entre différentes plates-formes.

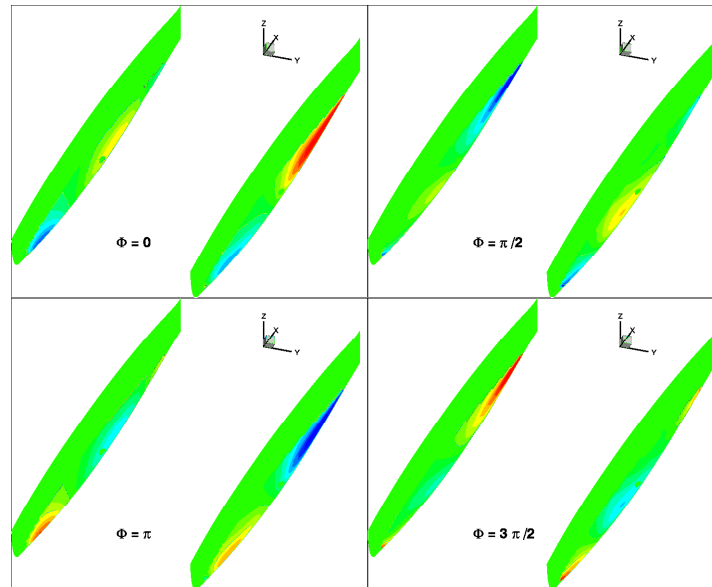


Figure 5 : Distribution des pressions sur la coque du catamaran Orange II pour différentes phases de houle.

Les cas statiques consistent à introduire les efforts sur la plate-forme de telle sorte que les sommes des forces et des moments soient égales à zéro. Il est assez difficile de quantifier les efforts aéros (efforts sur les lattes de grand-voile, efforts perpendiculaires à l'étai...). Par conséquent, la plate-forme ne comprend pas le mât ni le gréement. On se contente d'introduire les efforts du haubanage, au pied de mât, des étais, des écoutes.. Les efforts hydrodynamiques appliqués aux coques et aux appendices peuvent être obtenus à partir de résultats de V.P.P.. On pourra établir autant de cas statiques qu'il y a de plans de voilure.

Dans un second temps, on pourra appliquer des accélérations à ces cas statiques. Malheureusement, notre connaissance des mouvements des grands multicoques est assez limitée. Il n'y a pas encore eu à ce jour de campagnes de mesures. L'estimation des accélérations est donc encore empirique. On appliquera à ces efforts un coefficient de réduction dû à la fatigue des matériaux. Ce coefficient ne sera pas appliqué pour les chargements exceptionnels.

b) Simulations éléments finis

Les simulations éléments finis sont menées pour de nombreux cas de chargements hydrodynamiques et véliques correspondant à différentes configurations de navigation. Ces simulations ont pour but de valider et d'affiner l'échantillonnage des étapes précédentes.

Le premier critère de conception étant la fiabilité, il est important de vérifier qu'aucune zone n'est sous-échantillonnée dans les différents cas de chargement sélectionnés. Le critère de performance oblige, quant à lui, de ne pas sur-dimensionner les coques. Par conséquent, il est nécessaire de prendre en compte la participation de la structure interne (cloisons, ponts, ...) dans la réponse structurale du bateau.

Le modèle éléments finis du catamaran « Orange II » a été réalisé à partir des fichiers DAO. Il est constitué principalement d'éléments finis coques multicouches. Les zones de renforts autour des ouvertures sont également prises en compte. La finesse du maillage est choisie afin d'avoir une

précision de l'ordre d'une dizaine de centimètres, les détails plus petits pouvant être calculés sur des modèles plus fins indépendants. Par ailleurs, certains éléments constituant l'« habillage » du bateau (cockpit, ...) ne sont pas inclus au modèle. Le maillage est constitué d'éléments finis coques épaisses prenant en compte le cisaillement hors plan. Certaines éléments élancées sont remplacés par des éléments poutres. Le modèle ainsi construit comporte 290 000 degrés de libertés.



Figure 6 : Modèle éléments finis coques du voilier Orange II

Les simulations sont effectuées à l'aide d'un code de calcul éléments finis du commerce. Les cas de chargement dynamiques sont intégrés par l'intermédiaire d'un coefficient dynamique égal à 2 et correspondant à l'amplitude de déformation autour des solutions statiques. Une étape délicate concerne l'application des conditions aux limites. Pour cette étape, il est important de vérifier que le navire est en équilibre, ou de compenser le déséquilibre par des efforts hydrodynamiques réalistes sur des zones mouillées du catamaran.

Après vérification expérimentale, le comportement mécanique des différents matériaux élémentaires constituant le voilier est introduit dans le modèle. La raideur des sandwiches est alors calculée par techniques d'homogénéisation. Puis, une fois les cas de chargement résolus, une étape de post-traitement évalue le critère de rupture sur l'ensemble des plis constitutifs du bateau à partir de ces données matériau. Les risques de rupture et les marges de sécurité sont alors évalués pour l'ensemble des tissus en carbones et des nids d'abeilles pour chaque cas de navigation retenu.

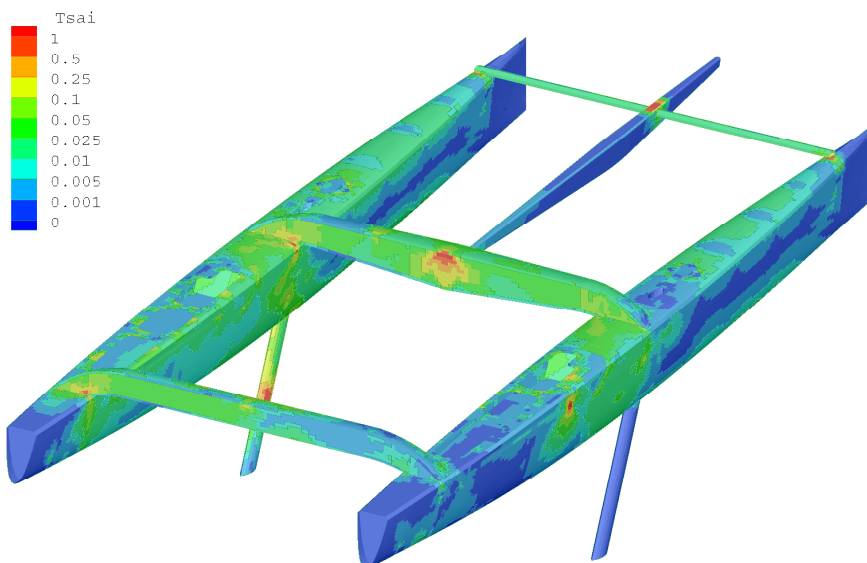


Figure 7 : Distribution du critère de Tsai maximum lors de l'avancée dans la houle diagonale.

7. ETUDE DETAILLEE :

a) Elaboration du dossier de plans

Nous disposons désormais d'une forme et d'un échantillonnage. Nous pouvons alors commencer la réalisation du dossier de plans de fabrication. Ce sont environ trois cents plans qu'il faut réaliser pendant une période d'environ dix mois. Ils devront bien sûr être conformes aux spécifications qui sont un document contractuel décrivant non seulement le bateau lui-même, mais aussi les procédés qui seront mis en œuvre durant la construction.

b) 2^{ème} boucle du devis de poids

Chaque plan contient une fiche de suivi détaillant chaque opération de fabrication de la pièce à réaliser. Ces fiches de suivi, conformes à notre plan qualité, servent aussi à alimenter une deuxième boucle de devis de poids puisque chaque pli y est détaillé. Chaque élément fabriqué est pesé. Cette pesée vient remplacer la valeur calculée auparavant.

On peut noter que dorénavant, les bateaux sont assemblés sur des bers équipés de jauges permettant de suivre en temps réel l'évolution de la masse et du centre de gravité de la plate-forme au fur et à mesure de l'avancement de l'assemblage. Cela permet par exemple de vérifier des masses qui sont par ailleurs assez difficiles à déterminer précisément comme l'enduit non poncé ou les résidus secs de peinture.

c) Domaine d'utilisation

Tout au long de l'étude, l'équipe de conception prépare un document qui sera remis au skipper au moment des premières navigations. Ce document contient entre autres informations le premier jeu de polaires de vitesse et des abaques d'utilisation de dérives. Il répertorie également les hypothèses de calcul retenues pendant la phase de conception. La liste des efforts théoriques et des cas de chargement permet à l'équipage de cerner le domaine d'utilisation, ou « domaine de vol » en langage aéronautique, et aide ainsi le skipper ou le navigateur à placer le curseur de prise de risque.

8. QUELQUES ASPECTS PARTICULIERS SUR LA CONSTRUCTION :

a) Moyens matériels mis en œuvre

La mise en œuvre du carbone pré-imprégné nécessite des moyens spécifiques par rapport à la construction navale traditionnelle. Il est essentiel de travailler dans un atelier équipé d'air conditionné en température et en hydrométrie.

La température tout d'abord. Nous disposons d'un frigo dont la température régulée à -18°C permet de stocker le pré-imprégné qui aura ainsi une durée de vie d'au moins 12 mois. La durée de vie n'est plus que de 6 à 60 jours selon les produits à 20°C et diminue quand la température augmente. Le chantier dispose de trois étuves dont la plus grande mesure 48 x 6 x 5 mètres. Grâce à elles, nous pouvons cuire des pré-imprégnés jusqu'à 120°C . La gestion de l'utilisation des étuves est un facteur important car les cuissons figurent souvent dans le chemin critique des plannings de construction.

L'hydrométrie est aussi un paramètre qu'il est important de maîtriser. Par exemple, Si l'air contenu dans les cellules de Nomex® contient de la vapeur, le volume de celui-ci va augmenter au moment de la cuisson et créer une pression susceptible de nuire à l'accrochage de la peau sur les parois du nid d'abeille.

b) Stabilité de forme

Les coques sont fabriquées dans des moules femelles. La première raison est la volonté de limiter le poids des enduits de finition. La deuxième raison est de minimiser les variations entre les formes théoriques et les formes modélisées. C'est la raison pour laquelle les moules femelles sont drapés autour des pièces mères avec des tissus en fibre de carbone. Ce carbone n'est pas aussi performant en terme de résistance ou de raideur que les carbones servant à fabriquer les pièces, mais il a le même coefficient de dilation thermique. Ce procédé permet d'éviter tout démoulage durant les phases de cuisson. Par rapport à une construction sur moule mâle, l'augmentation de coût de cette méthode, bien que non négligeable, est tout de même pondérée par le fait que le coût des moules est amorti sur deux coques.

Plusieurs cuissons sont nécessaires à la fabrication de chaque demi-coque :

- Peau extérieure
- Renforts locaux extérieurs
- Collage de l'âme
- Pontage entre les deux peaux
- Renforts locaux intérieurs
- Peau intérieure

Certaines opérations peuvent être effectuées simultanément. Un vide est bien sûr mis en place avant chaque cuisson.

c) Contrôles non-destructifs

La société MULTIPLAST dans les années 2000 a inscrit une nouvelle règle dans son assurance qualité : la démarche du contrôle par US (ultrasons) dans chacun de ses projets avec pour objectif d'affiner la fiabilité du produit fini.

Cette technologie ressort des mêmes principes appliqués en termes de sûreté dans les domaines les plus variés comme les centrales nucléaires ou les programmes aéronautiques et aérospatiaux.



Figure 8 : US Orange II Bras avant face arrière
Photo Avantage Service Contrôle

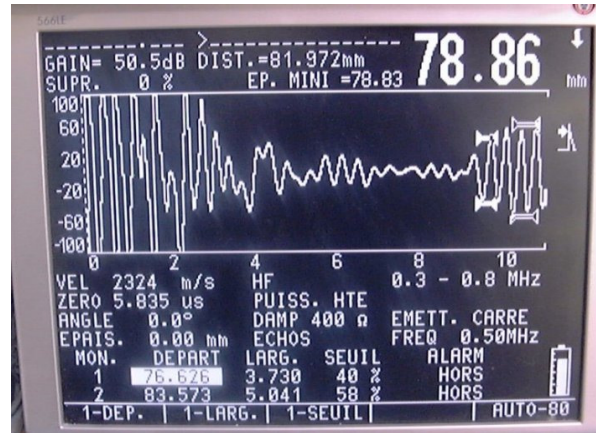


Figure 9 : A-Scan : Détection et analyse
Photo Avantage Service Contrôle

L'objet de l'examen par ultrasons est de détecter d'éventuels défauts dans les coques et les pièces élaborées après cuisson et autant que possible d'en estimer l'importance (défaut de liaison, porosité globale ou en grappes, résine/tissu, pli de colle/adhérence nid d'abeille, porosité dans les barreaux monolithiques, délaminage, séparateur, problème de vide, non collage nida et monolithique) .

C'est une analyse de santé matière sans préjuger des calculs d'architecture. Associée à un logiciel d'imagerie : c'est de l'échographie industrielle.

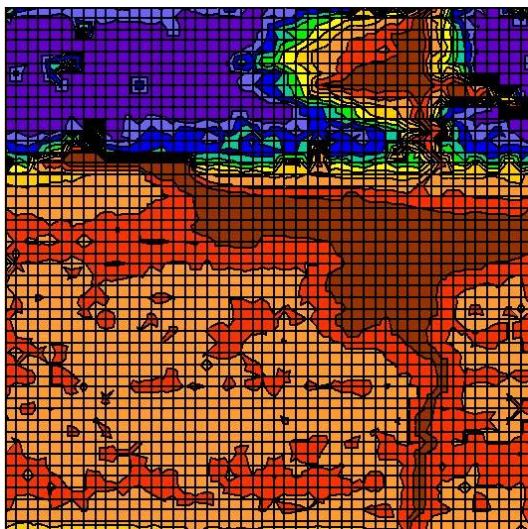


Figure 10 : C-Scan : Vue à plat
Fissure de cisaillement sur éprouvette
Photo Avantage Service Contrôle



Figure 11 : Méthode par Ressuage de pièces pour Orange II
Photo Avantage Service Contrôle

Les contrôles ultrasons suivent tous les stades de la construction composite carbone : demi-coques bâbord et tribord, poutres, assemblages, renforts sous winch, mât, etc . jusqu'au bateau fini. Hors composite, des contrôles sont aussi effectués sur tous les axes inox ou titane (contrôle ultrasons et contrôle ressuage en recherche de criques).

d) Essais avant navigation

Le bateau est mâté dès la mise à l'eau. Dès que le gréement courant est en place, il est alors procédé à des essais statiques. Chaque système de cordage destiné à être soumis à un effort important en navigation est testé au port à l'aide d'un peson et de gros bras. Par exemple, le peson est fixé à la drisse de grand-voile d'un côté et en bout de bôme de l'autre. On simule alors l'action de border la

grand-voile jusqu'à lecture de la valeur maximum d'effort ayant été retenue durant la conception. On procède de la sorte pour les différents circuits d'écoute, de drisse, bosses de ris, etc..

9. ANALYSE DES PERFORMANCES :

Nous avons vu au chapitre concernant les simulations que les études de prédictions de performances d'« Orange II » étaient basées sur des données météorologiques statistiques. Tout au long du tour du monde victorieux d'« Orange II », nous avons reçu des données de vent et de vitesse du bateau enregistrées à bord. Ces données sont utiles pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, le traitement des données de vent nous permet d'établir un parcours météo représentatif de ce qu'a subi « Orange II » pendant son record. Les conditions se sont révélées plus favorables que le parcours statistique que nous avons utilisé pendant la conception. Pour les études des bateaux à venir, nous nous inspirerons néanmoins de ce parcours pour comparer les avant projets car le temps de 50 jours 16 heures ne pourra être battu qu'avec des conditions plutôt favorables. Ce n'est donc pas la peine d'optimiser un projet pour des conditions moins favorables. La différence entre bateau de records et bateau de course se creuse un peu plus.

Les données enregistrées sont également utilisées pour remplacer les valeurs de vitesse prédites pendant la conception. Pour une valeur de vent en angle et en vitesse, on enlève les valeurs hautes de vitesse car elles ont peut-être été enregistrées pendant des phases d'accélération. On enlève également la partie basse peut-être liée à des phases de manœuvre. La moyenne des valeurs restantes constitue des polaires de vitesse utilisables pour le routage du bateau pour les tentatives à venir.

En traitant les données avec une autre approche statistique pour identifier non pas une valeur moyenne mais une valeur représentative d'un maximum raisonnablement atteignable, on élabore alors un ensemble de polaires dites de performance qui serviront d'une part à quantifier l'erreur du V.P.P., d'autre part à fournir aux barreurs et aux régleurs des éléments de vitesse cible pendant les navigations à venir.

La méthode traditionnelle de représentation de ces éléments est un diagramme polaire, d'où son nom. On peut aussi envisager de créer deux surfaces dont les coordonnées en X sont la vitesse de vent, les coordonnées en Y sont les angles de vent et les coordonnées en Z sont le pourcentage de temps passé pour la première surface et la vitesse du bateau pour la seconde. Cette méthode présente l'avantage d'être très visuelle. La « multiplication » de ces surfaces donne une troisième surface représentative des distances parcourues.

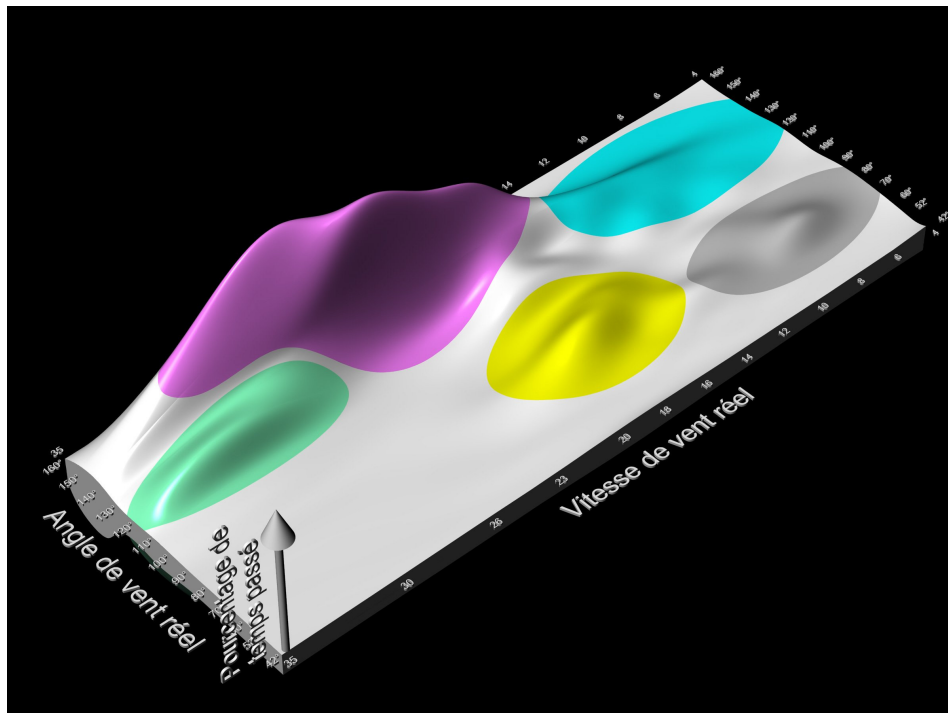


Figure 12 : Exemple de surface de parcours

Chaque colline ou montagne identifiée ici par une couleur est représentative d'une phase particulière du tour du monde. Par exemple, la zone violette, la plus grande, correspond aux journées très rapides parcourues dans le sud. La zone grise correspond aux passages des zones calmes de l'atlantique.

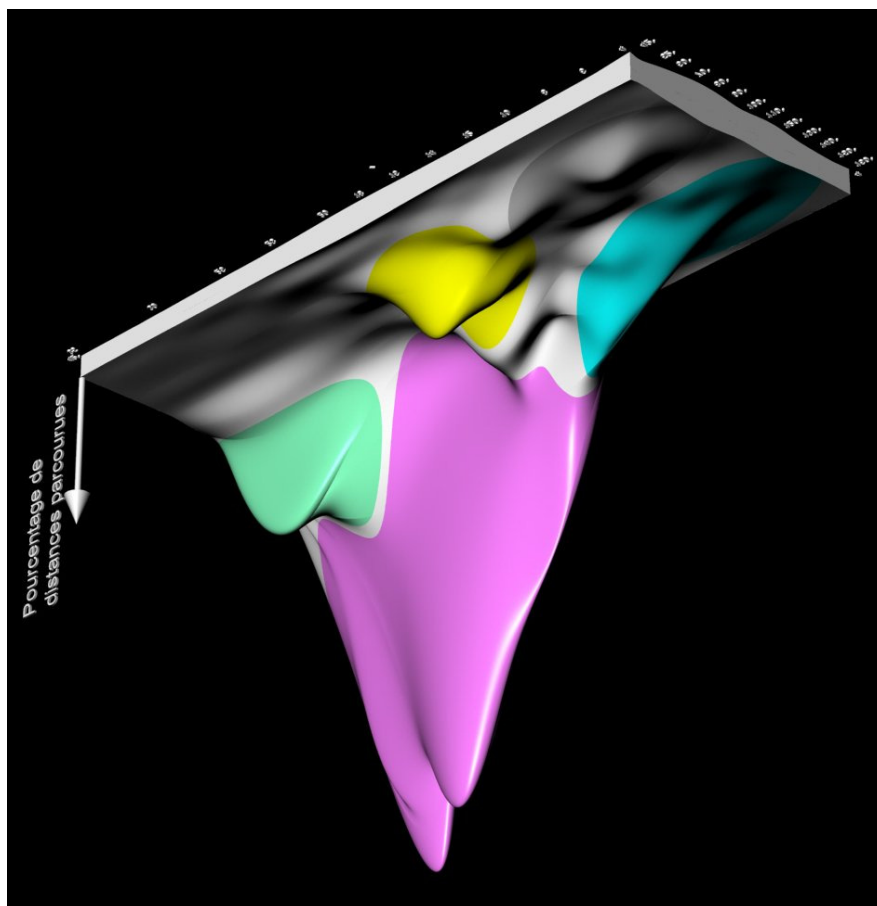


Figure 13 : Exemple de surface de distances parcourues

Au delà de l'échange de données numériques, les échanges avec l'équipe navigante se sont souvent révélées fructueuses. Avant le départ du tour du monde, leur retour d'expérience participe à la pondération des résultats bruts de V.P.P. en vue de l'obtention des premières polaires de routage. Après l'arrivée, les témoignages des membres d'équipage aident à la réflexion de ce que pourrait être le successeur d'« Orange II ».

10. CONCLUSION :

Une réflexion basée sur l'expérience accompagnée par des outils dont certains sont largement répandus, mais d'autres sont plus originaux,

Des moyens matériels adaptés à un mode de construction « high-tech »,

Mais aussi et surtout une équipe de conception et de construction visant un seul but, la réussite du projet,

tels sont les ingrédients qui ont permis d'aboutir à une performance remarquable battant le record précédent de plus de 13%.

Cependant, tous les records sont destinés à être battus et la réflexion concernant un bateau capable de battre ce nouveau temps de référence a commencé peu de temps après l'arrivée. Cette réflexion doit être appuyée par des outils de simulation et de calcul en évolution perpétuelle. Comme cela a été évoqué au chapitre concernant les simulations, une meilleure évaluation des caractéristiques, qu'elles soient aérodynamiques pour les plans de voilure ou hydrodynamiques pour les plates-formes dans une mer formée, nous aideraient certainement à améliorer les performances des grands multicoques.



Figure 14 : Orange II en navigation

L'auteur souhaite remercier pour leur contribution à la rédaction de cette communication Bertrand ALESSANDRINI, Laurent GORNET, Gilles MARCKMANN et Philippe ROLLAND. Merci également à Gilles OLLIER qui, outre une relecture constructive du présent document, n'a jamais été avare de ses conseils tout au long de nos années de collaboration.