
Formulation d'une base de connaissances pour l'aide en conception

M. SALLAOU *, ** — J. PAILHES ** — J. P. NADEAU **

* ENSAM – BP 4024, Meknès Ismailia Maroc
mosallaou@yahoo.fr

** TREFLE – ENSAM UMR CNRS 8508
Esplanade des Arts et Métiers 33405 Talence France
jérôme.pailhes@bordeaux.ensam.fr
jean-pierre.nadeau@bordeaux.ensam.fr

RÉSUMÉ.

Dans le cadre d'une démarche d'aide à la conception, nous avons mis en œuvre puis appliqué à un système éolien, une méthodologie d'analyse et de structuration du problème de conception préliminaire. Elle identifie les caractéristiques structurantes et génère une vision parcimonieuse du problème que nous traduisons sous forme de contraintes. Cette démarche permet, par l'utilisation des outils de l'analyse fonctionnelle enrichie de deux lois d'évolution de TRIZ et par l'analyse des flux fonctionnels, d'obtenir des modèles de solutions à un niveau de description donné du système. Cette analyse contribue à mettre en place des modèles, liés à des fonctions et à des verbes d'action, exploitables pour un traitement par satisfaction de contraintes. Cette base de connaissances sera organisée en terme de niveau systémique et de niveau de qualification, conduisant ainsi à la résolution et la génération de solutions potentiellement validées pour poursuivre vers la conception détaillée.

ABSTRACT.

In this article, a design support tools is developed and is illustrated through the example of wind turbine. An analysis and a structuring methodology is investigated and applied. This methodology leads to the definition of structuring characteristics and generates a parsimonious vision of the design problem. The model is a set of constraints. This approach leads to solutions defined at several systemic levels using functional analysis tools. These tools are completed by two evolution laws of TRIZ and functional flow analysis. The present analysis contributes to set up models related to functions and action verbs. They may be treated as constraint satisfaction problems. This knowledge base is organised through systemic and qualification levels, leading to the generation of solutions which are potentially validated to continue the detailed design.

MOTS-CLÉS : *Conception préliminaire, Aide à la conception, Modélisation fonctionnelle, Intégration des connaissances, Contraintes.*

KEYWORDS: *Preliminary design, Design support, functional modeling, Integration of knowledge, Constraints.*

1. Introduction

Notre société impose aux entreprises d'être sans cesse innovantes, flexibles et réactives dès qu'un besoin produit émerge. La compétitivité du marché a fait que pour respecter les normes de qualité et pour obtenir les certifications ISO 9000 [NAD 05], des méthodologies d'analyse et de management du produit se sont développées, par contre, les méthodes d'aide à la conception et à l'innovation n'ont pas suivi la même évolution. Plusieurs travaux de recherche tentent actuellement de lever ce verrou, et proposent des démarches et outils permettant de rendre performante la tâche de conception. Ces travaux sont d'autant justifiés que les coûts générés par la phase d'étude d'un produit sont importants.

2.1. La conception

L'objet de la conception de produits et des systèmes est de satisfaire les besoins des utilisateurs et les contraintes technico-économiques, tout en garantissant le respect de l'environnement, de la législation et de la rentabilité de l'entreprise.

Le processus classique de conception procède par la définition d'hypothèses successives, et focalise vers une solution dans une logique d'essais-corrrections. Il est donc fondé sur un caractère itératif. En effet, afin de pouvoir commencer la recherche d'architecture, des choix initiaux sont à faire. Il existe une séquentialité dans la détermination des caractéristiques de l'architecture : Il est souvent nécessaire de fixer les principales dimensions, choisir des technologies, des composants, etc. Ainsi, la conception architecturale induit un processus itératif de génération d'artefacts de produits et d'évaluation de leur capacité à satisfaire les exigences [ULL 03]. Ces choix, réalisés a priori, induisent un mode "essai-erreur" de détermination d'architecture. Ces décisions irréversibles occultent une part de l'espace des solutions. De plus, toutes les connaissances nécessaires à la conception d'un produit ne sont pas toujours toutes prises en compte simultanément. Finalement, le concepteur expérimenté trouve une solution, mais elle est rarement optimale [HUB 01]. Cet aspect contribue largement à l'augmentation des coûts et des temps de conception. Une amélioration attendue est l'élimination du caractère itératif du processus.

D'autre part, certaines études montrent que la phase de conception préliminaire engage à peu près 80% des frais générés dans le projet de conception lui-même [ZIM 01]. Ces travaux démontrent que les choix réalisés au cours de la conception préliminaire sont fondamentaux et que leur remise en cause doit être la moins fréquente possible.

2.2. Processus de conception

La plupart des modèles de processus de conception proposent, après une phase de traduction du besoin et avant la conception détaillée, une phase de conception préliminaire (depuis un cahier des charges jusqu'aux spécifications techniques).

Une méthodologie d'analyse et de structuration du problème de conception préliminaire doit aider à identifier les caractéristiques structurantes du problème de conception et rendre parcimonieuse la vision du problème qu'il faudra traduire sous forme de contraintes. Les caractéristiques structurantes au sens du raisonnement du concepteur sont celles qui lui permettent de débiter le travail de conception et de définir une première architecture. Se sont les critères et fonctions structurant l'acte de conception [SCA 04].

Les caractéristiques structurantes d'un problème de conception préliminaire sont [SCA 04]:

- des situations de vie qu'il faudra impérativement décrire;
- des fonctions incontournables ou comportant un risque;
- des éléments standards à choisir ou à dimensionner: ils génèrent des variables et des contraintes;
- des variables de conception permettant de définir l'architecture du produit;
- des variables critères permettant de qualifier une conception;
- des domaines de variation des variables;
- des comportements physiques pertinents pour décrire le fonctionnement du produit et leurs effets induits, se traduisant par des relations entre les variables de conception.

Des listes systématiques ont été proposées afin de faciliter l'identification des caractéristiques structurantes d'un problème de conception préliminaire [SCA 05].

2.3. Démarche d'analyse et de structuration du problème de conception

Une démarche de recherche des caractéristiques structurant l'acte de conception depuis l'émergence du concept jusqu'aux choix et réalisation d'une solution, a été développée [SCA 04]. Elle se déroule en quatre phases, chacune correspondant à un niveau d'analyse différent : analyse du besoin, analyses fonctionnelle, organique et physique (figure 1). Les outils de l'analyse fonctionnelle sont parfois améliorés, à l'image du GSC¹ complétant le Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF). Ces outils d'analyse fonctionnelle alliés à certaines des lois d'évolution de TRIZ, donnent des indications pour qualifier la conception, intégrer le point de vue utilisateur et dégager

¹ Le Graphe Substances Champs est issu de la théorie TRIZ [SAV 00]

des biais d'attaque pour innover. La figure 1 représente les outils utilisés lors des quatre phases et les caractéristiques structurantes obtenues :

- La première étape d'analyse de besoin permet d'exprimer également les critères de qualification du client ainsi que ses situations de vie de référence.

- Durant l'approche fonctionnelle (phase 2), l'Analyse Fonctionnelle (AF) externe liste les fonctions liées au produit à concevoir; seules les fonctions structurantes seront retenues.

- La phase 3 permet une décomposition structurelle du produit grâce à l'Organigramme Technique (OT) étendu, afin d'identifier notamment les éléments standards et les contraintes qu'ils engendrent.

- Le BDF et le GSC permettent l'analyse des flux fonctionnels et induits. Ainsi, l'approche physique (phase 4) met en évidence les comportements physiques pertinents à prendre à compte.

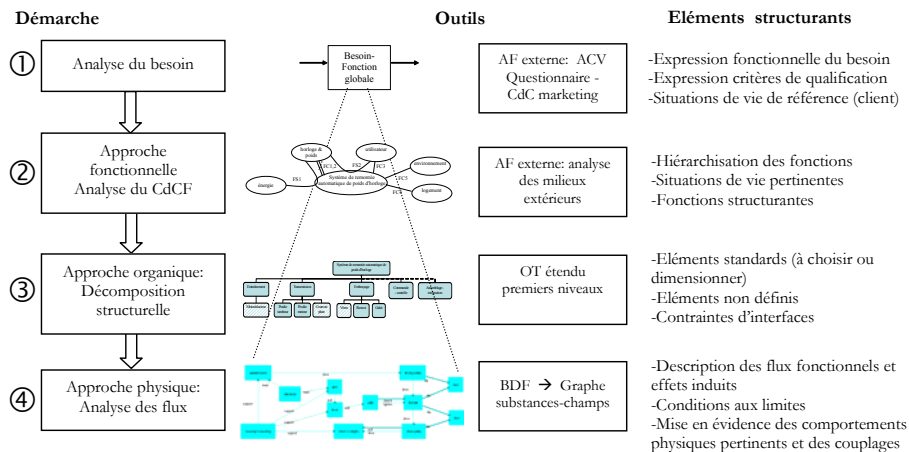


Figure 1 : Démarche de recherche, outils associés et caractéristiques structurantes [SCA 04]

Pour illustrer l'intérêt de la démarche de conception, le cas de la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne est traité en application, et plus particulièrement un de ces composants : le multiplicateur de vitesse.

3. Application de la démarche au système éolien

3.1. L'énergie éolienne

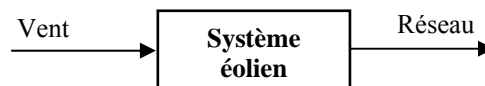
Les éoliennes sont une forme très ancienne d'exploitation du vent. Toutefois, les années 1970-2004 ont vu une importante évolution à la fois de leur utilisation de par le monde et de leur conception. L'éolienne présente une solution et une alternative de production d'énergie renouvelable fort intéressante et écologiquement acceptable. On

peut diviser les éoliennes en deux catégories (axe vertical et axe horizontal). Dans notre étude on s'intéresse aux éoliennes à axe horizontal tripale. Car leur typologie de construction est la plus largement adoptée dans l'industrie.

3.2. Analyse de l'éolienne

3.2.1. Analyse du besoin

La démarche de conception commence par une formulation exhaustive du besoin exprimé ou implicite des utilisateurs. L'analyse fonctionnelle permet de traduire et d'intégrer dans le processus de conception, l'expression du besoin pour l'utilisateur final, le client, le concepteur [SCA 04], [AFN 90]. Cette étape d'analyse du besoin permet également d'exprimer les critères de qualification client ainsi que des situations de vie de référence. La fonction globale traduit la raison d'être du système. Ce système rend service au gérant du site éolien en récupérant l'énergie du vent et la transformant en énergie électrique et au distributeur en fournissant au réseau un courant électrique de bonne qualité.



- Critères de qualification client [ARB 05] :
 - coût du kWh produit
 - coût total actualisé du projet
 - qualité de l'énergie électrique : tension, flickers...
 - quantité d'énergie produite par an
 - durée de vie.

Ces critères permettront de statuer sur la pertinence de la conception et des choix réalisés et contribueront à la phase finale de tri de solutions.

3.2.2. Approche fonctionnelle

Il s'agit de faire l'analyse fonctionnelle externe pour différentes situations de vie en vue d'extraire les relations fonctionnelles entre le produit et les milieux extérieurs (diagramme APTE®). Pour le système éolien et pour illustrer nos propos nous retenons parmi les situations de vie pertinentes, la situation de fonctionnement normal (figure 2).

- Situation de vie « fonctionnement normal: production d'électricité »

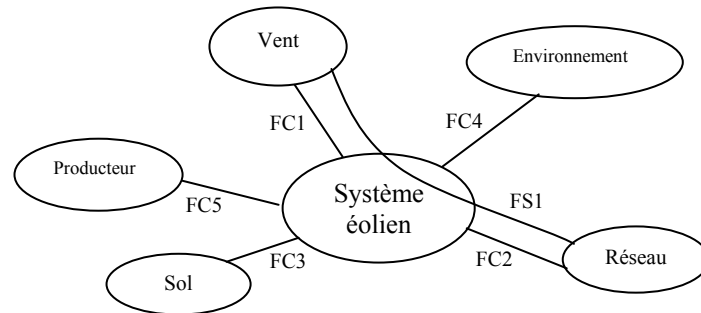


Figure 2 : Diagramme APTE du système éolien

- FS1 : Transformer la puissance aéraulique du vent en puissance électrique de fournie au réseau
- FC1 : Résister au vent
- FC2 : Respecter les critères de la qualité du courant électrique à fournir au réseau
- FC3 : Lier au sol
- FC4 : Ne pas polluer l'environnement
- FC5 : Etre rentable pour le producteur

Pour cette situation de vie, les fonctions structurantes et les critères d'appréciation sont [SCA 04] :

- Fonction à flexibilité faible ou nulle :
 - FC2 : qualité du courant à fournir au réseau : tension, flickers...
 - FC5 : - coût du kWh produit et coût total actualisé du projet
 - durée de vie
- Fonction à risques :
 - FC1 : résister au vent
- Fonction Contraintes impératives :
 - FC4 : respect de l'environnement (bruit, impact sur le paysage, ...)

3.2.3. Approche organique

La troisième phase permet la décomposition structurelle du produit grâce à l'organigramme technique étendu aux milieux extérieurs. L'organigramme technique étendu (Figure 3) décrit la constitution d'une éolienne. Il permet d'identifier les caractéristiques structurantes suivantes [CPI 03] :

- Les éléments standard (à choisir ou à dimensionner) ;
- Les éléments non définis, à dimensionner ;
- Les contraintes d'interface entre les blocs fonctionnels.

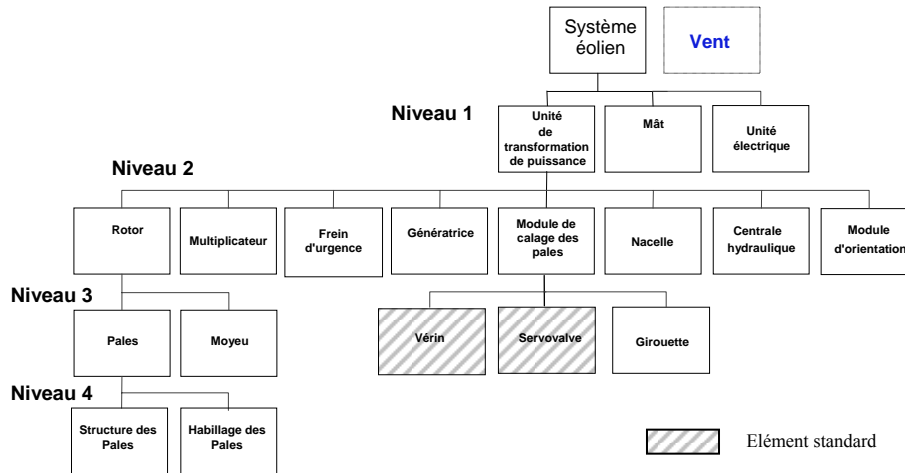


Figure 3 : Organigramme technique du système éolien

Au deuxième niveau, l'un des éléments principaux de la chaîne de transmission de l'éolienne est le multiplicateur. Ce composant permet de lier le rotor à la génératrice. Pour la suite du travail, on réduira notre étude au multiplicateur, dont le diagramme FAST est donné figure 4.

Le diagramme FAST définit les fonctions successives permettant de réaliser la fonction principale du multiplicateur. Ce diagramme (figure 4) décrit une réalisation possible de la fonction « transmettre la puissance mécanique en rotation ».

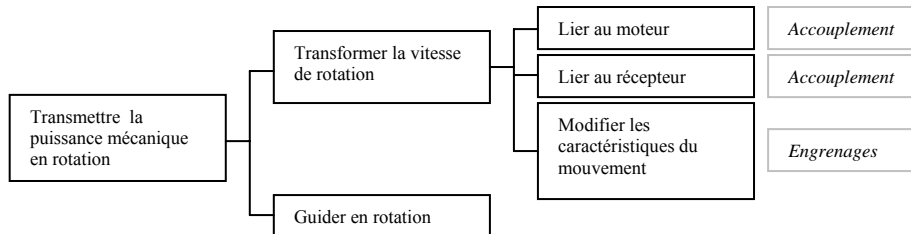


Figure 4 : FAST du multiplicateur

L'organigramme technique du multiplicateur étendu aux milieux extérieurs est donné figure 5. Sur cette représentation, en plus des composants standard et des composants non définis, on énumère les composants d'interface (liaison mécanique, fluïdique, électrique, informatique,...). Cette remarque a son importance, au niveau de la formalisation des modèles de comportement, dans la mesure où on fait la distinction entre des modèles de composants et des modèles d'interfaces ou d'interaction entre composants [VER 04].

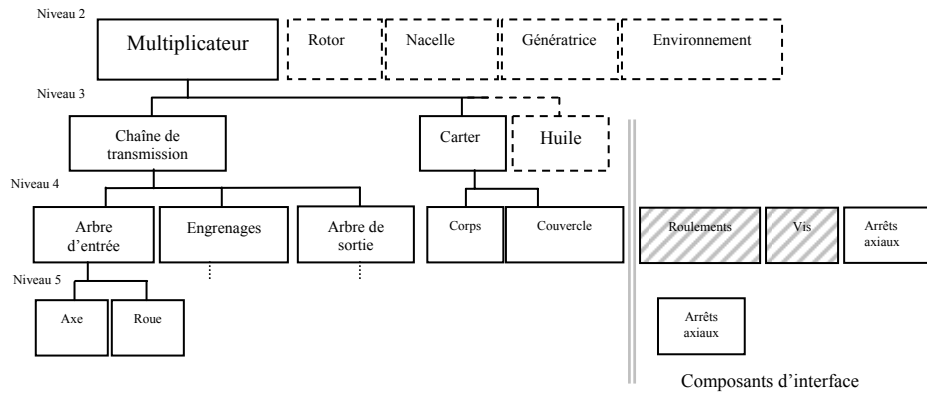


Figure 5 : Organigramme technique étendu du multiplicateur

3.2.4. Approche physique

Cette étape est très importante pour identifier les comportements physiques pertinents. Le bloc diagramme substances-champs permet d'analyser les flux fonctionnels et les flux induits [SCA 04]. L'utilisation de certaines lois d'évolution issues de la théorie TRIZ donne une vision exhaustive sur l'analyse des flux fonctionnels [NAD 05] (figure 6 et 7). Nous utilisons dans cette étude les 2 premières lois qui permettent d'étudier l'utilisation rationnelle de l'énergie pour réaliser l'action. Ces 2 lois sont :

- Loi d'intégralité des parties : cette loi identifie une entité motrice, une entité de transmission, une entité opératrice et une entité de contrôle. Le flux d'énergie (flux fonctionnel) évolue dans les entités jusqu'à la réalisation de l'action requise.
- Loi de conductivité thermique : cette loi stipule que le système doit permettre le libre passage de l'énergie entre toutes ses entités lors de la réalisation de l'action.

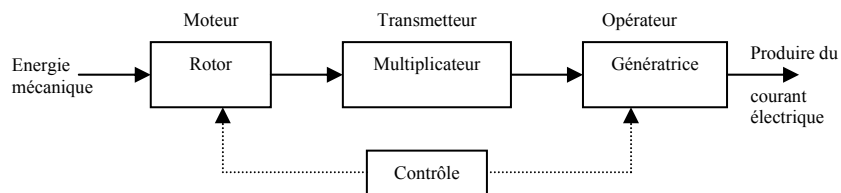


Figure 6 : Loi d'intégralité des parties du système éolien

De même, au niveau 4 de l'organigramme technique, l'analyse du multiplicateur, implique les arbres d'entrée et de sortie et les différents engrenages (figure 7).

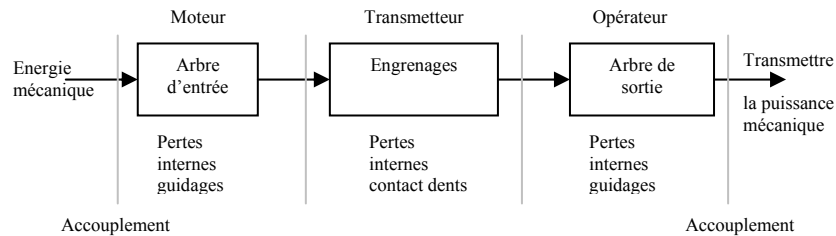


Figure 7 : Lois d'intégralité des parties et de conductivité thermique pour le multiplicateur

Le tableau 1 donne les différents flux liés à la réalisation de la fonction principale du multiplicateur : transmettre de la puissance mécanique en rotation. Des effets induits produisent des pertes de puissance sous forme de chaleur, de déformation, de production de matière (usure) ou de bruit. Donc d'autres fonctions (non demandées) sont induites par la réalisation de la fonction (tableau 2).

Composant	Fonction	Flux fonctionnel	Flux induits
Arbre d'entrée	Transmettre la puissance mécanique en rotation	Flux d'énergie mécanique	- Flux d'énergie de déformation (torsion de l'arbre)
Engrenages	Transformer la vitesse de rotation	Flux d'énergie mécanique	- Flux d'énergie thermique (frottement de contact, effusivité). - Flux d'énergie de déformation (flexion denture, contact) - Flux d'énergie sonore - Flux de matière (usure)
Arbre de sortie	Transmettre la puissance mécanique en rotation	Flux d'énergie mécanique	- Flux d'énergie de déformation (torsion de l'arbre)

Tableau 1 : Cheminement du flux fonctionnel dans la chaîne de transmission et flux générés

Composant	Fonction	Flux fonctionnels	Flux induits
Carter	Guider en rotation les arbres	Flux d'énergie mécanique (contact)	- Flux d'énergie thermique (frottement). - Flux d'énergie sonore - Flux d'énergie mécanique (frottement, couple résistant) - Flux de matière (usure)
Huile	Transporter l'énergie thermique	- Flux d'énergie thermique. - Flux de matière	- Flux d'énergie mécanique (viscosité de l'huile, couple résistant)

Tableau 2 : Fonctions induites, flux fonctionnels et flux générés

Afin d'identifier les phénomènes physiques pertinents mis en jeu, le bloc diagramme fonctionnel est tracé, pour la situation de vie "fonctionnement normal du multiplicateur" (Figure 8). Le bloc diagramme fonctionnel du multiplicateur permet de mettre en évidence la circulation des flux entre les différentes entités.

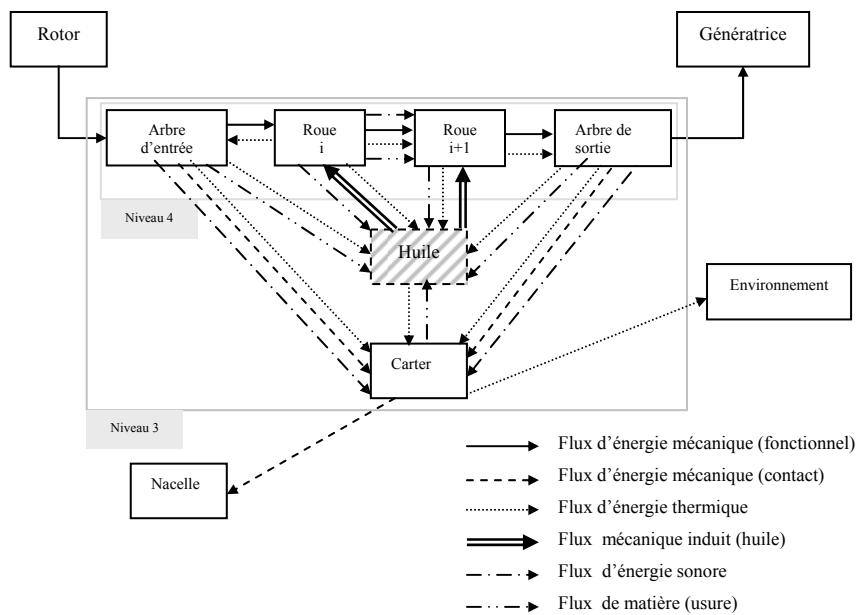


Figure 8 : Bloc diagramme fonctionnel du multiplicateur

La décomposition d'un système en sous systèmes, appelés composants, et l'identification de leurs comportements physiques par les blocs diagrammes

fonctionnels, ne peut être établi qu'après une première définition préliminaire du produit.

Pour formaliser les connaissances et assurer l'exhaustivité de l'analyse de conception, nous proposons des modèles de composants. Ces modèles sont liés à un niveau de description et associés à une solution possible (tableaux 3 et 4).

Fonction	Flux d'entrée	Flux de sortie	Variables	Relations
Niveau 2				
Transmettre la puissance mécanique en rotation	Puissance mécanique en rotation $C_e \omega_e$	Puissance mécanique en rotation $C_s \omega_s$	ω_e ω_s η_m C_e C_s	Puissance perdue $\Phi = \eta_m C_e \omega_e$ $\eta_m = 1 - \left[(1 - \pi_m) \left(\frac{p_n}{p} + 3 \right) \right]^{1/4}$ $\pi_m = 0.89 P_n^{0.012}$ $k = \frac{\omega_e}{\omega_s}$ * source [WIL 76]

Tableau 3 : modèle de composant du multiplicateur au niveau 2

Au niveau 2, à l'échelle du multiplicateur, le rendement permet de donner la puissance perdue sur le flux fonctionnel. La grande partie de ces pertes est sous forme de flux d'énergie thermique qui doit être transportée vers l'extérieur. Cette fonction est mise en évidence au niveau inférieur soit le niveau 3 de l'organigramme technique. L'analyse correspondante est montrée sur le tableau 4 pour deux solutions différentes : refroidir l'huile à l'extérieur du multiplicateur par un échangeur ou refroidir l'huile par les parois du carter. L'expression des coefficients d'échange fait appel à des bases de données thermiques [KAY 84].

Fonction		Flux d'entrée	Flux de sortie	Variables	Relations
Niveau 3					
Refroidir l'huile du multiplicateur	Alternative 1 (utiliser un échangeur)	Matière : huile q_h	Matière : huile q_h	q_h	Puissance à dissiper $\Phi = \eta_m C_e \omega_e$ $= q_h C p_h (T_{h,e} - T_{h,s})$ $= q_a C p_a (T_{a,s} - T_{a,e})$ Efficacité de l'échangeur $\varepsilon_h = \frac{T_{h,e} - T_{h,s}}{T_{h,e} - T_{a,e}}$ Rapport de capacité $R_h = \frac{q_h C p_h}{q_a C p_a}$ Nombre d'unités de transfert $NUT_h = \frac{kA}{q_h C p_h} = f(R_h, \varepsilon_h)$
		Fluide caloporteur air q_a	Air q_a	q_a $C p_h$ $C p_a$	
		Energie: thermique $q C p_h T_{h,e}$ $q C p_a T_{a,e}$	Energie thermique $q C p_h T_{h,s}$ $q C p_a T_{a,s}$	$T_{h,e}, T_{h,s}$ $T_{a,e}, T_{a,s}$ k	
	Alternative 2 (refroidir par le carter)	Matière : air $q C p_a T_{a,e}$	Matière : air $q C p_a T_{a,s}$	T_h q_{air} $T_{a,e}, T_{a,s}$ $C p_a$ k	Puissance à dissiper $\Phi = \eta C_e \omega_e$ $= q C p_a (T_{a,s} - T_{a,e})$ Stabilisation de la température d'huile $\Phi = kA(T_h - \bar{T}_a)$

Tableau 4 : Analyse de deux réalisations de la fonction : refroidir l'huile du multiplicateur

Au niveau 4, l'étude de la fonction « transmettre la puissance mécanique de rotation », permet de faire l'analyse fine des contacts et de mettre en évidence les flux d'énergie mécanique et thermique au niveau des contacts des roues (contact effusif et déformation locale). On peut ainsi s'affranchir de l'utilisation de la notion de rendement (tableau3). Nous réalisons actuellement ces modèles plus complexes.

Au niveau 3, apparaît la fonction « guider en rotation » qui conduit à une analyse identique des flux de contact (paliers lisse ou à roulement). Les modèles de composant et de composants d'interaction (roulements, paliers) constituent une base de connaissance. Cette base de connaissances reliera des fonctions (sous forme de verbe d'action + complément) aux modèles qui seront vérifiés et validés à différents

niveaux systémiques par leurs critères de qualification (PEPS) : Parcimonie, Exactitude, Précision, Spécialisation [VER 05].

Les paramètres du PEPS sont définis comme suit :

- La Parcimonie est une mesure inverse de la complexité d'un modèle. Elle croît avec le nombre et le niveau de couplage entre les variables d'un modèle.

- L'Exactitude est une mesure de l'écart qui sépare le modèle de la réalité qu'il est censé représenter.

- La Précision est une mesure définie par opposition à celle de l'imprécision. L'imprécision mesure l'aspect vague ou flou lié à la distinction entre plusieurs valeurs d'une même variable d'un modèle, et qui se traduit par un ensemble de valeurs possibles pour la variable (par exemple, sous la forme d'un intervalle).

- La Spécialisation d'un modèle est une caractérisation des hypothèses et des informations qui restreignent son champ d'application.

Ces travaux sont en cours de réalisation au sein du laboratoire TREFLE et feront l'objet de validation sur des applications industrielles.

4. Conclusion et perspectives

Nous avons présenté, dans le cadre du développement d'un outil d'aide à la conception, une démarche d'analyse et structuration d'un problème de conception. Cette démarche, appliquée sur plusieurs projets industriels menés par notre équipe, permet de faire sortir des architectures-solutions validées et éléments permettant de poursuivre vers la conception détaillée. Nous avons présenté aussi les outils permettant l'approche physique et l'analyse des flux générés par les fonctions et leur mise en œuvre à différents niveaux du système. Dans le cadre de ce travail, nous avons appliqué notre démarche sur un système éolien.

La multiplicité des choix possibles, des interactions entre les différents paramètres du problème et des points de vue à prendre en compte rend la définition des systèmes éoliens difficile. Sur cet exemple, nous avons montré qu'on peut formaliser sous forme d'une base de connaissances des modèles et des solutions correspondant à une fonction donnée du système. Cette analyse se fait à différents niveaux systémiques et permet de dégager des modèles liés à un niveau de description et associés à des alternatives de solutions possibles.

Dans la suite de nos travaux, nous allons développer des modèles à des niveaux systémiques de description plus fine. Ces modèles seront qualifiés par leurs critères de qualification (PEPS).

Nomenclature

C_e	Couple d'entrée du multiplicateur	C_p	Chaleur massique
C_s	Couple de sortie du multiplicateur	T_e	Température d'entrée
ω_e	Vitesse de rotation de l'arbre d'entrée du multiplicateur	T_s	Température de sortie
ω_s	Vitesse de rotation de l'arbre d'entrée du multiplicateur	\bar{T}	Température moyenne
η_m	Rendement du multiplicateur	A	Surface d'échange
q	Débit	π_m	Facteur d'efficacité du multiplicateur
k	Coefficient global d'échange	ε_h	Efficacité de l'échangeur
Φ	Puissance perdue	<i>Indice a</i>	Air
<i>NUT</i>	Nombre d'unités de transfert	<i>Indice h</i>	Huile

Bibliographie

- [AFN 90] AFNOR. « NF X50-150/151, analyse de la valeur, analyse fonctionnelle : vocabulaire NF », Association Française de Normalisation, paris, 1990-1991.
- [ARB 03] Arbaoui A., Nadeau J.P., Sébastien P., Bchir L., Brakez A., « Aide à la décision pour la définition d'un système éolien adapté à un site donné », congrès international CPI 2003, 22-24/10/03, Meknès, Maroc.
- [ARB 05] Arbaoui A., Nadeau J.P., Sébastien P., « Constraint modelling and decision support for wind energy », 12th Seminar on Life Cycle Engineering, CIRP 2005, 3-5 April, Grenoble, France.
- [HUB 01] Hubka V., Eder E., « Design Science », *Edited for the web by Filippo A. Salustri, 2001.*
- [KAY 84] Kay W., London A. L., « Compact Heat Exchangers », McGraw-Hill Book Company, second edition (1984).
- [NAD 05] Nadeau J.P., Pailhes J., Dore R., Scaravetti D., « Analyser, qualifier et innover en conception par les lois d'évolution TRIZ », *6e Congrès international de génie industriel – 7-10 juin 2005 – Besançon (France).*
- [SAV 00] Savransky S.D. « Engineering of creativity: Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving », *CRC Press, Boca Raton, 2000.*

- [SCA 04] Scaravetti D., « Formalisation préalable d'un problème de conception, pour l'aide à la décision en conception préliminaire », Thèse de doctorat, ENSAM, 2004.
- [SCA 05] Scaravetti, D., Nadeau, J-P., Pailhès, J., Sebastian, P. « Structuring of embodiment design problem based on the product lifecycle », *International Journal of Product Development*, Vol. 2, n° 1/2, pp.47-70, Inderscience, Geneva (2005).
- [ULL 03] Ullman D.G, « *The mechanical design process* », 3rd edition, McGraw-Hill Higher Education, New York, 2003.
- [VER 04] Vernat Y., « Formalisation de modèles par contraintes en conception préliminaire », Thèse de doctorat, ENSAM, 2004.
- [VER 05] Vernat Y., Nadeau J.P., Sébastien P., Fischer X., « Démarche de formalisation de modèles adaptés à la conception préliminaire » *6e Congrès international de génie industriel* – 7-10 juin 2005 – Besançon (France).
- [WIL 76] Wilson R. E., Lissaman P. B. S., Walker S. N., « Aérodynamique performance of wind turbines », ERDA/NSF/04014-76/1, Washington, DC, 1976.
- [ZIM 01] Zimmer L., Zablitz P., « Global aircraft predesign based on constraint propagation and interval analysis », proceedings of CEAS Conference on multidisciplinary Aircraft design and Optimisation, Köln, Germany, June 2001.