

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

RAPPORT D'ÉTAPE

PROJET DE FIN D'ÉTUDES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE LOGICIEL ET DES TI

Optimisation des paramètres d'une éolienne en mouvement

Auteur :

Pierre-Alexandre ST-JEAN
<pa@stjean.me>

Superviseur :

Dr. Christian DESROSIERS
<christian.desrosiers@etsmtl.ca>

Table des matières

Résumé	2
1 Introduction	2
1.1 Problématique et contexte	2
1.2 Objectifs	3
2 Méthodologie	3
2.1 Analyse du modèle	4
2.1.1 Caractérisation du C_p (efficacité) de l'éolienne	4
2.1.2 Modélisation de l'espace d'état	5
2.1.3 Modélisation de l'algorithme génétique	5
2.1.4 Modélisation du système de contrôle	5
2.2 Intégration du modèle	5
2.3 Gestion du projet	6
3 Résultats	6
3.1 Sommaire des travaux réalisés	6
3.2 Recommandations	6
4 Planification	6
4.1 Artéfacts	7
4.2 Risques	9
4.2.1 Risques et mitigation de ces risques	9
4.2.2 Impact, probabilité et exposition aux risques	9
Références	10
Annexes	II
Annexe A Architecture Électrique du Chinook 3	II
Annexe B Calcul de l'impact, la probabilité et de l'exposition aux risques	I2
B.1 Niveaux de probabilités/Impact	I2
B.2 Calcul de Probabilité/Impact	I2
B.3 Exposition au risque	I2

Résumé

Le club étudiant Chinook de l'ÉTS afin de continuer son succès en compétition améliore continuellement son véhicule éolien. Un système de contrôle pour l'éolienne tel que celui présent dans les éoliennes statiques doit être mis en place afin d'améliorer la performance du véhicule. Le contrôle de l'angle d'attaque et de la vitesse de rotation de l'éolienne est la façon la plus commune d'ajuster la puissance de sortie d'une éolienne. Afin d'arriver à optimiser le système, l'éolienne du véhicule est d'abord caractérisée expérimentalement puis un système de contrôle de l'angle d'attaque et du ratio de transmission par algorithme génétique est développé, analysé et testé théoriquement et expérimentalement. Le système de contrôle utilisé n'est pas un système conventionnel (PI,PID,etc.) auquel une seule entrée et une seule sortie est considérée, mais plutôt un système dans l'espace d'état dans lequel plusieurs entrées et plusieurs sorties sont considérées.

Résumé des résultats à venir ...

1 Introduction

1.1 Problématique et contexte

Le club étudiant Chinook¹ de l'ÉTS est un regroupement d'étudiants qui analysent, conçoivent et construisent un véhicule propulsé par une éolienne [figure 1.1]. Le véhicule participe, chaque année, depuis deux années à une compétition de véhicules du même type et participe à des courses contre la montre. Le véhicule est ensuite évalué selon sa performance en fonction de sa vitesse par rapport à la vitesse du vent.

La compétition vise à ammener les étudiants à développer de nouvelles technologies pour les éoliennes, plus précisément pour des éoliennes de petites dimensions. Afin de rendre la compétition intéressante, elles sont utilisées en tant que moteur d'un véhicule de petite dimension. Un tel véhicule ne serait pas viable mais une telle technologie pourrait facilement être adapté sur d'autres médiums tels que les éoliennes sur des navires ou pour des bâtiments.



FIGURE 1 – Le Chinook 1 et le Chinook 2 en exposition dans le Hall A de l'ÉTS

Pour améliorer le véhicule, permettre à l'équipe de bien performer et rester compétitif, l'équipe installe un système électro-mécanique de contrôle de l'angle d'attaque des pales. La transmission du véhicule sera aussi modifiée afin de pouvoir être asservi électroniquement.

Afin de pouvoir contrôler ces systèmes électriques, des modèles de contrôle et d'optimisation de la puissance de l'éolienne doivent être créés. Les modèles disponibles sur les éoliennes statiques peuvent s'appliquer pour une éolienne en mouvement mais doivent être modifiés afin de prendre en compte plusieurs facteurs.

[LPW09] décrit plusieurs méthodes de contrôle des éoliennes mais la plupart de ces méthodes ne vont pas chercher le point maximum de puissance, elle vont plutôt chercher un point stable de contrôle qui permet d'offrir une puissance stable pour les générateurs électriques. (author?) [MJ09] va

1. <http://chinookets.com>

chercher le point maximum de puissance de l'éolienne, mais seulement dans le cas où la vitesse du vent est sous la vitesse prescrite de l'éolienne. (author?) [OB12] dans son article utilise un algorithme génétique couplé à un algorithme flou (fuzzy control system), la méthode semble fonctionner mais celui-ci ne semble pas prendre en compte les changements de vitesse de rotation de l'éolienne et les variations de la vitesse du vent.

1.2 Objectifs

Le présent projet a pour but d'amener l'éolienne du Chinook 3 [figure : 1.2] à opérer dans les conditions et à l'aide des paramètres d'opérations les plus optimales possibles. Pour ce faire, l'éolienne doit être caractérisé, un modèle de contrôle et d'optimisation de l'angle d'attaque (β) des pales et du ratio de transmission qui affecte la vitesse de rotation de l'éolienne (ω) doit être conçu, analysé puis ce modèle doit être implanté dans le logiciel de la carte électronique de calcul.

Le système de contrôle pourra, à tout moment et selon certaines conditions, changer l'angle d'attaque des pales (β) où le ratio transmission afin d'atteindre les performances optimales de l'éolienne dans les conditions de vitesse du véhicule et de vitesse du vent.

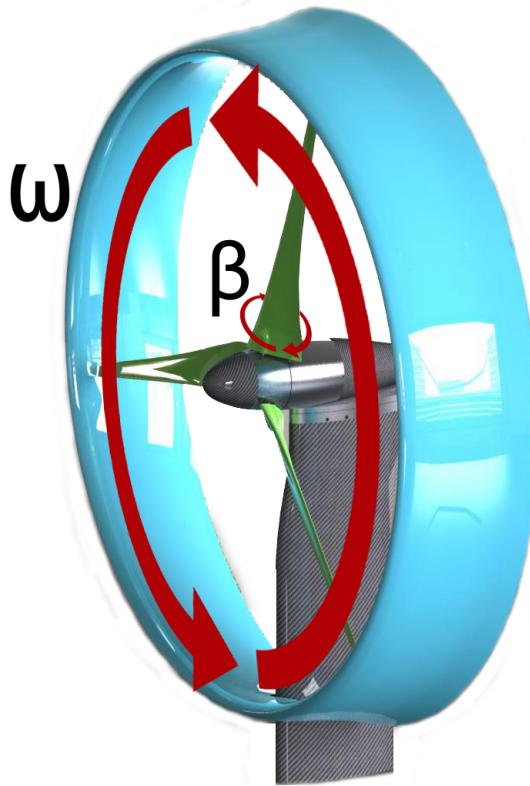


FIGURE 2 – Rendu 3D du mat et du rotor du Chinook 3

Un tel modèle ainsi opérationnel dans les systèmes de contrôle du Chinook permettra au véhicule d'atteindre de meilleures vitesses et ce plus rapidement tout en permettant de conserver les vitesses atteintes et de mieux résister aux turbulences environnementales que par les années passées.

2 Méthodologie

La méthode de résolution du problème peut être résumée par étape :

1. Caractérisation du C_p (efficacité) de l'éolienne
2. Modélisation de l'espace d'état

3. Modélisation de l'algorithme génétique
4. Modélisation du système de contrôle
5. Implémentation sur la carte de calcul

2.1 Analyse du modèle

La puissance de l'éolienne est donné par :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

Où :

- P_t : la puissance de sortie de l'éolienne (watts)
- ρ : la densité de l'air ambiante ($\approx 1.225 \text{ kg/m}^3$)
- R : le rayon de l'éolienne (m)
- λ : le ratio de vitesse en bout de pale (tip-speed ratio)

$$\lambda = \frac{\omega_t * R}{v} \quad (2)$$

- ω_t : la vitesse de rotation de l'éolienne (rad/s)
- β : l'angle d'attaque des pales (rad)
- C_p : l'efficacité de l'éolienne en fonction de l'angle d'attaque des pales et du ratio n de vitesse en bout de pale
- v : la vitesse de vent relative à l'éolienne (m/s)

Le coefficient de puissance de l'éolienne peut être obtenu à l'aide de cette équation :

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 * \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (3)$$

Où :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{0.035\lambda + 0.08\beta}{1 + \beta^3} \quad (4)$$

Le torque produit de l'éolienne est défini comme :

$$T_t = \frac{P_t}{\omega_t} \quad (5)$$

2.1.1 Caractérisation du C_p (efficacité) de l'éolienne

La caractérisation de l'éolienne est effectuée expérimentalement. On récupère les données de torque, de vitesse de rotation, de vitesse de vent et d'angle d'attaque et on fait une régression paramétrique sur l'équation C_p afin de trouver toutes les constantes $c_1 \dots c_6$.

Premièrement on doit isoler C_p dans l'équation mécanique de puissance à l'aide de l'accélération angulaire :

$$P = I\alpha \quad (6)$$

Avec I l'inertie totale du système qui pour la plateforme de test du Chinook est de 0.788195 et α qui est l'accélération angulaire (rad/s^2) de l'éolienne.

À l'aide de l'équation 1 et 6 on peut faire une régression paramétrique de type Levenberg-Marquardt afin de trouver les paramètres $c_1 \dots c_6$.

2.1.2 Modélisation de l'espace d'état

La modélisation dans l'espace d'état [Wiki13] est un modèle mathématique du système complet de l'éolienne et du Chinook. Une telle représentation permet de connaître l'état de ce système selon les variables d'entrée les variables de sorties et les états.

L'état du système peut être représenté par ces équations :

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \quad (7)$$

$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) \quad (8)$$

- $x(\cdot)$ est le vecteur d'état
- $y(\cdot)$ est le vecteur de sortie
- $u(\cdot)$ est le vecteur de contrôle
- $A(\cdot)$ est la matrice d'état
- $B(\cdot)$ est la matrice de contrôle
- $C(\cdot)$ est la matrice de sortie
- $D(\cdot)$ est la matrice d'action directe

L'espace d'état peut aussi être représenté par le graphique à la figure 2.1.2.

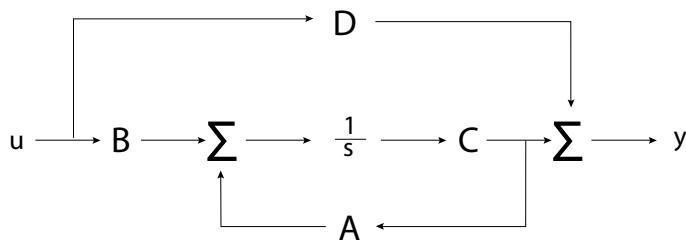


FIGURE 3 – Représentation en bloc de l'espace d'état

... La modélisation des équations dans l'espace d'état suivra.

2.1.3 Modélisation de l'algorithme génétique

La méthodologie pour la modélisation de l'algorithme génétique de maximisation de la puissance de l'éolienne n'est pas encore fait et viendra.

2.1.4 Modélisation du système de contrôle

La méthodologie pour la modélisation du système de contrôle de l'éolienne n'est pas encore fait et viendra.

2.2 Intégration du modèle

Le modèle après analyse doit être intégré à l'intérieur de la carte électronique de calcul (figure 2.2) conçue à cette fin. C'est une carte composée d'un microcontrôleur 16 bit de 70 mips ayant 512 KB d'espace programme et 50 KB de mémoire vive

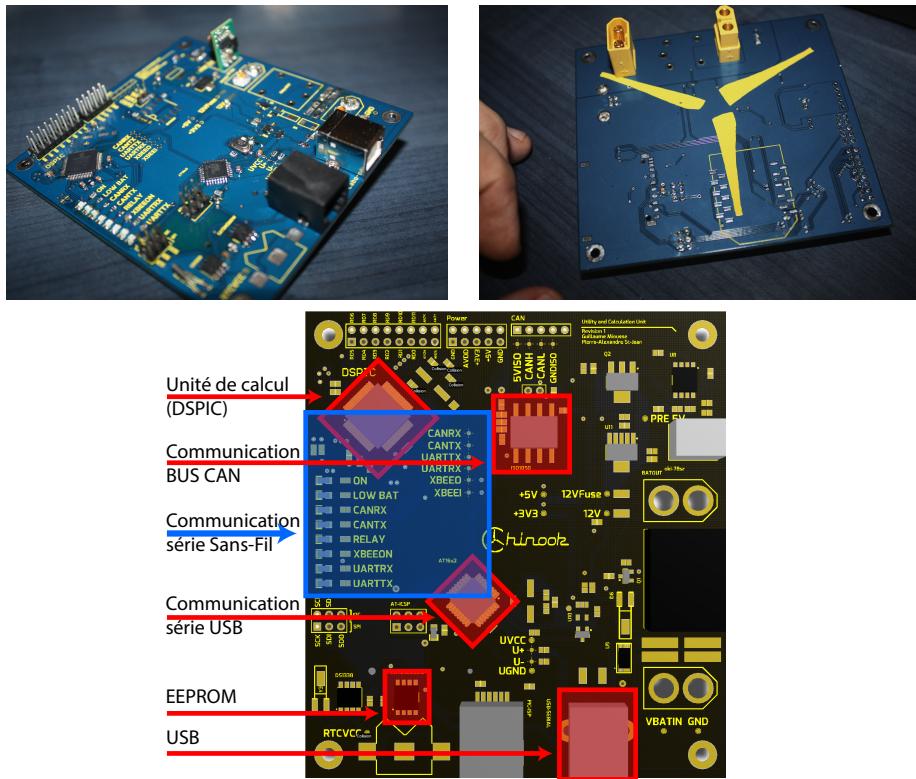


FIGURE 4 – La carte électronique de calcul

Le code de contrôle doit y être intégré. Premièrement les bibliothèques de communication et l'application qui permet de faire fonctionner la carte doit fonctionner. Puis on intègre le modèle mathématique en le transformant en programme en C utilisant les données reçus des autres cartes.

2.3 Gestion du projet

3 Résultats

3.1 Sommaire des travaux réalisés

À la suite de plusieurs lectures et recommandations le projet a beaucoup avancé au niveau des choix. Les algorithmes et la méthodologie qui permettent de trouver le C_p de l'éolienne ont été fait. L'implémentation du code de base et de la documentation pour le logiciel de la carte de contrôle est presque terminé, seul le module d'encodage et de décodage des données pour les communications reste à être fait.

Une partie de la méthodologie est faite et il ne reste que la documentation de la méthodologie par algorithme génétique et l'analyse du système dans l'espace d'état.

3.2 Recommandations

Pour l'instant, l'avancement du projet suit la planification, par contre il reste plusieurs choses à faire. Un sprint sera donné dans les prochaines semaines afin d'obtenir des résultats sur la performance de l'éolienne et afin d'avoir une méthodologie complète afin de pouvoir tester en condition réelles les performances de l'éolienne avec le nouveau système de contrôle. Un accent sur l'implémentation des logiciels et la documentation de la méthodologie sera mis car la façon de construire le système est bien comprise dans l'ensemble.

4 Planification

L'état d'avancement du projet peut être consulté sur Trello à l'adresse suivante :
<https://trello.com/board/wind-apprentice/518a9df2d4ebe4e1a000b36>

FIGURE 5 – Planification du projet sur Trello

Tâche	Début - Fin	Effort estimé
Fiche de renseignement	26 Mars 2013	1h
Proposition de projet	6 Mai 2013 - 12 Mai 2013	15h
Rapport Étape	12 Mai 2013 - 21 Juin 2013	25h
Rapport Final	21 Juin 2013 - 31 Juillet 2013	30h
Présentation	21 Juin 2013 - 31 Juillet 2013	5h
Planification du projet	8 Mai 2013 - 31 Juillet 2013	5h
Compétition Racing Aeolus 2013	17 Août	
Rencontre avec professeur superviseur	(Au besoin)	3h (1h)
Rencontre avec François Dubé, étudiant de maîtrise spécialisé dans le contrôle des éoliennes		2h
Mise en place de l'environnement de développement	12 Mai - 18 Mai	5h
Spécification du projet	12 Mai - 1 Juin	15h
Programme de caractérisation de l'éolienne	12 Mai - 30 Mai	15h
Récolte de données	Mi-juin	12h
Caractérisation de l'éolienne	Mi-juin	6h
Outils de simulation & de visualisation	12 Mai	30h
Programme génétique d'optimisation	1 Juin - 15 Juillet	30h
Carte électronique : implémentation de base	10 mars 2013 - 20 Mai 2013	30h
Carte électronique : ajout du logiciel d'optimisation	1 Juillet 2013 - 31 Juillet 2013	20h
Tests sur route	Mi-Juillet	3 fois 6h

4.1 Artéfacts

Artéfact	Description
Proposition de projet	Le présent document qui décris sommairement en quoi consistera le projet, ça planification et la façon dont il sera exécuté.
Rapport d'étape	Document décrivant l'avancement du projet et la façon dont le projet est analyser et conçu
Rapport final	Document décrivant le projet dans son ensemble.
Présentation	Préparation et mise en page de la présentation du projet au département de Génie Logiciel et des TI à la fin de la session
Article	Article scientifique décrivant la méthode utilisée pour caractériser l'éolienne et créer l'algorithme d'optimisation (intégré dans le rapport)
Spécifications	Documents de spécifications des différents sous-projets que ce projet génère. Sous forme de *readme* dans chaque sous-projet
Carte électronique : implémentation de base	Implémentation permettant de faire fonctionner tout les composantes de la carte électronique et prêt à accueillir la fonction de calcul. Cet implémentation permet de faire fonctionner les modules de communication soit le XBEE, le module CAN et le module de USB-SERIAL. L'implémentation permettra aussi de faire fonctionner le module de mémoire morte (EEPROM), le module de surveillance électrique et le module d'horloge (realtime clock).
Carte électronique : Logiciel d'optimisation	Implémentation du logiciel d'optimisation génétique à l'intérieur de la carte électronique en language C
Programme de caractérisation de l'éolienne	Programme d'algorithme génétique faisant une opération de Curve-fitting
Outils de simulation	Outils mathématiques permettant de simuler le fonctionnement de l'éolienne dans des conditions réelles.
Algorithme génétique d'optimisation	Algorithme permettant d'optimiser les paramètres de l'éolienne selon des conditions quasi réelles d'opération
Données de banc d'essai	Données récoltés en fixant certains paramètres de l'éolienne.
Algorithme génétique de caractérisation de l'éolienne	Algorithme permettant de caractérisé la fonction de puissance de l'éolienne en fonction des données récoltés
Outils de simulation & de visualisation	Outils mathématiques et algorithmiques qui permettent de simuler des conditions fictive et de voir les performances de l'éolienne et des algorithmes selon ces conditions
Planification de projet	La planification de projet initiale est produite à l'intérieur de ce document. Elle ensuite continuée sur la plateforme Trello (Voir la section ??)
Environnement de développement	L'environnement de développement est l'ensemble des outils utilisés lors de ce projet. L'environnement de développement permet de bien intégrer les différents outils entre eux.

4.2 Risques

4.2.1 Risques et mitigation de ces risques

Risque	Description & Mitigation
Risque que la préparation du véhicule ne respecte pas les délais	Ce risque peut-être mitigé en ayant un bon suivi de l'avancement et de la construction du véhicule et en offrant de l'aide si nécessaire.
Complexité du domaine d'application	Le domaine de l'application des énergies éoliennes et de la mécanique des fluides est un domaine complexe, ce risque peut être mitigé en ayant les bons renseignements en main. Plusieurs ressources sont disponibles, soit à l'intérieur du club étudiant Chinook ou auprès des professeurs spécialisés dans ce domaine.
Manque de données	En s'assurant d'obtenir assez de données lors des sorties de banc d'essai, ce risque est facilement évitable.
Non fonctionnement de la méthode d'optimisation	Ce risque peut être évité en se renseignant sur l'application et la pertinence de la méthode utilisée. Toutefois, la méthode manuelle de contrôle reste toujours disponible.
Complexité du projet	Ce risque peut être évité en se documentant correctement sur les méthodes utilisées et en s'assurant de la compréhension de ces méthodes

4.2.2 Impact, probabilité et exposition aux risques

Risque	Impact	Probabilité	Exposition
Risque que la préparation du véhicule ne respecte pas les délais	Élevé	Élevé	0.3734
Complexité du domaine d'application	Moyen	Haut	0.1698
Manque de données	Haut	Faible	0.0679
Non fonctionnement de la méthode d'optimisation	Haut	Faible	0.0679
Complexité du projet	Moyen	Bas	0.0309

La façon de calculer l'impact des risques et leur probabilités est faite selon la méthode de PÉRIL². Voir les tableaux en [Annexe B] afin de voir les calculs.

Références

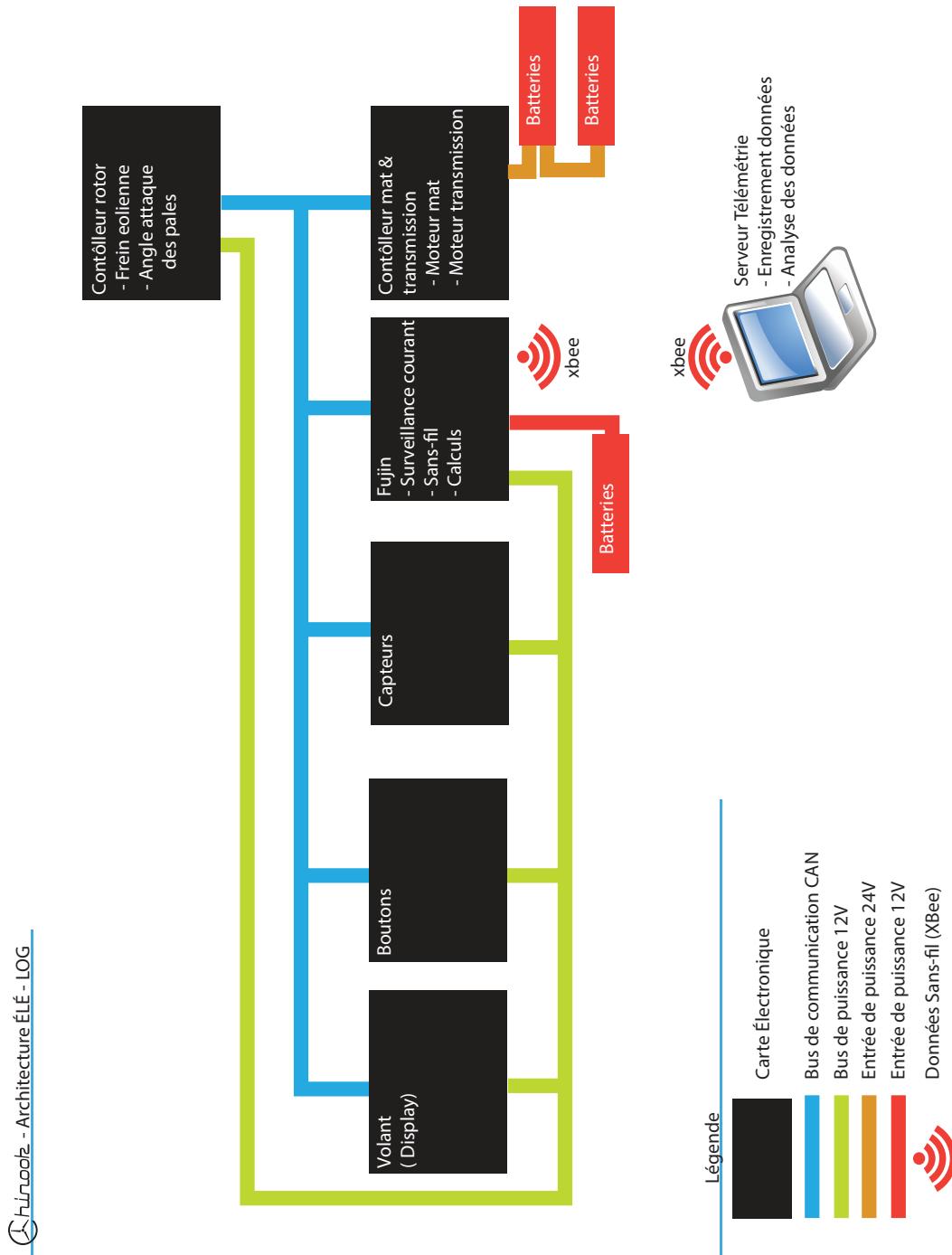
- [Adz11] Gojko Adzic. *Specification by Example : How Successful Teams Deliver the Right Software*. Manning Publications, 2011.
- [EKo06] Kostas Kalaitzakis Eftichios Koutroulis. Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 53. No.2, 2006.
- [JsK12] Hoon Heo Jun-sung Kim, Jong-hyun Jeon. Hybris dso-ga-based sensorless optimal control strategy for wind turbine generators. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27, 2012.

2. <http://msdn.microsoft.com/en-us/magazine/dd315417.aspx>

-
- [LPW09] J.H. Laks, Lucy Y. Pao, and A.D. Wright. Control of wind turbines : Past, present, and future. In *American Control Conference, 2009. ACC '09*, pages 2096--2103, 2009.
 - [MJ09] Nedjelko Peri Mate Jelavic. Wind turbine control for highly turbulent winds. *Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, Vol.50 No.3-4 December 2009., 50. No.3-4, 2009.
 - [OB12] Mohamed Cherkaoui Ouissam Belghazi. Pitch angle control for variable speed wind turbines using genetic algorithm controller. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 39. No. 1 :005 -- 010, 2012.
 - [RP08] Nicholas F. McPhee Riccardo Poli, William B. Langdon. *A Field Guide to Genetic Programming*. lulu, 2008.
 - [Wik13] Wikipedia. State space representation--- Wikipedia, the free encyclopedia, 2013. [Online ; accessed 21-june-2013].

Annexes

A Architecture Électrique du Chinook 3



B Calcul de l'impact, la probabilité et de l'exposition aux risques

Voici les tableaux représentant le calcul de l'impact, la probabilité et l'exposition des risques selon la méthode de PERIL.

B.1 Niveaux de probabilités/Impact

Terme	Définition
Haut	Risque qui aurait une forte probabilité ou dont l'impact risquerait de mettre le bon bon déroulement du projet en jeu (retard de plusieurs jours)
Moyen	Risque qui aurait une moyenne probabilité de survenir ou dont l'impact risquerait de retarder le projet de quelques jours.
Bas	Risque qui aurait une faible probabilité de survenir ou dont l'impact risquerait de ne peu ou pas retarder le projet (quelques heures).

B.2 Calcul de Probabilité/Impact

Niveau	Calcul	Probabilité ou Impact
Haut	$\frac{1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3}}{3}$	0.6111
Moyen	$\frac{\frac{1}{2} + \frac{1}{3}}{3}$	0.2777
Bas	$\frac{\frac{1}{3}}{3}$	0.1111

B.3 Exposition au risque

L'exposition au risque est la probabilité multipliée par l'impact

	Haut	Moyen	Bas
Haut	0.3734	0.1698	0.0679
Moyen	0.1698	0.0712	0.0309
Bas	0.0679	0.0309	0.0123