

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI**

**SYSTÈMES HYBRIDES ÉOLIEN-DIESEL EN CLIMAT  
FROID**

**LE CAS DE LA BASE ANTARCTIQUE JUBANY**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie

en vue de l'obtention du grade de maître en sciences appliquées

PAR

© **RENÉ G. CORRAL-RODRIGUEZ**

**Décembre 2012**

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI  
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.



**Composition du jury :**

**Hussein Ibrahim, président du jury, UQAR**

**Adrian Ilinca, directeur de recherche, UQAR**

**Mazen Ghandour, examinateur externe, Université Libanaise de Beyrouth**

Dépôt initial le 17 mai 2012

Dépôt final le 12 décembre 2012



Pour Natalia Inés, Renata  
Sofía, Micaela Gabriela et Magdalena :  
mes moteurs de recherche



## **REMERCIEMENTS**

Tout d'abord, je dois remercier le Prof. Adrian Ilinca, directeur du LREE et de ma recherche. C'est lui qui m'a proposé de faire la conception d'un système hybride éolien-diesel pour la base antarctique Jubany, et c'est lui qui m'a guidé pendant ces années d'étude.

Le Lieutenant-colonel Orlando Interlandi et les techniciens à Jubany 2010-11, MM. Cancino, Vázquez, Sandoval et Gaona ont eu une contribution essentielle à la réalisation de cette recherche, je leur suis reconnaissant.

Jorge Carlos Lusky, du département technique et logistique polaire de la Direction nationale de l'Antarctique (DNA) en Argentine, a répondu à mon long courriel de questions sur les coûts de la génération électrique à Jubany.

Le Prof. Gustavo Ferreyra et la Dre. Irène Schluss ont fourni une excellente liaison et ont assuré la communication avec la DNA, ils m'ont donné en même temps leur amitié.

Je dois aussi mes remerciements à Mathieu Jacob, qui a été le coauteur du rapport de préfaisabilité d'un système éolien-diesel pour Jubany en 2009 et à Olivier Parent, qui a partagé avec moi son savoir-faire sur l'exploitation des éoliennes en climat froid.

Pour les compagnons de la salle K-250, des étudiants à la maîtrise en génie, qui ont fait du processus d'apprentissage un vrai plaisir par le partage de leurs connaissances et leur curiosité intellectuelle, et spécialement pour la vieille garde, Fahed et Sorin, un gros merci.

Je ne peux conclure ces remerciements que par la mention de Natalia Inés et Renata Sofía, mes filles, et surtout de mon épouse, Micaela Gabriela, les raisons de ma vie et les motifs premiers de tous mes travaux. *Gracias Corazones.*



## ***RÉSUMÉ***

Dans ce mémoire nous étudions le processus d'intégration d'éoliennes à des réseaux électriques isolés utilisant des génératrices diesel en conditions de climat froid, en se basant sur le cas de la base scientifique antarctique argentine Jubany. Le but du mémoire est de développer une procédure de conception selon les méthodologies, recommandations et expériences actuelles des organismes de normalisation et de l'industrie pour implanter un système hybride éolien-diesel opérant dans le climat froid de Jubany dans des conditions optimales d'efficacité et durabilité. La conception du système est faite jusqu'à un niveau architectural afin d'illustrer la disposition et les spécifications techniques générales des principaux équipements.

La méthode suivie est d'utiliser la série des spécifications techniques TS 62257 de l'IEC (la Commission électrotechnique internationale), ensemble de documents pour concevoir et implanter des systèmes hybrides, comme une procédure de conception de base, d'ajouter à cette procédure la prise en compte des effets du froid sur le système, tels que décrits dans les documents sur l'exploitation de l'énergie éolienne en climats froids de l'IEA (l'Agence internationale d'énergie). Cette méthodologie est enrichie par l'analyse d'installations hybrides éoliennes-diesel en climat arctique/antarctique, utilisées comme sources pour faire des choix lors de la conception du système hybride à Jubany. Les architectures proposées sont modélisées dans le logiciel Homer afin d'évaluer la production d'énergie et la diminution possible de consommation de carburant.

Nous concluons que la série de normes TS 62257 est une procédure adéquate pour évaluer les conditions d'implantation du projet et réaliser de façon normalisée les premières étapes de conception, toujours en considérant les effets du froid sur le système. Pour le cas de Jubany, nous avons évalué l'état actuel des conditions climatiques (vitesses de vent, températures) et le système électrique en activité pour proposer des recommandations pour l'installation du système hybride éolien-diesel.

Mots clés : Antarctique, climat froid, cogénération, éolien-diesel, IEC TS 62257, Jubany, logiciel Homer, normalisation



## ***ABSTRACT***

The present work studies the process of coupling wind turbines with local isolated diesel generator to provide electricity to remote power grids in a cold climate. Different scenarios of wind penetration are evaluated and the methodology is applied to a specific site, the scientific Antarctic Argentinean base "Jubany". The goal of the thesis is to develop a design procedure in agreement to the most recent methodologies, recommendations and experiences of the standardization organisations and of the industry to successfully implement an effective and sustainable wind-diesel hybrid system operating in the cold climate at Jubany. The system design is made up to an architectural level, showing the layout and general technical specifications of the major equipments.

The method follows the technical specifications TS 62257 of the IEC, the International Electrotechnical Commission, which is a set of recommendations to design and implement hybrid systems. This norm has been used as a basic design procedure, to which have been added specific aspects of the cold climate effects, as described in documents of the IEA, the International Energy Agency. Other examples of hybrid wind-diesel facilities in Arctic/Antarctic climate, either operational or proposed, have been analyzed as a source of technological ideas to make design proposals for the hybrid system at Jubany. The proposed architectures are simulated with Homer software to assess their energy production, cost of energy and fuel savings.

It is concluded that the norm TS 62257 is a good basic procedure to organise and evaluate the input information and complete the first steps of design in a standardized way, even considering the effects of the cold climate on the system. For the Jubany case, conclusions are presented regarding the current state of information of the climate (wind, cold) and of the electrical system in operation and recommendations are made to prepare the installation of the hybrid wind-diesel system.

*Keywords:* Antarctica, cogeneration, cold climate, Homer software, IEC TS 62257, Jubany, standardization, wind-diesel



## *TABLE DES MATIÈRES*

REMERCIEMENTS.....	IX
RÉSUMÉ.....	XI
ABSTRACT .....	XIII
TABLE DES MATIÈRES .....	XV
LISTE DES TABLEAUX .....	XXI
LISTE DES FIGURES.....	XXIII
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES .....	XXVII
LISTE DES SYMBOLES .....	XXIX
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 DOCUMENTS NORMATIFS ET DONNÉES D'ENTRÉE .....	5
1.1 LA BASE ANTARCTIQUE DE JUBANY.....	5
1.2 LES DOCUMENTS NORMATIFS APPLICABLES AUX SYSTÈMES HYBRIDES.....	7
1.2.1 LA SÉRIE DE SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES IEC TS 62257.....	9
1.3 CAHIER DE CHARGES.....	10
1.3.1 FACTEURS TECHNIQUES .....	11
1.3.2 FACTEURS ÉCONOMIQUES.....	13
1.3.3 CARACTÉRISTIQUES DU SITE.....	14
1.3.4 CONTRAINTES RÉGLEMENTAIRES ET AUTRES EXIGENCES .....	25
1.4 LE SYSTÈME ÉLECTRIQUE ET LES AUTRES GÉNÉRATEURS D'ÉNERGIE .....	27
1.4.1 DESCRIPTION FONCTIONNELLE DU SOUS-SYSTÈME DE PRODUCTION.....	28
1.4.2 LES GÉNÉRATRICES DIESEL ACTUELLES À JUBANY .....	30
1.4.3 LE STOCKAGE DE CARBURANT.....	36

1.4.4	LES AUTRES GÉNÉRATEURS D'ÉNERGIE DANS LA BASE .....	36
1.4.5	DESCRIPTION FONCTIONNELLE DU SOUS-SYSTÈME DE DISTRIBUTION ..	38
1.4.6	LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE À JUBANY .....	41
1.4.7	DESCRIPTION FONCTIONNELLE DU SOUS-SYSTÈME DE DEMANDE .....	45
1.4.8	LES TYPES DE CHARGES ÉLECTRIQUES À JUBANY .....	45
1.5	COÛTS OPÉRATIONNELS PENDANT 2010-11 .....	50
1.5.1	LE COÛT OPÉRATIONNEL DU KILOWATTHEURE .....	52
1.6	ÉVALUATIONS DES DONNÉES D'ENTRÉE.....	53
1.6.1	ÉVALUATION DE LA CONNAISSANCE DU SITE .....	53
1.6.2	ÉVALUATION DE LA CONNAISSANCE DE LA CHARGE .....	55
1.6.3	ÉVALUATION DE LA CONNAISSANCE DU VENT .....	56
1.6.4	LES FAIBLESSES DE L'INFORMATION ACTUELLE SUR JUBANY .....	58
<b>CHAPITRE 2 LES EFFETS DU CLIMAT FROID.....</b>		<b>61</b>
2.1	MESURES MÉTÉOROLOGIQUES EN CLIMAT FROID.....	64
2.1.1	MESURES MÉTÉOROLOGIQUES PENDANT L'ÉVALUATION DU SITE .....	64
2.1.2	ORIGINES ATMOSPHÉRIQUES DU GIVRE.....	67
2.1.3	DÉTECTEURS DU GIVRAGE ATMOSPHÉRIQUE .....	69
2.1.4	ANÉMOMÉTRIE MULTIPLE.....	70
2.1.5	DÉTECTEURS DU POINT DE ROSÉE .....	71
2.1.6	DÉTECTEURS ET ANÉMOMÉTRIE PENDANT LE STADE D'OPÉRATION .....	72
2.1.7	DÉTECTION PAR ERREURS DANS LA COURBE DE PUISSANCE .....	74
2.1.8	SURVEILLANCE DU GIVRE PAR VIDÉO .....	74
2.1.9	DÉTECTION PAR VIBRATIONS ET BRUIT DE LA TURBINE.....	75
2.1.10	L'ÉTUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL EN CLIMAT FROID.....	76
2.2	LES TURBINES ÉOLIENNES EN CLIMAT FROID .....	77
2.2.1	L'IMPACT DU CLIMAT FROID SUR LA PRODUCTION D'ÉNERGIE .....	79
2.2.2	CONTRÔLE DES TURBINES ÉOLIENNES EN CLIMAT FROID .....	82
2.2.3	EFFET DU FROID SUR LE CONTRÔLE PAR DÉCROCHAGE.....	84
2.2.4	SYSTÈMES D'ANTIGIVRAGE ET DE DÉGIVRAGE DES ÉOLIENNES.....	86

2.2.5	LES SYSTÈMES POUR CLIMAT FROID DES ÉOLIENNES .....	90
2.3	LES GÉNÉRATRICES DIESEL EN CLIMAT FROID .....	93
2.4	L'INFRASTRUCTURE ET LE TRAVAIL EN CLIMAT FROID .....	96
2.4.1	LES INFRASTRUCTURES DU SITE, LA TOUR ET LES FONDATIONS.....	96
2.4.2	LES CONNEXIONS ET LE CÂBLAGE DU RÉSEAU .....	101
2.4.3	L'ACCESSIBILITÉ ET LE TRAVAIL DANS LE FROID .....	102
2.4.4	LA PROTECTION DU PERSONNEL DE LA GLACE ÉJECTÉE .....	104
2.4.5	OPÉRATION ET MAINTENANCE DANS LE FROID .....	106
2.4.6	DÉMANTÈLEMENT DANS LE FROID .....	107
2.5	ESTIMATION DES PERTES FINANCIÈRES DUES AU FROID .....	108
2.6	PROPOSITIONS DE CONCEPTION RELIÉES AU FROID.....	110
2.6.1	LE VENT ET LE GIVRE.....	110
2.6.2	LA TURBINE, LA TOUR ET LES FONDATIONS .....	111
2.6.3	LE TRAVAIL ET L'INFRASTRUCTURE .....	115
<b>CHAPITRE 3 CONCEPTS DES SYSTÈMES HYBRIDES .....</b>		<b>117</b>
3.1	CONCEPTS ET DISPOSITIFS DES SYSTÈMES HYBRIDES .....	118
3.1.1	LA « QUALITÉ DE LA PUISSANCE ».....	119
3.1.2	LE CONCEPT DE LA PÉNÉTRATION RENOUVELABLE.....	124
3.1.3	LES NIVEAUX DE LA PÉNÉTRATION RENOUVELABLE.....	125
3.1.4	SYSTÈMES À BASSE PÉNÉTRATION .....	127
3.1.5	SYSTÈMES À PÉNÉTRATION MOYENNE.....	127
3.1.6	SYSTÈMES À HAUTE PÉNÉTRATION .....	129
3.1.7	LA COGÉNÉRATION .....	130
3.1.8	COMPENSATEURS SYNCHRONES .....	133
3.1.9	GROUPES ÉLECTROGÈNES À FAIBLE CHARGE .....	135
3.1.10	CHARGES DE DISSIPATION.....	138
3.1.11	TYPES DU STOCKAGE : OBJECTIFS, DURÉE .....	141
3.1.12	STOCKAGE PAR BATTERIES.....	144
3.1.13	STOCKAGE PAR ROUES D'INERTIE .....	145

3.1.14	STOCKAGE PAR ÉNERGIE HYDRAULIQUE .....	149
3.1.15	STOCKAGE PAR AIR COMPRIMÉ .....	150
3.2	EXEMPLES DE SYSTÈMES ÉOLIEN-DIESEL EN CLIMAT FROID .....	151
3.2.1	SYSTÈME À LA STATION ANTARCTIQUE MAWSON .....	151
3.2.2	SYSTÈME À L'ÎLE ROSS, ANTARCTIQUE .....	154
3.2.3	SYSTÈME PROPOSÉ POUR LA BASE ANTARCTIQUE EDUARDO FREI.....	156
3.2.4	SYSTÈME À WALES, ALASKA.....	159
3.2.5	SIMILARITES ET DIFFERENCES POUR LES SYSTEMES ANALYSES .....	164
<b>CHAPITRE 4 CONCEPTION ET MODÉLISATIONS.....</b>		<b>167</b>
4.1	CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT SELON LA NORME TS 62257 .....	168
4.1.1	PARTIES À CONSIDÉRER DANS LA PROPOSITION DE CONCEPTION.....	169
4.1.2	LA GESTION DE L'ÉNERGIE DANS UN SYSTÈME HYBRIDE .....	178
4.1.3	TYPES D'INFORMATION NÉCESSAIRE POUR LA GESTION DU SYSTÈME.	180
4.1.4	METHODOLOGIE PROPOSEE DE CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT	182
4.1.5	PREMIERS PAS DE LA CONCEPTION POUR JUBANY .....	188
4.2	LES MODÉLISATIONS AVEC HOMER POUR LA BASE JUBANY.....	193
4.2.1	MODÉLISATION DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE ACTUEL.....	194
4.2.2	MODÉLISATION DE LA COGÉNÉRATION .....	200
4.2.3	MODÉLISATION DU SYSTÈME HYBRIDE ÉOLIEN-DIESEL.....	204
4.2.4	APERÇU PRÉLIMINAIRE DE LA RENTABILITÉ DU SYSTÈME HYBRIDE ...	215
4.2.5	RÉSULTATS DES MODÉLISATIONS À HOMER.....	218
<b>CONCLUSIONS .....</b>		<b>221</b>
<b>ANNEXE I LES ANTÉCÉDENTS DU PERSONNEL TECHNIQUE.....</b>		<b>231</b>
<b>ANNEXE II PLAN DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE.....</b>		<b>233</b>
<b>ANNEXE III CARTE GEOLOGIQUE DE LA PENINSULE POTTER .....</b>		<b>235</b>
<b>ANNEXE IV COTISATIONS PESO ARGENTIN – DOLLAR DES É.U.A....</b>		<b>237</b>
<b>ANNEXE V MATRICE DE DÉCISION DES ÉOLIENNES DE 10 KW .....</b>		<b>239</b>

<b>ANNEXE VI CONFIGURATIONS DES SYSTÈMES HYBRIDES.....</b>	<b>241</b>
<b>ANNEXE VII SCHEMAS FONCTIONNELS DE LA TS 62257-2.....</b>	<b>243</b>
<b>ANNEXE VIII CALENDRIER 2010-2011 DES GENSETS A JUBANY .....</b>	<b>247</b>
<b>ANNEXE IX MODÉLISATION DE LA CHARGE THERMIQUE.....</b>	<b>249</b>
<b>ANNEXE X TABLEAUX DE FLUX DE TRÉSORERIE DES SYSTÈMES....</b>	<b>253</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>255</b>



## ***LISTE DES TABLEAUX***

Tableau 1. Statistiques météorologiques principales. Source : Corral, 2009 .....	14
Tableau 2. Caractéristiques techniques des gensets actuellement à Jubany .....	31
Tableau 3. Coûts opérationnels annuels .....	51
Tableau 4. Exemple de système d'adaptation pour climat froid.....	90
Tableau 5. Éoliennes d'autour de 10 kW pour Jubany.....	113
Tableau 6. Éolienne de 100 kW pour Jubany .....	114
Tableau 7. Classes de pénétration de systèmes hybrides éolien-diesel .....	126
Tableau 8. Caractéristiques du genset à faible charge Powercorp.....	137
Tableau 9. Caractéristiques des types de charges de dissipation.....	139
Tableau 10. Modes du système de contrôle à Wales .....	163
Tableau 11. Gamme préliminaire des systèmes décentralisés d'électrification .....	171
Tableau 12. Typologie des systèmes décentralisés d'électrification .....	172
Tableau 13. Sujets et numéros des modélisations Homer .....	193
Tableau 14. Dates et conditions des mesures de la charge électrique primaire.....	194
Tableau 15. Données de la vie opérationnelle des gensets .....	196
Tableau 16. Modélisation 6 : Données résultant des gensets modélisés .....	198

Tableau 17. Modélisation°7. Données résultant des gensets modélisés .....	199
Tableau 18. Modélisation°7-Optim. Données résultant des gensets modélisés.....	200
Tableau 19. Modélisation°7-Optim. Scénarios avec un seul genset .....	200
Tableau 20. Modélisation 8. Données thermiques des composants modélisés.....	202
Tableau 21. Modélisation°9. Données thermiques des composants modélisés .....	203
Tableau 22. Modélisation°10. Données thermiques des composants modélisés .....	204
Tableau 23. Modélisation°15, système hybride avec turbines Excel-S sans stockage .....	209
Tableau 24. Modélisation 17, système hybride avec Excel-S et stockage de 18,9 kWh ...	209
Tableau 25. Modélisation 16. Système hybride avec turbines NW100 sans stockage .....	210
Tableau 26. Modélisation 18. Système hybride avec NW100 et stockage de 18,9 kWh...	211
Tableau 27. Analyse financière du système avec une turbine NW100 Antarctique .....	217
Tableau 28. Analyse financière du système avec trois turbines NW100 Antarctique .....	217
Tableau 29. Cotisations mensuelles du peso argentin –dollar américain en 2010.....	237
Tableau 30. Matrice de décision des éoliennes de 10 kW .....	239
Tableau 31. Calendrier 2010-11 des gensets à Jubany.....	247
Tableau 32. Pertes thermiques selon les températures extérieures .....	251
Tableau 33. Flux de trésorerie du système hybride avec 100 kW éoliens .....	254
Tableau 34. Flux de trésorerie du système hybride avec 300 kW éoliens .....	254

## ***LISTE DES FIGURES***

Figure 1. Le chef de base (le troisième) et les techniciens à Jubany, 2010-11 .....	3
Figure 2. Vue panoramique sur la base Jubany. Source : DNA .....	5
Figure 3. Localisation de la base Jubany. Source : Corral, 2009.....	6
Figure 4. Types de facteurs à considérer pour le design. Source : TS 62257-4 .....	10
Figure 5. Fdp de la température de l'air à Jubany. Source: Corral, 2009 .....	14
Figure 6. Fdp de la vitesse du vent à Jubany. Source : Corral, 2009.....	15
Figure 7. La rose des vents à Jubany. Source : Corral, 2009.....	15
Figure 8. Une antenne à Jubany en train de dégeler. Source : O. Interlandi .....	16
Figure 9. La structure des bâtiments. Source : O. Interlandi .....	19
Figure 10. Distribution des espèces à la ZSPA 132. Source : STA.....	21
Figure 11. Les trois parties d'un système d'électrification. Source : TS 62257-9-1 .....	27
Figure 12. Emplacement des 5 gensets (bâtiments 1 et 4). Source : W. Cancino .....	35
Figure 13. Deux images de l'« Usina ». Source : O. Interlandi.....	35
Figure 14. Le genset IV, la plus nouvelle génératrice. Source : O. Interlandi.....	35
Figure 15. Réservoirs de carburant à Jubany. Source : O. Interlandi .....	36
Figure 16. Réservoir de carburant de la chaudière à Jubany. Source : O. Interlandi.....	37

Figure 17. « Boker » du garage. Source : O. Interlandi .....	37
Figure 18. Structure radiale d'un microréseau. Source : TS 62257-4 .....	40
Figure 19. Câble à 4 fils Sintenax à l' « Usina ». Source : O. Interlandi .....	42
Figure 20. Câble Sintenax à 4 fils. Source: Electrogis .....	42
Figure 21. Le bornier de distribution (15). Source : O. Interlandi .....	42
Figure 22. Profil de la charge électrique le 30 juin 2010 .....	47
Figure 23. Profil de la charge électrique le 30 décembre 2010 .....	48
Figure 24. Réflecteur externe et éclairage fluorescent. Source : O. Interlandi .....	48
Figure 25. Moteur compresseur de la chambre hyperbare. Source : O. Interlandi .....	48
Figure 26. Les deux types de givrage présent à Jubany. Source : O. Interlandi .....	68
Figure 27. Vitesse du vent vs température à Jubany, 1994-2008.....	79
Figure 28. Une turbine éolienne givrée. Source : John Maissan, 2001 .....	81
Figure 29. Erreurs de mesure d'un anémomètre givré.....	83
Figure 30. Turbines à vitesse fixe et à vitesse variable. Source : Chris McKay .....	85
Figure 31. Application de revêtement hydrophobique noir. Source : Carrie McLaughlin ..	86
Figure 32. Genset complètement couvert par la neige (sauf l'entrée d'air) .....	94
Figure 33. La résistance électrique qui réchauffe le genset IV. Source : E. Richard.....	94
Figure 34. Fondations sur pergélisol avec une couche active profonde (Baring-Gould).....	97
Figure 35. L'élévation des « Tres Hermanos » (Trois Frères). Source : YouTube (a) .....	100
Figure 36. « Tres Hermanos » et la rose des vents à Jubany. Source : DNA.....	100

Figure 37. Photos du câblage du réseau électrique à Jubany. Source : O. Interlandi .....	101
Figure 38. Transport de pales et de grue vers la base Mawson. Source : Jargstorf.....	102
Figure 39. Tour tubulaire composée de trois sections imbriquées. Source : C. MacKay...	103
Figure 40. Véhicules à chenilles « Logan » à Jubany. Source : O. Interlandi .....	103
Figure 41. L'arrivée des provisions à la plage de Jubany, février 2011 .....	103
Figure 42. Anémomètres chauffés : à gauche, Vaisala; à droite, NRG .....	110
Figure 43. Turbines Northwind 100 « Arctiques » à Unalakleet, Alaska. Source : NPS ...	114
Figure 44. Levage de la turbine IVS-4500 à Base Esperanza. Source : YouTube (b) .....	114
Figure 45. Schéma général d'un système électrique hybride. Source : McGowan .....	118
Figure 46. Le système hybride vu comme une seule entité électromécanique .....	120
Figure 47. Diagramme du contrôle d'une génératrice diesel. Source : Muljadi .....	123
Figure 48. Genset à gaz naturel avec les deux types de cogénération. Source : EES.....	132
Figure 49. Le flux $\phi_m$ est créé par la force magnétomotrice de rotor et stator.....	133
Figure 50. Convertisseur rotatif de 156 kW à Wales, AK. Source : Baring-Gould .....	134
Figure 51. Genset à faible charge, schéma et intérieur. Source : Powercorp .....	135
Figure 52. Schéma du genset à vitesse variable. Source : McGowan .....	137
Figure 53. Types de charges de dissipation. Source : Hunter, 1994.....	138
Figure 54. Classification des types de stockage selon capacités (W) et objectifs .....	142
Figure 55. Structure de base d'une roue d'inertie. Source : Bolund.....	145
Figure 56. Redresseur/inverseur de la roue d'inertie « PowerStore » .....	146

Figure 57. Système éolien-diesel avec stockage à air comprimé. Source : H. Ibrahim .....	150
Figure 58. Architecture du système éolien-diesel à Mawson. Source : Waterhouse .....	152
Figure 59. Première étape du système hybride à l'île Ross. Source : Cahill, 2009 .....	155
Figure 60. Proposition de cogénération pour les gensets à la base Frei .....	158
Figure 61. Proposition du réseau hybride pour la base Frei. Source : Jargstorf.....	158
Figure 62. Schéma du système hybride à Wales. Source : Drouilhet .....	160
Figure 63. Schéma de cogénération/refroidissement à Wales. Source : Drouilhet .....	162
Figure 64. Méthodologie de conception et dimensionnement. Source : TS 62257-4 .....	185
Figure 65. Schéma fonctionnel de l'architecture pour Jubany .....	189
Figure 66. Courbe Weibull ( $k=2,29$ , $c= 11,2$ m/s) de la Fdp du vent de la DNA .....	205
Figure 67. Courbe Weibull ( $k= 2,32$ , $c= 11,24$ m/s) de la Fdp des 365 moyennes.....	205
Figure 68. Taux d'économie de carburant pour dix niveaux de charge .....	212
Figure 69. Graphe horaire de charge, gensets et électricité en excès.....	214
Figure 70. Graphe horaire de charge, gensets, éoliennes et électricité en excès.....	214
Figure 71. Plan du réseau électrique de Jubany, août 2010 .....	233
Figure 72. Carte géologique de la péninsule Potter .....	235
Figure 73. Configurations de systèmes hybrides .....	241
Figure 74. Glossaire des symboles des schémas fonctionnels .....	244
Figure 75. Système du type T <sub>4</sub> C, avec bus à C.A. ....	245
Figure 76. Système du type T <sub>5</sub> C, avec seulement genset.....	246

## ***LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES***

<b>AEA</b>	L'Autorité d'Énergie de l'Alaska
<b>API</b>	Automate Programmable Industriel
<b>AWG</b>	Calibre américain des fils ( <i>American Wire Gauge</i> )
<b>DMV</b>	diamètre moyen du volume
<b>DNA</b>	La Direction Nationale de l'Antarctique de la République Argentine
<b>EES</b>	Systèmes d'Énergie Elite ( <i>Elite Energy Systems</i> )
<b>ER</b>	Énergie renouvelable;
<b>FDP</b>	Fonction de densité de la probabilité
<b>GOA</b>	Gazole Antarctique
<b>IAA</b>	Institut Antarctique Argentin
<b>IEA</b>	L'Agence Internationale d'Énergie ( <i>International Energy Agency</i> )
<b>IEC</b>	La Commission Électrotechnique Internationale
<b>IRC</b>	interface réseau-chaudière
<b>NPS</b>	Systèmes Nordiques de Puissance ( <i>Northern Power Systems</i> )
<b>NREL</b>	Le Laboratoire National de l'Énergie Renouvelable, des É.-U.A.
<b>LCD</b>	Écran à cristaux liquides ( <i>Liquid Crystal Display</i> )
<b>LREE</b>	Le Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne, de l'UQAR

<b>SCADA</b>	Contrôleur superviseur et d'acquisition des données
<b>SEC</b>	Système d'électrification collectif
<b>SEI</b>	Système d'électrification individuel
<b>SSB</b>	Systèmes de Stockage par Batteries
<b>STA</b>	Secrétariat du Traité sur l'Antarctique
<b>TEL</b>	teneur en eau liquide
<b>Vars</b>	Volts-ampères réactifs
<b>VF</b>	Valeur Future
<b>VP</b>	Valeur Présente
<b>ZSPA132</b>	Zone spécialement protégée de l'Antarctique no 132

## ***LISTE DES SYMBOLES***

$C_{op}(n)$	coût d'exploitation à l'année (n)
$C_o(n)$	coût d'opération dans l'année (n)
$C_m(n)$	coût de maintenance engagé dans l'année (n)
$C_r(n)$	coût attendu pour les composants à remplacer dans l'année (n)
<b>d</b>	portée maximale de la glace jetée (en m)
<b>D</b>	diamètre du rotor (en m)
E.K.	énergie cinétique du système
$E_k$	énergie cinétique emmagasinée dans la roue d'inertie
<b>H</b>	hauteur du moyeu (en m)
I	moment d'inertie. Le moment d'inertie est fonction de forme et masse
J	moment d'inertie de machine tournante
<b>K</b>	Coefficient de transfert de la chaleur
I	épaisseur d'une surface
P	puissance active (kW)
Q	Énergie thermique
Q	puissance réactive (kvars)

<b>S</b>	Surface
<b>t</b>	temps
<b><math>\Delta t^\circ</math></b>	Différence des températures entre les deux côtés d'une surface
<b>v</b>	vitesse du vent à la hauteur du moyeu (en m/s)
<b><math>V_{CA}</math></b>	voltage du bus CA
<b><math>\omega</math></b>	vitesse angulaire de machine tournante
<b><math>\omega</math></b>	vitesse angulaire de la roue d'inertie

## INTRODUCTION

Le présent mémoire vise à étudier le processus d'intégration de turbines éoliennes à des réseaux électriques isolés et généralement éloignés, utilisant des génératrices diesel et exploités en climat froid. Une méthodologie rigoureuse, basée sur les normes et pratiques industrielles actuelles, est appliquée pour étudier la possibilité d'implanter différents taux de pénétration d'énergie éolienne soit bas, moyen ou haut.

Pour cette recherche nous avons l'opportunité d'utiliser les données d'un site réel, la base antarctique argentine Jubany. En avril 2009, la DNA (Direction nationale de l'Antarctique de la République Argentine) qui administre cette base a demandé la collaboration du LREE (Laboratoire de recherche en énergie éolienne) de l'UQAR, pour ajouter des turbines éoliennes au réseau électrique alimenté par génératrices diesel qui opère sur le site. La DNA a invoqué des raisons économiques, scientifiques, environnementales et politiques : diminuer la consommation de combustibles fossiles et sa pollution associée est aujourd'hui essentielle, répond aux exigences des traités internationaux et suit la tendance du développement technologique.

Le problème à résoudre dans ce travail est concevoir une installation éolien-diesel pour générer de l'électricité dans une base antarctique. Pourtant, le but de ce mémoire n'est pas de faire la conception complète et détaillée d'un système d'électrification éolien-diesel pour un site déterminé en climat antarctique (Jubany), mais plutôt de développer un processus, une méthode, une séquence de conception qui permettront d'arriver à une configuration optimale du système.

Le travail est basé sur des méthodologies, recommandations et expériences actuelles des organismes de normalisation et de l'industrie. La conception peut se faire jusqu'à un

niveau qui montre la disposition et les spécifications techniques générales des équipements principaux, en raison de l'impossibilité matérielle et temporelle d'atteindre un niveau suffisant de détail, dû au manque d'informations techniques concernant la base Jubany et des limitations imposées par le logiciel utilisé pour les simulations.

La recherche bibliographique effectuée sur la conception des systèmes hybrides en climat froid a montré qu'il n'y a pas de méthodologie de design disponible, mais plutôt des listes de recommandations pour prendre en compte les effets du climat froid dans ce processus. Des documents tels que « Expert Group Study on Recommendations for Wind Energy Projects In Cold Climates » (Baring-Gould, 2009a) et « State Of The Art Of Wind Energy in Cold Climate » (Laakso *et al.* 2009) sont très détaillés mais ils ne sont pas des procédures de conception. Ils résument plutôt l'expérience dans la conception et l'exploitation des divers projets réalisés en climats froids et, pour ainsi dire, donnent des listes des facteurs à surveiller pour arriver à des installations réussies. Pourtant, parmi les premières recommandations qu'ils donnent, se trouve celle de suivre une bonne méthodologie générale de conception d'installations éoliennes en climat « normal » pour ensuite appliquer les considérations de conception spécifiques au climat froid.

La même recherche bibliographique a permis de trouver la série des spécifications techniques TS 62257 de l'IEC (la Commission électrotechnique internationale), qui est l'ensemble de documents le plus complet et actualisé pour concevoir et implanter des systèmes hybrides. Des exemples d'installations hybrides éoliennes-diesel en climat arctique/antarctique, opérationnelles ou proposées, ont été utilisés. Ainsi, la série TS 62257 est utilisée comme une méthodologie de conception de base d'un système hybride, à laquelle nous ajoutons la prise en compte des effets du climat froid sur le système.

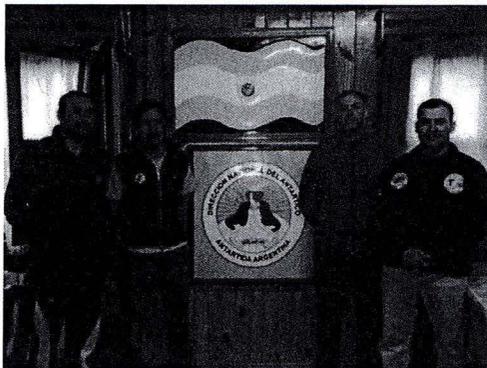


Figure 1. Le chef de base (le troisième) et les techniciens à Jubany, 2010-11

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

Chapitre 1 : La méthodologie pertinente de la norme TS 62257 est utilisée pour organiser et évaluer toutes les informations reçues de la base Jubany. On décrit l'équipement sur place, les génératrices, le réseau et la chaudière. À la fin du premier chapitre, on évalue la valeur et les faiblesses des informations du site par rapport aux exigences de la série TS 62257 et l'on recommande les mesures à prendre pour les compléter. Nous avons calculé le coût opérationnel annuel de la génération d'électricité à Jubany pendant l'année 2010.

La majorité des informations du chapitre 1 ont été transmises par le chef de base 2010-11, Lieutenant-colonel de l'Armée Argentine Orlando Ruben Interlandi et son équipe technique (voir Figure 1 et annexe I). Son aide à ce projet de recherche a été essentielle.

Chapitre 2 : Dans le deuxième chapitre nous présentons l'influence des deux facteurs reliés au climat froid, les basses températures et le givre atmosphérique qui affectent les mesures du vent, les éoliennes, les génératrices diesel et le reste des composants d'un système électrique. Ensuite, ces informations et les données pertinentes de Jubany (Chapitre 1) servent à :

a) souligner l'importance de l'amélioration des mesures du vent et faire les recommandations nécessaires;

b) faire les recommandations des spécifications techniques des éoliennes pour Jubany;

c) recommander les mises à niveau du réseau et de l'infrastructure de la base.

Ce chapitre donne aussi les informations sur l'équipement spécialisé pour le froid, par exemple la méthode de la détection du givre par anémométrie multiple et les détecteurs/capteurs de glace.

Chapitre 3 : Dans ce chapitre, nous présentons les concepts et les équipements nécessaires à l'opération des systèmes hybrides éolien-diesel. Les concepts du niveau de la pénétration d'énergie éolienne ainsi que de la qualité de la puissance, de la réserve tournante et de la cogénération sont expliqués. En plus des descriptions des équipements utilisés pour la stabilité et le stockage électrique, ces concepts servent à mieux comprendre quatre exemples de systèmes éolien-diesel qui opèrent, ou ont été projetés pour opérer en climat froid.

Chapitre 4 : Ce chapitre présente la méthodologie de conception et le dimensionnement des systèmes hybrides résultant de l'application des spécifications techniques TS 62257. En utilisant les exemples d'installations éolien-diesel en climat froid (Chapitre 3), les données du vent, de la charge électrique et des installations en place à la base Jubany (Chapitre 1) et les spécifications techniques des éoliennes (Chapitre 2), nous avons élaboré des architectures pour le système hybride éolien-diesel. Nous avons proposé la cogénération pour éliminer ou réduire la consommation de carburant d'une chaudière utilisée pour un des bâtiments principaux de la base. Nous présentons les simulations à l'aide du logiciel Homer des architectures proposées.

Finalement, nous présentons les conclusions du mémoire et des recommandations pour les travaux futurs à être entrepris par la DNA pour la continuation du projet.

# CHAPITRE 1

## DOCUMENTS NORMATIFS ET DONNÉES D'ENTRÉE

### 1.1 LA BASE ANTARCTIQUE DE JUBANY

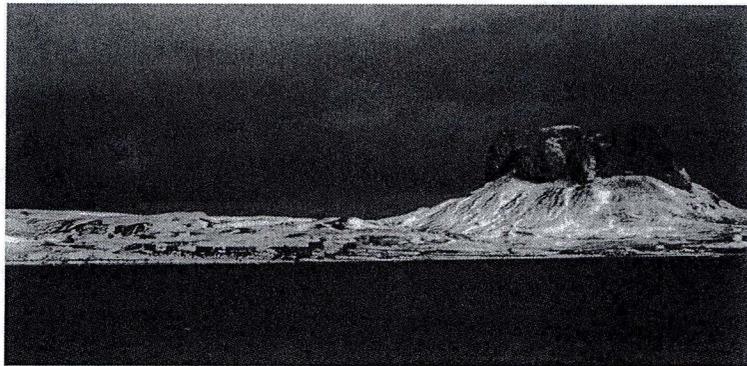


Figure 2. Vue panoramique sur la base Jubany. Source : DNA

Jubany est une base et station scientifique permanente argentine dans l'Antarctique, fondée à 1953 et contrôlée par la DNA depuis 1982. Elle est localisée à  $62^{\circ} 14'$  de latitude Sud et  $58^{\circ} 40'$  de longitude Ouest, sur la côte sud de l'anse Potter, à la baie de La Garde nationale, dans l'île 25 de Mayo.

La base dispose d'environ 20 bâtiments, dont deux laboratoires avec collaboration scientifique allemande et italienne et une salle de cinéma. Pour y parvenir, il est nécessaire de voler ou de naviguer à partir d'Ushuaia dans le sud de l'Argentine. La population atteint un maximum de 70-100 personnes pendant l'été antarctique, mais le reste de l'année (avril à novembre) il y a une moyenne de 20-30 personnes.

Jubany est dans le voisinage d'autres bases, de l'Uruguay, du Chili, de la Corée, de la Russie, de la Chine et de la Pologne. À proximité il y a des colonies des pingouins, d'otaries et des pétrels (Corral, 2009).

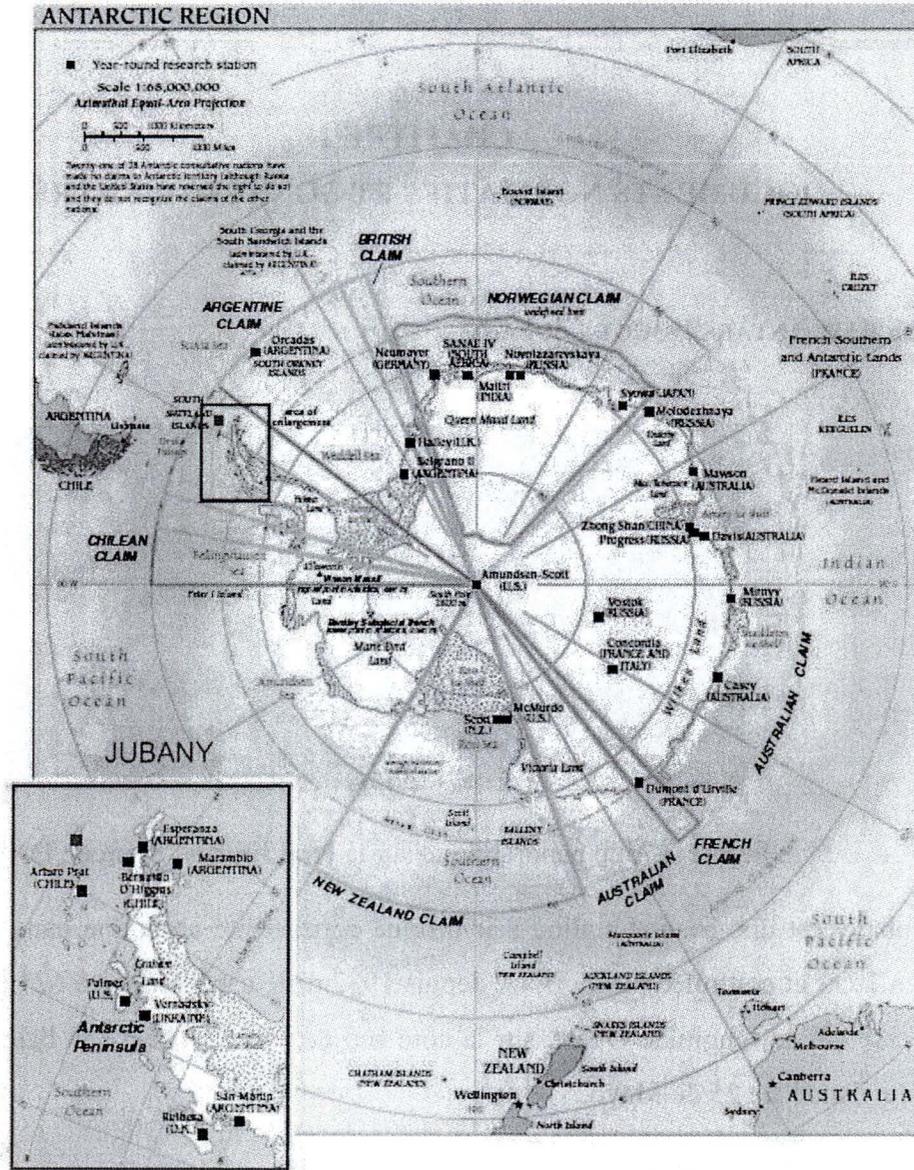


Figure 3. Localisation de la base Jubany. Source : Corral, 2009

## 1.2 LES DOCUMENTS NORMATIFS APPLICABLES AUX SYSTÈMES HYBRIDES

Pendant les années 1990, l'utilisation du vent comme source d'énergie, en combinaison avec les génératrices diesel pour alimenter des communautés et installations isolées avait mené à l'augmentation des installations hybrides éoliennes-diesel de production d'électricité partout dans le monde. Pourtant, la conception de ces systèmes se faisait « sur mesure » avec une qualité inégale, sans références techniques et avec un faible rapport coûts/avantages (Schmitt, 2006). Pour Ian Baring-Gould, « le développement de normes ou de lignes directrices pour les systèmes éolien-diesel et des procédures de mise en service qui assurent un fonctionnement acceptable du système après son installation » fait partie des défis techniques de l'industrie face à l'utilisation des systèmes éolien-diesel (Baring-Gould, 2009b).

Plusieurs instituts de recherche ont commencé à faire des efforts de normalisation pour toutes les étapes de vie utile de ces installations. Les rapports R-1256 et R-1257, issus de l'étude « Isolated Systems with Wind Power », font partie de ces efforts (Clausen, 2001; Lundsager, 2001; Baring-Gould, 2009c).

Les étapes à suivre pour la réalisation d'un système hybride éolien-diesel, selon le rapport R-1257 (Clausen, 2001), sont :

- Trouver et utiliser l'information nécessaire pour la bonne conception et le bon dimensionnement de l'installation : ressources de vent, demande électrique actuelle et prévue, installation électrique actuelle, infrastructure actuelle.
- Trouver et utiliser l'information pour confirmer que l'installation hybride proposée sera véritablement durable : aspects économiques, environnementaux, légaux, opérationnels, logistiques.

La suite naturelle de cet effort a été la norme PAS 62 111 de 1999 sur les Systèmes d'énergie renouvelable décentralisés, rédigée par l'IEC, et qui a évolué aujourd'hui dans la série de spécifications techniques TS 62257 « Recommendations for small renewable

energy and hybrid systems for rural electrification » (Ackermann, 2005; IEC, 2005; Schmitt, 2006).

La série des spécifications techniques IEC TS 62257 couvre l'ensemble des étapes, dès l'identification des besoins énergétiques jusqu'à la spécification d'équipements. Ces spécifications s'adressent non seulement à la normalisation des installations éolien-diesel, mais à toute installation hybride de génération d'électricité qui combine à la fois des sources renouvelables et fossiles.

Pour cette raison la structure de l'IEC TS 62257 est complexe et son coût d'acquisition est élevé. La série contient 30 spécifications techniques qui traitent 3 thèmes principaux :

- Introduction à l'électrification rurale
- Orientations pour la gestion et l'implantation du projet
- Spécifications techniques pour les composantes et les systèmes

Ce sont les orientations pour la gestion et l'implantation des projets qui présentent le plus grand intérêt pour cette étude. Ces orientations servent à faciliter et normaliser le travail de conception, et aussi à améliorer la qualité, la sécurité et la fiabilité des systèmes hybrides envers leurs utilisateurs, surtout lorsque ces systèmes sont opérés dans des conditions climatiques extrêmes, comme basses températures, givre, rafales, etc. (Schmitt, 2006).

### **1.2.1 La série de spécifications techniques IEC TS 62257**

La série de spécifications techniques IEC TS 62257 fournit des recommandations pour :

- Choisir le système approprié pour un site cible
- Concevoir le système
- Opérer et maintenir le système (TS 62257-4, 2005-07)

Ces documents sont faits pour la mise en place de systèmes d'énergie renouvelable et systèmes hybrides jusqu'à 750 V de courant continu, 500 V de courant alternatif et 100 kVA de puissance nominale, pour une utilisation en milieu rural. Cependant, leurs recommandations méthodologiques sont d'application générale et peuvent s'appliquer pour la mise en place de systèmes éolien-diesel de puissances nominales supérieures à 100 kVA et en milieu arctique/antarctique, comme c'est le cas de la base Jubany. Les spécifications techniques utilisées dans ce travail sont :

- IEC TS 62257-2 Des exigences pour une gamme de systèmes d'électrification
- IEC TS 62257-4 Conception et sélection des systèmes
- IEC TS 62257-7 Générateurs
- IEC TS 62257-7-3 Sélection de génératrices diesel et à d'autres combustibles pour les systèmes d'électrification rurale
- IEC TS 62257-9-1 Microcentrales
- IEC TS 62257-9-2 Microréseaux

### 1.3 CAHIER DE CHARGES

La toute première étape de la conception d'un système hybride éolien-diesel est la collection des informations à être considérées dans le design.

La norme TS 62257-4 « Conception et sélection des Systèmes » établit des méthodologies pour concevoir des systèmes d'électrification pour sites éloignés. Cette norme propose une classification des informations d'entrée et des données pertinentes pour la conception du système de la base Jubany.

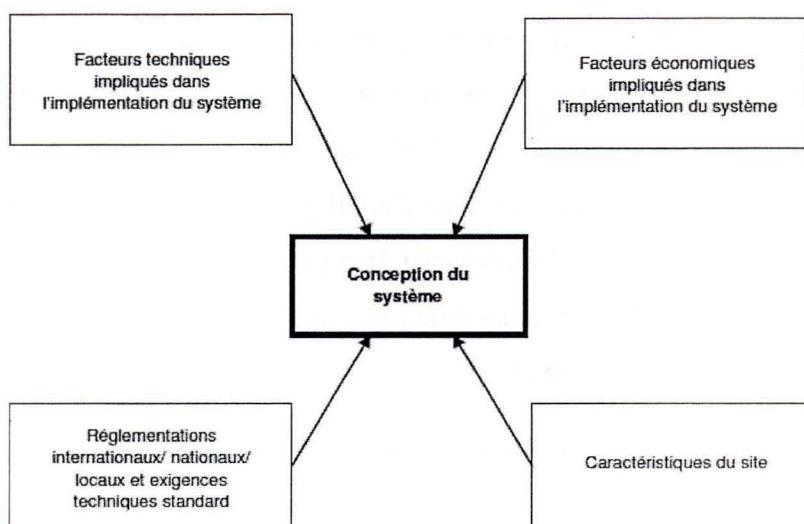


Figure 4. Types de facteurs à considérer pour le design. Source : TS 62257-4

Selon la TS 62257-4, les exigences et les caractéristiques à considérer dans la conception du système peuvent être regroupées en quatre types de facteurs, illustrés à la Figure 4.

Certains facteurs, notamment les ressources locales (vent), la charge électrique demandée et le budget disponible pour le projet affectent directement la conception et le dimensionnement du système. Le fait de considérer d'autres facteurs dans le design, comme les réglementations, les facteurs environnementaux, la formation du personnel

chargé des installations, etc., permet d'arriver à une conception réussie et durable. Pour cette raison, la liste des facteurs devient longue.

Les quatre sous-sections suivantes listent les éléments associés à chacun des quatre types de facteurs pour la base Jubany, selon la classification de la TS 62257-4.

La seconde étape est l'évaluation des informations d'entrée. Cela est fait aussi à l'aide de la même méthodologie proposée au TS 62257-4 et présentée dans une section postérieure de ce même chapitre.

### **1.3.1 Facteurs techniques**

Les facteurs techniques prévus dans la norme et pertinents pour le projet sont :

#### **1. Une utilisation efficace de l'énergie**

Les conditions actuelles du réseau électrique à Jubany, avec des gensets surdimensionnés par rapport à la charge électrique, empêchent d'entreprendre un programme d'économie d'énergie qui forcerait les gensets à opérer en dessous du pourcentage minimal recommandé de leurs capacités, ceci ayant comme effet une réduction de leur vie utile. Pourtant, l'ajout de l'énergie éolienne combinée à une mise à niveau des gensets serait une solution efficace.

- *Genset ; terme familier qui signifie « moteur — groupe électrogène » ou l'ensemble d'un moteur à combustible fossile couplé à une génératrice électrique (IEC, 2008-4)*

#### **2. Une mise en œuvre la plus facile possible : limiter au maximum l'utilisation des moyens de transport et des appareils de levage**

Absolument toutes les fournitures et la machinerie doivent être transportées à Jubany par bateau ou par avion depuis l'Argentine continentale, soit le port de Buenos Aires, soit le

port d'Ushuaia. La soute du navire ou de l'avion limite la taille maximale des composants à installer sur le site, notamment de la tour et des pales ainsi que le transport d'une grue pour le montage.

### **3. Appliquer des technologies compatibles avec les habiletés limitées de la main-d'œuvre locale**

Un équipage typique de maintenance et réparation des équipements électriques et mécaniques à la base Jubany est composé de quatre techniciens : deux spécialistes en mécanique (gensets) et deux en installations électriques, hydrauliques et à gaz. À la dotation 2010-11, personne ne possédait de l'expérience avec les éoliennes (voir annexe I).

### **4. Durée limitée de travail d'installation sur le terrain**

À Jubany le travail sur le terrain pourrait se faire seulement pendant la période estivale. D'après les informations transmises par le chef de base 2010-11, lieutenant-colonel O. Interlandi, l'équipe peut travailler à l'extérieur pendant décembre, janvier, février et mars. Durant des années exceptionnelles, le travail peut commencer à partir du mois de novembre. Aussi, le pergélisol dans l'aire de l'anse Potter fond de septembre à mai de l'année prochaine (Silva Busso [s.d.]).

### **5. Des règles et des outils opérationnels simples**

Ceci est pour faire face à la possibilité de compétences limitées des techniciens et opérateurs locales.

### **6. Limiter la variété des pièces de rechange**

En raison de la difficulté et du coût élevé du transport et du stockage des fournitures à la base Jubany.

### **1.3.2 Facteurs économiques**

Les facteurs économiques inclus dans le tableau correspondant de la norme et pertinents pour le projet sont :

#### **1. Équilibre entre les coûts du capital initial et les coûts opérationnels pour rendre le projet rentable et durable**

Les systèmes utilisant uniquement des gensets ont un coût du capital initial bas et des coûts opérationnels de plus en plus élevés en raison de l'inflation annuelle du coût du carburant. Par contre, les systèmes hybrides éolien-diesel ont un coût du capital initial élevé, déterminé fortement par le nombre d'éoliennes installées et des coûts opérationnels annuels bas en raison de la diminution de consommation du carburant. La centrale électrique actuelle à Jubany est déjà équipée de gensets, mais l'ajout d'éoliennes nécessitera la mise au niveau ou le remplacement des gensets actuels.

#### **2. Équilibre entre les coûts de l'équipement (achat et installation) et le niveau de fiabilité spécifiée**

La fiabilité des équipements est vitale dans le climat antarctique et elle doit être très haute, même si les coûts sont élevés.

#### **3. Avoir des coûts d'exploitation aussi bas que possible**

C'est un des objectifs principaux d'installer un système hybride éolien-diesel à Jubany.

### 1.3.3 Caractéristiques du site

Les caractéristiques du site reliées à l'environnement géographique que demande la norme et pertinentes pour le projet sont :

#### 1. Les statistiques climatiques (température, humidité, vitesse du vent, précipitation pluviale)

Tableau 1. Statistiques météorologiques principales. Source : Corral, 2009

Statistique	Unités	Moyenne	Minimale	Maximale	Écart-type
Direction du vent	°	202,5	0	360,0	83,2
Vitesse du vent	m/s	9,95	0	43,69	4,57
Pression	kPa	99,0	70,9	120,0	1,4
Température de l'air	°C	-1,55	-25,0	9,1	4,6
Humidité	%	88,2	63,5	124,4	6,3

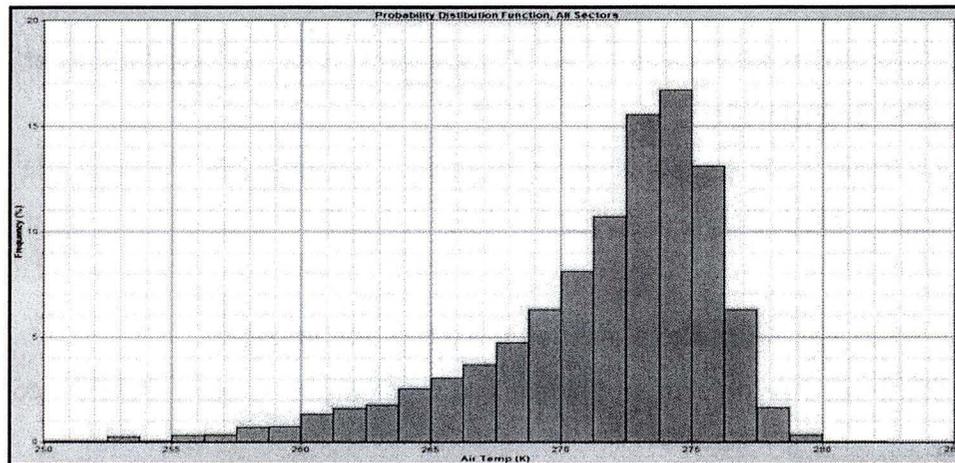


Figure 5. Fdp de la température de l'air à Jubany. Source: Corral, 2009

Le Tableau 1 et les Figures 5 à 7 montrent les conditions météorologiques générales à Jubany calculées à partir des moyennes journalières du janvier 1994 jusqu'au avril 2008, telles que fournies par la DNA.

La figure 5 montre la fonction de densité de probabilité (Fdp) pour la température de l'air à Jubany, en grades Kelvin. La température varie de  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $248\text{ }^{\circ}\text{K}$ ) pendant l'hiver à  $+9\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $282\text{ }^{\circ}\text{K}$ ), la moyenne étant  $-1,55\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $271,45\text{ }^{\circ}\text{K}$ ).

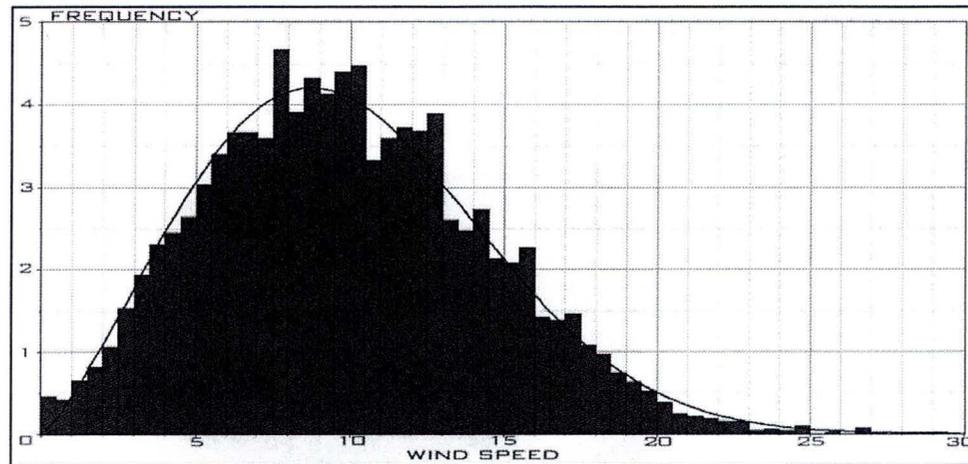


Figure 6. Fdp de la vitesse du vent à Jubany. Source : Corral, 2009

La Figure 6 montre la fonction de densité de probabilité (Fdp) de la vitesse du vent à Jubany, en m/s. La fonction approximative de Weibull a un paramètre de forme  $k= 2,29$  et un paramètre d'échelle  $c= 11,2\text{ m/s}$ . La vitesse moyenne est de  $9,95\text{ m/s}$  et la vitesse maximale est de  $43\text{ m/s}$ .

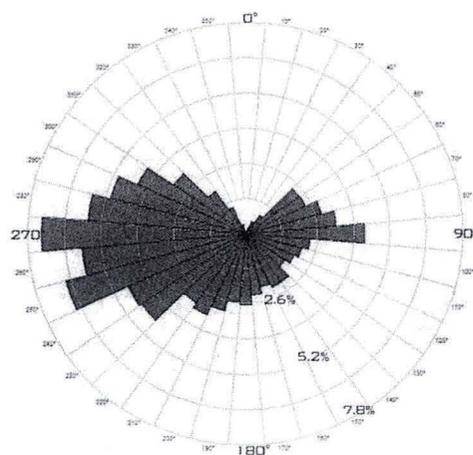


Figure 7. La rose des vents à Jubany. Source : Corral, 2009

La Figure 7 montre la rose des vents à Jubany. Pour la période considérée, le vent a soufflé du secteur 240°-300° (l'ouest) plus de 40 % du temps et, plus précisément, depuis le secteur 265°-275° plus de 7 % du temps. (Corral, 2009)

La DNA n'a pas fourni les données d'accumulation de pluie et neige.

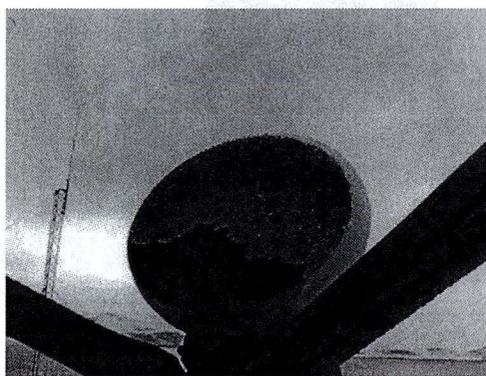


Figure 8. Une antenne à Jubany en train de dégeler. Source : O. Interlandi

## 2. Les phénomènes climatiques sévères

À Jubany, la sévérité des rafales, et les charges superposées par ces rafales sur les structures comme tours et rotors doivent être prises en considération. Les informations fournies par le chef de base (2010-2011) indiquent que de rafales maximales de 33,44 m/s (65 nœuds) ont été enregistrées pour l'année 2010-2011 tandis que l'étude de 2009 calculait des rafales autour de 43 m/s (83,6 nœuds) en se basant sur la courbe de Weibull (Corral, 2009).

Les informations fournies par le météorologue Raúl Pascual Ibáñez (de l'équipage Jubany 2010-2011) indiquent que les épisodes de givrage sont plutôt rares, mais pendant les mois d'octobre et de novembre 2010, de la pluie verglaçante a affecté l'antenne Internet (voir Figure 8) et a interrompu au moins deux fois les communications par ce moyen pendant des heures. Ibáñez indique aussi qu'il n'y a pas un protocole établi de détection d'événements de givrage à la station météorologique de la base. Aussi, selon Ibáñez, la

salinité présente dans le site est très haute et provoque la corrosion rapide de toutes les surfaces métalliques non protégées. L'équipement météorologique doit rester toujours bien scellé pour empêcher le sel de pénétrer à l'intérieur.

Par rapport aux tempêtes de neige, l'année 2009 a été caractérisée par un niveau élevé de précipitations, 329,45 mm. L'hiver austral 2010 a connu un phénomène jamais vu depuis 30 ans, de la pluie en plein hiver, qui peut transférer rapidement en givre sur les structures de toutes sortes (conversation avec O. Interlandi).

### **3. Les ressources locales d'énergie**

A priori, Jubany est un bon site pour l'exploitation d'énergie éolienne (avec une vitesse moyenne du vent de 9,95 m/s), mais les effets du froid et des rafales qui peuvent empêcher les éoliennes de produire de l'énergie doivent être pris en compte (voir les sous-sections 1.6.1, 1.6.2 et 1.6.3 concernant les conditions du site et du vent pour plus de détails).

Dans cette étude, aucun intérêt n'a été donné pour le potentiel solaire local, à part l'utilisation des panneaux solaires photovoltaïques pour alimenter en électricité quelques équipements de petite puissance.

### **4. Les moyens d'accès vers et autour du site**

Le moyen privilégié de transport des personnes et fournitures est par bateau depuis le continent sud-américain. Il y a aussi la possibilité de transport aérien (avions et hélicoptères). La base a une extension d'autour d'un kilomètre au long de la *Caleta Potter*. Pour le transport terrestre, des véhicules à chenilles peuvent être utilisés. Le plan du réseau électrique (voir annexe II) montre un chemin parallèle à la côte.

## **5. Le type du sol et l'environnement géologique**

Le sol de la péninsule Potter est composé des coulées de lave (~ 50 %), des roches pyroclastiques (~ 30 %) et des intrusions hypabyssales (~ 20 %) (Kraus, Del Valle, 2008).

Le Prof. Eugenio Yermolin, glaciologue de la DNA indique que (conversation téléphonique du 12 août 2010) : le pergélisol est présent depuis deux mètres d'altitude sur la mer. Le seul endroit libre de pergélisol est la plage, mais à cet endroit la construction est déconseillée en raison d'autres facteurs. Le pergélisol riche en glace contient environ 20 % à 30 % de la glace et le pergélisol pauvre en glace en contient près de 5 % à 10 %. Pour un site spécifique de construction, une étude de mécanique des sols doit être réalisée parce que les pergélisols riches et pauvres en glace sont très mélangés à Jubany et la technique des fondations appropriée doit être bien choisie pour ce site selon le type de pergélisol.

## **6. La distribution géographique : la dispersion ou la concentration des points d'utilisation et son évolution temporelle et spatiale**

Les points d'utilisation d'énergie, autrement dit les bâtiments de la base, se trouvent de l'est à l'ouest sur une distance de mille mètres jusqu'à l'héliport situé à l'ouest et de nord au sud de 200 mètres. Le réseau de distribution est déjà en place, et sa topologie ressemble à une étoile, puisque presque tous les bâtiments sont branchés directement avec le bâtiment appelé l'« Usina » (l'Usine), le centre de l'étoile, où se trouvent quatre de cinq génératrices diesel. Les bâtiments plus lointains sont branchés aussi à l'« Usina » à travers des borniers de raccordement.

Les constructions futures devraient se trouver à l'intérieur de ces distances. Par exemple, durant l'été antarctique 2011, un bâtiment devait être construit pour garder deux bateaux de 4,500 kg à quelque 400 m vers l'ouest de l'« Usina » sur la côte, près de l'incinérateur de déchets, dans un endroit appelé « Punta Elefante » (Point de l'Éléphant, voir le plan du réseau électrique à l'annexe II).

## **7. Les distances entre les bâtiments/charges et le sous-système de production (l'« Usina »)**

Les distances moyennes seraient de 50 à 100 mètres et la distance maximale jusqu'à l'atelier de réparations serait de 500 mètres. Pour le nouveau dépôt des bateaux, la distance serait de quelque 400 m.

## **8. Le type des maisons et charges électriques**

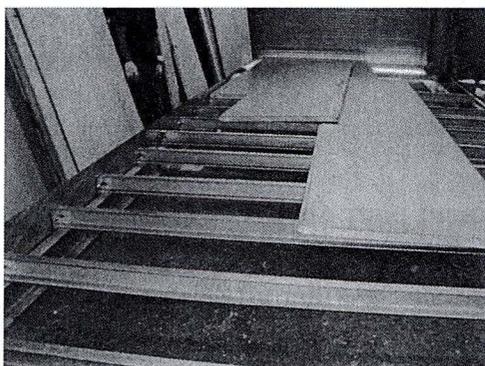


Figure 9. La structure des bâtiments. Source : O. Interlandi

Les bâtiments sont adaptés au climat antarctique. Ils ont une structure en fer recouvert par de panneaux de matériel résistant au feu (figure 9). Les charges sont du type résistif (chauffage) et inductive (moteurs et éclairage à tubes fluorescents). Au cours de l'été, l'utilisation d'ordinateurs et d'équipements scientifiques augmente et ce type de charges nécessite de l'énergie électrique de haute qualité.

## **9. Le niveau acceptable du bruit**

Les effets du bruit doivent être considérés pas seulement pour les humains, mais aussi pour la faune locale, majoritairement des oiseaux. Le niveau du bruit actuel produit par les gensets et l'effet général du bruit sur les habitants humains et animaux à Jubany requiert

plus d'information de la DNA. Par rapport aux génératrices diesel, la norme TS 62257-7-3 autorise un niveau de bruit aérien de 100 dBA pour génératrices de puissance de 2 kVA à 240 kVA (IEC, 2008-4).

### **10. Le niveau acceptable d'élimination de déchets**

Les règlements de traitement de déchets à Jubany sont issus du Protocole de Madrid où le Protocole de protection de l'environnement en Antarctique de 1991 et de la loi nationale argentine no 24 051 de Gestion des déchets dangereux. En conséquence, les déchets du système d'énergie devront être traités en respectant ces règlements.

### **11. Le type de bâtiment pour abriter la centrale de génération d'énergie**

L'« Usina » et l'« Usina auxiliar » (l'Usine auxiliaire) sont des bâtiments du même type que le reste des bâtiments de la base (voir figure 9 et le plan du réseau électrique à l'annexe II).

Les caractéristiques du site reliées à l'environnement biologique sont :

### **12. Les types de faune, flore et couverture forestière**

Près de la base, dans le secteur de l'élévation connue sous le nom « Tres Hermanos » (« Trois Frères »), nichent des skuas et des pétrels de Wilson. Les communautés végétales sont dominées par des lichens et des graminées. À un kilomètre et demi vers le sud se trouve la *Zone spécialement protégée de l'Antarctique* no 132, qualifiée comme véritable échantillon représentatif de l'écosystème antarctique maritime et où des pétrels géants, éléphants et léopards de mer, manchots papous, Adélie et « barbijo » peuvent se trouver (Secrétariat du Traité sur l'Antarctique [s.d.]). La Figure 10 montre la distribution des

concentrations d'oiseaux et de mammifères dans la ZSPA no 132. La couverture forestière près de la base est inexistante.

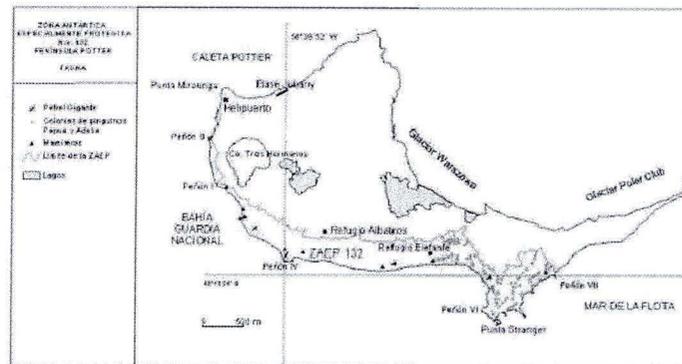


Figure 10. Distribution des espèces à la ZSPA 132. Source : STA

Les caractéristiques du site reliées à l'environnement technique sont :

### 13. Le type de réseau de distribution en place, aérien ou enterré

Quelques sections du réseau sont enterrées à 30-50 cm sous le sol, sans aucune protection et quelques autres se trouvent directement sur le sol, sans protection non plus, et ainsi sont couvertes par la neige pendant les mois froids.

### 14. La qualité des bâtiments existants

Tous les bâtiments à la base sont adaptés à l'environnement antarctique. Ils ont une structure en fer recouvert par de panneaux de matériel résistant au feu. La qualité des bâtiments est suffisante pour fournir un soutien physique aux conducteurs électriques du réseau (Figure 9).

### 15. La maintenance locale possible sur le site

L'équipe typique actuelle de maintenance est composée de personnel technique de l'armée. Pour un nombre limité de turbines, c'est suffisant à condition que les techniciens se familiarisent avec la technologie éolienne. Pour une installation plus complexe, avec un

grand nombre de turbines, du personnel plus spécialisé sera requis sur le site (voir le personnel disponible sur la base à l'annexe I).

### **16. Installations de télécommunications disponibles**

La base possède deux antennes satellites : une pour l'Internet, l'autre pour la téléphonie IP ainsi que des équipements de radiocommunication à ondes courtes.

### **17. Restrictions de l'équipement**

Les restrictions qui doivent être respectées par les équipements sont au niveau de la taille en raison de la transportation par bateau/avion ou des restrictions de caractéristiques mécaniques (soudures, acier, etc.) et électriques (isolement des fils, composants électroniques) par rapport aux exigences d'opération en milieu antarctique froid et salin.

### **18. Niveau d'habiletés locales techniques**

Personnel de l'armée argentine du niveau technique : mécaniciens, électriciens.

### **19. Résistivité du sol**

Inconnue. C'est un facteur important parce que des parties du câblage qui sont enterrées sans protection ou bien se trouvent sur le sol sont très anciennes et leur mauvais isolement peut se combiner avec une basse résistivité du sol pour provoquer des pertes d'énergie et chutes de voltage dans le réseau électrique de distribution.

Les caractéristiques du site liées à l'environnement sociologique sont :

### **20. Les habitudes de consommation d'énergie**

D'après les profils de charge électrique fournis pour la période depuis mars 2010, le profil de consommation est du type résidentiel (les profils sont similaires à ceux montrés

par Hunter, 1994), avec deux pics journaliers, le premier pendant l'avant-midi, le deuxième, parfois le plus important, autour de 20 heures.

### **21. Le type de la clientèle**

La distribution d'énergie par le réseau se fera sur la base de critères techniques comme un niveau garanti de service, de sécurité, etc.

Par rapport à l'environnement économique, on doit remarquer que la base Jubany est une station scientifique gouvernementale qui représente, ensemble avec les autres bases antarctiques nationales, les claims de souveraineté de l'Argentine sur une portion du continent antarctique. Ainsi, la fourniture d'énergie électrique et le reste de ressources vitales sont assurés par des fonds gouvernementaux. Le coût de l'énergie, qui comprend le coût du diesel, huile, pièces de rechange, maintenance, salaires, continue à être un concept applicable, mais ce n'est pas le cas des concepts de solvabilité du client ou de tarif applicable au service électrique.

Les caractéristiques du site reliées à l'environnement économique sont :

### **22. Le coût du combustible des gensets livré au site : 2 000,41 \$ US par mètre cube en 2010**

Le chef de base Jubany 2010-11 O. Interlandi et le chef du Département technique et logistique polaire de la DNA Jorge Lusky confirment un prix pour 2008-09 de 5 233,75 \$ pesos par mètre cube de diesel GOA au port de Buenos Aires, obtenu de l'appel d'offres du Commandement antarctique de l'Armée argentine. La DNA estime un taux d'inflation de 20 % pour l'année 2010 et ainsi le prix en 2010 est de 6 280,50 \$ pesos. Lusky confirme un coût de transport par la Marine de 0,40 \$ US par litre. Pour un taux de change de 3,9243 \$ pesos par 1 \$ US (moyenne des dernières valeurs mensuelles pendant 2010, selon l'annexe IV), le prix par mètre cube de diesel GOA à Jubany est de 2 000,41 \$ US. Avec un coût à

Buenos Aires plus cher et un coût de transport plus bas, il représente la moitié du coût de 4,00 \$ US par litre estimé dans l'étude de 2009 (Corral, 2009).

**23. Le coût de l'huile pour les Gensets livré au site : 3 484,63 \$ US par mètre cube d'huile**

Lusky indique que le prix du mètre cube d'huile est de 12 105 \$ pesos (le baril de 200 litres d'huile coûte 2 421 \$ pesos) et le coût du transport par la Marine est de 0,40 \$ US par litre. À un taux d'échange moyen en 2010 de 3,9243 \$ pesos par dollar, le coût du mètre cube d'huile à Jubany est de 3 484,63 \$ US.

**24. Le coût de l'antigel pour les gensets livré au site : 5,50 \$ US par litre d'antigel**

Lusky estime la consommation d'antigel à 30 litres par année à un coût de 600 \$ pesos à Buenos Aires. Interlandi considère que c'est la consommation totale pour les cinq gensets. Le prix du transport par la Marine est de 0,40 \$ US par litre. Le coût par litre d'antigel à Jubany serait de  $20 \text{ \$ pesos} / 3,9243 \text{ \$ pesos par dollar} = 5,10 \text{ \$ US}$  plus le coût de transport, soit 5,50 \$ US.

**25. Le coût de la maintenance et des pièces de rechange livrées au site**

Lusky indique que d'après les informations fournies par Caterpillar, le coût de la maintenance du genset modèle Cat 3406C est de 4 990 \$ US pour 5000 heures de fonctionnement. Le poids estimé des pièces de rechange pour la maintenance de ce genset est de 160 kg, et le coût de transport par la Marine argentine est de 0,40 \$ US par kilogramme.

Les coûts exacts de la maintenance et pièces de rechange pour les autres modèles et marques de gensets présents à la base restent inconnus.

**26. Le coût des services techniques : coût total annuel 166 654 \$ US à 2010**

Lusky indique que le supplément antarctique en plus du salaire par mois pour chaque technicien qui s'occupe des gensets est de 6 013 \$ pesos. D'après les renseignements du

chef de base, les deux techniciens qui travaillent à l'« Usina » reçoivent des salaires mensuels de 13 000 \$ et 14 500 \$ pesos chacun et les deux techniciens responsables du réseau électrique reçoivent des salaires mensuels de 13 500 \$ pesos chacun. Ces quatre salaires comprennent déjà le supplément antarctique mentionné par Lusky. Le coût total mensuel des services techniques est de 54 500 \$ pesos, ce qui fait un coût total annuel de 654 000 \$ pesos. Avec un taux de change de 3,9243 \$ pesos par dollar, le coût total devient 166 654 \$ US pour l'année 2010.

### **1.3.4 Contraintes réglementaires et autres exigences**

Le quatrième et dernier type de facteurs prévus dans la norme comprend tous les règlements pertinents pour le projet. Cette dernière sous-section a été remplie avec l'aide du chef de base 2010-11, O. Interlandi, en raison que, malheureusement, le département concerné de la DNA n'a pas répondu sur ce sujet. La DNA devrait compléter ces informations dans une étape ultérieure puisque, pour chaque activité à réaliser dans la base Jubany, un formulaire d'évaluation environnementale doit être rempli et approuvé préalablement par la DNA. Ce formulaire est issu de réglementations mentionnées ci-dessous.

#### **1. Code et sécurité électrique. Spécifications de la production/distribution dans la génération et dans les bâtiments**

Depuis 1998, le code électrique applicable en Argentine est le « *Reglamento para la ejecución de instalaciones eléctricas en inmuebles (Resolución ENRE No. 207/95)* », l'acronyme « ENRE » signifiant Entreprise nationale régulatrice de l'Électricité. Il n'y a pas de moyen pour savoir si ce règlement est applicable à une base antarctique comme Jubany.

#### **2. Impact sur l'environnement local. Stockage et transport de carburant**

A) Protocole de protection de l'environnement en Antarctique de 1991 ou « Protocole de Madrid ». B) Loi nationale 24 216 de protection de l'environnement de la République Argentine de 1993. C) Plan de gestion de la ZSPA no 132.

### **3. Possibilité de recyclage de l'équipement et des matériaux**

A) Loi nationale no 24 051 de gestion des déchets dangereux de janvier 1992 et décret réglementaire no 831-93. Cette loi et son décret d'application établissent une classification des "Ys grecs" pour les divers déchets dangereux. B) Disposition légale 87-2000 de la DNA qui établit les champs d'application du Protocole de Madrid et les aspects réglementaires du traitement et l'élimination des déchets. À Jubany, les règlements issus du Protocole de Madrid qui régissent le traitement des déchets, la conservation de la vie marine, etc. doivent être strictement respectés. Par exemple, les restes de nourriture sont brûlés, le verre est réduit en poudre et retourné en barils de 200 litres, les batteries sont vidées et liquides et solides retournés séparément.

### **4. Exigences ou normes du travail local**

A) Le personnel militaire travaille encadré par le code militaire. B) La Loi sur le travail de l'Argentine régit les travailleurs civils. C) L'« ART », la compagnie d'assurance de risques du travail, s'occupe des accidents de travail du personnel civil.

### **5. Décrets divers**

A) L'article 41 de la Constitution argentine qui traite sur la législation de l'environnement. B) Loi nationale 18 513 d'orientation pour les activités antarctiques argentines. C) Traité sur l'Antarctique et le Protocole de Madrid régissant les questions de l'impact environnemental en l'Antarctique.

### **6. Droits d'importation**

L'Argentine considère le territoire antarctique comme partie intégrale de son territoire national. Donc, ils ne sont pas applicables.

## 1.4 LE SYSTÈME ÉLECTRIQUE ET LES AUTRES GÉNÉRATEURS D'ÉNERGIE

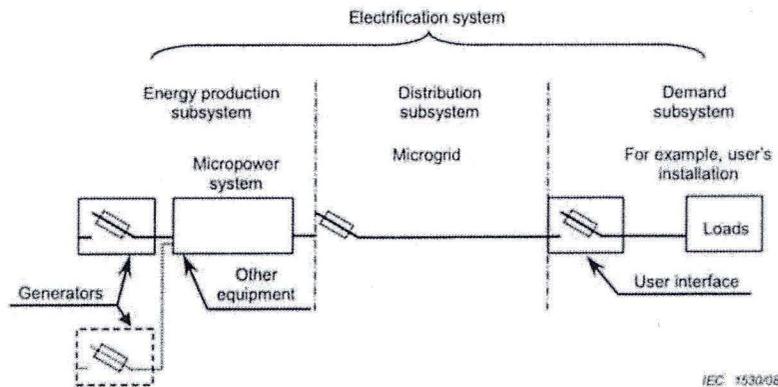


Figure 1 – Micropower system limits

Figure 11. Les trois parties d'un système d'électrification. Source : TS 62257-9-1

La spécification technique TS 62257-4 divise le système d'électrification en trois parties : sous-système de production, sous-système de distribution et sous-système de demande (Figure 11). Les trois sous-systèmes interagissent de la façon suivante :

« Un système d'électrification doit être considéré comme un système assurant un service d'alimentation (sous-système de production) et fournissant un service de distribution d'énergie électrique (sous-système de distribution) et fournissant un service à l'utilisateur (sous-système de la demande), tout en respectant des contraintes, actives sur tous les sous-systèmes, telles que : 1) satisfaire aux caractéristiques du site; 2) assurer la protection du personnel et des actifs; 3) minimiser la maintenance; 4) respecter les contraintes techniques et légales (TS 62257-4, 2005-07).

### 1.4.1 Description fonctionnelle du sous-système de production

Le sous-système de production doit être capable de garantir le service d'alimentation malgré les aléas de la disponibilité des énergies renouvelables et/ou des sources d'énergie fossiles qui l'alimentent et doit aussi gérer les habitudes de consommation de la clientèle. Il doit produire et stocker l'énergie d'une manière économiquement rentable.

S'il y a des sources renouvelables locales, le sous-système de production doit leur donner la priorité d'utilisation et de stockage, afin de minimiser l'utilisation des ressources fossiles et les utiliser (les génératrices diesel) uniquement pour atteindre le niveau de service spécifié.

Les fonctions détaillées que doit réaliser un sous-système de production pour garantir le service d'alimentation sont :

- produire de l'énergie électrique et, si nécessaire, la stocker, la convertir de CC à CA et la mesurer, avec les caractéristiques de voltage, fréquence, harmoniques, puissance et consommation pour satisfaire la qualité accordée du service.
- Fournir de l'énergie électrique au sous-système de distribution et gérer l'énergie produite pour répondre aux besoins énergétiques immédiats des clients et en même temps protéger l'équipement afin d'augmenter la vie utile de l'installation.
- Être capable de fournir des informations sur les conditions de fonctionnement de l'installation pour des fins de contrôle (TS 62257-4, 2005-07).

La norme TS 62257-4 présente une liste des critères et niveaux de performance détaillés à remplir pour le sous-système de production. Cette liste définit les services à fournir et les contraintes à respecter ainsi que leurs paramètres associés à mesurer pour évaluer la performance du sous-système.

La DNA devra, de commun accord avec le concepteur du projet, élaborer cette liste d'objectifs, services et des contraintes pour le sous-système de production à Jubany pour la

situation actuelle et future, c'est-à-dire la centrale diesel actuelle, les éoliennes et la centrale modernisée à installer à l'avenir. Cela permettra de fixer les objectifs du sous-système de production hybride et ainsi d'avoir une référence solide pour le suivi du processus de conception et dimensionnement de toute l'installation.

Les autres normes de la série TS 62257 que traitent le sous-système de production sont la partie 7 « Générateurs », 7-3 « Sélection de génératrices diesel et à autres combustibles pour systèmes d'électrification rurale », et 9-1 « Systèmes de la microcentrale ».

La norme TS 62257-7 définit le « générateur » comme « appareil qui transforme une forme d'énergie en électricité » et fournit une introduction générale aux différents générateurs qui peuvent être utilisés dans un système hybride d'électrification, qu'ils soient dispatchables, c'est-à-dire qu'ils peuvent livrer l'électricité demandée au moment prévu, ou non-dispatchables, c'est-à-dire qu'ils sont dépendants de la forme d'énergie primaire (soleil, vent, débit/hauteur d'eau).

La norme TS 62257-7-3 traite spécifiquement les gensets. Ces derniers sont considérés comme « les groupes électrogènes installés eux-mêmes, les travaux de génie civil ou bâtiment préfabriqué liés et tous les auxiliaires nécessaires pour le fonctionnement des gensets tels que le réservoir de carburant, les tuyaux, la mise à la terre du système, etc. ». Cette spécification technique sert surtout à recommander les stratégies de sélection et les critères qu'influencent l'opération des gensets en sites isolés.

La norme TS 62257-9-1 s'occupe des microcentrales qui sont au cœur du sous-système de production associé à une installation décentralisée d'électrification rurale. Les microcentrales couvertes par cette spécification sont à basse tension, triphasées, monophasées ou à C.D., d'une capacité nominale inférieure ou égale à 100 kVA et ne comprennent pas de transformation du voltage.

Les sous-sections suivantes portent sur les gensets et les autres générateurs d'énergie qui opèrent actuellement à Jubany.

### 1.4.2 Les génératrices diesel actuelles à Jubany

En septembre 2010, les génératrices diesel qui composaient le sous-système de production à la base Jubany et leur numérotation étaient :

- Genset I : Marque Marsiglione avec moteur John Deere. Puissance électrique de 169 kW, 212 kVA à la puissance appelée « **Prime\*\*** », ou de 200 kW, 250 kVA, à la puissance appelée « **Standby\*\*\*** » (voir Tableau 2). Selon le Sergent Gaona, le genset I opère toujours à cette dernière puissance. Il est à l'« Usina », le bâtiment no 1 du plan électrique de la base (voir annexe II).
- Genset II : Marque Caterpillar CAT 3306B D1 de 180 kW, 225 kVA qui est le plus ancien. En août 2010, ses heures enregistrées d'utilisation étaient 60 529. Il a été mis hors service et renvoyé sur le continent pendant l'année 2011 pour réparations générales. Il était à l'« Usina ».
- Genset III : Marque Caterpillar, CAT 3306 de 180 kW, 225 kVA. Il est à l'« Usina ».
- Genset IV : Marque Caterpillar, CAT 3406C de 240 kW, 300 kVA. Jusqu'en septembre 2010, ses heures enregistrées d'opération étaient zéro. Il était resté arrêté pendant les deux dernières années en raison d'un problème avec la garantie de Caterpillar (Caterpillar exigeait la présence de son personnel lors du premier démarrage, et ce personnel n'est jamais arrivé à la base Jubany). Il est à l'« Usina ».
- Genset V : Marque Caterpillar, CAT 3306B D1 de 180 kW, 225 kVA. Il est considéré le genset auxiliaire et se trouve à l'usine de traitement de l'eau, nommée « Usina Auxiliar » (4) sur le plan électrique, pour fournir l'énergie nécessaire pour le chauffage des réservoirs d'eau. Il fonctionne surtout pendant l'été antarctique.

Tableau 2. Caractéristiques techniques des gensets actuellement à Jubany

Modèle	rpm/Fréquence	Puissance nominale	Voltage/ Courant	facteur de puissance (cos φ)
Cat 3306 & Cat3306 B	1500 rpm/50 Hz	225 kVA/180 kW	400 V/325 A	0,8
Cat 3406 C	1500 rpm/50 Hz	300 kVA/240 kW	400 V/433 A	0,8
Marsiglione	1500 rpm/50 Hz	<b>Standby***:</b> 250 kVA/200 kW <b>Prime**:</b> 212 kVA/169 kW	380 V/375 A	0,8

Modèle	Consommation carburant*	Température d'émission gaz d'échappement	Taux de débit gaz d'échappement
Cat 3306 & Cat3306 B	51,6 L/h @ 100 % charge+vent. 38,7 L/h @ 75 % charge+vent.	555 °C	42,5 m <sup>3</sup> / min
Cat 3406 C	69,3 L/h @ 100 % charge+vent. 53,8 L/h @ 75 % charge+vent. 38,5 L/h @ 50 % charge+vent.	580,6 °C	52,9 m <sup>3</sup> / min
Marsiglione	<b>Sous Standby:</b> 45,5 kg/h @ 100 % charge 34,1 kg/h @ 75 % charge 22,8 kg/h @ 50 % charge 11,4 kg/h @ 25 % charge <b>Sous Prime:</b> 38,7 kg/h @ 100 % charge 29,0 kg/h @ 75 % charge 19,4 kg/h @ 50 % charge 9,7 kg/h @ 25 % charge	<b>Standby:</b> 531 °C <b>Prime:</b> 512 °C	<b>Standby:</b> 41,1 m <sup>3</sup> / min <b>Prime:</b> 36,5 m <sup>3</sup> / min

\***Pour le genset Marsiglione**, le taux de consommation de carburant est basé sur un diesel à poids spécifique de 0,853 kg/litre @ 15,5 °C. La division de la consommation par ce poids spécifique permet d'obtenir la consommation en L/h.

\***Pour les gensets modèles 3306 et 3306B**, le taux de consommation de carburant est basé sur un diesel de 35° API (16 °C or 60 °F) avec un LHV de 42 780 kJ/kg (18 390 Btu/lb) lorsqu'il est utilisé à 29 °C (85 °F) et un poids spécifique de 838,9 g/litre (7,001 lb/U.S. gal.)

\***Pour le genset modèle 3406 C**, le taux de consommation de carburant est basé sur un diesel de 35° API (16 °C or 60 °F) avec un LHV de 42 780 kJ/kg (18 390 Btu/lb)

lorsqu'il est utilisé à 29 °C (85 °F) et un poids spécifique de 838,9 g/litre (7,001 lb/U.S. gal). Pour toute information concernant la capacité d'utiliser du diesel à faible contenu en soufre et du biodiesel, il faudra consulter le fabricant Caterpillar.

**\*\*Prime, selon la norme ISO 8528-1 :** C'est la puissance maximale disponible au cours d'un service à charges variables pour un nombre illimité d'heures par an avec des intervalles normaux d'entretien. Il supporte une surcharge de 10 % pour des périodes allant jusqu'à 2 heures. L'utilisation entre 100 % et 110 % ne doit pas dépasser 8 % du temps total d'opération. La puissance moyenne admissible ne doit pas dépasser 70 % de la puissance Prime lorsqu'elle est calculée selon la norme ISO 8528-1.

**\*\*\*Standby (LTP), selon la norme ISO 8528-1 :** C'est la puissance maximale disponible avec des facteurs de charge variables pour une utilisation limitée à 500 heures par an, avec des intervalles normaux de service. Pourtant le sergent Gaona a souligné (conversation téléphonique du 8 novembre 2010) que le Genset Marsiglione installé à Jubany travaille normalement à 250 kVA, 200 kW. La DNA devrait confirmer ou infirmer cette information.

Source : Fabricants des génératrices diesel

En principe, un seul genset est utilisé à la fois pendant des périodes de 240 heures (10 jours). Les gensets numéro I et numéro III ont opéré de façon intercalée d'avril à septembre, lorsque le genset numéro IV a commencé lui aussi à opérer. Pendant l'été antarctique (décembre, janvier, février, mars), le genset numéro V a été opéré aussi et toujours un seul genset à la fois (voir à l'annexe VIII le calendrier 2010-11 d'opération des groupes électrogènes). De façon distincte, l'équipe 2009-10 avait fait opérer les gensets de Jubany selon leur disponibilité opérationnelle plutôt que par périodes fixes.

Actuellement, le sous-système de production ne possède que les compteurs de courant et de tension des gensets. Toutes les mesures électriques sont manuelles. C'est la

raison principale de la méconnaissance de la courbe de la charge électrique de la base. Pour pouvoir savoir les conditions du fonctionnement du système d'électrification, information essentielle pour le contrôle d'un système hybride, un système actualisé de mesures électriques doit être installé. D'après les renseignements du caporal Cancino, l'endroit idéal pour installer un équipement de mesure de la courbe de la charge électrique demandée, serait le tableau général situé à l'« Usina » (1) du plan électrique, où se trouvent les gensets I, II, III, IV. À ce tableau, arrive aussi la sortie du genset V qui se trouve à l'« Usina Auxiliar » (4) du plan électrique, à travers le câble (A) désigné sur le plan par une ligne rouge avec des flèches (voir figure 12).

Le chef de base 2010-11 considère qu'avec l'installation du genset IV, l'espace de travail à l'« Usina » s'est réduit et à l'avenir il sera nécessaire de prévoir un autre bâtiment, plus spacieux, pour les génératrices diesel.

Le sergent Gaona est de l'avis que les gensets de Jubany montrent une usure prématurée (conversation téléphonique du 8 novembre 2010). Selon lui, la cause de cette usure dans de nombreuses pièces telles que les broches, buses, etc. est l'absence d'une maintenance intégrale depuis plusieurs années. Pourtant, une autre cause possible serait l'encrassement ou la lubrification insuffisante des moteurs diesel provoqués par l'opération prolongée des gensets avec une charge électrique faible par rapport à leurs puissances nominales. C'est une condition opérationnelle qui, comme le montrent les mesures de puissance électrique effectuées à Jubany, arrive si souvent qu'elle est considérée comme normale.

Les gensets destinés à des sites isolés sont usuellement dimensionnés pour répondre à la charge maximale et, fréquemment, ils passent de longues périodes d'opération avec des demandes faibles. Le résultat est qu'ils opèrent longtemps à puissances en dessous de leur puissance nominale.

Les mesures de la charge réalisées en 2010-11 démontrent que les gensets de 180 kW et 200 kW ont opéré à des charges allant de 28 % à 57 % de leur capacité nominale, avec

une moyenne de 42 %, tandis que le genset no IV de 240 kW a opéré en septembre et octobre à des charges allant de 23 % à 35 % (moyenne de 30 %). Les spécifications techniques TS 62257 recommandent des charges de 50 % à 80 % de la puissance nominale pour ne pas nuire à la vie opérationnelle des gensets (TS 62257-7; TS 62257-7-3). Hunter affirme que les fabricants recommandent des charges minimales de 40 % (Hunter, 1994) pour pouvoir maintenir un rendement élevé et minimiser l'usure du moteur.

L'opération à faible charge réduit la température des moteurs diesel qui travaillent à bas rendement thermique. Des effets indésirables se produisent : une mauvaise combustion en raison du retard accru de l'allumage du moteur, un mauvais mélange carburant/air et une trop faible température de l'air d'admission et du cylindre. Le résultat est l'accumulation d'hydrocarbures ou la carbonisation à l'intérieur du moteur. Le climat froid de Jubany accentue ce processus en raison de la plus basse température de l'air d'admission et du moteur en général.

Rogers (Rogers, 1996) affirme que « les problèmes les plus fréquemment rencontrés à faible charge sont l'accumulation d'hydrocarbures, le collage des anneaux, la vitrification ou cristallisation des pistons et des parois des cylindres, l'augmentation de la viscosité de l'huile de lubrification, sa combustion ainsi que la diminution de la durée de vie du moteur ».

L'addition des sources renouvelables au réseau électrique de Jubany réduirait encore plus la puissance électrique demandée aux gensets de Jubany. Donc cette réduction est une limitation de la quantité d'énergie éolienne que le réseau de Jubany peut accepter pour éviter que les groupes électrogènes opèrent en dessous de leur point minimal de fonctionnement. Des solutions à ce problème sont présentées dans les chapitres 3 et 4.

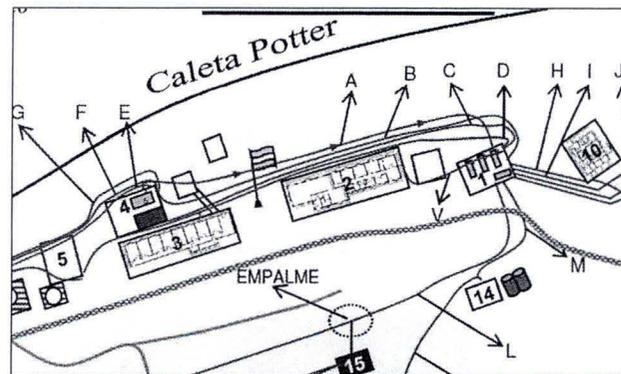


Figure 12. Emplacement des 5 gensets (bâtiments 1 et 4). Source : W. Cancino

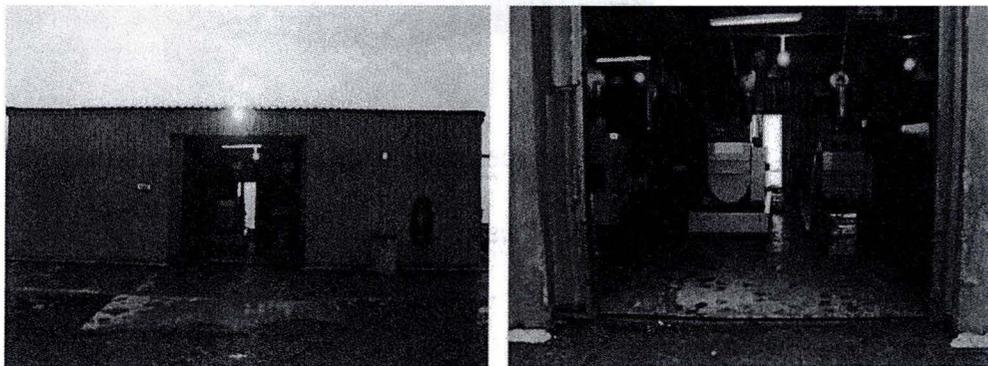


Figure 13. Deux images de l'« Usina ». Source : O. Interlandi

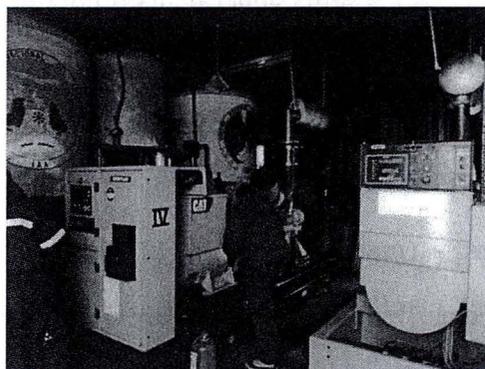


Figure 14. Le genset IV, la plus nouvelle génératrice. Source : O. Interlandi

### 1.4.3 Le stockage de carburant

La base dispose de 28 réservoirs de carburant chacun des 10 000 litres ou 10 mètres cubes, pour un total de 280 mètres cubes. Au début de chaque campagne antarctique annuelle, Jubany doit disposer de 270 à 288 mètres cubes de diesel GOA.

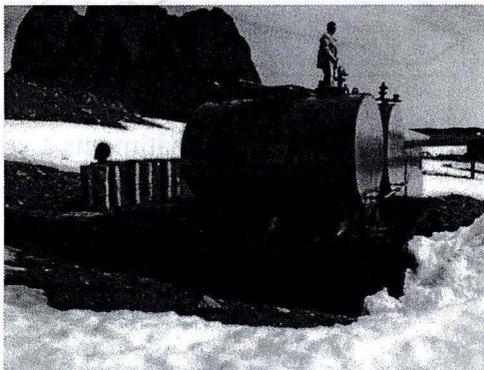


Figure 15. Réservoirs de carburant à Jubany. Source : O. Interlandi

Les réservoirs de carburant sont localisés à l'est de l'« Usina », signalés « cisternas » dans le plan du réseau électrique.

### 1.4.4 Les autres générateurs d'énergie dans la base

Les gensets ne sont pas les seuls générateurs d'énergie à Jubany. Il y a une chaudière d'eau et deux réchauffeurs d'air qui sont utilisés pour le chauffage et qui dépendent eux aussi un pourcentage de l'approvisionnement du diesel de la base. Il est à noter que ce type de dispositif n'est pas traité par la norme TS 62257.

La « Casa principal » (maison principale) (2) du plan électrique (les logements de l'équipage de la base) est chauffée par une chaudière d'eau qui consomme autour de 1 800 litres de diesel par mois. Du 24 janvier 2010 au 24 janvier 2011, elle a consommé 20,8 mètres cubes de GOA. L'eau est chauffée à 30 °C et elle est circulée par des tuyaux insérés

à l'intérieur des murs de la « Casa principal ». La proximité de la « Casa principal » de l'« Usina » rend intéressante l'option d'utiliser la cogénération de la chaleur des gensests pour remplacer cette chaudière.

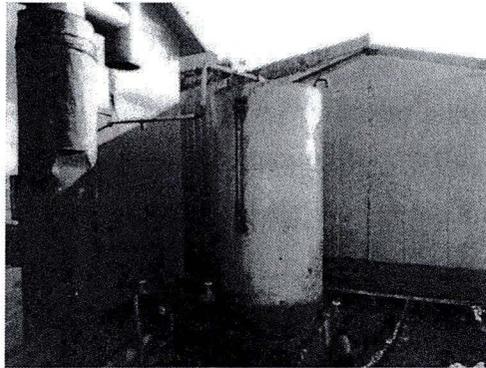


Figure 16. Réservoir de carburant de la chaudière à Jubany. Source : O. Interlandi

« La Casa Nueva » (Maison Nouvelle) (18) du plan électrique, actuellement inhabitée, dispose de 4 réservoirs d'eau de 2000 litres chacun. L'un d'eux est un chauffe-eau alimenté par l'électricité du réseau; l'eau ainsi chauffée sert à chauffer le bâtiment.

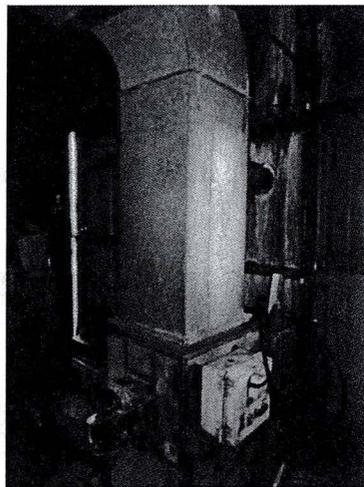


Figure 17. « Boker » du garage. Source : O. Interlandi

Il y a un réchauffeur d'air appelé « Boker » (d'après son fabricant) dans le garage de réparation des véhicules (vers l'ouest hors du plan électrique) qui consomme mensuellement autour de 600 litres de GOA. Il y a aussi un deuxième réchauffeur « Boker » à la menuiserie (20) du plan électrique, qui consomme entre 400 à 500 litres de GOA par mois. Autant dans le garage que dans la menuiserie, l'électricité est utilisée pour l'éclairage et les outils, mais pas pour le chauffage. Les « Bokers » sont des brûleurs du carburant diesel qui chauffent un courant d'air circulé par un ventilateur. L'allumage du diesel est fait électriquement. Du 24 janvier 2010 au 24 janvier 2011, les deux réchauffeurs ont consommé 12 mètres cubes du carburant diesel.

L'utilisation des « Bokers » est une question de commodité et d'efficacité. Comme l'environnement est chauffé par un jet d'air chaud, le réchauffage de grands hangars s'effectue très rapidement. Le garage de réparations a un gros volume (1 000 m<sup>3</sup>) et un « Boker » le réchauffe plus vite qu'autres dispositifs. Bien sûr, les « Bokers » et la chaudière consomment plus de carburant pendant les mois froids. La réduction de consommation de carburant des « Bokers » peut se faire en utilisant des sources renouvelables.

#### **1.4.5 Description fonctionnelle du sous-système de distribution**

Le sous-système de distribution doit d'abord fournir un service de distribution d'énergie électrique. Ses fonctions sont :

- brancher tous les points de consommation d'électricité à la microcentrale électrique de façon adaptée selon le type de client (individu, autorité collective, éclairage public, etc.) et d'être capable de surveiller et de comptabiliser les pertes de la distribution du microréseau;
- Ne pas dégrader le niveau de qualité de l'électricité distribuée (qualité d'onde, fréquence, voltage);

- Protéger la microcentrale de courts-circuits et surcharges et pouvoir les isoler de façon à ne pas interrompre le service dans le reste du microréseau.
- Exécuter les décisions du gérant du microréseau, comme le délestage des charges selon les priorités accordées, le branchement ou débranchement des circuits connectés à la génératrice diesel et fournir des informations à l'opérateur pour le contrôle du microréseau.

La conception, l'architecture et le dimensionnement du microréseau dépendent des facteurs suivants :

- le nombre de points de livraison d'énergie,
- le nombre de lignes de transmission principales et secondaires déterminées en raison de la distribution des clients dans le site, les dimensions maximales des lignes, et les pertes du système,
- le niveau de la qualité de l'énergie à être distribuée, spécialement la chute maximale du voltage permise dans les lignes du microréseau,
- les contraintes mécaniques d'après l'environnement du site(TS 62257-4, 2005-07).

De la même manière que pour le sous-système de production, la norme TS 62257-4 fournit un exemple des critères et niveaux de performance détaillés à remplir pour le sous-système de distribution. Les fonctions à réaliser par ce sous-système sont listées avec les paramètres à surveiller pour assurer la performance de ce sous-système.

La DNA devra, en accord avec le concepteur du projet, élaborer une liste similaire pour le sous-système de distribution à Jubany dans son état actuel et ses mises à niveau qui tiennent compte des expansions prévues dans l'avenir. Cela permettra de fixer les objectifs à atteindre par le sous-système de distribution dans le processus de conception et dimensionnement du système hybride au complet.

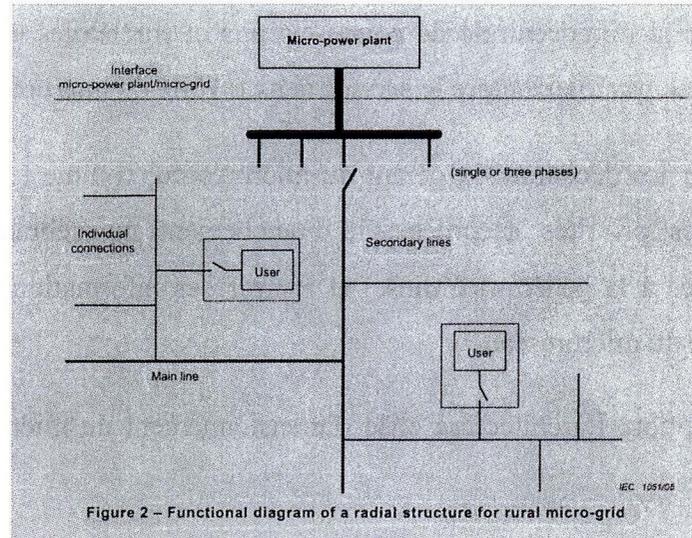


Figure 18. Structure radiale d'un microréseau. Source : TS 62257-4

Les microréseaux du sous-système de distribution sont traités dans la norme TS 62257-9-2 où on présente trois schémas de distribution :

- génération monophasée et distribution monophasée
- génération triphasée et distribution triphasée et monophasée
- génération triphasée et distribution monophasée

La section suivante présente l'état actuel du réseau électrique de la base Jubany.

#### 1.4.6 Le réseau électrique à Jubany

Le réseau de la base a une structure simple, un réseau de génération et distribution triphasé où la plupart des bâtiments sont branchés directement depuis l'« Usina » (1) du plan électrique, qui reçoit un câble de l'« Usina Auxiliar » (4) du plan, où se trouve la génératrice diesel de réserve. La topologie du réseau ressemble à une étoile centrée sur l'« Usina ». Les bâtiments plus lointains sont branchés à travers des borniers de raccordement, numérotés (15) et (19) dans le plan électrique. Dans ce plan, les lignes rouges représentent des conducteurs électriques à quatre pôles (fils), trois phases et le neutre, de 50 mm carrés chacun (qui équivaut à un 0 ou 1/0 AWG). Le réseau utilise des câbles installés à époques diverses : les câbles plus anciens n'ont pas des fils à cuivre et leur protection est à toile, tandis que les nouvelles sections utilisent du câble (probablement marque Pirelli) SINTENAX enveloppé à plastique noir, et contenant un gel blanc pour protéger les fils de l'humidité. Le réseau a des sections enterrées à 30-50 cm sous le sol sans aucune protection et des sections sur le sol, qui sont couvertes par la neige pendant les mois froids et qui se trouvent plongées dans de petits ruisseaux pendant l'été.

Le plan du réseau électrique de Jubany qui apparaît dans ce travail (annexe II) a été préparé par le Caporal Walter Daniel Cancino au cours de la semaine du 1 à 7 août 2010.

Dans le plan électrique, les lignes rouges représentent des câbles à 4 pôles. Les lignes bleues représentent des ruisseaux d'eau et la ligne grise pointillée représente un chemin d'accès. Il faut remarquer le pont qui protège le câble qui va à (23), la pompe au petit lac. Le bornier de raccordement (15) est appelé « Torre de Distribución » et se trouve en face de la « Casa principal » (2). Il y a un autre bornier de raccordement (19), qui distribue des câbles vers le garage de réparation des véhicules à l'ouest de la base (voir la ligne signalée S avec de flèches) et vers la « Casa Nueva »(18).

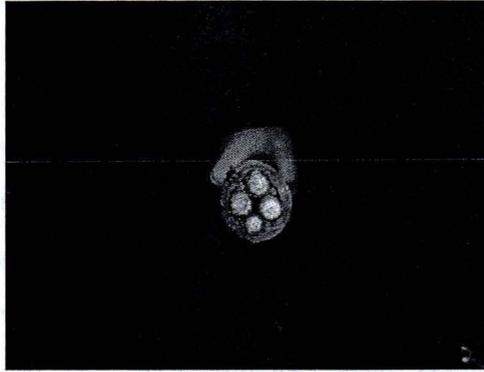


Figure 19. Câble à 4 fils Sintenax à l' « Usina ». Source : O. Interlandi

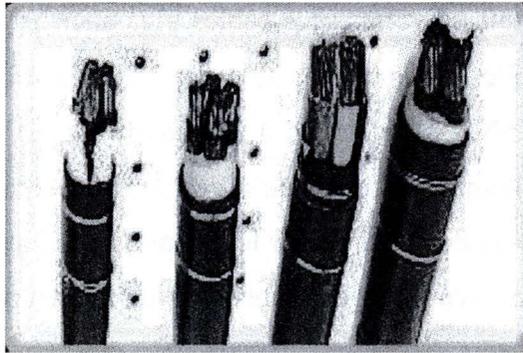


Figure 20. Câble Sintenax à 4 fils. Source: Electrogis

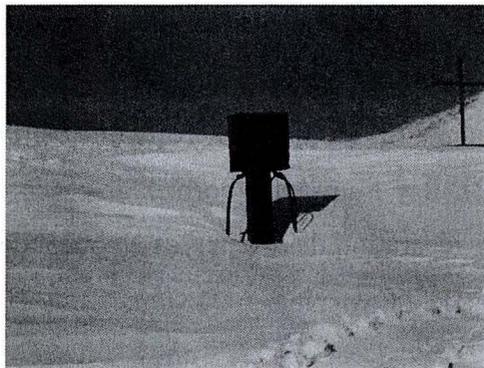


Figure 21. Le bornier de distribution (15). Source : O. Interlandi

Sur le plan électrique, peuvent être observés les quatre câbles qui sortent de l'« Usina » (1) vers les bâtiments (10) (11) (12) et (13). Ceux-ci forment un réseau de type « étoile » et non un réseau de type « arbre » dans lequel un seul connecteur principal se diviserait en branches pour les quatre bâtiments en question. Les avantages résident dans la possibilité d'utiliser un calibre de fil plus mince pour brancher directement chaque bâtiment à l'« Usina » et que s'il y a un problème dans un câble cela affecterait seulement le bâtiment branché par ce conducteur. Le désavantage est l'utilisation d'un câblage plus long. Des câbles partent depuis l'« Usina » envers tous les autres bâtiments de la base pour former un branchement du type « étoile », centré dans ce bâtiment.

Le caporal Cancino confirme (conversation du 9 septembre 2010) qu'à la sortie phase à phase des génératrices diesel, une tension de 377 V a été mesurée par rapport à une valeur nominale de 380 V (cette différence peut être compensée avec le réglage de la vitesse du genset). Au bâtiment le plus éloigné de la base, le garage de réparations de véhicules, qui est branché par la ligne (S) sortant du bornier (19), la tension mesurée par Cancino, entre phase et phase, est de 373V. Au même endroit, entre phase et neutre, il a mesuré 208V par rapport à la valeur nominale de 220V. En ce qui concerne la fréquence, Cancino a mesuré 49 Hertz par rapport à une valeur nominale de 50 Hertz. Les dispositifs de protection des ordinateurs signalent une fréquence plus basse que la normale, mais les ordinateurs continuent à fonctionner normalement.

Cancino est d'avis que ces chutes de voltage dans le réseau sont dues à l'ancien câblage de fils non fabriqués en cuivre et isolement à toile, une condition qui pourrait être empirée par une basse résistivité du sol. En conséquence, le chef de base 2010-11 a demandé à la DNA de prévoir le renouvellement de ces sections du réseau le plus tôt possible.

Le bâtiment (18) du plan électrique, la « Casa Nueva », un logement pour l'équipage de la base de construction récente, est reliée par un câble SINTENAX mis sur le sol (et pendant l'hiver sous quelques trois mètres de neige). C'est la ligne (T) qui vient du bornier de raccordement (19) et qui est considérée comme une connexion temporaire. Selon

Cancino, à la « Casa Nueva », la tension mesurée est de 375-376V entre phases et 214-215V entre phase et neutre.

Cancino reporte aussi que lors d'un remplacement de gense, il y a des effets des oscillations dans l'éclairage de tubes fluorescents; lors du démarrage des gros moteurs triphasés comme celui de la chambre hyperbare, signalée (7) dans le plan, il y a des effets sur le facteur de puissance.

Depuis l'« Usina », la plupart des bâtiments peuvent être débranchés de façon indépendante, un seul à la fois, sauf les bâtiments (17) (20) (21) et(22), branchés par les lignes (L) et (LL) qui se débranchent simultanément. Aussi, à chaque bâtiment il y a des interrupteurs thermomagnétiques triphasés avec la même finalité : la déconnexion indépendante de chacun d'eux.

Toutes les mesures de la charge électrique effectuées depuis juillet 2009 montrent que les trois courants de phase ont de magnitudes différentes et, en conséquence, l'existence toujours du courant dans le fil du neutre.

Cancino convient qu'il existe un déséquilibre du courant entre les trois phases du réseau provoqué par un déséquilibre dans la connexion de charges branchées à chaque phase (qu'il appelle U, V, W). Selon Cancino, un problème majeur est le tableau de distribution à l'« Usina » qui est très détérioré. Là, d'après Cancino, des reconnections des charges peuvent être effectuées afin d'équilibrer le courant entre les phases. Aussi, ce tableau représente l'endroit idéal pour installer des équipements actualisés de mesure de la charge électrique demandée. En bref, une mise à niveau de ce tableau est nécessaire.

#### **1.4.7 Description fonctionnelle du sous-système de demande**

La tâche première du sous-système de demande est de fournir de la puissance électrique aux applications des clients.

Les fonctions détaillées du sous-système de demande consistent en :

- fournir toute l'interface nécessaire entre le sous-système de distribution et les installations des utilisateurs. En réseaux commerciaux par exemple, il s'agit de fournir les services de mesure d'énergie pour facturer les clients.
- Distribuer l'énergie électrique aux appareils électriques dans le site de l'utilisateur.

#### **1.4.8 Les types de charges électriques à Jubany**

Il y a des charges de type résistif, comme le chauffage, et inductif, comme les moteurs et l'éclairage à tubes fluorescents. Pendant l'été antarctique, les chercheurs utilisent des nombreux ordinateurs et équipements scientifiques. Ce type de charges nécessite une énergie électrique de haute qualité (tensions et fréquences stables et proches des valeurs nominales).

Les gensests sont surdimensionnés par rapport à la charge électrique locale. Cette condition empêche d'entreprendre un programme d'épargne d'énergie électrique comme l'installation des luminaires à basse consommation.

Pour pallier la méconnaissance de la courbe de charge électrique à Jubany, l'équipe technique a été invitée pour réaliser des mesures de la puissance demandée à chacun des 12 mois de la campagne 2010-11. La méthode suivie a été :

- Effectuer 24 mesures consécutives, une par heure, depuis 00 heure à 23 heures dans une journée normale de travail pendant la semaine.
- Cette série de mesures a été effectuée par les techniciens le dernier jour du mois, raison pour laquelle le jour change de mois à mois.
- Effectuer les mesures d'intensité de courant pour chacune des trois phases de la génératrice diesel qui est en marche ce jour-là. Effectuer les mesures au panneau principal de la génératrice où la tension est 380V, 50 Hz.

Les raisons principales de la manière dont la charge a été mesurée sont :a) faciliter la collaboration du personnel de la base; b) s'ajuster à la façon dont le logiciel Homer modélise la charge de consommation.

Hunter (1994) parle de trois méthodes différentes pour évaluer la demande électrique et construire la courbe de la charge. Les deux premières nécessitent des mesures avec un intervalle d'échantillonnage maximal de 1 heure pendant un an complet ou bien pendant un mois complet. La troisième méthode utilise des renseignements structuraux de la clientèle (type, consommation annuelle, charge maximale) pour bâtir la courbe de la charge. La méthodologie de mesures suivie dans cette étude est adaptée à l'impossibilité du personnel de la base Jubany d'effectuer des mesures manuelles chaque heure pendant tout un mois, tel qu'exigé dans la seconde méthode de Hunter.

D'après les profils de charge électrique obtenus entre mars 2010 et février 2011 et par comparaison avec les profils de charge résidentiels présentés par Hunter (1994), le comportement de la consommation est du type résidentiel, avec deux pics journaliers, le premier pendant l'avant-midi, le deuxième et souvent le maximal autour de 20 heures.

Par rapport au comportement annuel de la charge électrique à Jubany, deux observations peuvent être remarquées : la première est que pendant l'été antarctique (décembre, janvier, février) le nombre de personnes présentes à la base passe d'environ 30 à 70-100, et la consommation électrique du personnel augmente en conséquence. La

deuxième observation est qu'un pourcentage (actuellement inconnu) de la charge électrique est destiné au chauffage des locaux de la base et la consommation de ces chauffeurs électriques est plus élevée pendant les mois les plus froids de l'année (juin, juillet, août).

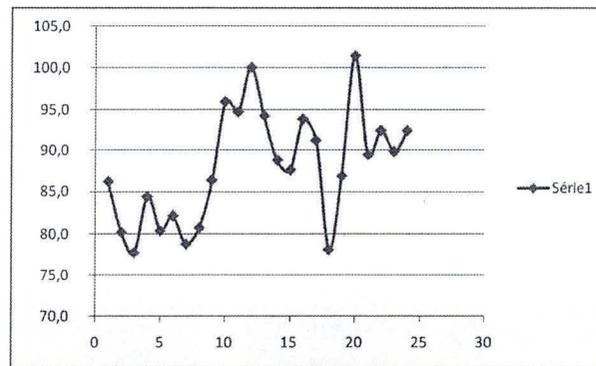


Figure 22. Profil de la charge électrique le 30 juin 2010

Sur le profil de la charge du 30 juin 2010 (Figure 22), pendant l'hiver antarctique, il peut être observé que tout le profil présente des puissances plus élevées de consommation que la moyenne annuelle. La charge électrique de chauffage est plus importante à cause du froid (la température mensuelle moyenne de juin est de  $-5,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) et la consommation électrique se produit pendant toute la journée. Les activités du personnel de la base ajoutent seulement un peu à cette consommation électrique journalière en raison du nombre peu élevé de personnes (environ 30 personnes). Ainsi, le profil résidentiel est déplacé vers le haut.

Le profil du 30 décembre 2010 (Figure 23), pendant l'été, est déplacé vers le bas, avec des puissances moins importantes tout le jour, mais il montre une différence plus grande entre la consommation nocturne et la consommation diurne. La consommation électrique du chauffage est basse toute la journée (la température mensuelle moyenne de décembre est de  $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), mais l'augmentation de la population de la base à 74 personnes provoque une consommation plus haute pendant le jour à cause des activités quotidiennes. Ainsi, tout le profil est déplacé vers le bas, mais la différence entre les consommations nocturnes et diurnes est plus grande.

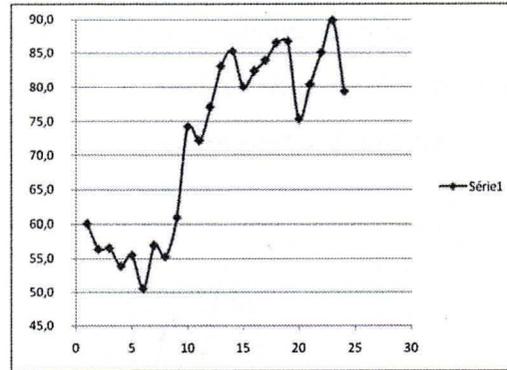


Figure 23. Profil de la charge électrique le 30 décembre 2010



Figure 24. Réflecteur externe et éclairage fluorescent. Source : O. Interlandi

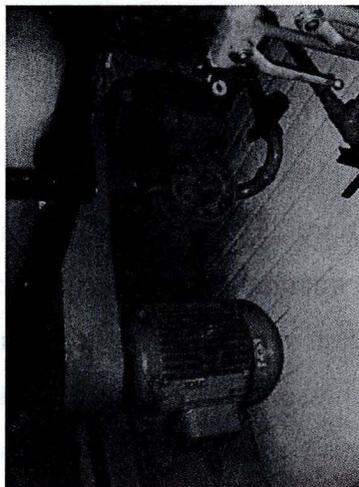


Figure 25. Moteur compresseur de la chambre hyperbare. Source : O. Interlandi

Selon Frye (2006), le comportement annuel de la charge à la base Scott est similaire. L'été antarctique témoin à un nombre des personnes présentes à la base plus élevé (près de 90), et pendant celle-ci les équipements scientifiques et personnels ainsi qu'un éclairage complet à la base créent la charge d'électricité (Figure 24). La charge moyenne pendant l'été est d'environ 127 kilowatts. Durant l'hiver le personnel diminue à quelque 15 personnes avec activités restreintes, la charge d'éclairage est aussi plus faible, mais en raison des basses températures il devient nécessaire de chauffer électriquement les moteurs des véhicules de la base et cette charge est assez grande. La charge électrique moyenne pendant l'hiver est d'environ 145 kilowatts. Ainsi, c'est la même situation qu'à Jubany : en hiver, la charge électrique moyenne est plus élevée qu'en été, même s'il y a moins de personnel.

Une mention spéciale par rapport aux charges est méritée pour deux moteurs triphasés : celui de la chambre hyperbare (Figure 25), située dans le bâtiment signalé (7) dans le plan électrique, de 380V, 22,4A, 11 kW, qui apparemment produit des décalages sur le facteur de puissance lors de ses démarrages; et celui de l'équipement pour la fabrication de l'azote liquide nécessaire à la conservation des échantillonnages biologiques pendant leur transport par bateau vers l'Argentine. Pour ce dernier moteur de 10 kW à 380V, son démarrage peut être programmé avec anticipation (Conversation téléphonique avec la Dre. Irène Schluss du 3 octobre 2011). Cela permet l'utilisation d'une petite génératrice diesel où son démarrage sera anticipé pour compenser la potentielle charge pic, ou bien le moteur sera programmé à démarrer pendant des périodes de faible charge électrique dans le réseau de Jubany.

À chaque bâtiment il y a des interrupteurs thermomagnétiques triphasés, qui servent à les débrancher en cas de nécessité.

## 1.5 COÛTS OPÉRATIONNELS PENDANT 2010-11

Les informations fournies par la DNA pour ce travail ne concernent que les coûts d'exploitation du système électrique de la base pour l'année 2010-11, et cela partiellement. En conséquence, parmi les différents composants des coûts que la TS 62257-4 mentionne, nous pouvons identifier, de façon approximative, uniquement celui des « frais annualisés de maintenance, exploitation et remplacement ».

Les frais opérationnels du système d'électrification peuvent être calculés par l'addition d'un sous-ensemble des coûts annuels des flux de trésorerie (Tableau 3):

$$C_{op}(n) = Co(n) + Cm(n) + Cr(n)$$

Où

$C_{op}$  : est le coût d'exploitation à l'année (n) et, en absence de revenu, est aussi le flux de trésorerie du système.

$C_o$  : est le coût d'opération du système dans l'année (n) y compris le carburant, l'huile, l'eau distillée des batteries, les fusibles à remplacer, etc.

$C_m$  : est le coût de maintenance engagé ou devant être engagé dans l'année (n) pour les équipements dans le système, y compris les filtres, les changements d'huile, les inspections du système.

$C_r$  : est le coût attendu pour les composants à remplacer dans l'année (n) (TS 62257-4, 2005-07)

Tableau 3. Coûts opérationnels annuels

<b>Coûts annuels 2010-11</b>	<b>Du 24 janvier 2010 au 24 janvier 2011</b>
Coût du diesel GOA (C <sub>o</sub> )	476 058,24 \$ US
Coût de l'huile des gensets (C <sub>o</sub> )	3 916,72 \$ US
Coût de l'antigel (C <sub>o</sub> )	164,89 \$ US
Coût matériel pour la maintenance (C <sub>m</sub> )	9 062,48 \$ US
Salaires du personnel technique (C <sub>m</sub> )	166 653,93 \$ US
Coût du remplacement Cat 3306 (C <sub>r</sub> )	13 475,81 \$ US
<b>TOTAL (C<sub>op</sub>)</b>	<b>669 332,07 \$ US</b>

Les hypothèses des coûts utilisées sont :

La consommation du carburant des gensets seuls est de 237 980 litres (du 24 janvier 2010 au 24 janvier 2011). Tel que mentionné à la sous-section 1.3.3 « Caractéristiques du site », le prix par mètre cube de diesel GOA à Jubany est de 2 000,41 \$ US, soit un total de **476 058,24 \$ US**. La consommation du carburant des gensets, de la chaudière et des réchauffeurs d'air de la marque « Boker » est de 270 780 litres du 24 janvier 2010 au 24 janvier 2011, soit **541 671,78 \$ US**. Une réduction intéressante des coûts peut se produire parce que la consommation de la chaudière pourrait être diminuée ou éliminée par cogénération thermique avec la chaleur résiduelle des gensets (voir chapitre 4).

Pour le calcul du coût annuel de l'huile, l'approximation suivante peut être utilisée :  $30 \times (365/10) = 1095$  litres/année d'après les renseignements du caporal Cancino (90 litres d'huile sont utilisés par mois ou 30 litres tous les 10 jours). Plus précisément, les gensets ont eu une consommation d'huile de 1 124 litres du 24 janvier 2010 au 24 janvier 2011, avec un coût par mètre cube d'huile à Jubany de 3 484,63 \$ US.

Le coût de la maintenance des cinq gensets à Jubany est estimé de la façon suivante : en raison qu'on connaît seulement le coût de la maintenance pour le Cat 3406C, qui est de 4990 \$ US pour 5 000 heures d'opération, le même coût sera considéré pour les autres gensets, c'est à dire un seul gensest qui a travaillé pour 8760 heures, soit l'année complète, pour un coût de 8 742,48 \$ US. Pour le coût du transport des matériaux liés à la maintenance, le pire cas a été considéré, c'est-à-dire celui de l'utilisation de la totalité de

pièces de rechange, 160 kg pour chacun des cinq gensets, à 0,40 \$ US par kilogramme transporté par la marine argentine (coût de 320 \$ US).

Le coût des réparations générales dans le continent du genset II, CAT 3306B D1, est approximativement 45 000 \$ pesos, à un taux de change de 3,924 \$ pesos par 1 \$ US, 11 467,01 \$ US plus l'aller-retour à la base fourni par la marine argentine en raison de 0,40 \$ US par kilogramme,  $2\,511\text{ kg} \times 0,40\ \$ = 2\,008,80\ \$\text{ US}$ , pour un total de **13 475,81 \$ US** (informations du chef de base et fiche technique Caterpillar pour le poids à l'expédition du genset CAT 3306B D1).

Par manque de renseignements, le possible coût de l'expansion du réseau électrique jusqu'à la nouvelle « Casa de Botes », à quelque 400 m de l'« Usina », n'a pas été considéré dans le coût opérationnel pour la campagne 2010-11.

### **1.5.1 Le coût opérationnel du kilowattheure**

Avec les estimations de l'énergie électrique produite pendant la campagne antarctique 2010-11, peut être estimé le coût opérationnel du kilowattheure à Jubany pendant ces 12 mois. Si l'on utilise la moyenne de l'énergie journalière consommée pendant les 12 prises de mesures, de 1819,3 kWh/jour (voir le Tableau 14 au chapitre 4), le total de l'énergie électrique produite pendant l'année est :

$$1819,3\text{ kWh/jour} \times 365\text{ jours} = 664\,045\text{ kWh/année}$$

Selon la modélisation no 7 du chapitre 4, la production électrique totale pour l'année serait de 679 021 kWh. Si l'on divise le total des coûts opérationnels de 2010 par chacune de ces valeurs d'énergie :

$$669\,332 \text{ \$ US} / 664\,045 \text{ kWh/année} = \mathbf{1,008 \text{ \$ US/kWh}}$$

$$669\,332 \text{ \$ US} / 679\,021 \text{ kWh/année} = \mathbf{0,986 \text{ \$ US/kWh}}$$

Ceci représente un intervalle pour le coût opérationnel du kilowatt-heure pendant la campagne 2010-11.

À titre de comparaison, le coût moyen pour produire l'énergie électrique en Argentine en 2008 a été de 168 \$ US/MWh= 0,168 \$ US/kWh (Rabinovich, 2009). Ainsi le coût de production de 1 kWh à Jubany à 2010 serait 1,008 \$ US/0,168 \$ US= 6 fois le coût de production en Argentine en 2008.

## 1.6 ÉVALUATIONS DES DONNÉES D'ENTRÉE

L'évaluation des données des caractéristiques du site et de la charge électrique qui seront utilisées dans le processus de conception exige la connaissance de leur **niveau**. Selon la norme TS 62257-4, le niveau est la qualité technique de ces informations. La norme définit les niveaux ou qualités techniques de la connaissance du site, de la charge électrique et du vent. (TS 62257-4, 2005-07)

Pour évaluer les données du régime du vent, la norme TS 62257-4 exige aussi connaître leur **cas** : la pertinence géographique des données pour le site spécifique, et leur **enregistrement** : la durée des données historiques utilisées dans le processus de conception, en ans (N) et mois (M).(TS 62257-4, 2005-07)

### 1.6.1 Évaluation de la connaissance du site

Trois éléments sont considérés pour évaluer la connaissance du site : topographie, climat et dangers.

## 1. Topographie du site

Selon la norme TS 62257-4, l'information disponible est de **niveau 1**. La DNA a envoyé une carte topographique en format « pdf » qui avec un zoom de 800 % donne une échelle approximative de 1:1742 et les contours d'élévation sont dessinés à intervalles de 3 m. L'emplacement exact de chaque point de charge électrique n'apparaît pas dans cette carte en raison de l'expansion actuelle de la base, et pour cela les informations ont été complétées avec le plan du réseau électrique qui montre le nouveau bâtiment signalé (18), la « Casa Nueva ». Étant donné qu'il s'agit d'une base scientifique, on a une compréhension bien établie de la végétation de la zone; les communautés végétales étant dominées par des lichens et des graminées. [Voir à l'annexe III la carte « GEOLOGICAL MAP OF POTTER PENINSULA », et à l'annexe II le Plan du réseau électrique 2010 de la base Jubany]

## 2. Climat du site

L'information reçue est de **niveau 1**. La DNA a fourni un fichier Excel avec moyennes journalières de pression, température, humidité, vitesse et direction du vent qui couvre la période du samedi 1<sup>er</sup> janvier 1994 au samedi 31 mai 2008. Des moyennes et valeurs maximales et minimales peuvent être obtenues de ces enregistrements. Les graphiques obtenus de l'étude de faisabilité en 2009 se montrent à la sous-section 1.3.3 « Caractéristiques du site ». Les mesures climatologiques à Jubany sont celles d'un aéroport. Les moyennes journalières mentionnées ont été obtenues de mesures réalisées toutes les trois heures (chaque heure lors de l'arrivée et départ d'un avion). Aussi, la précipitation pluviale et de neige a été mesurée et l'état du ciel a été estimé avec une échelle de 0/8 (ensoleillé) à 8/8 (nuageux), mais on n'a pas eu accès aux enregistrements de ces données.

### 3. Dangers du site

Selon la norme, la connaissance des dangers du site est de **niveau 3** « Compréhension non établie ou non confirmée d'informations climatiques du site. » Pour un site de climat froid comme Jubany, les occurrences de la grêle et du givrage ne sont pas enregistrées, et comme l'on explique au chapitre 2, ces phénomènes affectent de façon très significative la performance des éoliennes. Un facteur climatique à ne pas oublier est la salinité élevée dans le site, qui accélère la corrosion des matériels métalliques aux intempéries. Pour le reste, le chef de base (2010-2011) signale qu'il n'y a pas de danger d'orages, inondations, tornades, etc. La présence de foudres (dangereuses pour les éoliennes) dans le site est presque nulle.

#### 1.6.2 Évaluation de la connaissance de la charge

Deux éléments sont considérés pour évaluer la connaissance de la charge électrique, la consommation d'énergie et sa possible variation dans l'avenir.

##### 1. Consommation d'énergie

La connaissance de la consommation électrique est de **niveau 5**. Comme décrit à la sous-section 1.4.8 « Les types de charges électriques à Jubany », de mars 2010 à février 2011, des mesures de la charge électrique ont été effectuées pour faire un profil journalier chaque mois de la puissance demandée au gensec en marche ce jour-là.

L'expérience de brancher tous les équipements simultanément a été réalisée où 160-170 kW de puissance maximale demandée, et une moyenne de 90 kW ont été mesurées (Julietta Contreras, communication du 3 septembre 2009; la date de l'expérience reste inconnue). Pourtant, les charges moyennes et maximales mesurées à chaque mois pendant 2010-2011 sont systématiquement inférieures. Les charges moyennes varient de 62 à 93 kW et une charge maximale de 102,3 kW a été mesurée le vendredi 30 avril 2010.

## 2. Changement dans la consommation d'énergie

La connaissance de cet élément est de **niveau 2**. La DNA doit être capable de fournir une « Estimation de l'augmentation de la charge ou de la population », qui est le niveau 2 de connaissance selon la norme. Pendant l'été 2010, un nouveau logement a été bâti à la base, la « Casa nueva » signalée (18) dans le plan, pensée pour remplacer la « Casa principal » (2), mais qui reste inhabitée. Pendant l'été 2011, une « Casa de botes » (maison des bateaux) pourrait être bâtie ce qui ajouterait quelques 15-20 kW à la charge électrique (information du chef de base).

Variation de la population pendant l'année : Le cycle d'occupation de la base pendant une année antarctique (de la fin de février à la fin du février de l'année suivante) est très bien connu. À la base, il y a trois étapes, de mars à septembre 20-30 personnes, d'octobre à décembre, connue comme la précampagne ou « PreCAV », 40 personnes, de 20 décembre à mars c'est la campagne estivale, 64-74 personnes et même jusqu'à 100 avec le personnel en transit. La connaissance du cycle annuel de la charge électrique reste pourtant basique.

### 1.6.3 Évaluation de la connaissance du vent

Pour évaluer la connaissance de la ressource éolienne à Jubany, la norme exige connaître son niveau, son cas et son registre.

#### 1. Niveau d'exactitude de données

Les données du vent ont une exactitude de **niveau 5**. Le fichier Excel avec les moyennes journalières de la vitesse et la direction du vent (janvier 1994-mai 2008) a été obtenu à partir de mesures manuelles prises à chaque trois heures par l'équipage de trois météorologues de la Force Aérienne Argentine à la base Jubany. Le niveau d'exactitude de ces données est le 5, « Échantillon périodique de la vitesse et direction du vent tous les

jours, par exemple sur une base tri-horaire (à chaque trois heures), commun à la plupart des aéroports. » (TS 62257-4, 2005-07).

L'échantillonnage tri-horaire ne permet pas de considérer dans les mesures du vent l'effet des rafales, une caractéristique souvent mentionnée pour les vents à Jubany.

Les anémomètres sont réchauffés par des résistances électriques du type « ruban ». Il n'y pas la configuration d'une paire d'anémomètres chauffés/non chauffés pour détecter des erreurs de mesure ou épisodes de givrage.

## **2. Données conservées pour le site considéré**

Le cas des données du vent à Jubany peut être le **cas 1** ou le **cas 2**. L'emplacement exact choisi par la DNA en 2010 pour l'installation d'une éolienne de 10 kW près de la base n'est pas connu et non plus les lieux possibles d'installation pour un champ des éoliennes (les types riche et pauvre de pergélisol, qui déterminent la qualité du sol et les fondations, sont très mélangés à Jubany). Pour cette raison, seront considérés ici soit le cas 1, « Données conservées obtenues à l'emplacement approximatif de l'installation du système sur le site considéré », ou le cas 2, « Données conservées obtenues à un emplacement à proximité immédiate du site considéré et avec les mêmes caractéristiques générales d'écoulement de l'air. » (TS 62257-4, 2005-07)

## **3. Série de données historiques**

Les données du vent sont du **registre 1** selon la norme. La durée des données historiques de l'information disponible est de M=173 mois consécutifs de données recueillies sur le site avec N=14 ans de données historiques qui peuvent être utilisées dans une corrélation générale.

#### **1.6.4 Les faiblesses de l'information actuelle sur Jubany**

L'évaluation des données disponibles actuellement sur Jubany montre qu'il y a des faiblesses dans la connaissance de la ressource du vent (niveau 5), dans la connaissance des dangers du site, spécifiquement l'occurrence des événements de givrage (niveau 3), dans la connaissance de la courbe de la charge électrique (niveau 5) et de sa variation à l'avenir et pendant le cycle annuel (niveau 2). Toutes ces données, nécessaires à une conception et un dimensionnement réussis de l'installation hybride, devront être améliorées.

Même si les moyennes de vitesse et direction du vent à Jubany sont connues, les mesures manuelles tri-horaires du vent ne mesurent pas les rafales et l'effet qu'elles pourraient avoir sur l'usure et les systèmes de protection de certaines éoliennes de petite taille, tels que les mécanismes d'arrêt auto-enrouleur (en anglais « auto-furling »). Pour avoir un niveau 1 de connaissance, il serait nécessaire d'installer une tour de mesure du vent avec des anémomètres et girouettes, capable de détecter les occurrences de givrage et d'obtenir les moyennes de la vitesse et direction du vent aux 10 minutes de façon automatique (standard de l'industrie éolienne, communication d'Olivier Parent) ou de 15 minutes de mesures automatiques (recommandation de la TS 62257-4). Cette tour devrait être en service pendant une période suffisamment longue, usuellement d'une année.

Le manque d'informations sur l'occurrence du givrage et de la grêle à Jubany résulte en un niveau 3 de connaissance des dangers du site. Le givrage est un des phénomènes du climat froid qui peut affecter énormément la performance des éoliennes. Comme discuté au chapitre 2, les basses températures et les événements de givrage peuvent modifier beaucoup la performance opérationnelle des éoliennes et leur production d'énergie. Une méthode économique recommandée pour détecter le givre est celle de la paire d'anémomètres, un chauffé, l'autre non chauffé. Plus de détails se trouvent au chapitre 2.

La méconnaissance de la charge électrique à la base (niveau 5), qui n'avait jamais été mesurée avant ce travail, est une entrave au bon dimensionnement des composantes éoliennes et possiblement cette méconnaissance a contribué au surdimensionnement des

génératrices diesel qui opèrent aujourd'hui à Jubany. Un capteur-enregistreur automatique de la courbe de la charge électrique et de la puissance générée, installé dans le tableau général situé à l'« Usina » remplirait cette lacune.

Le climat antarctique de Jubany présente des variations extrêmes. La TS 63357-4 souligne qu'il devient essentiel pour le concepteur d'un système qui travaille dans un tel environnement de faire un effort extra pour augmenter le niveau des détails de l'information des ressources renouvelables et de la courbe de la charge et surtout de leurs effets sur la variabilité du service rendu par le système. Comme discuté au chapitre 2, l'importance de bien mesurer les données caractéristiques du site augmente pour un système qui opère en climat froid.

Une mention à part mérite la connaissance de l'état actuel du système électrique de la base. Malgré la collaboration excellente de l'équipage technique 2010-2011 pour partager les renseignements, une évaluation complète de l'état de ce système ne peut être effectuée que sur le terrain. Cette vérification et la mise à niveau du système d'électrification sont essentielles si l'on veut atteindre une moyenne ou haute pénétration des énergies renouvelables.

The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that every entry should be supported by a valid receipt or invoice. This not only helps in tracking expenses but also ensures compliance with tax regulations.

In the second section, the author outlines the various methods used for data collection and analysis. It includes a detailed description of the survey process, from the selection of participants to the distribution of questionnaires. The results of the survey are then presented in a clear and concise manner, highlighting the key findings and trends.

The third part of the document focuses on the implementation of the proposed system. It describes the steps involved in the development and testing of the software, as well as the challenges faced during the process. The author also provides a timeline for the project and discusses the future plans for the system.

Finally, the document concludes with a summary of the overall findings and a list of references. It reiterates the importance of the research and the potential impact of the proposed system on the industry.

## **CHAPITRE 2**

### **LES EFFETS DU CLIMAT FROID**

Ce chapitre porte sur les défis posés par un environnement si exigeant pour les hommes et les machines comme le milieu antarctique. À part les problèmes de la conception et le dimensionnement des systèmes électriques hybrides en sites isolés, il y a un ensemble de contraintes dérivées de l'opération en climats extrêmes arctiques ou antarctiques.

Les aspects et les exigences techniques qui doivent être considérés pour permettre à des installations électriques éolien-diesel d'opérer pendant des périodes raisonnables dans un milieu polaire extrême sont :

- Mesures météorologiques en climat froid pendant a) l'évaluation du site et b) l'exploitation
- Turbines éoliennes en climat froid
- Génératrices diesel en climat froid
- L'infrastructure et le travail en climat froid

Pour ce chapitre, les documents principaux que qui ont été consultés sont « Des Recommandations pour projets d'énergie éolienne en climat froid » (Expert Group Study on Recommendations for Wind Energy Projects In Cold Climates; Baring-Gould *et al.* 2009a) et « État de l'art de l'énergie éolienne en climat froid » (State-of-the-art of wind energy in cold climates; Laakso *et al.* 2009). Il s'agit de documents très riches en informations sur l'exploitation de l'énergie éolienne en climats froids, rédigés par le groupe spécial no 19 de l'IEA, de l'Agence internationale d'énergie. Le climat froid est « le climat où se produisent des occurrences de givrage ou des températures inférieures aux limites de

fonctionnement des éoliennes standard ». Une autre source de synthèse a été réalisée par Olivier Parent « Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: Critical review » (Parent, 2010).

Dans (Baring-Gould *et al.*, 2009a), les recommandations consistent en suivre les bonnes pratiques générales pour le développement des installations éoliennes, même si elles ne considèrent pas les problèmes causés par le climat froid. Les lignes directrices dictées par des organisations nationales, internationales, professionnelles et industrielles pour la mise en œuvre des projets d'énergie éolienne doivent être respectées aussi pour les projets en climat froid (d'où l'utilisation des spécifications techniques TS 62257 de l'IEC). Ensuite, il est important d'évaluer soigneusement les risques supplémentaires qui posent le froid, la glace, la neige et une densité de l'air plus élevée aux installations proposées. Le climat froid affecte directement les conditions d'accès et du travail au site, la sélection de la turbine, la santé et la sécurité du personnel et du public, la production d'énergie, etc.

(Baring-Gould *et al.*, 2009a) conclut que l'exploitation des éoliennes en climat froid doit résoudre deux problèmes importants : l'estimation exacte des pertes de production des éoliennes provoquées par le climat froid et la fiabilité des contre-mesures contre la glace et les événements givrants.

Le pragmatisme des conseils suivants est très utile pour réussir dans l'exploitation de l'énergie éolienne en climat froid (Baring-Gould *et al.*, 2009a) :

- Dès le commencement, être conscient des risques et des coûts supplémentaires qu'implique la production éolienne en climat froid.
- Autant que possible, suivre les meilleures pratiques disponibles pour le développement éolien, même si elles ne considèrent pas les questions posées par le climat froid.

- Bien comparer les solutions offertes par les fabricants d'instruments climatologiques et de turbines, en considérant toujours que les conditions varient fortement entre les différents sites en climat froid.
- Effectuer une campagne de mesures d'évaluation du site d'au mois un an, en incluant des mesures de givre, avec des instruments adaptés. Être conscient qu'une moindre disponibilité de mesures du vent résulte en une plus haute incertitude dans l'estimation de production d'énergie, et que cette étape fournit des informations précieuses sur l'accès au site et les conditions de travail.
- Effectuer une évaluation des risques qui inclut l'évaluation de la qualité de la turbine choisie et l'expérience et les références de la société d'installation, les entrepreneurs, et l'opérateur.
- Dans le processus de sélection des turbines, considérer soigneusement les adaptations au climat froid qui sont offertes par les fabricants. Inclure des systèmes d'antigivrage et de dégivrage si les conditions du site le demandent et les technologies disponibles ont été testées.
- S'assurer que les éoliennes sélectionnées ne seront pas opérées dans des conditions pour lesquelles elles n'ont pas été certifiées sans une analyse approfondie et des discussions avec le fournisseur de la turbine.

## 2.1 MESURES MÉTÉOROLOGIQUES EN CLIMAT FROID

### 2.1.1 Mesures météorologiques pendant l'évaluation du site

Le résumé de (Baring-Gould *et al.*, 2009a) soutient que dans un site en climat froid la campagne d'évaluation de ressources du vent et de conditions météorologiques est plus critique que pour autres sites en climat tempéré. Ceci est en accord avec la norme TS 63357-4 qui demande de faire un effort supplémentaire pour augmenter le niveau des détails de l'information des ressources renouvelables et de leurs effets sur la variabilité du service rendu par le système hybride. Sur les données obtenues pendant cette étape sera basé le reste des décisions du projet. À part des mesures traditionnelles, les occurrences de glace et de givrage doivent être mesurées pendant au mois un an, avec des instruments de mesure adaptés au climat. La campagne d'évaluation sert aussi à obtenir des expériences précieuses sur les conditions de travail et l'accès au site.

Uniquement pour évaluer correctement la ressource éolienne et les événements de givrage du site, Parent (2010) soutient qu'il est recommandé de prendre des mesures pendant au moins un an en utilisant :

- Un détecteur de givrage atmosphérique,
- Une paire d'anémomètres chauffés/non chauffés,
- Une girouette chauffée,
- Des détecteurs du point de rosée et de visibilité.

Les mesures de température, d'humidité et de pression atmosphérique requièrent une protection des instruments de la glace et de la neige qui peuvent provoquer des lectures erronées. Une attention spéciale mérite le positionnement de boucliers de rayonnement que, réalisé de façon inappropriée, pourrait entraver les mesures. Tous les instruments utilisés doivent être conçus pour l'opération à basse température.

Les installations de mesures météorologiques en climat froid utilisent plus d'énergie en raison du chauffage des capteurs et autres équipements additionnels. La capacité de rétention des données doit être élargie pour compenser l'accessibilité plus difficile et restreinte au site imposé par le climat froid (les visites pour récupérer l'information sont nécessairement plus éloignées). Tous les dispositifs tels que les paratonnerres, les tours et haubans, le câblage, les girouettes, les anémomètres, etc. doivent être renforcés pour tenir compte de l'éventuelle accumulation de glace et doivent être résistants au froid. Les hauteurs des tours pourront diminuer pour être plus résistantes aux intempéries. Il est important que tout l'équipement doive être manipulé avec des gants.

Les tours des stations météo en climat froid subissent des charges parfois très lourdes dues à l'accumulation de glace, combinée avec des vents forts. Un mât d'environ 1000 kg peut recueillir 5000 kg de glace sur le mât et ses haubans. Ceux-ci doivent être protégés à leurs extrémités inférieures (où ils sont attachés aux ancrages) parce que l'accumulation de glace sur les haubans peut glisser vers le bas, et endommager les serre-câbles et/ou les tiges d'ancrage. Des tours en treillis bien conçues sont habituellement plus recommandables que des tours tubulaires qui ont tendance à subissent un flambage dans cet environnement.

Par rapport à la hauteur, Maissan (2006) recommande des tours de 30 m avec les anémomètres positionnés à 10, 20 et 30 mètres afin de déterminer le cisaillement du vent. Maissan recommande aussi une campagne de mesures d'au moins un an.

L'accumulation du givre sur les haubans, les paratonnerres, la tour et le reste d'éléments de la station météo peut influencer l'écoulement du vent. L'anémomètre et la girouette doivent être positionnés sur la tour de façon à éviter l'interférence avec les objets givrés (Laakso *et al.* 2009).

La détection du givre par l'analyse des dommages, par exemple le bris des mâts météorologiques ou lignes à haute tension dû au flambage ou la possible résonance causée par masses supplémentaires, pourrait servir comme un indicateur supplémentaire pour des sites où le givrage lourd n'avait pas été prévu (Parent, 2010).

Il est recommandable de planifier la mise en place de la station météorologique pendant la saison « chaude ». Pour les visites de récupération des données, on devra peut-être utiliser des véhicules à chenilles ou motoneiges. Il est recommandable de baliser les chemins d'accès avec des marqueurs réfléchissants et de préparer des refuges d'urgence dans les sites lointains.

Le problème de l'alimentation électrique des capteurs chauffés en sites éloignés du réseau électrique peut être résolu avec des systèmes autonomes et hybrides comme des éoliennes de petite taille, panneaux photovoltaïques, génératrices diesel et batteries. Pour les génératrices diesel, doit être prévue la protection contre la neige par des entrées d'air et des cheminées en U et l'utilisation de radiateurs passifs de grosse dimension plutôt que des ventilateurs qui ont tendance à se coller avec le froid. Le système distant de surveillance et de collection des données de la station météo pourrait servir aussi pour l'alerte précoce des problèmes d'alimentation énergétique de l'installation (Baring-Gould *et al.* 2009a; Laakso *et al.* 2009).

Pour des sites sans une alimentation suffisante d'énergie, une autre possibilité est l'utilisation des anémomètres à hélice. Des expériences suisses dans les montagnes Jura montrent une disponibilité pour ce type d'instruments du 98 % du temps à températures sous zéro et haute humidité (Laakso *et al.* 2009).

### 2.1.2 Origines atmosphériques du givre

La difficulté de la détection du givre vient du fait que leurs origines atmosphériques sont plutôt variées et complexes et donnent lieu à toute une panoplie de types du givre (Figure 26). Parent (2010) et Comeau (2008) classifient le givrage ainsi :

- **Brouillards ou nuages givrants** : lorsque des gouttelettes d'eau surfondues qui composent un nuage frappent une surface à une température inférieure à 0 °C et gèlent lors de l'impact, le givre est généré. La température des gouttelettes peut être aussi basse que -30 °C, mais elles ne gèlent pas dans l'air en raison de leur taille et de l'absence d'un moyen pour se solidifier. Les accrétions formées possèdent différentes tailles, géométries et propriétés, selon le nombre de gouttelettes dans l'air (teneur en eau liquide, « **TEL** ») et leur taille (diamètre moyen du volume, « **DMV** »), la température, la vitesse du vent, la durée, la longueur de corde de la pale de l'éolienne et l'efficacité de collection. Il y a un continuum dans l'apparence de l'accrétion de glace dès le givre aux températures plus froides jusqu'au verglas aux températures moins froides.
  - **Givre mou** : mince couche de glace avec aiguilles et flocons. Il apparaît lorsque la température est bien en dessous de 0 °C, et DMV et TEL sont petits. L'accrétion résultante aura une faible densité et une faible adhérence.
  - **Givre dur** : DMV et TEL plus élevés feront une accrétion de plus haute densité, qui est plus difficile à enlever.
  - **Verglas** : quand une partie de la gouttelette ne gèle pas à l'impact, mais se déplace sur la surface et gèle plus tard. La densité et l'adhérence de la glace résultante sont fortes. Elle est souvent associée à des précipitations.

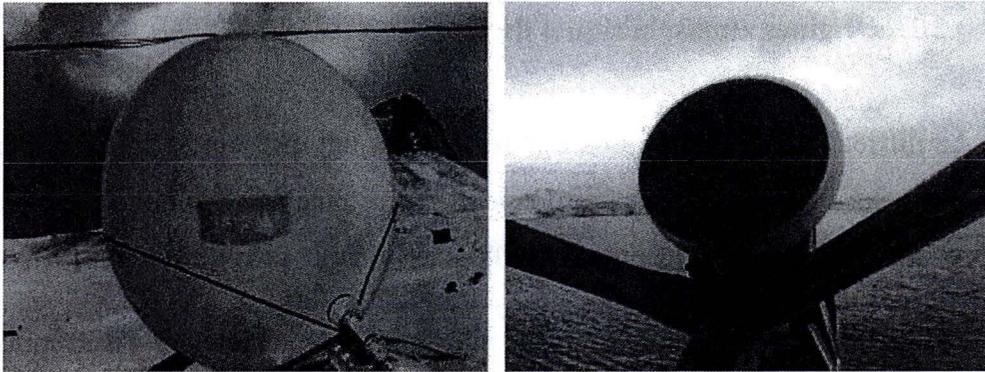


Figure 26. Les deux types de givrage présent à Jubany. Source : O. Interlandi

- **Précipitation** : peut être de la neige ou de la pluie. Le taux d'accrétion peut être beaucoup plus élevé que dans le nuage givrant, ce qui peut provoquer plus de dommages.
  - **Pluie ou bruine verglaçantes** : Ce phénomène apparaît lorsque la pluie tombe sur une surface dont la température est inférieure à  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Il se produit souvent lors d'une inversion thermique, lorsqu'il y a une couche d'air froid ( $T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) au sol et une couche d'air plus chaud ( $T > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) au-dessus, et en traversant la couche froide la pluie devient surfondue. Sa densité et son adhérence sont élevées.
  - **Neige mouillée ou fondante** : lorsque la neige est un peu liquide à une température de l'air entre  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , elle s'adhère à la surface. Initialement elle est facile à enlever, mais peut devenir difficile si elle gèle sur la surface.
- **Gelée blanche** : Elle apparaît lorsque la vapeur d'eau se solidifie directement sur une surface froide, souvent au cours de vents faibles. Étant donné la structure cristalline des accumulations, la gelée blanche peut considérablement augmenter la rugosité des pales d'une éolienne. Son adhérence peut être forte.

### 2.1.3 Détecteurs du givrage atmosphérique

Laakso et al. (2009) et Parent (2010) considèrent comme nécessaire l'installation de détecteurs de glace pendant l'évaluation du site dans des endroits où des événements de givrage pourraient se produire. Leur présence est recommandée simultanément avec les mesures météorologiques habituelles d'évaluation du site. Il y a un certain nombre de détecteurs de givre actuellement sur le marché, mais aucun ne peut être utilisé pour détecter tous les types de givre, parce que différentes techniques de détection sont adaptées à des climats différents et à des fins différentes. Des dispositifs divers sont nécessaires pour détecter la persistance de la glace et le temps de givrage réel, et secondairement la durée, le type, la densité et la masse de glace accumulée. Le temps pendant lequel la glace s'accumule doit être estimé afin de déterminer l'énergie de chauffage nécessaire, tandis que la persistance de givrage détermine les pertes globales de production causées par la glace. La durée, le type, la densité et la masse de celui-ci sur les surfaces sont nécessaires pour estimer les caractéristiques du givrage dans le site.

Un problème de certains détecteurs de glace est causé par leurs cycles de fusion. Ces détecteurs captent la glace au moyen d'une sonde qui doit collecter le givre et après se libèrent de celle-ci en se chauffant. La puissance de ce chauffage peut être insuffisante pour enlever toute la glace ou la glace accumulée déjà fondue peut geler de nouveau après que la période de chauffage est passée. Cela empêche la détection suivante (Laakso *et al.* 2009).

Deux capteurs de glace montrent une certaine capacité à mesurer des événements de givrage pour des applications en sites d'exploitation éolienne selon le cadre de recherche COST 727 : ce sont l'« IceMonitor » de Combitech, entreprise suédoise et le capteur de pluie verglaçante légère « Goodrich 0847LH1 », fabriqué aux États-Unis (Baring-Gould *et al.* 2009a; Fikke, 2006).

Les détecteurs de givre sont plus utilisés pendant la phase d'opération que pendant l'évaluation du site éolien en raison de leur coût élevé et de leurs besoins élevés d'énergie, qui entravent leur fonctionnement aux stations météo lointaines (Parent, 2010).

### 2.1.4 Anémométrie multiple

Pendant l'évaluation du site, il est fortement recommandé l'utilisation d'anémomètres chauffés lorsqu'il y a la possibilité de givrage. Laakso et al. (2009) mentionne qu'une petite quantité de givre dans la coupe ou l'axe d'un anémomètre peut causer une sous-estimation d'autour de 30 % pour une vitesse de vent de 10 m/s. Comme la majorité des anémomètres chauffés ont des inconvénients tels qu'une masse plus grande et une sensibilité au vent vertical, des anémomètres classiques à coupe doivent être utilisés simultanément. L'idée à l'arrière de cette configuration est que la présence de glace sera détectée lorsqu'il aura des différences significatives dans les mesures des détecteurs chauffés et non chauffés. Une extension de cette dernière méthode peut comprendre trois anémomètres. Le troisième anémomètre sera chauffé uniquement s'il y a une différence significative entre les sorties des deux anémomètres restants (Baring-Gould *et al.* 2009a; Parent, 2010).

Une configuration reliée à l'anémométrie multiple est l'utilisation de girouettes non chauffées. Lorsqu'on détecte une déviation standard égale à zéro dans les moyennes de quelques échantillons consécutives et la température est inférieure à 0 °C, on présume une occurrence de givrage. Parent (2010) mentionne une bonne corrélation entre cette hypothèse et les indications de givrage qui proviennent des paires d'anémomètres.

Équiper le mât de mesure avec la paire d'anémomètres chauffé et non chauffé pour estimer les épisodes de givrage est relativement peu coûteux et recommandable. Cet arrangement donne une vue d'ensemble du climat de givrage. Toutefois, le traitement des signaux en provenance de cet arrangement doit prendre en considération l'expérience locale des événements du givrage, par exemple pour décider quelle différence de mesures sera considérée comme indicative d'une vraie présence de glace. L'obtention de données telles que les séries chronologiques de la hauteur de la base des nuages de l'aéroport le plus proche et comparer cela avec les données mesurées est aussi souhaitable. Ces deux méthodes ont la capacité de donner une évaluation assez bonne du temps que le givre peut affecter le fonctionnement des éoliennes (Baring-Gould *et al.* 2009a).

L'anémométrie double travaille bien à températures douces, pendant des froids intenses l'anémomètre non chauffé risque de rester gelé pendant de longues périodes. À vitesses du vent très faibles, la différence de mesures entre les anémomètres chauffés et non chauffés peut s'expliquer par leurs différentes caractéristiques d'inertie plutôt que par la vraie présence du givre. Et, bien sûr, l'anémométrie multiple ne peut donner des indications de givrage lorsqu'il n'y a pas de vent (Parent, 2010).

### **2.1.5 Détecteurs du point de rosée**

Il a été observé que la sévérité de la présence locale de givre dépend particulièrement de la hauteur du site en relation à la hauteur moyenne des environs (Laakso et al., 2009; Parent, 2010), peut-être parce que de grandes différences d'altitude favorisent la formation de nuages ou brouillards givrants en raison de la « montée orographique » ou « montée forcée » de l'air qui favorise l'expansion et abaisse la température des gouttelettes qu'il emporte (Comeau, 2008).

L'utilisation des capteurs par paires d'anémomètres chauffés/non chauffés est améliorée en mesurant des paramètres tels que la température extérieure, l'humidité, l'accumulation de glace et sa durée, qui permettra une évaluation précise de la disponibilité potentielle des turbines (Baring-Gould *et al.* 2009a).

Il est possible d'estimer la présence dans le site de nuages givrants à partir des observations de visibilité, qui comprennent des mesures de la hauteur de la base des nuages. Ces mesures sont d'habitude effectuées dans les aéroports et pour cela, la couverture et la précision de cette méthode sont limitées.

Une augmentation du risque de givrage provoqué par nuages ou brouillards givrants peut être estimée, pendant l'évaluation du site, avec un détecteur du point de rosée conçu pour fonctionner à températures en dessous de 0 °C (Laakso et al., 2009) parce que pendant l'occurrence des nuages givrants, l'humidité relative est élevée (autour de 95 %), et se trouve combinée à de basses températures (inférieures à 0 °C). Un détecteur du point de

rosée tel que décrit pourrait fournir des informations précieuses, parce que dans la pratique la température de l'air est au point de gel presque tout le temps lorsque les nuages givrants se produisent (Parent, 2010).

### **2.1.6 Détecteurs et anémométrie pendant le stade d'opération**

Pendant l'opération, l'utilisation de l'anémométrie multiple et des détecteurs de la glace atmosphérique impose d'exigences différentes que pendant l'évaluation du site.

Les détecteurs de givre sont la méthode la plus couramment utilisée pour contrôler les systèmes d'antigivrage-dégivrage des turbines éoliennes (Parent, 2010). Comme la glace s'accumule plus rapidement et de façon différenciée sur les pales en raison de la grande vitesse des éoliennes que sur des objets statiques, Homola (2006) propose que les détecteurs du givre des turbines éoliennes en exploitation remplissent les exigences suivantes :

- **Pouvoir être positionnés dans la pointe de la pale.** La vitesse relative entre les gouttelettes en surfusion et la pale est la plus grande à cet endroit. Les pointes des pales atteignent la hauteur maximale et peuvent geler même si la nacelle se trouve libre de glace. Les bouts des pales balayent le plus grand volume et peuvent ainsi collecter plus des gouttelettes. Ces phénomènes s'accroissent lorsque la longueur de la pale augmente. Il est à signaler qu'à cette position, les détecteurs devront être protégés contre la foudre, et en cas de bris il sera difficile de les réparer, ou remplacer. Pour résoudre le problème du câblage à l'intérieur des pales ou la mise à niveau des éoliennes existantes, le détecteur peut être sans fil.
- **Une haute sensibilité pour détecter de petites accrétions.** Le dégivrage par chauffage doit commencer à opérer lorsque les accrétions de glace sont petites, sinon elles vont modifier le flux laminaire sur la pale dans un écoulement turbulent et l'on aura besoin d'une puissance de chauffage beaucoup plus élevée pour fondre les accrétions. Aussi, un ou deux centimètres de givre sur le bord d'attaque de la pale

posent déjà le risque de jeter des morceaux de glace. Finalement, même un peu de rugosité dans la surface de la pale affecte l'efficacité du rotor et la production d'électricité de l'éolienne avec les pertes économiques correspondantes.

- **La capacité à détecter le givre sur une grande surface.** L'accumulation de glace ne se produit pas toujours aux mêmes endroits sur la pale. L'emplacement varie en fonction des mécanismes d'accumulation du givre. Le verglas peut apparaître sur de grandes surfaces de la pale, avec de l'eau qui court vers l'arrière et gèle loin du bord d'attaque. Le givre apparaît généralement sur le bord d'attaque, autour du point de stagnation, mais l'endroit exact peut varier en fonction de l'angle d'attaque. En plus, dans certains cas peut être observé des zones de la pale ayant peu ou pas de glace alors que d'autres ont de grandes accumulations. Ces phénomènes indiquent que les détecteurs de glace des éoliennes en exploitation doivent pouvoir détecter le givrage en plus d'un ou deux endroits.

Une configuration améliorée pour ce type de détecteurs est l'utilisation par paires, dont l'unité chauffée sert à mesurer l'intensité et l'unité non chauffée sert à mesurer la durée (Tammelin *et al.*, 2005).

Des anémomètres et des girouettes sont des éléments clés dans l'industrie éolienne. Les modèles plus avancés pour la mesure de la vitesse du vent sont les anémomètres à coupoles et les anémomètres à ultrasons. Les instruments à ultrasons fournissent, généralement, des informations sur la direction du vent tandis qu'une girouette est nécessaire pour détecter la direction du vent lorsque la vitesse du vent est mesurée avec un anémomètre à coupoles.

Dans des conditions de givrage, une paire d'anémomètres chauffés/non chauffés donne des lectures du vent différentes. Ce comportement des lectures peut être traité par le système de contrôle pour, par exemple, arrêter la turbine (Laakso *et al.*, 2009).

L'inconvénient principal de la méthode d'anémométrie double pendant l'opération des turbines réside dans le fait que les anémomètres s'installent à la nacelle et ainsi à une

hauteur inférieure à celle de la pointe des pales dans son parcours supérieur, où usuellement il y a plus d'occurrences de nuages givrants (Parent 2010).

### **2.1.7 Détection par erreurs dans la courbe de puissance**

L'écart de la puissance réelle produite de celle calculée par la courbe de puissance de référence aux températures ambiantes inférieures à 0 °C pourrait indiquer une opération en conditions givrantes. La production réelle d'une éolienne par rapport à la production d'énergie espérée selon la vitesse du vent mesurée par l'anémomètre de la nacelle et sa courbe de puissance peut fournir une indication sur la présence de glace parce qu'une turbine givrée produira moins qu'une turbine sans givre. Cette méthode devrait toujours être implémentée, mais considérée surtout comme un contrôle de vérification, parce que la différence entre la production réelle en exploitation et celle prédite par la courbe de puissance peut être expliquée par des facteurs autres que le givrage (Homola *et al.*, 2006). Il est à souligner que sans une expérience opérationnelle locale, la diminution de l'énergie produite devient difficile à interpréter (Laakso *et al.*, 2009).

### **2.1.8 Surveillance du givre par vidéo**

Des caméras vidéo peuvent être utilisées comme détectrices de givre pendant le stade d'opération; un exemple serait une webcam dans le moyeu du rotor, en visant le côté sous pression du vent d'une pale qui pourrait givrer. Pourtant, les problèmes opérationnels suivants doivent être résolus : 1) l'ensemble du dispositif, notamment les lentilles, doit être chauffé pour assurer un fonctionnement approprié; 2) dans les régions arctiques, il y a peu de lumière naturelle pendant l'hiver, la saison du givre. L'éclairage artificiel est donc nécessaire, ce qui peut avoir des impacts visuels négatifs si elle est dans le spectre visible. 3) La rareté d'outils automatisés appropriés d'analyse des images. Si l'on considère que

l'analyse des images est un domaine en plein essor, ce type de système pourrait devenir viable dans un avenir proche (Parent, 2010).

### **2.1.9 Détection par vibrations et bruit de la turbine**

Pendant l'opération d'une turbine, des capteurs dans le rotor peuvent mesurer ses vibrations. Les fréquences typiques du fonctionnement normal (sans givre) changent si un bris s'est produit ou du givre s'est accumulé sur les pales. Le système de contrôle peut soit arrêter la turbine, soit activer les systèmes d'antigivrage-dégivrage. Les signaux de ces capteurs doivent être interprétés correctement pour déterminer si les pales sont givrées ou si les vibrations ont une source différente (Laakso et al., 2009).

De petites quantités de glace peuvent être détectées en surveillant l'augmentation du bruit aérodynamique qui est produit par les pales du rotor. Une couche mince de glace sur le bord d'attaque augmente le bruit et déplace la fréquence à des niveaux plus hauts. Si mesurer la variation de fréquence du bruit aérodynamique semble être une bonne indication de l'accumulation de glace, cette méthode requiert d'être vérifiée afin de déterminer comment le bruit de fond et les changements des vitesses de vent influencent les données (Homola *et al.*, 2006).

Aucune de ces deux méthodes n'est capable de détecter le givre lorsque la turbine fonctionne en mode de décrochage.

Des recherches ont montré qu'un rotor givré même légèrement peut présenter un déséquilibre typique du couple une fois par révolution, causé par le changement dans l'aérodynamique individuelle des pales. L'apparition des variations du couple et de l'alimentation électrique, une fois par révolution du rotor, peut servir comme une première indication de la présence de givre (Baring-Gould *et al.* 2009a).

### 2.1.10 L'étude d'impact environnemental en climat froid

Par rapport aux études d'impacts environnementaux en climats froids, il est à souligner, d'une part, que la flore et la faune de ces climats extrêmes ont été de façon générale moins étudiées que celles des autres climats, ce qui rend l'évaluation de l'impact environnemental difficile. D'autre part, le nombre limité de spécimens dans ce type de sites distants peut permettre une évaluation plus facile de l'impact environnemental. Un aspect critique est la durée du temps nécessaire pour que la flore se régénère après avoir été perturbée, principalement pendant la construction d'un projet d'énergie éolienne. Il y a de sites où la flore a besoin de 20 ans pour atteindre sa maturité et pour se régénérer.

Étant donné que les climats froids sont très différents des climats tempérés, les personnes chargées des évaluations devront avoir une expérience particulière sur ce type de climats (Baring-Gould *et al.* 2009a).

Un des impacts environnementaux qui doit être envisagé est l'augmentation du bruit causé par la glace sur les pales. La rugosité augmentée de la surface des pales multiplie les niveaux de bruit par rapport aux pales sans givrage de la même éolienne (Baring-Gould *et al.* 2009a).

Comme on l'a mentionné dans le chapitre 1, diverses législations argentines et internationales exigent la réalisation d'études d'impact environnemental pour n'importe quelle activité planifiée dans le site. La DNA a un département spécialisé qui s'occupe de réaliser les études d'impact environnemental selon les législations applicables, l'« Oficina de Medio Ambiente de la Dirección Nacional del Antártico » (Le Bureau de l'Environnement de la DNA).

## 2.2 LES TURBINES ÉOLIENNES EN CLIMAT FROID

Les limites opérationnelles imposées à une turbine éolienne par le froid dépendent des qualités de son acier et des soudures. L'énergie des vents qui soufflent lorsque la température est en dessous de la limite opérationnelle de conception de la turbine ne peut être captée. Par conséquent, pendant l'analyse des mesures du site, la distribution locale de la température doit être prise en compte simultanément avec les vitesses du vent et les événements de givrage pour réussir à sélectionner une turbine adaptée au climat froid (Baring-Gould *et al.* 2009a).

Baring-Gould *et al.* (2009a) souligne que les normes internationales actuelles pour la conception de turbines éoliennes ne prévoient pas l'opération en conditions de climat froid, déclarant simplement que le fonctionnement des turbines en dehors de leurs caractéristiques techniques peut affecter leur performance et les contrats de maintenance et que toute turbine installée en dehors des conditions atmosphériques « normales » devrait appartenir à la Classe S, classe que le même document qualifie de nettement insuffisante. Sont mentionnés deux efforts de normalisation internationale pour les turbines opérant en climat froid : le document « GL Vent-Note technique no 067, Certification des turbines éoliennes pour de températures extrêmes » de Germanischer Lloyd (2010) et un standard non spécifié de classification pour turbines émis par l'IEC et qui est basé sur la moyenne annuelle et la vitesse maximale du vent ainsi que sa turbulence. La certification de Germanischer Lloyd exige simplement l'installation d'un équipement ou d'une procédure de détection de givre et ensuite formule l'exigence d'arrêter la turbine lorsque la glace se trouve sur les pales. Cette procédure peut ne pas être applicable, voire souhaitable, pour des turbines opérant sous certaines conditions de givrage.

L'Université d'Alaska a entrepris l'évaluation des adaptations pour le climat froid réalisées par les fabricants des turbines actuellement en processus d'installation dans cet état américain. L'idée est de développer les adaptations les plus appropriées et robustes et de les standardiser ainsi que les tests d'efficacité sur le terrain pour arriver à une

certification de turbines pour le climat froid d'Alaska en accord avec les fabricants. Il s'agit d'un travail en train de se réaliser et qui devra se finaliser dans quelques années (Holdmann, 2010).

En raison de l'impact de l'air froid de haute densité, changer la classification de la turbine choisie pour le site considéré pourrait devenir souhaitable ou plutôt nécessaire.

Un grand nombre des problèmes posés par le climat froid aux éoliennes peut être résolu par l'utilisation des technologies adaptées et conçues pour les climats polaires. Des exemples de ces technologies sont les éléments chauffants, l'huile hydraulique et la graisse pour climat froid, les capteurs chauffés, l'étanchéité des composants sensibles au gel interne comme la caisse d'engrenages et les dispositifs d'antigivrage ou de dégivrage pour les pales (Baring-Gould *et al.* 2009a).

Les systèmes d'atténuation du givrage suivent deux stratégies principales : un système antigivrage est conçu pour interdire à la glace de s'accumuler sur un objet. Un système de dégivrage est conçu pour permettre à la glace de se placer sur l'objet avant de l'enlever (Baring-Gould *et al.* 2009a). Les deux stratégies peuvent opérer de façon passive ou active. Les méthodes passives profitent des propriétés physiques de la surface de la pale afin d'éliminer ou d'empêcher le givre, tandis que les méthodes actives utilisent des systèmes externes et nécessitent une source d'énergie qui peut être thermique, chimique ou pneumatique (Parent, 2010).

En général, tandis que les dispositifs actuels d'antigivrage-dégivrage nécessitent plus d'évaluations sur le terrain et qu'il n'a pas une seule technologie applicable dans tous les types de climat froid, les solutions pour les basses températures sont généralement plus testées à cause d'une plus longue expérience de terrain (Baring-Gould *et al.* 2009a).

### 2.2.1 L'impact du climat froid sur la production d'énergie

Les deux facteurs principaux qui produisent des pertes de production d'énergie pour une turbine sont a) les basses températures et b) le givre atmosphérique.

#### a) L'effet des basses températures

Une turbine éolienne ne peut pas opérer à des températures en dessous de ses limites opérationnelles, définies surtout par le type d'acier et des soudures. Toute l'énergie des vents que soufflent pendant que la température est inférieure à la limite de la turbine ne sera pas exploitée. L'opération à basse température affecte la viscosité des huiles et modifie les dimensions et les propriétés mécaniques des différentes composantes de la turbine.

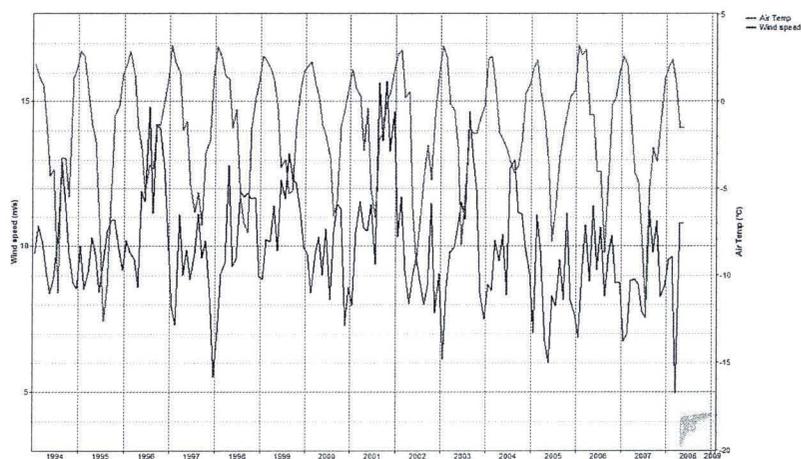


Figure 27. Vitesse du vent vs température à Jubany, 1994-2008

L'évaluation des pertes de production d'énergie provoquées par les basses températures se fait en utilisant les données combinées de température et de vents, puis éliminer toutes les contributions à la production d'énergie à des moments où la température est inférieure à la température nominale de fonctionnement. La Figure 27 montre les graphiques des moyennes mensuelles de la vitesse du vent (bleu) versus les moyennes mensuelles de la température de l'air (rouge) à Jubany pour la période janvier 1994 — mai 2008. Ce type de graphique aide à évaluer l'énergie éolienne non produite en raison des

basses températures. Il est à remarquer que les limites inférieures de  $-30\text{ °C}$  et  $-40\text{ °C}$  des turbines recommandées pour Jubany à la fin de ce chapitre ne sont jamais atteintes.

Une autre source de pertes de production énergétique est reliée à l'augmentation de la densité de l'air refroidi. Cette augmentation peut provoquer la surproduction d'énergie électrique, la surcharge des divers composants électriques et leurs bris éventuels. Ce phénomène ne contribue pas à une augmentation de la production annuelle de manière significative, mais il doit être considéré lors d'évaluations de la capacité de l'ensemble du système électrique et mécanique pour résister à ce type de surcharges (Baring-Gould *et al.* 2009a)

#### **b) L'effet du givrage atmosphérique**

La présence de glace ou givre est un paramètre essentiel des projets en climat froid pendant leur développement, construction, exploitation et mise hors service. La performance d'une turbine givrée va se dégrader. Sans un système antigivrage-dégivrage, la turbine finira par s'arrêter en raison des vibrations excessives ou se débranchera du réseau à cause de la traînée aérodynamique accrue qui ralentit la vitesse du rotor. La turbine doit être arrêtée lorsque les conditions de givrage sont au-delà de ses limites opérationnelles. En conséquence, la distribution locale du givre doit être mesurée ensemble avec les distributions de vitesse de vent et de température pour arriver à la sélection d'une turbine permettant de minimiser ces pertes (Baring-Gould *et al.* 2009a).



Figure 28. Une turbine éolienne givrée. Source : John Maissan, 2001

Parent (2010) identifie les effets négatifs du givrage sur les éoliennes et leurs équipements auxiliaires :

- **Erreurs de mesure et de contrôle :** Pendant l'opération en climat froid, les anémomètres, girouettes et thermomètres peuvent givrer et donner des lectures erronées de la vitesse et de la direction du vent et de la température. Comme le contrôle de la turbine dépend de ces détecteurs, elle peut perdre son efficacité pour profiter de l'énergie du vent, ou subir de dommages causés par l'erreur de contrôle d'orientation de la nacelle ou de la puissance du vent à gérer.
- **Pertes de puissance :** L'accumulation de glace sur les pales d'une éolienne réduit la force de poussée et augmente la traînée. La réduction de l'efficacité aérodynamique entraîne la réduction de la production énergétique et éventuellement l'arrêt de la turbine. Le pourcentage de pertes dépend de la quantité de la glace, le profil de la pale et le type de contrôle de la turbine. Les deux paramètres fondamentaux pour évaluer les pertes de production énergétique provoquées par la glace sont le nombre d'heures que la glace affecte la turbine et le rendement de l'éolienne lorsque ses pales sont couvertes de glace. D'après des études réalisées par le Centre de Recherche technique de la Finlande, les éoliennes avec contrôle à décrochage passif subissent des pertes plus significatives que les éoliennes avec contrôle de décrochage actif (Baring-Gould *et al.* 2009a).

- **Défaillances mécaniques :** Le givrage des pales augmente beaucoup les charges structurelles subies par une turbine par le changement des profils aérodynamiques, par la masse de la glace ajoutée et par le déséquilibre que la glace inégalement distribuée provoque. Ceci conduit à des vibrations de grande amplitude et/ou de la résonance et provoque deux types de charges mécaniques : charges extrêmes et charges de fatigue. Ces dernières affectent notamment la boîte de vitesses qui peut voir sa vie utile considérablement réduite.
- **Défaillances électriques :** L'infiltration de la neige dans la nacelle et les basses températures peuvent résulter en condensation à l'intérieur de l'électronique, avec les dommages conséquents.
- **Dangers à la sécurité :** Les accumulations de glace sur les pales peuvent être projetées à une distance allant jusqu'à 1,5 x la hauteur combinée de la turbine et du rotor, avec les dangers résultants pour les personnes et les animaux.

### 2.2.2 Contrôle des turbines éoliennes en climat froid

Une attention particulière doit être accordée au contrôle de la boîte de vitesses, de la génératrice et du transformateur. Aucun d'eux ne devrait être opéré en dessous de sa température nominale ou au-dessus de sa puissance nominale ou de sa vitesse maximale du vent. La fiabilité des anémomètres sur la nacelle de la turbine devient extrêmement importante en climats froids. Le contrôle d'une turbine avec un anémomètre givré devient erratique, comme montre la Figure 29 des courbes de puissance mesurées d'une turbine située en l'Allemagne. La courbe de puissance à gauche est le résultat des erreurs de mesure d'un anémomètre givré qui provoque des erreurs de contrôle (Baring-Gould *et al.* 2009a). Il est à mentionner que même si l'utilisation de l'anémométrie multiple est recommandée, cela ne garantit pas un contrôle total de la turbine sous conditions de givrage des pales ou autres composantes.

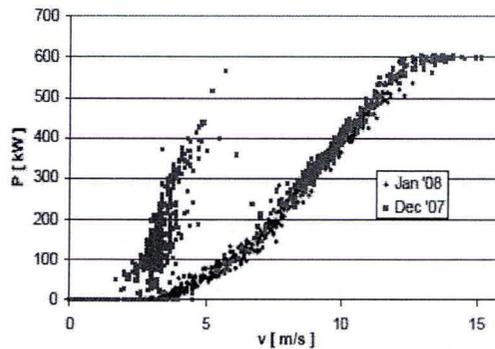


Figure 29. Erreurs de mesure d'un anémomètre givré

Même si un givrage très étendu peut causer des fortes vibrations dans le rotor et provoquer son arrêt, le système de contrôle doit être capable de détecter des givrages légers, qui causent des vibrations de faible amplitude ou des variations périodiques à chaque révolution du rotor. Si le contrôle ne peut pas prévenir ces accumulations, des surcharges ou des ruptures en raison de la fatigue des matériaux sont possibles.

La synchronisation avec le réseau électrique peut devenir impossible dans le cas de turbines contrôlées par décrochage passif, lorsque l'accumulation de glace sur les pales augmente la traînée et empêche les turbines d'atteindre la vitesse de rotation pour générer le voltage et la fréquence de conception.

Le contrôle à distance est essentiel pour l'opération des éoliennes opérant en climat froid. Celui-ci peut permettre la réinitialisation à distance des turbines arrêtées en raison des pales ou d'autres composantes glacées. Des options de communications comme la télédétection par caméra vidéo peuvent permettre le diagnostic à distance afin de planifier la maintenance des turbines en sites d'accès difficile.

Si le système de communications utilise des connexions à fibre optique, celles-ci devront être protégées contre la glace et la neige, par exemple par gel antigivrage pompé à l'intérieur du conduit (Baring-Gould *et al.* 2009a).

### 2.2.3 Effet du froid sur le contrôle par décrochage

Le contrôle par décrochage passif ou aérodynamique des éoliennes à vitesse constante présente une fiabilité réduite lorsque la température est basse et la densité de l'air élevée. Chacune des pales des turbines a été montée à un angle de pas fixe, optimisé pour une densité typique de l'air sur le site. Si cette densité de l'air varie, le résultat peut être la sous-production ou la surproduction d'énergie avec les pertes correspondantes ou l'usure prématurée des composants. La valeur du pas des pales peut être modifiée pour augmenter l'énergie capturée ou pour réduire la puissance maximale, mais cela peut devenir un processus long et coûteux pour les turbines à pas fixe.

Pour les raisons antérieures, les turbines à vitesse constante combinée avec décrochage passif ne sont pas recommandées sauf si a) l'angle d'attaque peut être facilement ajusté à une variation significative de la densité de l'air, b) une puissance maximale réduite peut être acceptée dans des conditions d'air à basse densité (haute température), ou c) le décrochage passif est combiné avec la vitesse variable.

Un contrôle de la puissance de la turbine par la variation des pas des pales permet à la puissance maximale d'être indépendante des variations de densité de l'air. Pourtant, une attention doit être accordée à la modification du profil aérodynamique des pales causée par l'accumulation du givre et des erreurs que cela peut induire sur le contrôle du pas. Un système de contrôle mal conçu pourrait mésinterpréter l'augmentation de la traînée causée par la glace dans les pales et surcompenser l'angle d'attaque, ce qui pourrait empirer plutôt qu'améliorer l'efficacité aérodynamique du rotor (Baring-Gould *et al.* 2009a).

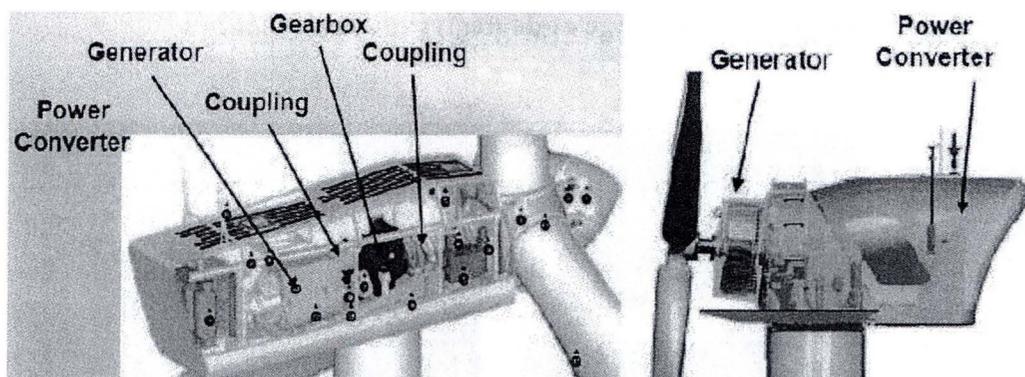


Figure 30. Turbines à vitesse fixe et à vitesse variable. Source : Chris McKay

Le contrôle par décrochage passif ou aérodynamique est relié à l'utilisation de génératrices asynchrones qui nécessitent des vitesses constantes du rotor et des boîtes de vitesses, pour générer électricité à une fréquence égale à la fréquence du réseau (voir Figure 30 à gauche). Par contre, les génératrices synchrones à aimants permanents peuvent être mécaniquement opérées par des rotors qui tournent à vitesses variables, à pas fixe ou à pas variable et sans boîte de vitesses, parce que le conditionnement de l'électricité à fréquence très variable qu'elles vont produire sera effectué électroniquement par des convertisseurs CA-CC-CA, qui généreront le courant alternatif final à une fréquence égale à celle du réseau. À l'avantage d'avoir une puissance maximale indépendante des variations de la densité de l'air s'ajoute l'élimination de la boîte de vitesses, qui reste très sensible aux surcharges mécaniques provoquées par ces mêmes variations et à la condensation interne provoquée par les basses températures. Ainsi, il y a des fabricants qui offrent des turbines pour leur utilisation en climat froid avec génératrice synchrone à aimants permanents, sans boîte de vitesses et rotor à vitesse variable et pas fixe contrôlé par décrochage aérodynamique (voir Figure 30, à droite, une turbine Northwind 100 conçue pour l'opération en climat froid).

### 2.2.4 Systèmes d'antigivrage et de dégivrage des éoliennes

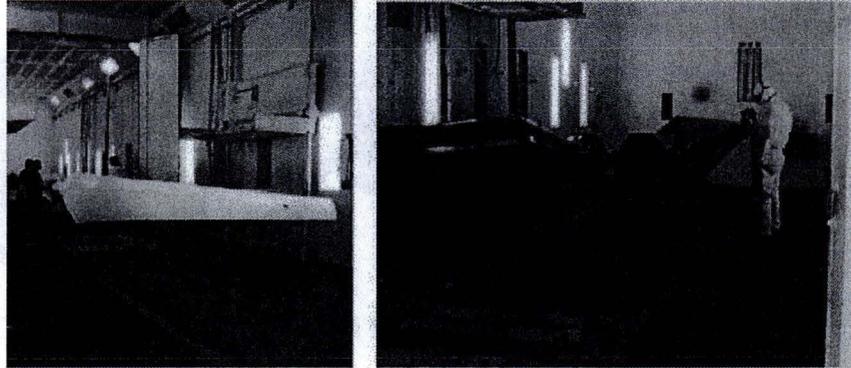


Figure 31. Application de revêtement hydrophobique noir. Source : Carrie McLaughlin

Les systèmes d'antigivrage empêchent la formation de la glace. Par contre, les systèmes de dégivrage éliminent la glace lorsqu'une quantité prédéterminée s'est accumulée. Les méthodes de mitigation du givrage se divisent en passives et actives. Les méthodes passives utilisent des propriétés physiques de la surface du rotor et les méthodes actives utilisent des systèmes externes thermiques, chimiques ou pneumatiques.

La peinture noire et les surfaces ou revêtements lisses, non collants, de la surface des pales pour éliminer ou empêcher la formation de la glace sont des méthodes passives d'antigivrage basées sur les propriétés physiques des matériaux (Figure 31). Une méthode passive de dégivrage se base sur la flexibilité des pales. Des pales assez flexibles pourraient faciliter leur déglacage (Baring-Gould *et al.* 2009a).

Laakso et al. (2009) mentionne des recherches sur polymères synthétiques imitant l'effet de protéines antigel qui existent dans certains poissons de l'Arctique. Ces protéines inhibent la croissance des cristaux et la formation de la glace commence à températures beaucoup plus basses.

Les expériences démontrent que les deux premières méthodes ne sont pas suffisantes pour éviter des événements de givrage en climats froids. Le givrage apparaît sur les

surfaces peinturées ou revêtues sans regard aux températures. La flexibilité des pales pour casser et se libérer du givre n'a pas été assez étudiée.

Les avantages des revêtements spéciaux et de la peinture noire sont leurs faibles coûts, pas besoin de protection envers la foudre, maintenance des pales facile et protection de la totalité de leurs surfaces. Lorsque la réduction de l'adhérence du givre est combinée à un système actif thermique, la consommation d'énergie du deuxième se voit réduite.

À part son insuffisance pour éliminer le givrage, les inconvénients de ces méthodes sont l'éjection des morceaux de glace, la grande accrétion de glace au cours de givrage sévère et l'accrétion asymétrique du givre conduisant à l'instabilité mécanique du rotor. Actuellement, la durabilité des revêtements est telle qu'après d'une courte période, ils deviennent poreux et perdent leur capacité à repousser la glace (Parent, 2010).

D'autres méthodes semi-passives sont en cours d'exploration, comme la variation du pas des pales, le démarrage et l'arrêt du rotor et son positionnement en face des rayons du soleil, mais il n'y pas des données statistiques pour connaître leur efficacité (Baring-Gould *et al.* 2009a).

Deux méthodes actives de dégivrage, actuellement utilisées commercialement, sont un système électrique de chauffage sur la surface de la pale ou un système de chauffage basé sur la circulation d'air chaud à l'intérieur de la structure de la pale.

Pour ces deux méthodes actives, il est important de considérer qu'à cause de la vitesse du vent plus basse et la moindre contribution à la production d'électricité, les deux tiers de la pale plus proches du moyeu sont moins importants à dégivrer et requièrent ainsi moins d'énergie. L'installation d'un système de dégivrage seulement sur le tiers extrême de la pale permettrait de diminuer les coûts d'installation et d'énergie tout en conservant 90 % de la performance aérodynamique de la pale (Parent, 2010).

Les éléments de chauffage peuvent être des membranes appliqués sur la surface de la pale ou des résistances électriques insérées dans la structure de la pale. L'idée est que la

chaleur produira une pellicule d'eau entre la glace et la surface de la pale. Une fois la pellicule créée, les forces centrifuges jetteront les morceaux de glace.

Les avantages sont que ce type de système a été déjà testé pour plus de 10 ans dans l'industrie éolienne et que la puissance de chauffage semble être raisonnable, sauf en cas de pluie en surfusion. Les désavantages sont que si l'unité d'une pale fonctionne mal, une sévère instabilité mécanique du rotor sera ainsi provoquée. On doit considérer soigneusement la quantité de chaleur que les éléments chauffants vont générer : un système antigivrage qui nécessairement doit faire évaporer l'eau de la surface de la pale consomme beaucoup d'énergie pour atteindre les 100 °C nécessaires, tandis qu'un système de dégivrage qui ne fournit pas assez de chaleur provoquera l'accumulation du givre sur les bords des éléments de chauffage.

La circulation d'air chaud à l'intérieur de la structure de la pale est effective à des températures autour de 0 °C. Des ventilateurs situés à la base de chaque pale ou à l'intérieur du moyeu soufflent l'air chaud. La chaleur passe à travers la coquille de la pale jusqu'à la surface. Encore une fois, l'idée est de développer une pellicule d'eau entre la glace et la surface qui diminuera l'adhésion du givre à la pale. Pourtant, des pales toujours plus longues et avec des structures plus épaisses et considérant que la partie essentielle à dégivrer est le tiers extrême de la pale, requièrent des températures plus élevées du flux d'air à l'intérieur pour maintenir la surface des pales libre de glace.

Le système à air chaud fonctionne mieux dans des sites de climat plutôt doux où le givrage se produit principalement à des températures proches de 0 °C. La surface du bord d'attaque et l'aérodynamique de la pale ne sont pas affectées. Le système n'a pas d'effet négatif sur le système de protection contre la foudre. Par contre, cette méthode consomme beaucoup d'énergie lorsque la vitesse du vent est grande et la température est basse. Les plastiques renforcés à fibres de verre, matériels de choix pour la construction des pales, sont de bons isolants thermiques et l'augmentation de la taille et de l'épaisseur des pales, exigent que plus de chaleur doive être poussée et transférée jusqu'à la surface et à la pointe de la pale (Parent, 2010).

Une méthode de faible consommation d'énergie est l'utilisation d'un système de dégivrage pneumatique qui fonctionne avec l'expansion rapide des membranes gonflables sur les pales. Un système similaire a été utilisé sur certains petits aéronefs depuis plusieurs années. L'expérience en éoliennes est toutefois très limitée (Laakso et al., 2009).

Il est à souligner que la composante essentielle d'un système actif de protection qui n'opère pas de façon continue est un détecteur de glace fiable. Une mauvaise détection de la glace provoquerait que le système génère de la chaleur en excès ou en déficit, avec le résultat gaspillage d'énergie ou accumulation de givre. Dans une expérience au Yukon, Canada (Laakso et al., 2009), après avoir eu des problèmes causés par le détecteur de givre qui contrôlait les éléments de chauffage des pales, on a préféré de l'éliminer et de contrôler le système manuellement.

En raison que la plupart de méthodes antigivrage-dégivrage sont basées sur le chauffage, les éoliennes ont besoin de plus d'énergie pour fonctionner. Cette énergie s'ajoute à la consommation du système d'adaptation au climat froid de la nacelle. En outre, une maintenance additionnelle devra être planifiée. Laakso et al. (2009) et Parent (2010), donnent des estimations de dépenses de 6 à 12 % de la puissance nominale de la turbine pour des systèmes à éléments chauffants pour turbines de 100-220 kW et de 10 à 15 % de la puissance nominale pour des systèmes antigivrage-dégivrage à air chaud. Parent (2010) informe que l'énergie totale consommée par les turbines pour opération en climat froid reste entre 3 et 8 % de l'énergie totale produite, tandis que l'énergie utilisée uniquement par le système antigivrage-dégivrage est de moins du 3 %.

## 2.2.5 Les systèmes pour climat froid des éoliennes

Tableau 4. Exemple de système d'adaptation pour climat froid

<b>Exemple de système d'adaptation au climat froid : turbine Nothwind 100 « Arctique »</b>	
Pour opération jusqu'à -40 °C	Composants structurels faits en alliages d'acier pour basses températures
	Électronique conçue pour basses températures, chaque fois que possible
	Contrôles environnementaux avec chauffage pour protéger les composants sensibles
	Chauffage de la nacelle
Pour protection contre le givrage	Revêtement des pales de polymère noir hydrophobe <ul style="list-style-type: none"> <li>• Résistant à la glace</li> <li>• Accélère l'élimination de glace après givrage</li> <li>• Avec surface endurcie pour une longue durée</li> </ul>
Pour opération plus exigeante selon la Classe S	Facteurs de sécurité pour une densité de l'air plus élevée : 1,34 kg/m <sup>3</sup> contre 1,23 kg/m <sup>3</sup> selon le classement de la Classe II de l'IEC
	Modifie le classement extrême du vent : 56 m/s contre 59,5 m/s pour la Classe II de l'IEC
Pour arrêts de protection bien décidés	Contrôles plus intelligents

(McKay, 2009; McLaughlin, 2009)

Divers fabricants de turbines fournissent des systèmes de modifications pour adapter leurs turbines à l'utilisation en climats froids. Les modifications plus communes incluses dans ces systèmes affectent le système de contrôle, les détecteurs sélectionnés, particulièrement les détecteurs de la vitesse et de la direction du vent, le système d'orientation, la boîte de vitesses et le chauffage de la nacelle pour le personnel d'entretien (Baring-Gould *et al.* 2009a).

En climat froid, la boîte de vitesses doit résister au gros couple causé par l'effet combiné des rafales et de la densité d'air plus élevée. Les boîtes de vitesses doivent être chauffées de l'extérieur ou par circulation continue à son intérieur d'huile chauffée, pour prévenir la condensation de l'eau.

Autres modifications spéciales pour le climat froid sont l'encapsulation des circuits électroniques pour les protéger de la condensation, la non-utilisation des écrans à LCD qui peuvent geler et le chauffage des cabinets contenant l'électronique de contrôle. La qualité de l'acier et des soudures doit être appropriée pour une utilisation dans les climats froids.

Des lubrifiants spéciaux (huiles, graisses et l'hydraulique) sont aussi généralement inclus. Les huiles hydrauliques standards deviennent très visqueuses à basse température. Pour adapter un système hydraulique standard à climat froid il faut non seulement remplacer l'huile, mais aussi les tuyaux, valves et équipements associés.

Pour une opération à très basse température, à part l'acier et le plastique, la résistance d'autres composantes de la turbine doit être évaluée, comme l'isolation du câblage, qui peut briser et provoquer des court-circuits. Chaque pièce d'équipement, même la plus triviale, doit être évaluée sur la possibilité d'utilisation à des températures extrêmes.

Il est recommandé que les turbines aient des tours tubulaires avec échelles ou ascenseurs à l'intérieur pour accéder à la nacelle en sécurité. Pourtant, ce type de tours ne protège pas du froid intense. D'autre part, les revêtements en caoutchouc peuvent améliorer la sécurité des échelles métalliques et d'escaliers, et éviter que leurs surfaces deviennent glissantes.

Les éoliennes installées dans les sites où la neige s'accumule beaucoup doivent avoir plusieurs portes d'entrée et à différents niveaux de hauteur par rapport au sol. Les aires de stockage des outils doivent être intégrées et accessibles depuis l'intérieur de la tour ou bien être conçues pour permettre l'accès pendant l'hiver. On doit protéger les portes, écrouilles et serrures de l'eau, qui peut geler et barrer l'entrée au personnel de service. Les nacelles ne sont pas usuellement des compartiments étanches et en fait elles ont plusieurs ouvertures

pour assurer la ventilation. La neige peut s'accumuler à leur intérieur et endommager les équipements ou obstruer les ouvertures et empêcher la circulation normale de l'air (Baring-Gould *et al.* 2009a).

Pour prévenir l'entrée de la poudrerie, les portes et les autres ouvertures doivent être scellées, même les conduites de ventilation et les doter de drains pour enlever l'eau de la fonte des neiges. Les parties mobiles doivent être protégées des accumulations de la glace qui pourraient affecter leurs mouvements. Des cheminées avec des coudes inversés en U peuvent fournir la ventilation sans permettre l'entrée de la neige (Baring-Gould *et al.* 2009a). À Jubany, ce type de cheminée peut être observée à la sortie des gaz d'échappement de la chaudière qui réchauffe la « Casa principal ».

### 2.3 LES GÉNÉRATRICES DIESEL EN CLIMAT FROID

À la différence des générateurs d'énergie renouvelable (éoliennes, panneaux photovoltaïques, etc.) qui doivent forcément être installés dehors, les génératrices diesel peuvent être installés à l'intérieur des bâtiments dédiés, où elles se trouvent protégées contre le froid et/ou la chaleur extrêmes (TS 62257-7-3). Pour cette raison, les mesures spéciales pour l'opération en climat froid des gensets ne sont pas nécessairement compliquées.

L'air froid de Jubany peut contribuer à l'encrassage des génératrices qui travaillent à faible charge électrique. Un air d'admission refroidi contribue à ce que les moteurs travaillent à un plus bas rendement thermique et peut causer des problèmes d'accumulation d'hydrocarbures ou carbonisation à l'intérieur du moteur (Rogers, 1996).

Aussi, les basses températures diminuent la charge électrique livrable par les batteries de démarrage et augmentent la viscosité de l'huile, du carburant et la résistance au mouvement des pièces internes du moteur et de la génératrice, ce qui rend le démarrage plus difficile. En climats froids, on doit toujours surveiller la charge des batteries et, si nécessaire, les garder dans des endroits moins froids avant leur utilisation.

Le niveau de l'ingénierie civile nécessaire à la construction des bâtiments pour loger les génératrices diesel et leurs installations auxiliaires est qualifié de « bas » par la spécification technique « Générateurs » (TS 62257-7). Par contre, le climat froid peut élever la complexité de la construction, ainsi que du transport du carburant et des possibles déplacements du genset pour réparations majeures.

Une recommandation de la TS 62257-7-3 est d'éviter que la température monte plus de 10 °C dans l'intérieur du bâtiment des génératrices à cause de l'opération du genset, en prévoyant une ventilation appropriée du bâtiment (TS 62257-7-3).

Lorsqu'il n'est pas possible d'installer les gensets à l'intérieur ou dans un bâtiment chauffé, de petits radiateurs électriques appelés « bougies de préchauffage » doivent être

utilisés dans la chambre de combustion interne, ou bien un chauffe-bloc électrique sur le moteur. Le chauffe-bloc peut être contrôlé par une minuterie réglée pour l'allumer quelques heures avant le moment prévu pour démarrer le moteur, disposition qui permet de gagner du temps et d'économiser de l'électricité (EmergencyPower.com).



Figure 32. Genset complètement couvert par la neige (sauf l'entrée d'air)

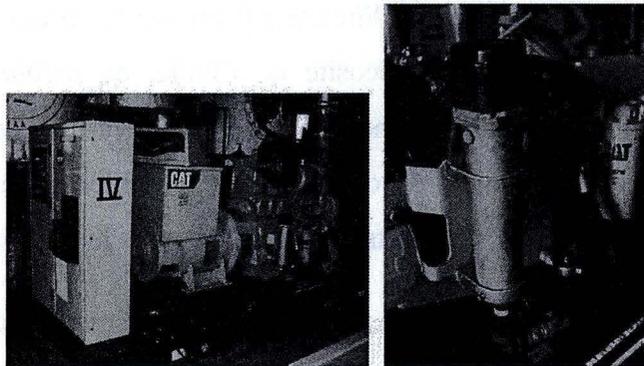


Figure 33. La résistance électrique qui réchauffe le genset IV. Source : E. Richard

Chaque génératrice diesel à Jubany est dotée d'une résistance électrique qui réchauffe le fluide (eau) du système de refroidissement du moteur. Dans les modèles plus anciens, le réglage de la température de chauffage se fait de 50 °C à 80 °C selon la saison, tandis que dans le modèle plus récent, le modèle CAT 3406C, la résistance électrique s'autorégule toujours pour chauffer le fluide à 55 °C, sans égard à la température ambiante.

Le carburant diesel peut aussi se cristalliser par temps froid. Les cristaux s'accumulent dans la conduite de carburant (en particulier dans les filtres) et peuvent étouffer le moteur et finissent par l'arrêter. On utilise des appareils de chauffage à faible puissance électrique dans les réservoirs de carburant et autour des conduites de carburant pour résoudre ce problème. En raison de l'amélioration des additifs, la cristallisation du diesel se produit rarement, sauf dans les plus grands froids lorsqu'un mélange de diesel et de kérosène doit être utilisé (Wikipédia [s.d.]. « Diesel Engine »).

Le diesel GOA qui est utilisé à Jubany pour les gensets est un gazole de couleur pâle très raffiné, d'apparence similaire au kérosène et qui est très résistant à la congélation. L'expérience du chef de base O. Interlandi est que le GOA n'a jamais gelé, même à la base antarctique argentine Belgrano, où les températures peuvent atteindre -60 °C.

## 2.4 L'INFRASTRUCTURE ET LE TRAVAIL EN CLIMAT FROID

### 2.4.1 Les infrastructures du site, la tour et les fondations

Le document (Baring-Gould *et al.*, 2009a) souligne que de la qualité du sol dépendent les techniques de fondation pour l'installation de turbines éoliennes. Si dans le site on trouve des zones de sable, de gravier ou de roches libres de l'effet de la glace, on peut utiliser des techniques traditionnelles de fondation. Pour des sites où le pergélisol est présent, le type de fondation dépendra du type de celui-ci, pauvre en glace ou riche en glace. Les techniques de construction doivent être adaptées au type de pergélisol présent sur un site spécifique.

Pour des sites de pergélisol pauvre en glace on devra excaver jusqu'à trouver une couche de sol stable, soit une couche rocheuse ou une couche de pergélisol solide qui ne va pas changer au fil du temps. Alors, on pourra utiliser des techniques de fondations standard.

Le pergélisol riche en glace est habituellement composé de sols à grains fins qui contiennent une quantité importante d'eau gelée. Pour profiter de la stabilité structurelle de cette glace, on devra l'isoler thermiquement de la fondation de la turbine pour prévenir sa décongélation, éviter les changements de volume et s'assurer qu'elle conserve une bonne capacité de résistance à la charge. On obtient généralement ces résultats par la séparation de la structure de la fondation du sol, la circulation libre d'air sur celui-ci et l'utilisation de thermosiphons pour maintenir le sol gelé.

Dans certaines régions, la couche active du pergélisol, c'est-à-dire la partie qui dégèle en été et regèle ensuite pendant l'hiver, peut être assez importante, nécessitant des fondations profondes, d'un tiers à deux tiers de la hauteur de la tour, pour s'assurer que celle-ci reste bien ancrée (voir Figure 34- Baring-Gould *et al.*, 2009a).

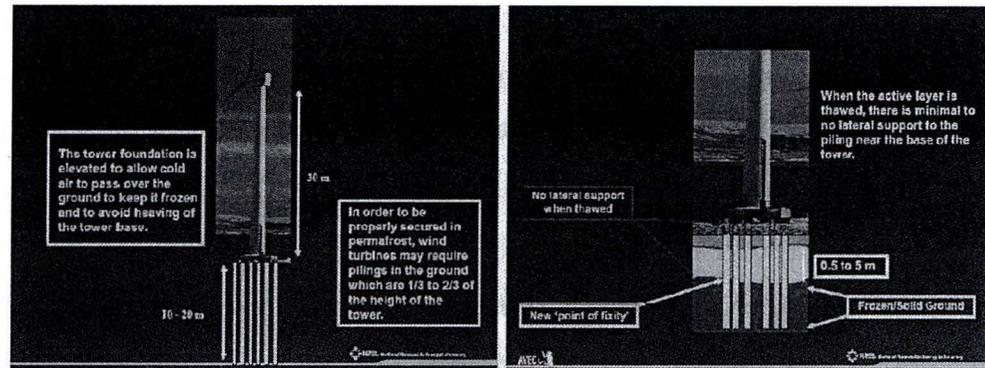


Figure 34. Fondations sur pergélisol avec une couche active profonde (Baring-Gould)

Les fondations de béton peuvent, selon les additifs et renforcements utilisés, avoir besoin d'un temps relativement long pour sécher. On peut profiter du pergélisol riche en glace solide pour réduire le coût et la complexité des infrastructures dans les zones éloignées. Les fondations pour les éoliennes installées sur l'île de Ross dans l'Antarctique ont utilisé des ancrés en roche et de grandes plaques préfabriquées de béton qui sont gelées en place, pour minimiser la quantité du travail en béton à réaliser sur le site (Baring-Gould *et al.*, 2009a).

Des chercheurs de l'Université de l'Alaska affirment que les fondations des éoliennes en zones de pergélisol discontinu dans cet état américain ont été surdimensionnées à cause du manque de compréhension des problèmes géotechniques associés aux sols avec cycles de gel-dégel importants. La situation empire en raison des effets que le changement climatique impose actuellement sur les régions de pergélisol de l'Alaska. Ce surdimensionnement entraîne des dépenses importantes pour les systèmes installés, dues surtout au coût élevé du transport maritime et du coulage de béton dans les communautés éloignées. L'Université de l'Alaska est en train de faire des études pour analyser les pratiques actuelles, faire des recommandations pour diminuer les coûts et déterminer des méthodes de surveillance à long terme des fondations (Holdmann, 2010).

Les contraintes que le pergélisol impose sur la construction en climat froid dictent les deux tendances actuelles de la conception de tours des éoliennes pour sites isolés en climat

froid, soit 1) une tour qui simplifie les techniques de fondations et diminue leurs coûts, 2) une tour à levage automatique qui n'a pas besoin de grue pour son installation (Baring-Gould, Dabo, 2009e). Maissan (2006) préconise le développement de tours haubanées à levage automatique de 60-80 mètres de hauteur, parce qu'elles nécessitent de fondations plus petites que les tours autoportantes et pour éviter l'utilisation de grues. Ces tours devraient être fabriquées de métaux et matériaux résistants au froid et la conception des haubans devrait considérer le surpoids du givre. Ce type de tours pourrait augmenter le risque de collision des oiseaux et les possibles dommages environnementaux. Il est à remarquer que les tours autoportantes tubulaires donnent plus de protection au personnel de maintenance.

Maissan (2006) soutient aussi que pour augmenter l'efficacité, il est plus rentable de localiser la turbine sur une tour plus haute, mais près des points de consommation que d'aller loin pour une meilleure vitesse et forcément installer des lignes électriques, des chemins d'accès dont les dépenses en capital dépassent celles d'une tour plus haute. Maissan remarque que « dans un endroit avec une ressource éolienne modeste, une tour de 50 mètres augmenterait le rendement énergétique d'une turbine d'environ 20 % par rapport à une tour de 25 mètres (coefficient de cisaillement du vent de 0,16) », et que le prix supplémentaire de la tour serait récupéré par les gains de production éolienne.

Le pergélisol à Jubany est discontinu et sa couche active est profonde. Silva Busso (2004) souligne que « dans la zone d'étude le pergélisol est discontinu et saisonnier. Il est continu dans les mois de l'hiver, mais dans la période estivale et même à la fin du printemps il y a des preuves qui indiquent la perte de la continuité régionale et le développement rapide de la couche active. Pour cette raison, dans les périodes estivales le bassin du ruisseau Matias possède une couche active profonde ».

Silva Busso reporte aussi que le système hydrique superficiel est composé d'une série de petits ruisseaux permanents au cours de l'été (même de septembre à mai, pendant quelques années), qui se versent dans l'anse Potter.

Ainsi, pour choisir les endroits pour l'installation des éoliennes, on doit faire davantage une étude de mécanique des sols parce que les pergélisols riches et pauvres en glace sont très mélangés à Jubany et chacun requiert la technique des fondations appropriée. À Jubany, le pergélisol riche en glace contient environ 20 % à 30 % de glace et le pergélisol pauvre de 5 % à 10 % (conversation téléphonique de 12 août 2010 avec le glaciologue Prof. Eugenio Yermolin de la DNA). La résistivité du sol est inconnue. Le mauvais isolement de parties du réseau de distribution pourrait se combiner avec une basse résistivité et provoquer des pertes d'énergie et chutes de voltage dans le réseau. Les photos du câblage appartenant au réseau électrique sont présentées à la sous-section suivante.

Le sol de la péninsule Potter, où se trouve la base Jubany, est d'origine volcanique : coulées de lave (~50 %), roches pyroclastiques (~30 %) et intrusions hypabyssales (~20 %). (Kraus, Del Valle, 2008). L'élévation près de la base appelée « Tres Hermanos » (Trois frères) est aussi une formation d'origine volcanique. Cette élévation est le trait géologique le plus impressionnant aux alentours de la Base Jubany. Il s'agit d'une formation andésitique de l'Éocène.

On peut observer sur la carte géologique de la péninsule Potter (voir annexe III) la distribution de ces types de roches : en violet la zone des roches pyroclastiques, de breccia et d'agglomérats ; en vert la zone de coulées de laves basaltiques et andésitiques et en vert foncé la zone d'intrusions hypabyssales.

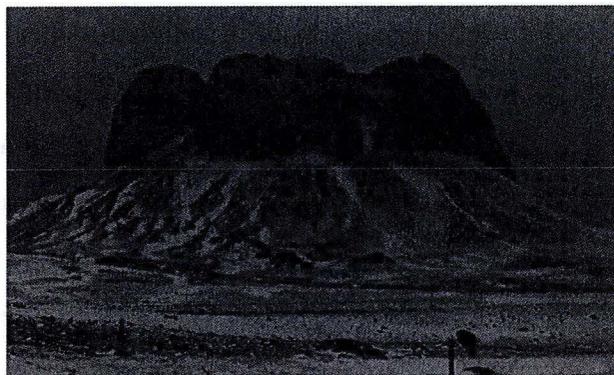


Figure 35. L'élévation des « Tres Hermanos » (Trois Frères). Source : YouTube (a)

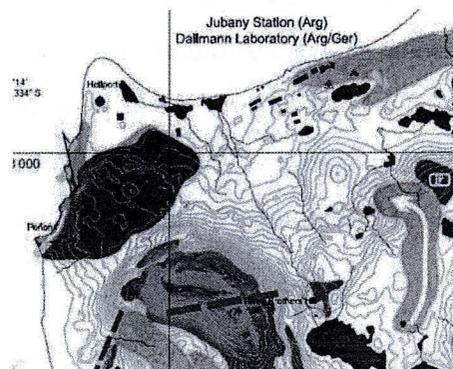


Figure 36. « Tres Hermanos » et la rose des vents à Jubany. Source : DNA

L'élévation des « Tres Hermanos » génère des turbulences importantes de l'écoulement du vent dans la zone de Jubany, en raison de sa hauteur (196 m) et de sa forme. Le relief topographique et la rose des vents à Jubany indiquent que l'élévation des « Tres Hermanos » pourrait provoquer de la turbulence dans le secteur du sud (Figure 36). Toute étude ou considération de l'emplacement des turbines éoliennes à Jubany doit prendre en considération cette élévation.

### 2.4.2 Les connexions et le câblage du réseau

Le pergélisol et la roche solide limitent l'enterrement du câblage de distribution, tant en raison des difficultés pour creuser des tranchées que pour le comportement dynamique du pergélisol pouvant briser les conduites et endommager les câbles. Les lignes électriques aériennes peuvent être endommagées par les effets des cycles de gel-dégel du pergélisol sur les poteaux électriques. Le câble peut généralement être posé sur le sol, apposé sur des blocs de béton ou autres fixations et protégé par de simples structures en bois ou des canalisations en acier (Baring-Gould *et al.*, 2009a).

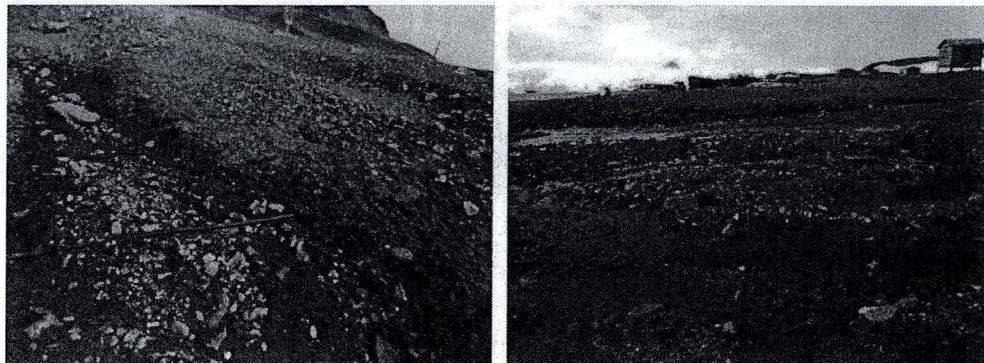


Figure 37. Photos du câblage du réseau électrique à Jubany. Source : O. Interlandi

Des parties du câblage du réseau de distribution à Jubany sont sur le sol, sous le sol ou traversent les petits ruisseaux (Figure 37).

Dans le document (Baring-Gould *et al.*, 2009a), il est mentionné aussi qu'uniquement des transformateurs conçus pour les climats arctiques devraient être utilisés. L'utilisation de ventilateurs pour leur refroidissement doit être évitée. En raison du soufflage et de la poudrierie, uniquement les transformateurs scellés doivent être utilisés et les connexions au réseau doivent être réalisées à l'intérieur des conteneurs scellés.

### 2.4.3 L'accessibilité et le travail dans le froid

L'accessibilité réduite au site en raison de son éloignement et du climat froid provoque des problèmes particuliers dans le transport et la logistique du projet, qui devront être pris en compte dès le stade de conception. Ces problèmes apparaîtront dans toutes les étapes du projet : construction, opération et démantèlement.

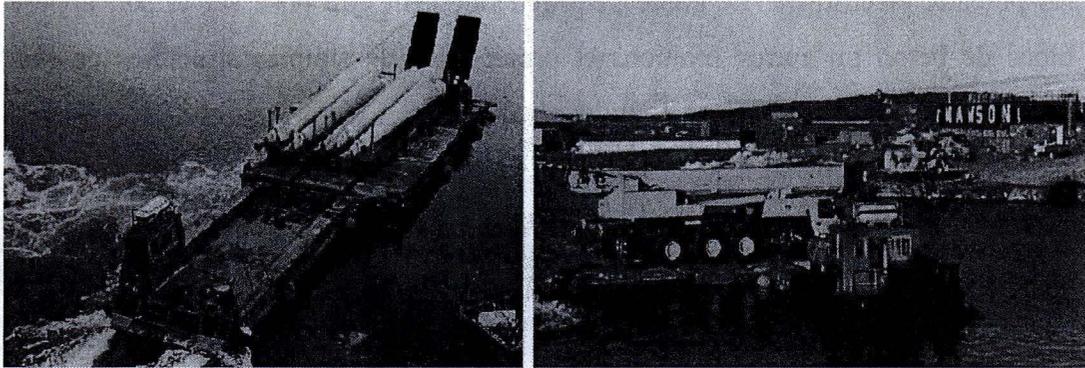


Figure 38. Transport de pales et de grue vers la base Mawson. Source : Jargstorf

Par exemple, le poids et la longueur de la tour et des autres composants des turbines seront dictés par la grandeur maximale de la capacité du transport, par navire, avion ou camions lourds et par les grues qui doivent traverser des rayons de tournage limités et les ponts des routes d'accès existantes. On devra juger les avantages de choisir des turbines qui puissent être transportées et assemblées sur le site avec des camions et des grues plus petites, ou des turbines avec tours inclinables qui n'ont pas besoin d'une grue pour être levées. Les mêmes considérations s'appliqueront à la construction du réseau de distribution. Une tour tubulaire composée de trois sections imbriquées comme celle de la turbine Northwind NW100 simplifie le transport en diminuant la taille du camion, mais elle nécessitera toujours une grue pour son levage (Figure 39).

Les climats froids imposent des exigences spéciales, comme le chauffage des vis et des boulons pour les serrer de façon appropriée. Le besoin d'outils et de véhicules spéciaux pour la réalisation des travaux devra être identifié avant de les commencer (Figures 40, 41).

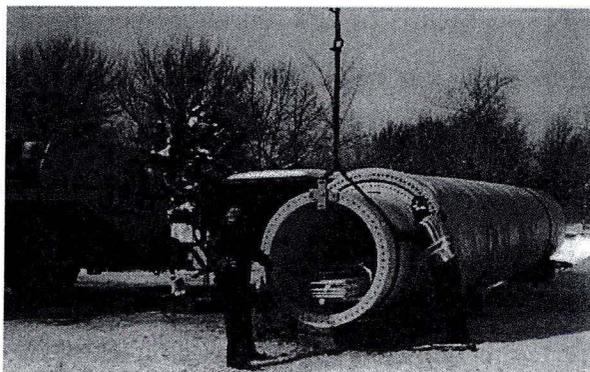


Figure 39. Tour tubulaire composée de trois sections imbriquées. Source : C. MacKay



Figure 40. Véhicules à chenilles « Logan » à Jubany. Source : O. Interlandi



Figure 41. L'arrivée des provisions à la plage de Jubany, février 2011

Les conditions de travail pendant la construction et la maintenance sont modifiées par le climat froid. Il est nécessaire d'avoir des sources d'énergie pour l'hébergement des travailleurs et les équipements électriques, pneumatiques, etc., des vêtements adaptés pour

les conditions extrêmes, des abris et des fournitures de nourriture et de carburant en cas d'isolement par tempêtes. Les lieux clos de travail pendant la construction et la maintenance devront être chauffés pour le confort et la sécurité du personnel. Si l'accessibilité est limitée, des outils de base pour l'entretien devront être disponibles sur place pour réduire le besoin d'apporter tout l'outillage à chaque voyage de service. On doit considérer toujours que la réparation des défauts inattendus dans un climat froid nécessite généralement plus de temps que dans les climats plus tempérés. La maintenance préventive devra être programmée pendant les périodes de meilleure accessibilité, mais si elle doit être réalisée dans des conditions climatiques plus instables, la météo du moment et les prévisions doivent être surveillées. On doit préparer des plans de contingence pour urgences médicales et évacuations qui peuvent être réalisées même sous froids intenses et conditions climatiques extrêmes (Baring-Gould *et al.*, 2009a).

#### **2.4.4 La protection du personnel de la glace éjectée**

Dans les climats froids, les turbines éoliennes en exploitation ou même arrêtées peuvent lancer ou laisser tomber des morceaux de glace. Ces morceaux peuvent blesser le personnel ou causer des dommages graves. Le risque le plus grand résultant de la projection des morceaux de glace se produit lors de l'utilisation des systèmes de dégivrage par chauffage des pales ou pendant le redémarrage juste après le chauffage pour le dégivrage des pales.

Les mesures pour protéger le personnel et les installations sont des structures résistantes aux impacts de morceaux de glace, avec des protections installées au-dessus des portes, des signes visuels comme des panneaux d'avertissement ou auditifs comme alarmes pour prévenir le personnel de la présence de givrage dans les turbines, et surtout l'utilisation dans les turbines de systèmes de détection du givre et d'antigivrage-dégivrage.

Deux formules existent pour évaluer la distance de danger à l'intérieur de laquelle une personne pourrait être percutée par des morceaux de glace (Baring-Gould *et al.*, 2009a). Pour une turbine en exploitation, la distance de danger suggérée serait :

$$d = (D + H) * 1,5$$

Et pour une turbine arrêtée, la distance de danger serait :

$$d = v \frac{(D/2 + H)}{15}$$

où

d= portée maximale de la glace projetée (en m)

D= diamètre du rotor (en m)

H= hauteur du moyeu (en m)

v = vitesse du vent à la hauteur du moyeu (en m/s)

Les résultats de ces formules doivent être considérés comme des estimations approximatives (Baring-Gould *et al.*, 2009a).

Les chances d'être touché par un morceau de glace (d'une masse de 0,18 à 0,36 kg) sur un site avec des conditions de givrage modéré (5 jours par an) sont de 1 sur 10 (Parent, 2010). Ceci est valable pour une personne qui marche 10 heures en dessous d'une turbine opérant avec un système de dégivrage et qui a une accretion totale de glace de 75 kg/rotor par jour. Ces résultats sont obtenus par des modélisations Monte-Carlo (Parent, 2010).

### **2.4.5 Opération et maintenance dans le froid**

Le stade actuel de la technologie permet l'exploitation presque automatique des parcs éoliens. Leur contrôle est réalisé par des systèmes SCADA (contrôleur superviseur et d'acquisition des données). Dans un contexte de climat froid, les SCADA doivent, en plus de leurs fonctions normales, collecter les données en provenance des détecteurs du givre, d'humidité, de température et de vibration et de prévenir l'opération des turbines en dehors des conditions climatiques acceptables. Les SCADA peuvent suivre les conditions d'humidité et de température des composants comme la boîte de vitesses, la génératrice et les tableaux électriques et activer les systèmes d'antigivrage-dégivrage. En raison de l'éloignement et de l'isolement des sites, il devient essentiel l'ajout de ces fonctionnalités dans les SCADA qui opèrent en climat froid.

La maintenance des éoliennes doit tenir compte de leurs conditions d'opération extrêmement difficiles. Les lubrifiants, les joints en caoutchouc et les propriétés mécaniques de tous les matériaux sont touchés par les basses températures. Ces éoliennes requièrent des lubrifiants à faible viscosité ou lubrifiants synthétiques. Toutefois, à des températures normales de fonctionnement, ces lubrifiants offriront moins de protection. Le froid impose des efforts supplémentaires aux mécanismes de pas variable et d'orientation. De tous les composants de la turbine, la boîte de vitesses est probablement la plus touchée par les opérations en climat froid. Elle doit résister aux gros couples causés par l'effet combiné des rafales et de la plus haute densité de l'air. Une analyse de son huile devra être effectuée périodiquement pour prévenir la présence d'eau causée par la condensation (Baring-Gould *et al.*, 2009a).

Puisque la boîte de vitesses est le composant le plus sensible au froid, la plupart des turbines utilisées en climat froid sont à attaque directe, avec une génératrice synchrone.

#### **2.4.6 Démantèlement dans le froid**

La plupart des dommages à l'environnement se passent pendant la construction et le démantèlement des éoliennes. Une bonne planification peut réduire les impacts environnementaux et les reconditionnements coûteux (Baring-Gould *et al.*, 2009a).

Pour la mise hors service des installations éoliennes, on pourrait profiter de la protection que la neige donne à l'environnement pendant la saison froide. Le démantèlement pourrait se faire pendant l'hiver lorsque le sol est couvert de neige ou de glace qui protégerait la végétation sensible, surtout où la flore montre une croissance et une capacité de récupération très lentes.

On devra vérifier si les codes locaux de bâtiment exigent une manipulation particulière ou le recyclage de certains composants de la turbine, par exemple ceux d'un système d'adaptation en climat froid comme une isolation spéciale ou un lubrifiant spécial à basse température pour une boîte de vitesses (Baring-Gould *et al.*, 2009a).

À Jubany, les législations argentines et internationales qu'on doit respecter pour le recyclage des matériaux pendant la mise hors service sont mentionnées au Chapitre 1. Par rapport au démantèlement des génératrices diesel, même si le ratio « espace occupé/puissance générée » est plus petit que pour les systèmes éoliens (TS 62257-7), on doit considérer l'enlèvement de leurs équipements auxiliaires, comme le bâtiment ou elles ont été installées et les réservoirs de carburant et d'huile, en évitant toujours la contamination du sol.

## 2.5 ESTIMATION DES PERTES FINANCIÈRES DUES AU FROID

Pour les installations éoliennes en climat froid, un risque supplémentaire de pertes de production énergétique doit être considéré en raison du givrage, des basses températures et des coûts plus élevés de maintenance. Les mesures d'atténuation, comme les systèmes d'adaptation pour climat froid, peuvent être évaluées afin de déterminer si la dépense supplémentaire de capital de ces mesures est justifiée. La consommation d'énergie additionnelle de ces technologies doit également être incluse dans les estimations de pertes énergétiques (Baring-Gould *et al.*, 2009a).

En plus des risques économiques usuels de l'exploitation de l'énergie éolienne, l'opération des éoliennes en climat froid ajoute des coûts supplémentaires et des variations de performance qui doivent être évaluées dès le début du projet. Des exemples de ces risques économiques sont :

- Augmentation des coûts initiaux du projet en raison des itinéraires d'installation limités et coûts d'installation et équipements plus élevés. Par exemple, à cause des saisons favorables trop courtes, les fondations pourraient devoir être mises en place une année avant l'érection des éoliennes.
- Augmentation des périodes sans production ou de puissance réduite causées par des événements de givrage durant la saison froide.
- Périodes d'arrêt des turbines à cause des morceaux de glace projetés par les pales et la tour comme précaution pour la sécurité publique.
- Périodes longues d'exposition au givre blanc, qui peuvent augmenter la fatigue mécanique et causer des défaillances prématurées.
- Temps d'arrêt provoqués par des températures basses extrêmes en combinaison avec surpuissances causées par densités d'air plus élevées.

- Augmentation des coûts d'entretien à cause des basses températures et probabilité de temps moyens d'arrêt entre réparations plus élevés en raison de l'inaccessibilité des turbines.
- Évaluation de l'impact économique d'opérer les équipements d'antigivrage-dégivrage et les équipements adaptés aux basses températures.

Dans l'évaluation des risques économiques, doit être calculée l'augmentation des coûts dus aux stratégies d'atténuation des risques tels que les systèmes de dégivrage et antigivrage des pales, l'augmentation de la maintenance préventive et le stockage de pièces de rechange. La campagne d'évaluation du site aidera à juger la convenance de telles mesures (Baring-Gould *et al.*, 2009a).

## 2.6 PROPOSITIONS DE CONCEPTION RELIÉES AU FROID

### 2.6.1 Le vent et le givre

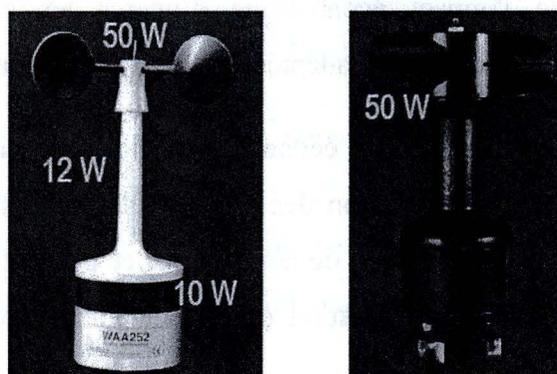


Figure 42. Anémomètres chauffés : à gauche, Vaisala; à droite, NRG

Pour une meilleure connaissance de la distribution des vents à Jubany, il est important d'inclure l'effet des rafales. Les rafales combinées avec la haute densité de l'air froid produisent des charges mécaniques supplémentaires sur la turbine et sa tour. Un autre effet est la possibilité d'affecter de façon continue les petites turbines avec mécanismes d'arrêt « auto-furling » en les arrêtant. Pour pouvoir mesurer l'effet des rafales dans la distribution du vent, il est nécessaire d'utiliser des anémomètres avec enregistrement automatique et taux élevé d'échantillonnage, d'environ une seconde (Manwell, 2002) pendant au moins une année.

Pour la détection d'occurrences de givrage, la méthode autant efficace qu'économique est la paire d'anémomètres chauffés/non chauffés et un protocole bien défini pour identifier la présence de givre. Un détecteur de point de rosée pour basses températures combiné avec les observations de visibilité (hauteur des nuages) du type aéroport réalisées d'habitude à Jubany serait aussi recommandable. L'utilité des registres historiques de visibilité à Jubany doit être évaluée pour l'estimation des occurrences de nuages ou brouillards givrants. Malheureusement, la DNA n'a pas mis à la disponibilité ces observations pour la présente étude.

Deux fabricants reconnus d'équipements pour la mesure du vent sont « NRG Systems » et « Vaisala ». Les deux marques fournissent des anémomètres et des girouettes chauffés et non chauffés, avec taux d'échantillonnage de près d'une seconde et des tours de différentes hauteurs. Selon la hauteur du moyeu du modèle de l'éolienne choisie pour le système hybride, le vent pourrait être mesuré à 10 mètres, comme la station météo actuelle à Jubany (éoliennes d'autour de 10 kW), ou à 30-40 mètres (éoliennes de 100 kW). La Figure 42 montre à gauche un anémomètre Vaisala chauffé (modèle WAA252 à 72 Watts) et à droite un anémomètre chauffé NRG (modèle IceFree3 à 50 W) (A. Bégin-Drolet et al. 2009).

Actuellement, l'utilisation d'un détecteur de givre n'est pas recommandée. Le détecteur de pluie verglaçante légère « Goodrich 0871LH1 », dernière version du « 0847LH1 », est très dispendieux et nécessite beaucoup d'énergie pour opérer. En novembre 2008, il coûtait presque 17 000 \$ (Renseignement de O. Parent). On peut considérer son installation dans l'avenir si l'anémométrie multiple montre des épisodes fréquents de givrage à Jubany.

### **2.6.2 La turbine, la tour et les fondations**

Dans l'étude de préfaisabilité (Corral, 2009), trois modèles de turbines recommandées pour climat froid et pour niveaux de pénétration éolienne (concept expliqué dans le chapitre suivant) bas, moyen, haut, ont été sélectionnés : la Proven WT de 6 kW, la Bergey Excel-S de 10 kW, et la Fortis Alizé de 10 kW (Tableau 5). Dans l'annexe V « Matrice de décision pour choisir les éoliennes de 10 kW » sont présentés les facteurs pris en considération pour faire la présélection.

Ces modèles peuvent opérer à Jubany avec des mesures passives usuelles de dégivrage pour ces tailles d'éoliennes, pales peinturées en noir avec couche hydrophobe. La stratégie de protection de ces modèles en cas de vitesse de rotation par-dessus la vitesse

maximale permise est l'arrêt de la turbine par moyens mécaniques ou électriques. Il faut vérifier avec les fabricants les stratégies de protection et leurs mécanismes d'implémentation pour les cas de vibrations fortes provoquées par la turbulence ou le givre ou dans le cas d'une température très basse.

Une autre option de turbine recommandée pour le service en Antarctique et pour une pénétration moyenne/haute est la Northwind 100 « arctique » de 100 kW, dont le système pour climat froid a été décrit au Tableau 4. Selon le document « Power Cost Equalization Report » de l'AEA (Alaska Energy Authority, 2009), la qualité et la résilience de cette éolienne en climat froid sont très bonnes (Fay, 2010). Les données des installations à Toksook Bay et Kasigluk montrent que cette éolienne a produit les quantités d'énergie prédites dans les modélisations utilisées pour justifier ces projets. Fay conclut que ces deux expériences vérifient la robustesse de la NW100. Actuellement, la Northwind 100 « arctique » est l'éolienne la plus souvent installée pour les centrales publiques d'électricité dans les régions rurales de l'Alaska.

Pour n'importe quel modèle de turbine éolienne choisi pour opérer à Jubany, on devra s'assurer de sa résistance à une très haute salinité.

Tableau 5. Éoliennes d'autour de 10 kW pour Jubany

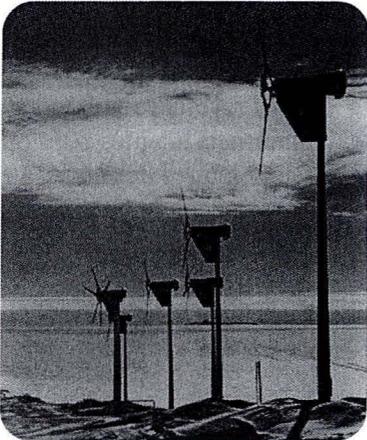
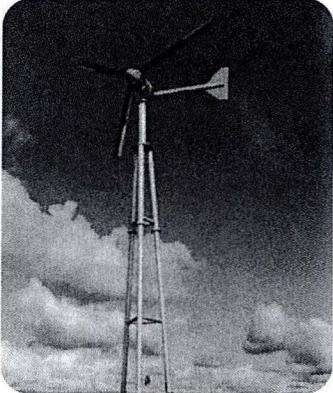
<b>PROVEN WT 6 kW (Royaume Uni)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• tour autoportante galvanisée, tubulaire, 9 m, à levage automatique</li> <li>• pales noires, matériaux adaptés pour opération à températures de -40 °C à +45 °C</li> <li>• mouvement de lacet libre, enroulage c'est-à-dire rotor contrôlé par décrochage aérodynamique</li> <li>• vitesse du vent de survie à la hauteur du moyeu de 70 m/s</li> </ul>	
<b>BERGEY EXCEL-S 10 kW (États-Unis d'Amérique)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• tour autoportante galvanisée, tubulaire, 9 m, à levage automatique (la photo montre une tour différente utilisée à Kuujjuarapik, QC)</li> <li>• pales noires, matériaux adaptés pour opération à températures de -40 °C à +60 °C</li> <li>• mouvement de lacet passif (aile de queue), rotor contrôlé par décrochage aérodynamique</li> <li>• vitesse du vent de survie à la hauteur du moyeu de 54 m/s</li> </ul>	
<b>FORTIS Alizé 10 kW (Pays-Bas)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• tour en treillis autoportante, galvanisée, 18 m, à levage automatique</li> <li>• pales noires, matériaux adaptés pour opération à températures de -30 °C à +50 °C</li> <li>• mouvement de lacet passif (aile de queue), rotor contrôlé par décrochage aérodynamique</li> <li>• vitesse du vent de survie à la hauteur du moyeu de 60 m/s</li> </ul>	

Tableau 6. Éolienne de 100 kW pour Jubany

<b>NORTHWIND 100 « Arctique » (États-Unis d'Amérique)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• tour autoportante tubulaire, 37 m, d'acier, poids de 13 800 kg. Besoin de grue pour son levage</li> <li>• pales revêtis de polymère noir hydrophobe, matériaux adaptés pour opération à températures de -40 °C à +50 °C</li> <li>• mouvement de lacet actif par électromécanique, rotor à vitesse variable contrôlé par décrochage aérodynamique</li> <li>• vitesse du vent de survie à la hauteur du moyeu de 56 m/s</li> </ul>	

Specifications Northwind 100 arctic. Document SS-090901-02

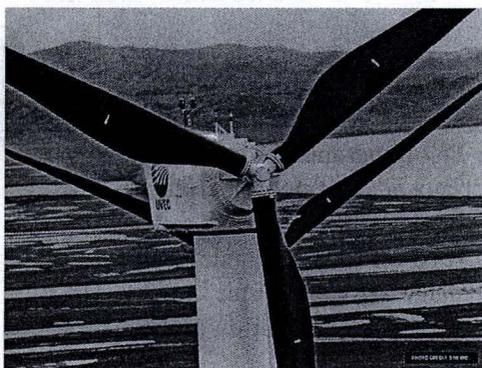


Figure 43. Turbines Northwind 100 « Arctiques » à Unalakleet, Alaska. Source : NPS



Figure 44. Levage de la turbine IVS-4500 à Base Esperanza. Source :YouTube (b)

Pour les éoliennes de 10 kW ou moins, il est recommandé d'utiliser une tour comme celle de l'IVS-4500, éolienne fabriquée en Argentine, qui peut s'incliner facilement pour réaliser la maintenance (voir à la Figure 44 le levage de sa tour basculante à la base Esperanza, en l'Antarctique). Pourtant, il faut porter une attention particulière au givre qui peut s'accumuler sur cette tour haubanée. Une autre option serait le type de la tour autoportante utilisée à Kuujjuarapik dans le nord du Québec (photo de la Bergey Excel-S de 10 kW au Tableau 5).

La tour de la Northwind 100 est une tour tubulaire autoportante composée de trois sections imbriquées (voir la Figure 39) de 37 m de hauteur qui a besoin d'une grue de 60 tonnes (McKay, 2009) pour installation.

### **2.6.3 Le travail et l'infrastructure**

Les équipages de l'armée argentine et de la DNA possèdent une longue expérience de travail dans les environnements antarctiques et particulièrement à la base Jubany de presque 60 ans. Depuis le commencement, ils ont travaillé avec des génératrices diesel en ce climat froid. Le câblage du réseau de distribution électrique peut être laissé sur le sol comme il reste actuellement ou bien il pourrait être apposé sur des blocs de béton ou autres fixations et protégé par des structures en bois ou en acier. Les anciennes sections de câblage doivent être remplacées. Lors de l'installation d'éoliennes à Jubany, on devra prendre les mesures adéquates pour assurer la sécurité du personnel contre les morceaux de glace que les turbines pourraient projeter.



## **CHAPITRE 3**

### **CONCEPTS DES SYSTÈMES HYBRIDES**

Dans ce chapitre sont présentés les concepts et dispositifs reliés au fonctionnement des systèmes hybrides éolien-diesel. D'abord, sera expliqué le concept de la « qualité » de l'énergie électrique produite par le système, l'importance de l'équilibre entre l'énergie produite et celle consommée et comment la génératrice diesel, à travers ses contrôles, maintient la stabilité de la fréquence et du voltage du réseau isolé.

Des concepts tels que les « niveaux de pénétration renouvelable » instantanés et moyens seront ainsi présentés. La complexité des systèmes hybrides qui est intrinsèquement reliée au niveau de pénétration sera abordée aussi. On introduit le concept de « réserve tournante », la capacité du système de répondre au déficit ou à l'excès soudain d'énergie sans perdre sa stabilité et de la « cogénération », la production simultanée d'électricité et de chaleur. Sont analysés les dispositifs électriques réels capables de fournir de la réserve tournante et maintenir la stabilité des systèmes hybrides éolien-diesel, comme les gensets à faible charge, les charges de dissipation et les divers types du stockage.

En se basant sur ces informations, sera analysé le fonctionnement des quatre systèmes éolien-diesel en climat froid présentés comme exemples de l'état de l'art, dont les conclusions sont utiles pour la conception du système hybride à la base Jubany. À la fin sera dressée une brève liste des similarités et différences des 4 exemples présentés des installations en climat froid.

### 3.1 CONCEPTS ET DISPOSITIFS DES SYSTÈMES HYBRIDES

Les systèmes hybrides « classiques » intègrent des générateurs renouvelables (éolien, PV, hydro), générateurs à combustibles fossiles, banc de batteries et convertisseur de puissance qui usuellement sont branchés par un système à deux bus : un bus CD (Courant Direct) pour le banc de batteries et un bus CA (Courant Alternatif) pour le gense et la distribution (Baring-Gould, 2009e).

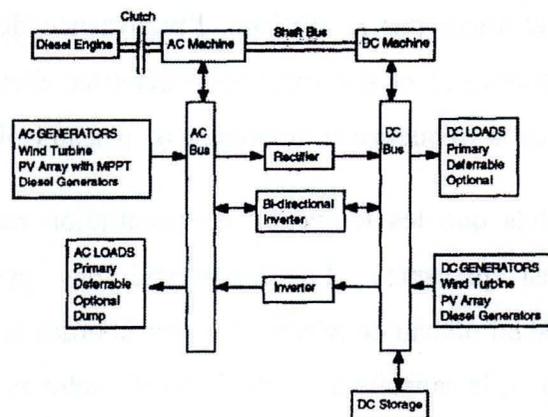


Figure 45. Schéma général d'un système électrique hybride. Source : McGowan

Dans les systèmes où le bus CD est le principal, le banc de batteries agit comme un régulateur énergétique qui permet de corriger les fluctuations de puissance produites par les générateurs d'énergie renouvelable. Par contre, dans les systèmes qui se regroupent autour d'un bus CA, des équipements spécialisés doivent souvent être ajoutés pour arriver à l'équilibre entre la production et la charge et pour régler le voltage et la fréquence de l'électricité produite par le système (Baring-Gould, 2002).

### 3.1.1 La « qualité de la puissance »

Selon Hunter (1994), la « qualité de la puissance » ou qualité de l'énergie générée peut être décrite par les propriétés électriques suivantes :

- Stabilité du voltage
- Stabilité de la fréquence
- Contenu des harmoniques
- Facteurs d'interférences téléphoniques
- Effets d'interférence électromagnétique
- Équilibre de phases
- Facteur de puissance

Idéalement, une qualité parfaite de l'électricité générée serait d'avoir un voltage continu et purement sinusoïdal, avec une amplitude et une fréquence constantes. Alors, plus l'électricité générée s'approche de ces caractéristiques, plus élevée serait la qualité de la puissance. Dans la vie réelle, la limite minimale est que l'électricité générée par le système doive être d'une qualité telle que les appareils des consommateurs ne présentent pas des défaillances ou des fonctionnements défectueux.

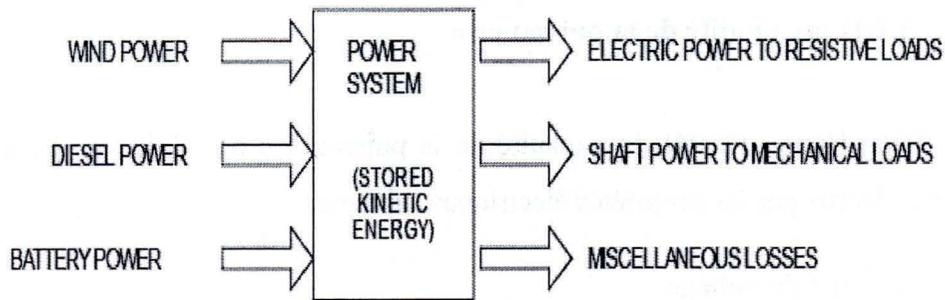


Figure 46. Le système hybride vu comme une seule entité électromécanique

On peut penser à tout le système hybride d'électrification, y compris ses trois sous-systèmes de production, distribution et demande, comme une seule grande entité électromécanique, à laquelle arrivent des flux d'énergie en provenance du vent capturé par l'éolienne, des rayons solaires captés par les panneaux PV, du carburant consommé par le moteur diesel du genset et de l'énergie tirée du stockage (batteries) de laquelle sortent des flux d'énergie vers les charges résistives, mécaniques (moteurs) et les diverses pertes (dans le câblage, etc.). À un moment donné, si un surplus d'énergie arrive au système, la différence sera emmagasinée comme énergie cinétique des machines tournantes, génératrices ou motrices (Drouilhet, 1999). L'effet immédiat sera une augmentation de la vitesse de rotation et par conséquent de la fréquence de tout le système. Dans le cas d'un déficit d'énergie, l'effet sera la diminution des vitesses de rotation et de la fréquence.

Ainsi, pour les systèmes basés sur des génératrices synchrones, la variation de la fréquence, ainsi que la variation de la vitesse des machines tournantes en ligne, est une indication de la stabilité du réseau. Wildi écrit que « le réseau est stable lorsque sa fréquence demeure constante » (Wildi, 2009).

Drouilhet (1999) remarque que la relation entre le déséquilibre d'énergies entrantes/sortantes et la variation de la fréquence s'applique seulement aux systèmes électriques où la fréquence est déterminée par les vitesses rotatives des machines synchrones (génératrices, moteurs). Dans les systèmes où la fréquence est déterminée par le cristal oscillateur d'un convertisseur de voltage et demeure toujours constante, les déséquilibres énergétiques se manifestent en augmentations ou diminutions des voltages du

côté CA ou du côté CD du convertisseur. Dans ces systèmes, le problème devient alors le contrôle de ces voltages (Drouilhet, 1999).

Pour avoir une fréquence stable, il est nécessaire de maintenir l'équilibre instantané de la puissance active (kW) entrant et sortant du système. L'équation suivante décrit l'effet des déséquilibres de l'énergie ou de puissance active du système :

$$\sum P_{SOURCES} - \sum P_{PUITS} = \frac{d(E.K.)}{dt} = \frac{d}{dt} \sum_i J_i \omega_i^2$$

Où

P = puissance active (kW)

E.K. = énergie cinétique du système

J = moment d'inertie de machine tournante

$\omega$  = vitesse angulaire de machine tournante

De façon similaire, la stabilité du voltage CA du système d'électrification est un problème de maintien de l'équilibre entre les « sources » et les « puits » de la puissance réactive (mesurée en vars) dans le système. Les génératrices à induction des turbines éoliennes, les transformateurs appartenant au sous-système de distribution et les moteurs à induction sont tous des « puits » de puissance réactive parce que pour générer leurs champs électromagnétiques ils ont besoin de vars. Les condensateurs de correction du facteur de puissance dans les éoliennes ou dans le sous-système de distribution sont des « sources » de puissance réactive. Les génératrices synchrones dans les gensets ou un compensateur synchrone peuvent agir comme des sources ou des puits, mais usuellement elles sont des sources qui fournissent la puissance réactive demandée par les puits.

À la différence du cas de la puissance active, où les déséquilibres peuvent être absorbés par le système comme une variation de l'énergie cinétique stockée, la puissance réactive, qui n'est pas « réelle », ne peut pas être emmagasinée. La puissance réactive

fournie par les « sources » est conceptuellement toujours égale à la puissance réactive absorbée par les « puits ». Cela est exprimé par l'équation suivante, où le flux de puissances réactives dans le système est exprimé comme une fonction du voltage du système :

$$\sum Q_{SOURCES} (V_{CA}) - \sum Q_{PUITS} (V_{CA}) = 0$$

Où

$Q$  = puissance réactive (kvars)

$V_{CA}$  = voltage du bus CA

Si les sources de puissance réactive ne sont pas capables de délivrer la puissance réactive demandée par les puits, le voltage du système tombera jusqu'à atteindre de nouveau l'équilibre de ce flux. Avec la puissance réactive, le problème n'est pas de maintenir son équilibre, situation qu'arrive automatiquement, mais que cet équilibre soit atteint au voltage souhaité. Dans un compensateur synchrone, la fonction du régulateur de voltage est en fait de régler le courant d'excitation de la génératrice de telle sorte qu'elle puisse délivrer la puissance réactive demandée par la charge au voltage CA souhaité (Drouilhet, 1999).

Dans les gros réseaux nationaux (Wildi, 2009), du côté du sous-système de production, la régulation de la fréquence et du voltage est faite au moyen de détecteurs très sensibles qui mesurent des variations très petites de vitesse (de l'ordre de 0,02 %) dans les génératrices synchrones et qu'automatiquement ouvrent/ferment soit les vannes des centrales hydroélectriques, soit les soupapes à vapeur des centrales thermiques et nucléaires afin de varier le torque mécanique sur les génératrices et ainsi leur vitesse de rotation, leur fréquence et finalement la puissance active générée par le réseau.

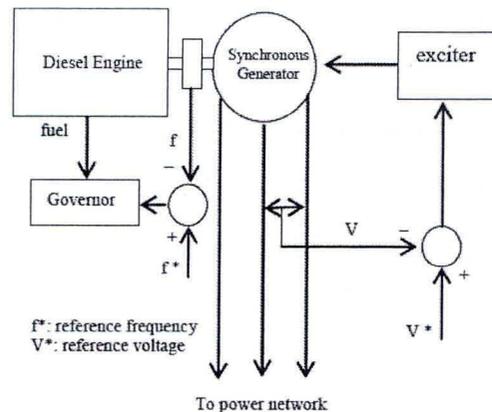


Figure 47. Diagramme du contrôle d'une génératrice diesel. Source : Muljadi

Dans les réseaux isolés d'électrification de type éolien-diesel, c'est la génératrice diesel qui contrôle la fréquence (via son gouverneur) et le voltage du système (via le réglage de son courant d'excitation). Il faut s'attendre à ce que les écarts d'une qualité de la puissance idéale soient plus amples dans ces réseaux que ceux des réseaux publics (Hunter, 1994) en raison des fluctuations électriques provoquées par la turbine éolienne et la possible utilisation des convertisseurs/onduleurs statiques de puissance. Hunter recommande d'accorder une attention particulière aux fluctuations rapides de tension (« flicker » en anglais) et aux variations de fréquence. En plus, le plus proche qu'on veut être de l'idéal de qualité, le plus cher sera le contrôle parce que la complexité et le coût du contrôle de ces réseaux isolés sont fortement dépendants des limites spécifiées pour la qualité de leur puissance.

Comme l'on a mentionné précédemment, « genset » est un terme familier pour nommer l'ensemble d'un moteur à combustible fossile couplé à une génératrice électrique (TS 62257-7, 2008-4) et que les gensets à Jubany utilisent des génératrices synchrones. Le moteur diesel doit être capable de fournir la puissance mécanique nécessaire aux besoins de la charge à une fréquence constante jusqu'à sa puissance nominale. La génératrice synchrone doit être capable de maintenir le voltage constant à toute condition de charge jusqu'à sa puissance nominale.

La Figure 47 est un diagramme à blocs de ce type de gense, où le bloc signalé « exciter » contrôle le voltage et le bloc signalé « governor » contrôle la fréquence. Le moteur diesel maintient la fréquence constante par le contrôle de la vitesse de son rotor. Lorsque la charge électrique fluctue, le moteur diesel peut ajuster son couple et sa vitesse de rotation grâce à la régulation du carburant réalisée via son gouverneur. La génératrice synchrone peut contrôler sa sortie de voltage par le contrôle de son courant d'excitation. Vu comme un ensemble, le gense peut contrôler sa fréquence et son voltage de sortie lorsqu'il opère dedans l'intervalle de puissance pour lequel il a été conçu. L'habileté du moteur diesel pour répondre aux variations de la charge se trouve limitée par l'inertie mécanique du groupe électrogène, la sensibilité de son gouverneur et sa puissance mécanique. L'habileté de la génératrice synchrone se trouve limitée par la constante de temps du champ électromagnétique de son bobinage, la disponibilité de la source CD de fournir ce champ électromagnétique et le temps de réponse du régulateur du voltage (Muljadi, 2004).

### **3.1.2 Le concept de la pénétration renouvelable**

On appelle « taux de pénétration d'énergie renouvelable », le pourcentage de l'énergie produite par les générateurs renouvelables par rapport à la quantité totale d'énergie. Dans le cas des systèmes éolien-diesel, le niveau de l'énergie des genses qui est remplacée par l'énergie des éoliennes est appelé le « taux de pénétration éolien » (Maissan, 2006).

Deux facteurs reliés dictent la conception des systèmes hybrides et leurs composants nécessaires : 1) le taux de pénétration en énergie renouvelable du système; 2) les méthodes utilisées pour contrôler le système hybride en fonction du taux de pénétration renouvelable. Dans les climats froids, l'utilisation de l'énergie thermique générée par le cycle de combustion des génératrices diesel (appelée « cogénération ») pour le chauffage de l'eau et des locaux joue également un rôle déterminant dans la conception du système hybride (Baring-Gould, 2009e).

### 3.1.3 Les niveaux de la pénétration renouvelable

L'augmentation de la pénétration renouvelable est accompagnée par une complexité supplémentaire des méthodes de contrôle du système hybride. Steve Drouilhet, du NREL, a proposé trois niveaux de pénétration en lien avec la complexité des systèmes éolien-diesel. Pour définir sa classification, Drouilhet fait usage des deux concepts : **(1) le taux de pénétration instantané** qui est le rapport entre la puissance éolienne (kW) et celle de la charge électrique primaire (kW) ; et **(2) le taux de pénétration moyen** qui est le rapport entre la production totale d'énergie éolienne (kWh) et la consommation électrique totale primaire (kWh) pendant une période spécifiée (Baring-Gould, 2009e) :

$$\text{Taux de pénétration instantané} = \frac{\text{Puissance éolienne (kW)}}{\text{Charge électrique primaire (kW)}}$$

$$\text{Taux de pénétration moyen} = \frac{\text{Énergie éolienne (kWh)}}{\text{Consommation électrique primaire (kWh)}}$$

La pénétration instantanée est reliée à la complexité du système électrique et à la classe de contrôle requis pour maintenir une qualité acceptable de l'électricité générée. Le taux de pénétration moyen est exprimé en unités d'énergie, et ainsi il est mesuré au fil des jours, des mois, voire des ans. La pénétration moyenne permet une estimation des économies et des besoins de stockage du carburant, des caractéristiques générales du fonctionnement du système, et de l'impact économique à long terme sur celui-ci.

Dans le Tableau 7, Baring-Gould (2009e) remarque que les taux de pénétration instantané et moyen dans ce tableau doivent être considérés comme approximatifs et fortement dépendants de l'obsolescence des gensests et de leurs contrôles associés.

Tableau 7. Classes de pénétration de systèmes hybrides éolien-diesel

Classe de pénétration	Caractéristiques d'opération	Pénétration	
		Instantanée	Moyenne annualisée
BASSE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genset opère toujours</li> <li>• Puissance éolienne réduit la charge nette sur le genset</li> <li>• Toute l'énergie éolienne alimente la charge primaire</li> <li>• Pas de système superviseur de contrôle</li> </ul>	<50 %	<20 %
MOYENNE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genset opère toujours</li> <li>• À niveaux élevés de puissance éolienne, on branche charges secondaires pour éviter la charge faible du genset ou bien génération éolienne est réduite</li> <li>• Système de contrôle relativement simple</li> </ul>	50 %-100 %	20 %-50 %
HAUTE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genset peut être arrêté lors de niveaux élevés de puissance éolienne</li> <li>• Équipements auxiliaires nécessaires pour réguler voltage et fréquence</li> <li>• Système de contrôle complexe</li> </ul>	100 %-400 %	50 %-150 %

Source : Baring-Gould, 2002, 2007

Un autre concept utile pour la compréhension de la pénétration éolienne est celui de **la réserve tournante** (« spinning reserve »). Baring-Gould (2009) présente à la réserve tournante comme la disponibilité de la capacité instantanée du système pour satisfaire les changements rapides dans la charge (la demande électrique) ou dans la production d'énergie du système. La réserve tournante serait d'abord la capacité de production supplémentaire qui est disponible en augmentant la puissance des générateurs déjà connectés au réseau électrique ; usuellement, cette augmentation de puissance est obtenue par l'augmentation du couple appliqué au rotor du genset (Wikipédia [s.d.]. « Operating Reserve »). Mais du côté de la charge, certains consommateurs peuvent fournir aussi de la réserve tournante, s'ils acceptent d'être débranchés ou de réduire leur charge sur demande du gestionnaire du

réseau (Rebours, 2005). C'est précisément le rôle des charges de dissipation (« dump loads »).

### **3.1.4 Systèmes à basse pénétration**

Dans les systèmes à basse pénétration, la génératrice diesel opère tout le temps. C'est le contrôleur de son courant d'excitation et son mécanisme gouverneur qui règlent le voltage et la fréquence de l'électricité générée par le système hybride. La génératrice diesel peut contrôler le système au complet parce que les variations induites par la partie éolienne restent limitées en raison du bas pourcentage de la pénétration et parce que l'énergie générée par la turbine éolienne produit le même effet qu'une « charge positive » sur la génératrice diesel (Baring-Gould, 2009e). L'éolienne n'a que son système de contrôle habituel et des opérateurs surveillent le fonctionnement de l'installation hybride. La réserve tournante est fournie par la capacité de génération non utilisée du genset, qui dans nombreux cas, peut fonctionner à 125 % de sa puissance nominale pour de courtes périodes de temps sans effets négatifs (Baring-Gould, 2009).

### **3.1.5 Systèmes à pénétration moyenne**

Dans les systèmes à pénétration moyenne, la génératrice diesel opère aussi tout le temps, mais une contribution plus élevée de la partie éolienne résulte en plus de difficultés pour le genset de régler voltage et fréquence et de maintenir la stabilité du système, surtout dans le cas des gensets plus âgés.

Dans ce type de systèmes, on essaie d'augmenter au maximum la pénétration éolienne sans débrancher ou arrêter la génératrice diesel puisque c'est elle qui continue à fournir le contrôle de fréquence et voltage. Pourtant, plus on augmente la pénétration éolienne, plus la génératrice est forcée à opérer sous une charge faible, ce qui provoque une

série d'effets indésirables sur la machine : la carbonisation du moteur, la vitrification de pistons et cylindres et l'augmentation de son entretien (voir aussi Chapitre 1). Ainsi, la limite d'opérer la génératrice à 40 % ou 50 % de sa capacité nominale (Baring-Gould, 2009e; TS 62257-7; Hunter, 1994) devient une barrière effective pour le pourcentage du taux de pénétration renouvelable dans les systèmes à pénétration moyenne.

Les stratégies actuelles pour augmenter la pénétration éolienne dans un système à pénétration moyenne et, en même temps, protéger la génératrice d'opérer en dessous de la limite inférieure de sa puissance nominale sont (Baring-Gould, 2009e) :

- Développement des capacités de réduction de la puissance de la partie éolienne; lors des diminutions de la charge, on peut diminuer la contribution éolienne même en périodes de vents forts.
- Inclusion de charges secondaires, augmentant ainsi la charge électrique totale du système; lors d'une augmentation de la contribution éolienne, on peut augmenter la charge électrique totale et, de cette façon, maintenir le niveau de la charge du gense. Un type de charge secondaire est la charge de dissipation.
- Utilisation de charges de dissipation contrôlées pour aider à lisser les pics de variabilité de la partie éolienne et pour contrôler la fréquence.
- Utilisation de l'électronique de puissance et du contrôle avancé dans la turbine pour permettre la stabilité de sa puissance en temps réel.
- Mécanisme gouverneur électronique de la génératrice pour lui permettre d'opérer à faible charge, et avoir temps de réponse plus courts. Actuellement, sont offerts sur le marché gense à faible charge qui peuvent opérer à moins de 10 % de leur puissance nominale. Un exemple est donné plus en avant.

### 3.1.6 Systèmes à haute pénétration

Lorsque la pénétration éolienne ou renouvelable dépasse un certain pourcentage de l'énergie totale produite par le système, il devient nécessaire et souhaitable de déconnecter la génératrice ou la partie diesel du système hybride, pour la protéger d'opérer à faible charge, mais aussi pour faire des économies de carburant. Dans cette situation, on doit ajouter divers équipements pour rétablir le contrôle de voltage et fréquence qui n'est plus fourni par l'opération de la partie diesel. Pour maintenir la stabilité du système hybride d'électrification, on peut utiliser des charges secondaires contrôlables, des compensateurs synchrones, des convertisseurs de puissance, des systèmes de commande de pointe, et possiblement du stockage par batteries ou roues d'inertie (« flywheels »). En outre, une gestion de la demande électrique qui inclut le délestage des charges peut s'avérer très utile pour garder la stabilité et la fiabilité du système (Baring-Gould, 2009e).

Ici, on doit souligner les différentes réponses aux variations de niveau de l'énergie éolienne des deux types de systèmes hybrides à haute pénétration : ceux avec un stockage d'énergie et ceux sans aucun stockage d'énergie.

Dans les systèmes à haute pénétration avec stockage d'énergie, l'excédent en énergie éolienne sert au stockage par batteries ou roues d'inertie. Lorsque la partie diesel se trouve arrêtée et la partie éolienne ne peut générer assez d'électricité par manque de vents, le stockage d'énergie doit fournir immédiatement l'énergie électrique requise par la charge, pendant quelques minutes et donner assez de temps pour que le diesel se rebranche au réseau, ou bien pour que les vents retournent et la partie éolienne recommence à générer le niveau désiré d'énergie. Une autre stratégie qui peut se réaliser simultanément est le délestage partiel ou total des charges secondaires et charges de dissipation. Dans ce type de systèmes, c'est le stockage (batteries, etc.), l'excédent régulier de l'énergie produite par les éoliennes et la gestion contrôlée de la charge électrique qui fournissent la réserve tournante du système.

Dans les systèmes à haute pénétration sans stockage d'énergie, on part du principe de base que la partie éolienne ou renouvelable possède une puissance installée beaucoup plus élevée que la charge du système (Baring-Gould, 2002). On débranche la partie diesel seulement dans des situations où la partie éolienne génère une quantité d'énergie par-dessus un seuil établi par le gestionnaire du système et qui donnent la certitude que l'alimentation de la charge ne sera pas interrompue par les variations de l'électricité éolienne. Lorsque la quantité de l'énergie éolienne descend en dessous de ce seuil, on rebranche immédiatement le diesel. Le diesel, même en état d'arrêt, doit être prêt à démarrer et cela oblige à le maintenir toujours réchauffé. L'énergie pour le réchauffage des génératrices peut provenir des éoliennes ou de chaudières indépendantes qui consomment du carburant. Dans ces systèmes, la réserve tournante est fournie par l'énergie éolienne générée par-dessus le seuil établi par le concepteur et le gestionnaire, et aussi par le branchement/délestage des charges secondaires dispatchables et des charges de dissipation.

### **3.1.7 La cogénération**

La cogénération est l'utilisation d'un moteur à combustion interne ou d'une centrale d'énergie pour produire simultanément de l'électricité et de la chaleur utile (Wikipédia [s.d.], « Cogénération »). Si l'on considère que seulement 20 % à 30 % (Hunter, 1994) de l'énergie totale du carburant est convertie en électricité par une génératrice diesel et que le reste devient de la chaleur résiduelle qui doit être dissipée par le système de refroidissement, par les gaz d'échappement ou par radiation depuis la surface de la machine, on peut profiter de cette chaleur résiduelle pour alimenter des charges utiles.

La façon la plus efficace de profiter de la chaleur résiduelle est de l'utiliser directement comme chaleur. Cela évite les pertes qui se produisent lorsque la chaleur est transformée en un autre type d'énergie, par exemple lorsqu'elle est reconvertie en électricité. La chaleur récupérée peut être utilisée pour chauffer des locaux, de l'eau domestique, ou pour tempérer les approvisionnements d'eau pour éviter le gel et faciliter le

traitement (Alaska Energy Authority, 2009). La cogénération se trouve parmi les méthodes les plus économiques et efficaces pour réduire les émissions de dioxyde de carbone du chauffage dans les climats froids (Wikipédia [s.d.], « Cogénération »).

La cogénération est plus efficace dans les cas où la chaleur peut être utilisée sur le site ou à proximité. L'efficacité totale diminue lorsque la chaleur doit être transportée sur de longues distances. Cela nécessite des conduites à haute isolation, qui sont coûteuses et inefficaces. Actuellement, il y a deux techniques pour réaliser la cogénération avec les génératrices diesel :

- **Récupération de la chaleur du système de refroidissement.** Cette technologie est actuellement considérée comme mature pour son application aux génératrices de taille moyenne (Alaska Energy Authority, 2009). Hunter (1994) classe ces systèmes de récupération selon la température de l'eau du système de refroidissement : pour des températures de 93 °C on peut utiliser des échangeurs thermiques liquide-liquide pour transférer la chaleur du moteur à un deuxième circuit à fluide, généralement aussi de l'eau. Pour des températures de 99 °C-121 °C, on utilise le même type d'échangeurs liquide-liquide, mais le système doit opérer à pressions plus élevées (30-140 kN/m<sup>2</sup> au-dessus la pression du point d'ébullition) pour éviter que l'eau passe à l'état de la vapeur. Cela requiert des dispositifs de contrôle de la pression tels que des réservoirs d'expansion et pompes spéciales. Dans le cas où le fluide du système de refroidissement est un mélange eau/vapeur, on utilise un séparateur de vapeur. La vapeur est évacuée et utilisée comme une source d'énergie tandis que l'eau résiduelle peut repasser à travers le moteur. Le système a l'avantage de fournir de la vapeur à basse pression pour des processus individuels et d'éliminer les pompes et échangeurs de chaleur.
- **Récupération de la chaleur des gaz d'échappement.** Si bien éprouvée et rentable dans les grandes centrales électriques, la faisabilité de cette récupération dans les gensets de taille moyenne est encore récente. Des progrès dans des échangeurs de chaleur des gaz d'échappement et des stratégies opérationnelles ont permis de

réduire les problèmes de corrosion et de suie et les coûts élevés d'entretien de ces systèmes. Les experts de l'Alaska considèrent que la taille de la génératrice diesel doit dépasser les 400 kW et la population de la communauté doit avoir plus de 700 résidents pendant toute l'année pour qu'un système de récupération de la chaleur résiduelle de ce type soit rentable (Alaska Energy Authority, 2009).

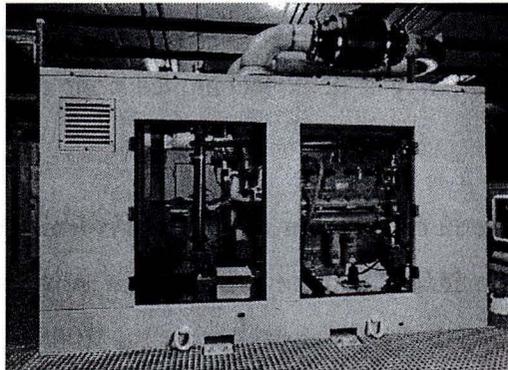


Figure 48. Genset à gaz naturel avec les deux types de cogénération. Source : EES

Pour les systèmes hybrides d'électrification où les génératrices diesel n'opèrent pas tout le temps, celles-ci doivent être toujours gardées au chaud, possiblement avec le surplus d'énergie renouvelable appliqué au système de refroidissement pour qu'il opère comme un système de réchauffage, afin d'améliorer le démarrage des gensets lorsqu'il devient nécessaire. De plus, pendant leur opération, les moteurs des gensets doivent toujours être correctement refroidis même si la demande de chaleur pour d'autres applications est faible.

Un exemple de l'utilisation en l'Antarctique des deux types de cogénération mentionnés se trouve à la station polaire franco-italienne Concordia (Tin, 2009). Concordia est située à plus de 1000 km de la côte et les quantités de carburant sont strictement limitées par la difficulté de le transporter. Tout le chauffage des locaux est fait par la récupération de la chaleur du système de refroidissement et des gaz d'échappement des groupes électrogènes diesel. À pleine charge, 155 kW de la chaleur produite dans la centrale électrique sont récupérés et distribués à l'intérieur des trois bâtiments de la station à travers le circuit de chauffage. La cogénération permet de chauffer l'espace de 1800 m<sup>2</sup> couverts

de la station et de préparer la ration journalière de 250 litres d'eau potable avec une consommation annuelle du carburant de l'ordre de  $200 \text{ m}^3$ .

### 3.1.8 Compensateurs synchrones

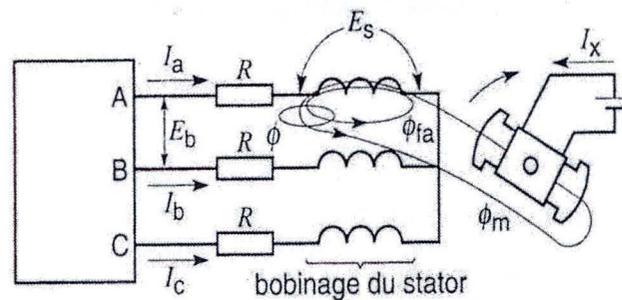


Figure 49. Le flux  $\phi_m$  est créé par la force magnétomotrice de rotor et stator

Dans un moteur synchrone, la force magnétomotrice nécessaire pour produire le flux électromagnétique  $\phi_m$  peut provenir soit du stator, soit du rotor (voir Figure 49). Si le courant d'excitation  $I_x$  dans les bobines du rotor est nul, tout le flux doit être produit par le stator, de sorte que ce dernier doit absorber une grande puissance réactive ou de magnétisation du réseau (celui doit fournir de kvars). Le moteur se comporte comme un « puits » de puissance réactive, donc il est vu comme une inductance par le réseau. Si le courant d'excitation  $I_x$  du rotor augmente graduellement, la force magnétomotrice reliée à ce courant contribue à la production du flux  $\phi_m$  et la puissance réactive absorbée par le stator diminue à fur et à mesure qu'augmente le courant d'excitation. Lorsque la seule force magnétomotrice du rotor génère le flux  $\phi_m$ , la puissance réactive absorbée par le stator devient nulle. Après ce point, si l'on continue à augmenter le courant d'excitation du rotor, le stator, au lieu de l'absorber, commence à fournir de la puissance réactive au réseau. Et cette puissance réactive fournie augmente progressivement avec le courant d'excitation. Le moteur se comporte ainsi comme une « source » de puissance réactive, donc comme une capacitance branchée au réseau (Wildi, 2009).

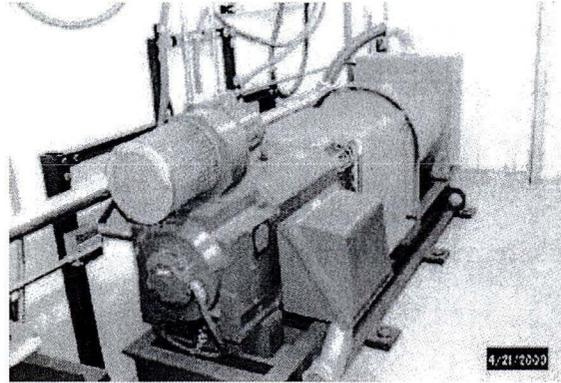


Figure 50. Convertisseur rotatif de 156 kW à Wales, AK. Source : Baring-Gould

Un compensateur synchrone est identique à un moteur synchrone, mais son arbre tourne librement, sans charge. Son but n'est pas celui de convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique ou vice-versa, mais de régler les conditions du réseau électrique auquel il est branché. Son flux électromagnétique est contrôlé par un régulateur de tension afin de générer ou d'absorber la puissance réactive nécessaire au réglage du voltage et du facteur de puissance du réseau. Le compensateur agit comme une grosse inductance ou capacitance variable dont la valeur peut changer en faisant varier le courant d'excitation de son rotor. Il peut remplacer les banques de condensateurs statiques pour corriger le facteur de puissance d'un réseau, sans être endommagé s'il y a des harmoniques présentes, sans produire de la résonance avec l'impédance du système et sans créer les tensions transitoires qui produisent la commutation des banques de condensateurs. Son installation et son fonctionnement sont identiques à ceux des moteurs électriques synchrones (Wikipédia [s.d.] « Synchronous condenser »).

Le système éolien-diesel à Wales, Alaska, comporte un convertisseur rotatif de 156 kW, composé de moteur/génératrice à CD et moteur à CA/compensateur synchrone qui fournit la régulation de voltage lorsque les groupes électrogènes sont arrêtés (Figure 50).

Nous analysons maintenant les dispositifs électriques capables de fournir de la réserve tournante et ainsi de la stabilité dans les systèmes hybrides isolés, comme les gensets à faible charge, les charges de dissipation et les divers types du stockage.

### 3.1.9 Groupes électrogènes à faible charge

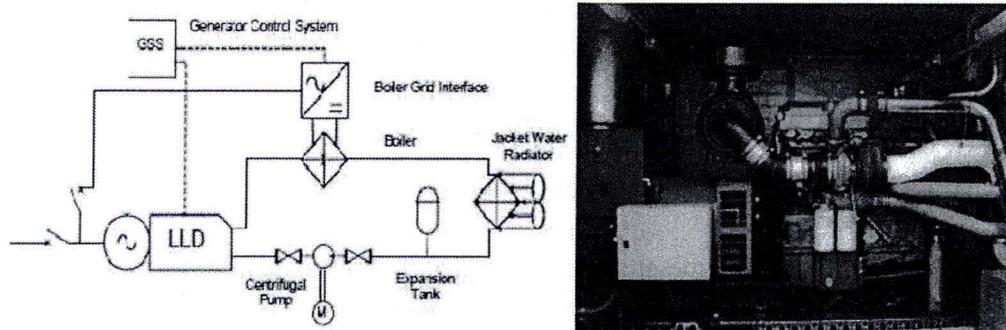


Figure 51. Gaset à faible charge, schéma et intérieur. Source : Powercorp

Une des options techniques qui permet une plus haute pénétration éolienne dans les systèmes hybrides est l'utilisation d'une génératrice diesel à faible charge. Comme mentionné précédemment, un gaset ordinaire ne doit pas fonctionner à moins de 40-50 % de sa capacité nominale (Baring-Gould, 2009e; TS 62257-7) et cela devient une barrière pour augmenter la pénétration éolienne à cause de la réserve tournante du gaset. La compagnie australienne Powercorp offre une génératrice à faible charge qui peut opérer à 7 % de sa capacité nominale de 320 kW, c'est-à-dire elle peut opérer pendant de longues périodes à seulement 23 kW (Figure 51). Cette capacité d'opérer à une charge si faible sans besoin de s'arrêter permet de :

- continuer à fournir la régulation de la fréquence du système tout en permettant une pénétration éolienne augmentée (de  $(320 \text{ kW}) \cdot (40 \% - 7 \%) = 105 \text{ kW}$ );
- agrandir dans la même proportion sa capacité de fournir de la réserve tournante, si l'on considère la différence entre la charge minimale d'un gaset normal (40 %), et la charge minimale de ce gaset à faible charge (7 %).

Selon Powercorp, sa génératrice peut fournir un échelon d'au moins 190 kW avec variations de fréquence et voltage acceptables, si des fluctuations dans la puissance éolienne requièrent une telle réserve tournante.

La génératrice à faible charge se compose des quatre éléments principaux suivants :

- Groupe électrogène composé de moteur modèle Detroit série 60 avec contrôle d'injection électronique et génératrice Stamford de 400 kVA (320 kW)
- Interface réseau-chaudière et tuyauterie associée, qui fournissent la protection contre puissances inversées en provenance de l'éolienne
- Contrôleur automatique et système de protection du groupe électrogène
- Tous les circuits hydrauliques de refroidissement, le système de refroidissement de l'alimentation d'air inclus

Si bien Powercorp n'explique pas les différences dans la conception du groupe électrogène à faible charge par rapport à la conception d'un groupe électrogène ordinaire, l'entreprise remarque que la génératrice a une charge de dissipation incluse, qu'empêche le groupe électrogène d'être forcé de génératrice synchrone à moteur synchrone par une surpuissance de l'éolienne. Lorsque la génératrice à faible charge opère à 7 % de sa capacité nominale et il y a une soudaine augmentation de la puissance éolienne provoquée par une rafale, la génératrice Stamford peut être forcée à opérer en mode moteur, c'est-à-dire absorber énergie plutôt que la générer. Pour prévenir cela, on utilise une charge contrôlable de dissipation qui est une chaudière intégrée dans le même cabinet de la génératrice. Cette chaudière peut consommer jusqu'à 100 kW de puissance inversée et c'est l'élément que Powercorp appelle l'interface réseau-chaudière (« Boiler grid interface »).

Tableau 8. Caractéristiques du genset à faible charge Powercorp

<b>Caractéristiques techniques de la génératrice à faible charge Powercorp</b>	
Vie utile	16 ans
Voltage nominal d'alimentation	3 ph. 415 VCA
Fréquence d'alimentation	50 Hz
Protection contre court-circuit à la sortie	oui
Courant de défaut disponible	oui
Capacité d'unités en parallèle	oui
Puissance nominale	320 kW à F.P. 0,8
Puissance minimale à long terme	7 % (~ 23 kW)
Consommation de carburant à 7 %	~ 8 litres/heure
Acceptation maximale de puissance inversée	100 kW
Mécanisme d'arrêt contre puissance inversée	relais séparé

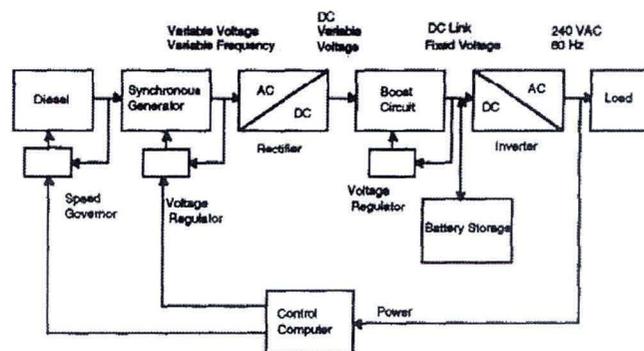


Figure 52. Schéma du genset à vitesse variable. Source : McGowan

Un concept proche à celui de la génératrice à faible charge est le concept d'une génératrice diesel à vitesse variable développé à l'Université du Massachusetts pendant les années 1990 (Figure 52, McGowan, 1999). L'idée est qu'une génératrice diesel capable de varier sa vitesse de façon proportionnelle à la charge serait capable d'opérer à des pourcentages plus bas de la puissance nominale que les génératrices normales (50 %) et avec une efficacité accrue dans la consommation du carburant (de 40 % selon les simulations réalisées à l'Université du Massachusetts). Comme sa vitesse varie, la génératrice produit de l'électricité à voltage et fréquence variables et cette électricité doit être conditionnée au moyen d'un redresseur, un régulateur élévateur et un inverseur, de la même manière que l'électricité générée par les actuelles turbines éoliennes à génératrice

synchrone à aimants permanents. Une telle génératrice montrerait ses avantages dans un système d'électrification isolé avec des charges pic très grandes par rapport à la charge moyenne.

### 3.1.10 Charges de dissipation

L'objectif premier d'ajouter une charge de dissipation d'énergie (Figure 53) est de dépenser le surplus de l'énergie éolienne, qu'on ne veut pas stocker, pour préserver la stabilité du voltage et de la fréquence du système.

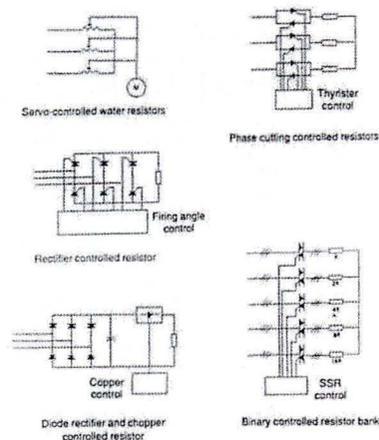


Figure 53. Types de charges de dissipation. Source : Hunter, 1994

Une charge de dissipation d'énergie doit être dimensionnée pour consommer la puissance excédentaire instantanée maximale qu'on attend du système hybride. Cela requiert le calcul de la charge minimale de consommation, la puissance maximale de l'éolienne et la puissance minimale d'opération du genset. Plusieurs systèmes éolien-diesel requièrent de considérer aussi l'interdépendance de la charge et de la fréquence lorsque l'on établit ces niveaux de puissance.

Les limites fixées aux caractéristiques électriques du système déterminent les variations maximales de la fréquence du système. Le but de la charge de dissipation est de préserver celles-ci. Ainsi, les paramètres de contrôle de la charge de dissipation sont usuellement la fréquence et l'équilibre de la puissance électrique. Les limites posées à la variation de la fréquence et la nature de l'opération du système déterminent l'exactitude et la qualité du contrôle requis par la charge de dissipation (Hunter, 1994).

Tableau 9. Caractéristiques des types de charges de dissipation

<b>Caractéristiques des différents types de charges de dissipation</b>				
<b>Type</b>	<b>Précision</b>	<b>Temps de réponse</b>	<b>Demande de puissance réactive</b>	<b>Distorsion de voltage</b>
contrôlée par redresseur	haute	rapide	oui	oui
contrôlée par redresseur plus hacheur	haute	rapide	no	légère
contrôlée par gradateur	haute	rapide	oui	légère
à valeurs multipliées par deux	haute	rapide	no	no
à l'eau	pauvre	lent	no	no

Source : Hunter, 1994

Types de charges pour la dissipation d'énergie (Hunter, 1994) :

- Résistance contrôlée par redresseur : ici, la puissance est dissipée par l'application d'un voltage à CD dans les bornes d'une résistance. Le voltage CD est contrôlé au moyen de l'angle d'amorçage d'un pont redresseur triphasé, à plein ou à demi onde. Plus le voltage CD à travers la résistance est élevé, la quantité d'énergie dissipée est grande.
- Résistance contrôlée par redresseur à diodes plus hacheur : Dans ce type de charge de dissipation, le voltage triphasé est redressé à un voltage constant CD au moyen d'un redresseur triphasé à diodes. Ce voltage CD est converti à un autre voltage CD au moyen d'un hacheur CD/CD. Le hacheur permet de contrôler le voltage aux bornes de la résistance de dissipation et ainsi la quantité d'énergie dissipée. Les résistances contrôlées par hacheur ne sont pas des dispositifs standards disponibles facilement sur le marché.

- Résistance contrôlée par gradateur : Cette fois-ci le voltage aux bornes de la résistance de dissipation est à CA et le gradateur permet de varier sa valeur efficace ou RMS en laissant passer le courant durant un temps plus ou moins long de la demi-période de chaque cycle.
- Banque de résistances à valeurs multiples de deux : La charge résistive de dissipation est ici un ensemble de résistances triphasées. On peut varier la résistance totale de l'ensemble par l'amorçage de relais statiques qui font varier la charge nette vue par le système. Pour parvenir à une variation régulière de cette charge avec une petite quantité de composants, l'ensemble est constitué de résistances à valeurs multiples de deux de la valeur de résistance la plus petite. C'est important que la précision des résistances individuelles soit assez haute pour imposer un taux régulier à l'augmentation ou diminution de la résistance totale de l'ensemble.
- Résistance à l'eau asservie : L'immersion de trois plaques conductrices, une pour chaque phase, est variée au moyen d'un servomoteur, modifiant ainsi leur surface mouillée et donc la résistance entre elles.

### 3.1.11 Types du stockage : objectifs, durée

Une première approche des types du stockage doit distinguer entre les technologies du stockage « classiques » desquelles on peut récupérer l'énergie emmagasinée pour la restituer sur demande dans le système hybride (batteries, roues d'inertie, etc.) et les technologies du stockage « à utilisation finale » (Hunter, 1994), qui reçoivent l'énergie excédentaire sous une forme utile qui ne sera pas reconvertie en électricité ou énergie mécanique par le système hybride. Ce deuxième type est très utile pour avoir un bon contrôle de la charge. Des exemples typiques de ces technologies sont des charges utiles de dissipation, comme le stockage d'eau chaude, le dessalement ou le pompage d'eau, la production d'hydrogène et (Fay, 2010) la production de glace, la recharge des véhicules électriques et le chauffage de locaux.

Dans un système hybride d'électrification, le stockage peut servir les objectifs suivants (Hunter, 1994) :

- lisser les fluctuations rapides de la puissance, produites par l'éolienne et/ou la charge des consommateurs pour améliorer la qualité de la puissance (stockage à court terme et stockage à utilisation finale).
- Réduire les cycles de démarrage/arrêt du gense (stockage de court à moyen terme).
- Réduire la consommation de carburant (stockage de court à moyen terme).
- Minimiser le temps du démarrage du gense et ainsi prolonger les périodes d'inactivité du moteur diesel (stockage à court terme).
- Équilibrer à court et moyen terme les surplus d'énergie provoqués par l'éolienne et par les faibles charges de consommation (stockage à long terme).

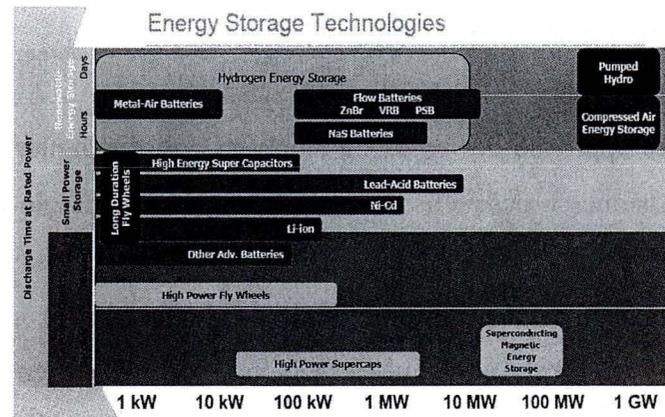


Figure 54. Classification des types de stockage selon capacités (W) et objectifs

Chaque technologie de stockage peut servir un ou plusieurs des objectifs mentionnés, mais il n'y a pas une technologie seule qui puisse remplir leur totalité.

Le diagramme de la Figure 54 montre une classification des divers types de stockage selon leurs capacités de puissance (W) et leurs natures d'application (périodes de décharge) : qualité de la puissance (secondes à minutes), stockage de puissance à petite échelle (minutes), stockage du surplus de l'énergie renouvelable (heures à jours) (McGillivray, 2009).

Des simulations par ordinateur ont montré qu'un stockage de 10-15 minutes de la charge moyenne de consommation ajouté au système hybride est assez pour réduire la consommation de carburant, le temps d'opération et le nombre de démarrages/arrêts des gensets. Ici, la taille du stockage est exprimée dans la quantité de minutes que sa capacité nominale d'énergie, si elle était entièrement disponible, pourrait couvrir la charge moyenne du système. Les mêmes simulations montrent aussi que les gains de performance des trois paramètres mentionnés par l'addition du stockage décroissent rapidement au-delà d'environ 10 minutes de la charge moyenne du système (Drouilhet, 1997; Beyer, 1995).

Dans la simulation effectuée par Drouilhet (1997), on a trouvé que même avec les 10-15 minutes de stockage d'énergie, la consommation du carburant, le temps d'opération et le nombre de démarrages/arrêts des gensets augmentent avec l'intensité de la turbulence du

vent et que, dans ce cas particulier, une taille plus grande du stockage d'énergie réduirait l'impact des intensités grandissantes de la turbulence du vent. À de hautes intensités de turbulence (Drouilhet,1994), il y a un avantage évident pour augmenter la taille nominale du stockage bien au-delà de 15 minutes. Les explications qu'il donne sont :

- Dans des conditions de haute intensité de la turbulence, il y aura des pics de charge nette plus grands. Si le stockage d'énergie utilise des batteries, la capacité effective de celles-ci diminue avec l'augmentation des courants de décharge. Avec le même niveau d'énergie délivrée, plus la puissance de la batterie pour répondre au maximum de charge est élevée, plus sa taille doit augmenter. Cela pourrait ne pas être le cas pour des systèmes de stockage basés sur des roues d'inertie.
- Pour un stockage constant de 10-15 minutes de la charge moyenne, à plus de turbulence, les gensets devront opérer plus de temps et ainsi consumeront plus de carburant.
- Pour un stockage constant de 10-15 minutes de la charge moyenne, plus de turbulence produira plus de pics de charge nette, et les gensets démarreront/arrêteront plus souvent pour compenser ces changements de la charge.

Dans le cadre du projet Jubany, la turbulence des vents est inconnue. Si sur le site de Jubany la turbulence des vents est haute, pour une pénétration renouvelable moyenne à haute, on pourrait préférer un stockage plus grand que 10-15 minutes de la charge moyenne du système.

### 3.1.12 Stockage par batteries

Les systèmes de stockage par batteries (SSB) sont très flexibles en raison de leur dimensionnement modulaire et ils sont aussi très fiables si l'on respecte leurs restrictions techniques comme leur niveau maximal de décharge, leur niveau maximal de courant demandé, etc. Puisque la totalité des batteries opère à CD, les SSB nécessitent une interface pour se brancher avec la partie CA du système hybride. Cette interface peut contenir redresseurs, transformateurs et onduleurs. Les SSB peuvent réaliser tous les objectifs des systèmes du stockage mentionnés antérieurement, mais à cause de leurs restrictions techniques (surtout de vitesse de décharge), les SSB sont une technologie de stockage de moyen à long terme (Hunter, 1994).

Dans le cas du projet Jubany, on doit considérer que les batteries sont très sensibles au froid. À basse température, les batteries délivrent des quantités d'énergie de plus en plus réduites, parce que le froid affecte les processus électrochimiques. En climat froid, les SSB devront être toujours localisés dans des bâtiments chauffés. Deux types de batteries sont usuels pour leur intégration avec les systèmes hybrides :

- Batteries classiques au plomb-acide. Celles de bonne qualité peuvent être déchargées jusqu'à 20 % de leur capacité nominale. Leur vie utile est de 400 à 1200 cycles de charge/décharge, selon leur qualité, le niveau de décharge atteint et le taux de transfert de puissance.
- Batteries au nickel-cadmium. Elles peuvent être déchargées jusqu'à 10 % de leur capacité nominale à des taux de transfert de puissance plus élevés. Leur vie utile peut atteindre 2000 cycles de charge/décharge. Par contre leur coût peut être deux ou quatre fois celui des batteries au plomb-acide (Hunter, 1994).

### 3.1.13 Stockage par roues d'inertie

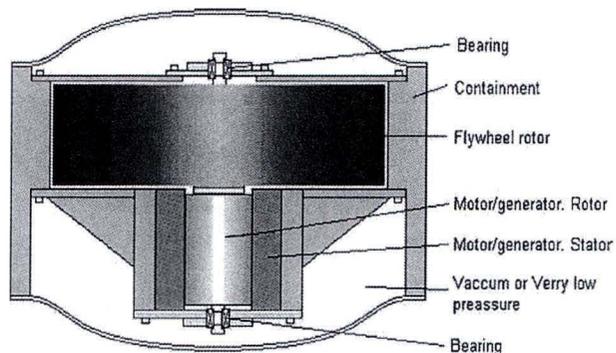


Figure 55. Structure de base d'une roue d'inertie. Source : Bolund

Les roues d'inertie (« flywheels ») emmagasinent l'énergie inertielle de rotation (Bolund, 2005). Cette quantité dépend de la masse, de la forme et de la vitesse de rotation du corps. Le corps, usuellement une roue ou un cylindre, est placé à l'intérieur d'un récipient sous vide pour éliminer les pertes par frottement de l'air et suspendu par des roulements pour une opération stable. L'énergie cinétique est transférée dedans et dehors de la roue d'inertie par une machine électrique qui peut fonctionner soit en moteur ou en générateur. Lorsqu'elle opère en tant que moteur, l'énergie électrique fournie à l'enroulement du stator est convertie en couple et appliquée sur le corps en rotation qui forme le rotor, lequel tourne plus vite et gagne de l'énergie cinétique. En mode générateur, l'énergie cinétique emmagasinée dans le rotor/corps applique un couple, qui est converti par le stator en énergie électrique. En plus de la roue d'inertie et de la machine électrique de conversion, on a besoin de l'électronique de puissance pour contrôler fréquence, voltage, vitesse d'entrée et de sortie, etc. (Figures 55 et 56).

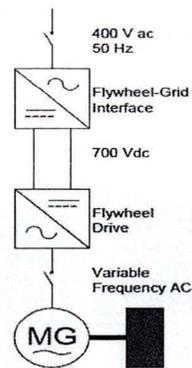


Figure 56. Redresseur/inverseur de la roue d'inertie « PowerStore »

L'énergie cinétique stockée dans une roue d'inertie est proportionnelle à la masse et au carré de la vitesse de rotation du corps interne selon l'équation suivante :

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2$$

Où

$E_k$  = énergie cinétique emmagasinée dans la roue d'inertie

$I$  = moment d'inertie. Pour tout objet, le moment d'inertie est fonction de sa forme et de sa masse

$\omega$  = vitesse angulaire de la roue d'inertie

L'équation antérieure montre que la façon la plus efficace d'augmenter l'énergie cinétique est d'accélérer la roue d'inertie, car celle-ci est proportionnelle au carré de la vitesse, mais seulement linéairement proportionnelle à la masse.

Selon Bolund (2005), les propriétés des roues d'inertie qui les rendent concurrentielles par rapport aux autres technologies de stockage sont :

- Haute densité de puissance
- Haute densité d'énergie.

- Leur vie utile est presque indépendante de la profondeur des cycles de charge et de décharge, qu'ils soient superficiels ou profonds.
- L'état de charge est facilement calculé, en mesurant la vitesse de rotation.
- Aucun entretien périodique n'est nécessaire.
- Le temps de recharge est très court.
- Leur dimensionnement (grâce à sa modularité) et leur localisation sont très flexibles.
- Leur impact sur l'environnement est très faible.

Frye (2006) soutient que dans le climat antarctique, les roues d'inertie ont les avantages suivants sur les SSB:

- Leur plus haute capacité de stockage par unité de poids et de volume, qui diminue les coûts d'expédition vers l'Antarctique.
- Pendant leur opération, les roues d'inertie doivent être conservées à des températures froides tandis que les batteries doivent être conservées à des températures normales.
- Leur plus long cycle de vie qui diminue la fréquence de remplacement par rapport à celle d'un SSB et ainsi la fréquence d'expédition vers et depuis l'Antarctique d'équipement lourd (batteries de rechange/batteries à la fin de sa vie utile).

Une série d'améliorations technologiques récentes augmentent les avantages comparatifs des roues d'inertie : l'utilisation de corps élaborés de matériaux composites permet des vitesses de rotation plus hautes et résulte en une densité de puissance supérieure à celle des batteries chimiques. Les roulements magnétiques offrent une friction très basse, parce ils lèvent la roue d'inertie et éliminent le contact entre l'essieu et les roulements. Cela résulte en de faibles pertes internes au cours du stockage à long terme. Ces roulements

magnétiques n'ont aucune pièce mobile, ils subissent peu d'usures et ne nécessitent aucune lubrification. Avec le progrès de l'électronique de puissance, il est possible de faire fonctionner une roue d'inertie à hautes densités de puissance/énergie, avec des unités électroniques comparables en taille à la roue elle-même. Le besoin de l'électronique de puissance vient du fait que la roue d'inertie diminue sa vitesse de rotation lorsque l'énergie cinétique est consommée et ainsi la fréquence de sortie de l'électricité générée diminue. On utilise un redresseur et un inverseur pour obtenir une sortie d'électricité à voltage et fréquence constantes (Figure 56, Bolund, 2005).

L'installation par la compagnie australienne Powercorp d'une roue d'inertie de 500 kW, 415V, dans le système isolé éolien-diesel à l'île « Flores » de l'Archipel portugais des Açores, a augmenté la qualité de la puissance générée par un meilleur amortissement et une stabilisation plus rapide des fluctuations dans la fréquence électrique du réseau de l'île lors de variations de la charge (Hamsic, 2006).

### 3.1.14 Stockage par énergie hydraulique

Il y a deux types principaux de stockage hydraulique, selon la substance, de l'eau ou quelque type de gaz, utilisée comme moyen pour emmagasiner l'énergie potentielle ou comme haute pression (Hunter, 1994).

- Pour emmagasiner l'énergie éolienne excédante comme énergie potentielle hydrostatique, on utilise une pompe/turbine électrique pour pomper l'eau à un niveau supérieur, où elle peut être stockée sans pertes et dans la quantité souhaitée. Lorsqu'on veut récupérer cette énergie, le sens du débit est inversé et l'énergie potentielle de l'eau est transformée en énergie cinétique (rotation) par l'unité pompe/turbine fonctionnant cette fois-ci comme turbine. L'idée est simple, mais le terrain doit avoir le relief adéquat pour fournir la différence de hauteur et la plupart des installations conventionnelles d'hydraulique pompée ne peuvent pas passer rapidement du mode stockage d'énergie (pompage) au mode génération d'énergie (turbine) (Alaska Energy Authority, 2009).
- Pour emmagasiner l'énergie excédentaire en utilisant de la haute pression, on utilise un réservoir avec une membrane flexible le divisant en deux et avec un des deux volumes rempli d'azote gazeux comprimé. Lorsque le système reçoit un excédent d'énergie éolienne, on utilise une unité pompe/moteur électrique en mode de pompage pour introduire dans l'autre volume de l'huile hydraulique à haute pression, en comprimant ainsi l'azote gazeux et en stockant l'énergie comme une haute pression. Pour récupérer cette énergie, l'unité doit passer en mode turbine/génératrice électrique.

### 3.1.15 Stockage par air comprimé

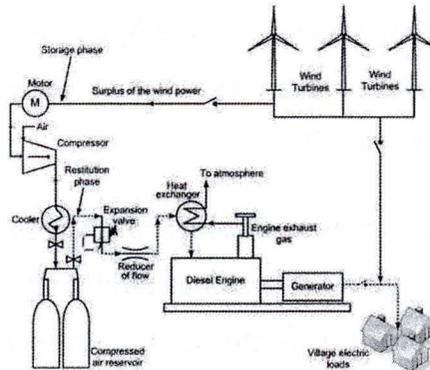


Figure 57. Système éolien-diesel avec stockage à air comprimé. Source : H. Ibrahim

Une autre forme de stockage utilise l'air comprimé directement ou comme suralimentation des moteurs diesel. L'air est comprimé pendant les périodes de surplus d'énergie renouvelable et lorsqu'on a besoin d'énergie complémentaire il est passé à travers une turbine/génératrice qui produit de l'électricité. Le système doit disposer d'un réservoir (caverne, ancienne mine, récipient fermé) d'étanchéité et taille suffisante à pouvoir emmagasiner un volume d'air comprimé à pression suffisante pour accumuler la quantité souhaitée d'énergie (Alaska Energy Authority, 2009).

L'air comprimé peut aussi suralimenter la prise d'air du moteur diesel d'un genset, qui verra ses caractéristiques de combustion améliorées (Figure 57). La suralimentation consiste à augmenter la pression de l'air qui entre dans la chambre de combustion du moteur, afin d'augmenter la puissance spécifique ou puissance par volume de combustion. Le générateur diesel fonctionne pendant les périodes de vents faibles, lorsque l'énergie du vent n'est pas suffisante pour alimenter la charge. La suralimentation permet aussi que le genset puisse opérer à 25 %-30 % en dessous de sa puissance nominale, au lieu du 50 % normalement exigé par le fabricant (Ibrahim, 2009).

## 3.2 EXEMPLES DE SYSTÈMES ÉOLIEN-DIESEL EN CLIMAT FROID

Quatre exemples des systèmes hybrides éolien-diesel installés en climat polaire seront présentés dans les sections suivantes. Les sources d'informations sont très diverses, des articles scientifiques à des présentations des entreprises qu'ont fait des propositions ou ont participé à la conception et l'installation de ces systèmes. Il sera remarqué aussi que les dates d'installation des systèmes opérationnels sont toutes récentes, la plus ancienne étant de 2002. Les analyses ont été concentrées sur les aspects de ces systèmes qui sont d'intérêt pour le cas de la base Jubany.

### 3.2.1 Système à la station antarctique Mawson

Les données principales du système à Mawson sont :

- Vitesse moyenne annuelle du vent à 10 m : 11,2 m/sec (Tin, 2009)
- Charge électrique moyenne avant l'installation des éoliennes : de 180 à 250 kW, et de 250 à 350 kW supplémentaires pour le chauffage, fournis en grande partie par cogénération (Waterhouse, 2009).

La station polaire australienne Mawson, la plus ancienne station habitée en permanence sur le continent antarctique, a été alimentée par des groupes électrogènes diesel depuis sa création en 1954, jusqu'à mars 2003, quand deux turbines éoliennes Enercon E-30 de 300 kW chacune ont commencé à opérer en parallèle avec au moins une des quatre génératrices diesel de 128 kW. Pendant les premiers six ans d'opération, ce système hybride a atteint une pénétration éolienne moyenne annuelle de 35 % et des pénétrations instantanées de 90 % (Tin, 2009). D'après les niveaux de pénétration instantanée et moyenne et du fait qu'au moins un genseit opère en tout temps il s'agit, selon la classification de Drouilhet, d'un système à pénétration moyenne.

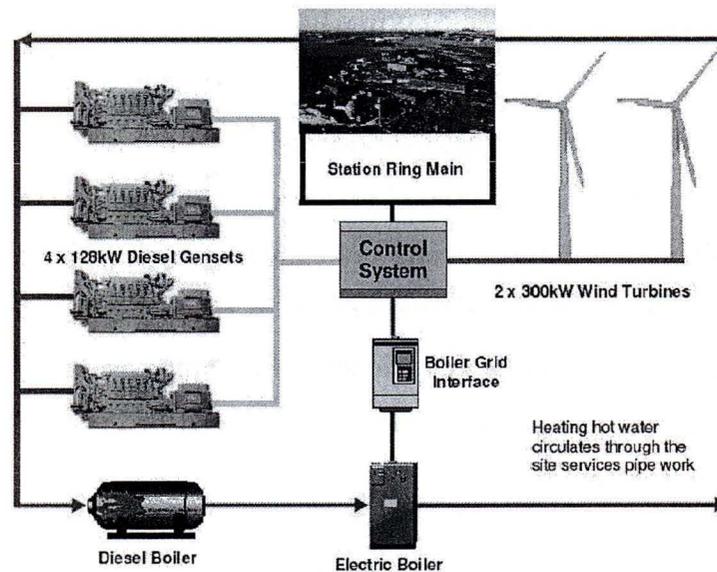


Figure 58. Architecture du système éolien-diesel à Mawson. Source : Waterhouse

Les deux turbines E-30 ne possèdent pas de boîte de vitesses et ont été modifiées pour opérer en climat froid : l'acier de toute la structure, les joints de caoutchouc et graisses adaptées pour basses températures, tour de 34 m plus courte que la normale, nacelle thermiquement isolée et chauffée, protections contre la neige (Tin, 2009; Waterhouse, 2009). Une des modifications les plus importantes a été le changement du seuil pour l'arrêt de la turbine à des vitesses du vent supérieures à 25 m/s. Pour profiter de l'énergie des vents plus forts que cette vitesse, on a élevé la valeur du seuil d'arrêt et on a programmé les turbines pour extraire plus de puissance à vents forts par le contrôle du courant d'excitation et du pas des pales. Le contrôle du rotor peut, dans une certaine mesure, augmenter ou diminuer la sortie d'énergie des turbines par la variation des pas des pales et de la vitesse du rotor (Waterhouse, 2009).

La Figure 58 ne représente pas seulement les connexions électriques, mais le flux d'énergie thermique dans le système (lignes rouges). Avant l'installation des éoliennes à Mawson, on récupérait par cogénération la chaleur résiduelle des génératrices diesel pour l'utiliser dans le système centralisé de chauffage par circulation d'eau de la station. Pour compenser la réduction de cette chaleur résiduelle après l'introduction de l'énergie

éolienne, on a installé une chaudière électrique d'eau qui reçoit l'énergie en excès des turbines et l'utilise pour chauffer l'eau. En périodes d'absence de vents, si la chaleur en provenance des génératrices n'est pas suffisante, une chaudière à diesel apporte la chaleur manquante au système de chauffage de la station.

Dans une journée normale, le système de contrôle maximise l'utilisation de la puissance éolienne, mais maintient en marche au moins un genset comme réserve tournante et pour préserver la stabilité électrique. Si la pénétration instantanée des turbines dépasse la capacité du genset de contrôler le voltage et la fréquence du réseau, l'excès d'énergie est consommé par la chaudière électrique d'eau qui se comporte comme une charge de dissipation contrôlée par l'interface réseau-chaudière (« Boiler grid interface »). Même si le réseau à Mawson n'a pas de système de stockage électrique, les 20 mètres cubes d'eau du circuit de chauffage servent comme un stockage d'énergie à utilisation finale (Australian Antarctic Division [s.d.], « Mawson wind-diesel »).

La chaudière électrique d'eau contrôlée par l'interface réseau-chaudière (IRC) sert comme charge de dissipation, mais aussi elle sert comme réserve tournante du côté de la demande, du fait que lors d'une baisse soudaine de la production éolienne, sa réponse pour débrancher leurs éléments résistifs et diminuer la charge est assez rapide, de l'ordre des millisecondes. Ainsi, la chaudière électrique et l'IRC sont un deuxième mécanisme de stabilité électrique. Si même avec le délestage de la chaudière électrique et des autres charges, les éoliennes plus un genset ne produisent pas assez d'énergie pour la charge de la station, le système de contrôle commande le démarrage d'un deuxième genset pour couvrir la charge. Pourtant, les gensets actuels de Mawson requièrent environ 30 secondes pour se mettre en ligne dans le réseau local. Si avant cette période le déficit énergétique n'est pas rempli ni par le délestage de charges, ni par le retour de la production éolienne, le réseau tombe en panne complète. Cette situation se passe à Mawson assez fréquemment pour nécessiter une amélioration du système.

Une condition météorologique qui provoque souvent ce type de pannes est une période de vents turbulents qui provoque de l'instabilité dans la production électrique des

éoliennes. Pendant ces périodes de turbulence, la solution temporaire est d'augmenter la réserve tournante par l'opération simultanée de deux génératrices, mais cela diminue aussi les économies de carburant. Des solutions plus efficaces sont d'accélérer et d'augmenter la réserve tournante du système hybride au moyen de gensets à démarrage rapide, gensets à faible charge ou de roues d'inertie (Waterhouse, 2009).

### 3.2.2 Système à l'Île Ross, Antarctique

Les données principales du système à l'Île Ross sont :

- Vitesse moyenne du vent à « Crater Hill » à 20 m : 8 m/sec. Les éoliennes sont installées à cet endroit (Baring-Gould, 2005).
- Charge électrique moyenne à la base néo-zélandaise Scott : 150 kW. Charge électrique moyenne à la station américaine McMurdo : 1,6 MW (Cahill, 2009).

La station américaine McMurdo (autour de 1250 personnes) et la base néo-zélandaise Scott (jusqu'à 100 personnes) se trouvent à une distance de 3 km sur la côte sud de l'île Ross, dans l'Antarctique. La partie diesel du système hybride à McMurdo est composée de six génératrices de la marque Caterpillar : quatre gensets modèle 3516B pour la charge de base et deux gensets modèle 3512B pour satisfaire la charge pic Baring-Gould (2005). En 2006, il y avait trois génératrices diesel en exploitation à la base Scott (Frye, 2006). Les trois génératrices étaient Caterpillar, du modèle 3406 DI-T série B d'une puissance nominale de 225 kW électriques et 110 kW thermiques par cogénération du système de refroidissement. Il y avait aussi deux chaudières diesel de 98 kW, chaudières utilisées si la chaleur résiduelle capturée du groupe électrogène actif était insuffisante pour répondre à la demande thermique de la base Scott, demande surtout composée du chauffage d'eau pour divers usages. Selon Frye (2006), ces gensets finissaient leurs vies utiles à 2011.

Ainsi, les trois genseis mentionnés à la base Scott par Cahill dans son schéma de 2009 sont peut-être des modèles différents, probablement plus petits.

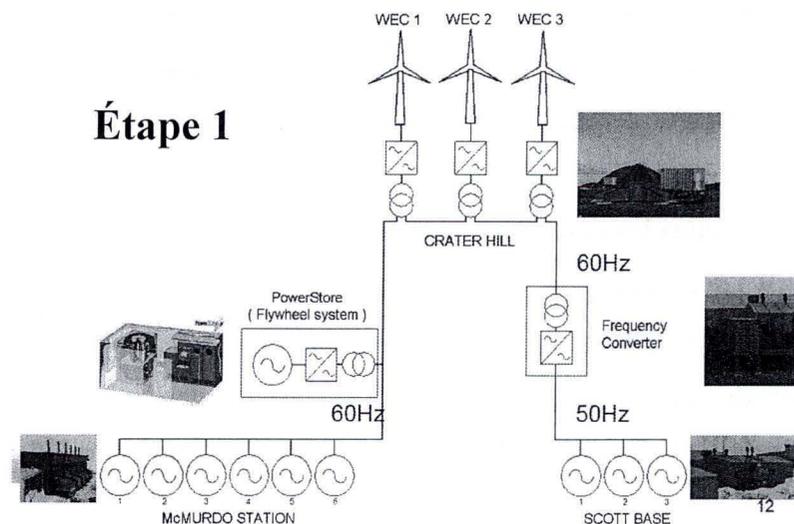


Figure 59. Première étape du système hybride à l'île Ross. Source : Cahill, 2009

Par rapport à la cogénération à McMurdo, Baring-Gould faisait état en 2005 d'un système de récupération de la chaleur résiduelle du système de refroidissement des génératrices qui servait à faire le chauffage des locaux. On avait l'intention d'implanter un système de récupération de la chaleur résiduelle des gaz d'échappement pour faire la désalinisation de l'eau de mer et chauffer autres locaux.

Peut-être en raison de sa très récente installation, l'information publiée sur ce système hybride est limitée. Une première étape de l'installation d'un système hybride, réalisée pendant l'été antarctique 2009/2010, a inclus l'installation du câblage pour brancher les deux réseaux, d'un convertisseur de fréquence de 300 kW, nécessaire en raison des fréquences différentes des réseaux à chaque base (60 et 50 Hz), d'une roue d'inertie de 500 kW et de 3 turbines E-30 de la marque Enercon de 330 kW similaires à celles de la station Mawson (Figure 59). La pénétration renouvelable atteinte à cette première étape est de 61 % de pénétration instantanée et de 22 % de pénétration moyenne. C'est un niveau de pénétration basse. Le modèle de

turbines éoliennes est le même que celui utilisé à Mawson, mais elles sont installées à une hauteur de 41 m, tandis qu'à la station australienne elles se trouvent à 34 m.

D'après Cahill (2009), les étés 2010 et 2011 verront l'installation de l'étape deux du système hybride : plus de turbines E-30 jusqu'à atteindre un total de 16 unités (5280 kW de puissance éolienne), plus de roues d'inertie jusqu'à atteindre un total de 5 (2500 kW du stockage) et un nombre de charges de chauffage électrique distribuées dans les deux bases pour une charge totale encore à déterminer (de 500 à 1000 kW) qui probablement seront utilisées pour compenser la chaleur résiduelle non générée par la réduction du temps d'opération des génératrices diesel et comme charges de dissipation pour l'énergie en excès des éoliennes. Ainsi, le système hybride à l'île Ross devrait être en 2011 le plus puissant dans l'Antarctique.

### **3.2.3 Système proposé pour la base antarctique Eduardo Frei**

Les données principales du système à la base Eduardo Frei sont :

- Vitesse moyenne du vent à l'aéroport à 10 m : 8,7 m/sec (Jargstorf [s.d.])
- Charge électrique pic à l'aéroport : ~90 kW. Charge pic au village « Las Estrellas » ~400 kW. (Jargstorf [s.d.]). Les deux réseaux ne sont pas interconnectés à la date de la présentation de Jargstorf (autour de 2009).

La base antarctique Présidente Eduardo Frei Montalva, qui appartient à la République de Chile, se trouve dans la partie ouest de l'île King George, à quelque 45 minutes par bateau de la Base Jubany. Selon l'information de Jargstorf, la base possède deux petites centrales électriques indépendantes, une à l'aéroport, avec deux génératrices diesel de 200 kW chacune et l'autre au village « Las Estrellas » (Les Étoiles, en espagnol) avec deux génératrices de 473 kW chacune.

Le problème de surdimensionnement des génératrices diesel qu'on a trouvé à Jubany (Corral, 2009) a été constaté par Jargstorf dans les deux centrales de la base « Eduardo Frei ». Les génératrices opèrent la majorité du temps à moins de 30 % de leur charge parce qu'elles ont été dimensionnées pour couvrir les charges maximales. Les faibles taux d'utilisation des génératrices ne favorisent pas les économies d'énergie parce qu'on doit éviter de diminuer davantage leurs charges, source d'une maintenance coûteuse et de réduction de la vie utile des gensets (Jargstorf [s.d.]).

Aucune génératrice des deux centrales n'utilise la cogénération. Ainsi, elles convertissent en électricité uniquement 20 % de l'énergie contenue dans le carburant qu'elles consomment (Jargstorf [s.d.]).

La proposition conceptuelle de Jargstorf pour la base Eduardo Frei comprend trois mesures :

- L'interconnexion des centrales à l'aéroport et au village via un câble souterrain pour augmenter la sécurité du réseau électrique en cas d'accidents, et pouvoir utiliser une seule génératrice diesel pour alimenter les deux charges.
- Installer des systèmes de cogénération dans chacune des deux centrales pour a) réduire ou éliminer le 30 % du pourcentage total d'électricité générée qu'on utilise pour le chauffage des locaux; b) maintenir le chauffage des génératrices en tout temps et c) disposer d'un réservoir thermique dans l'eau des deux circuits pour appliquer des charges de dissipation de la future énergie éolienne en excès.
- Installer un parc éolien de trois turbines de 330 kW chacune branchée au réseau aéroport-village, et l'équipement électrique nécessaire pour conserver la stabilité électrique.

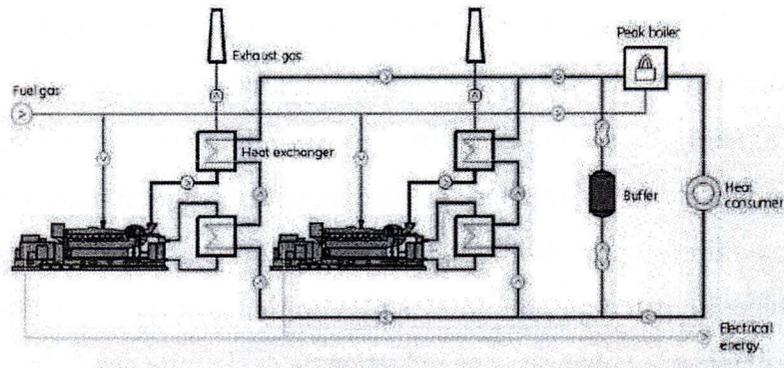


Figure 60. Proposition de cogénération pour les gensets à la base Frei

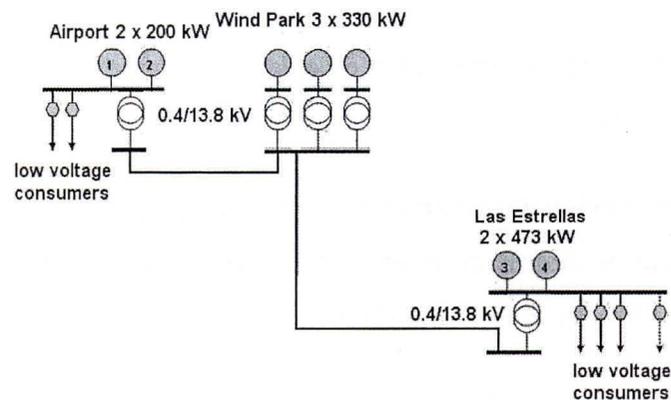


Figure 61. Proposition du réseau hybride pour la base Frei. Source : Jargstorf

Le schéma conceptuel de la Figure 60 montre des échangeurs de chaleur pour le système de refroidissement et pour la sortie des gaz d'échappement branchés en série pour chaque genset et ces sorties branchées en parallèle. Il y a aussi une chaudière à diesel pour la charge thermique maximale et un réservoir thermique, avant les points de consommation. La chaudière électrique avec les charges de dissipation de l'énergie éolienne en excès n'est pas montrée. Aussi, il est à noter qu'actuellement les systèmes de récupération des gaz d'échappement ne sont pas recommandés pour gensets de moins de 400 kW, comme ceux à l'aéroport de la base Eduardo Frei, de 200 kW (Alaska Energy Authority, 2009).

Le schéma unifilaire du système hybride d'électrification de la base Eduardo Frei (Figure 61) ne montre pas les équipements électriques nécessaires à la stabilité de fréquence et voltage du réseau : interrupteurs de synchronisation des deux centrales, stockage électrique, charges de dissipation, compensateur synchrone si nécessaire. Les caractéristiques souhaitables des turbines éoliennes décrites par Jargstorf pour ce projet se rassemblent à celles des Enercon E-30 : 330 kW, sans boîte d'engrenages, vitesse du rotor et pas des pales variable, génératrice synchrone.

### **3.2.4 Système à Wales, Alaska**

Les données principales du système à Wales sont :

- Vitesse moyenne du vent (à hauteur inconnue) : 8,0 m/sec (Rozell, 2004)
- Charge électrique moyenne : 60 kW, en plus des charges importantes de chauffage d'eau et de locaux (Baring-Gould, 2007). La Figure 62 montre une charge primaire de 40 kW jusqu'à 120 kW.

Wales est une communauté d'environ 150 habitants située à l'extrémité ouest de la péninsule de Seward, sur les rives de l'Étroit de Béring, dans l'état américain d'Alaska. Ce système a été conçu à 1995 comme un projet de démonstration de la technologie hybride éolien-diesel par le NREL et autres organismes américains et c'est l'exemple dont le plus d'informations sont disponibles sur sa conception. C'est aussi le plus ancien des exemples mentionnés, avec une mise en service finale en mars 2002. Le système à Wales est complexe, avec nombre de composants qui fournissent de la puissance active et qui ont besoin d'un contrôle assez développé pour pouvoir interagir entre eux. Entre autres pour cette raison le système à Wales a eu dès le début des difficultés techniques et opérationnelles qui ont résulté en nombreuses pannes, parfois de longue durée. Aussi, un peu ironiquement pour un projet de démonstration, on n'a pas mesuré de façon intensive son comportement et

donc les données sont limitées pour tous les modes de fonctionnement (Baring-Gould, 2007).

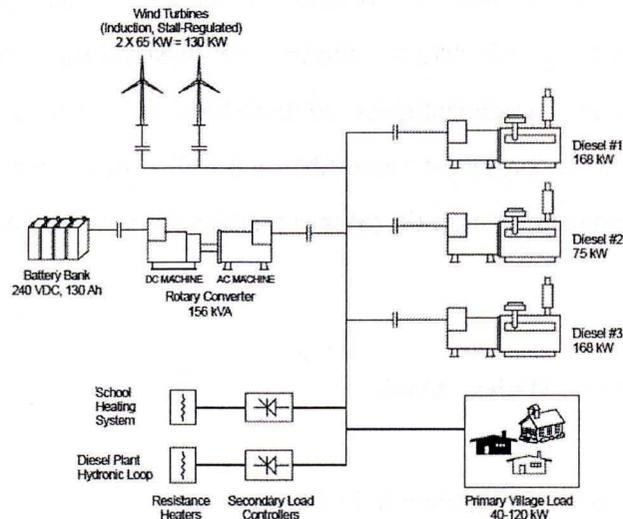


Figure 62. Schéma du système hybride à Wales. Source : Drouilhet

Dans le système éolien-diesel à Wales, les composants suivants interagissent pour fournir d'électricité à la communauté (Baring-Gould, 2007; Drouilhet, 2001) :

- Trois génératrices diesel d'une puissance combinée de 411 kW : deux Cummins LTA10 de 168 kW et un Allis-Chalmers 3500 de 75 kW.
- Deux turbines éoliennes AOC 15/50 de 65 kW chacune, à décrochage aérodynamique, avec génératrices à induction qui ont besoin de puissance réactive (vars) pour générer leurs champs magnétiques tournants.
- Un banc de batteries à nickel-cadmium de 130-Ah, qui peut fournir deux tiers de la charge primaire moyenne de la communauté pendant 15 minutes, tel que recommandé par (Drouilhet, 1997; Beyer, 1995).
- Un convertisseur rotatif de puissance, conçu et bâti par le NREL, qui sert comme l'interface entre le bus de 480 V C.A. et le banc de batteries, et qui est composé par deux machines couplées :

- une machine à C.A. qui peut opérer comme moteur/génératrice synchrone ou comme compensateur synchrone. En l'absence des gensets, son régulateur de tension contrôle le voltage du système, au moyen du maintien de l'équilibre de la puissance réactive.
- Une machine à D.C. qui peut opérer comme moteur et comme chargeur du banc de batteries. En l'absence de gensets, son contrôle du courant du flux, qui règle le transfert d'énergie vers ou à partir du banc de batteries maintient la fréquence du système, c'est-à-dire qu'elle est réglée par le maintien de l'équilibre de la puissance active.
- Des charges secondaires de dissipation : des systèmes électriques de chauffage à l'école de la communauté et dans le circuit de refroidissement/chauffage des génératrices diesel.
- Le système de contrôle basé sur un API (en anglais « PLC ») standard

La cogénération du système à Wales (Figure°63) est organisée de la façon suivante : les sorties des systèmes de refroidissement des trois génératrices diesel et d'une chaudière électrique sont connectées en parallèle. Cette chaudière électrique est une des deux charges de dissipation mentionnées, et lorsque les turbines éoliennes opèrent et les génératrices diesel sont arrêtées et ne produisent pas assez de chaleur pour rester prêtes à démarrer rapidement, celle-ci remplace la chaleur manquante pour maintenir chauffées les génératrices et le bâtiment de la centrale à travers l'échangeur thermique « Hydronic Loop » avec de l'électricité en provenance des éoliennes. Lorsque les éoliennes sont arrêtées par manque du vent et les génératrices diesel opèrent, il peut y avoir un excès d'énergie thermique résiduelle. Dans cette situation la sortie des systèmes de refroidissement des génératrices diesel peut passer à travers de radiateurs pour dissiper la chaleur en excès et éviter le surchauffage des gensets.

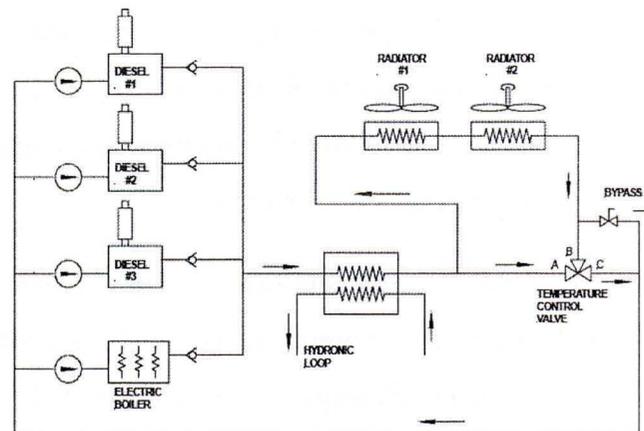


Figure 63. Schéma de cogénération/refroidissement à Wales. Source : Drouilhet

La façon la plus simple d'expliquer le fonctionnement complexe du système hybride à Wales est de présenter les modes d'opération du système de contrôle. Il y a cinq : Mode Manuel, Mode 0, Mode 1, Mode 2 et Mode 3. Chacun de ces modes nécessite la disponibilité d'un ensemble particulier de composants du système (voire le Tableau°10).

Le fait de structurer le système de contrôle par modes de fonctionnement différents selon la disponibilité des composants le rend plus robuste et tolérant aux pannes. Le Mode 3 est le mode de fonctionnement normal et prévu pour le système. Ce mode nécessite la disponibilité de tous les composants du système. Si, par exemple, il y a une panne du banc de batteries ou de la machine à C.D., la fonction du stockage devient non disponible. Avec un seul algorithme rigide du contrôle qui assumerait la disponibilité en permanence du stockage d'énergie, le système de contrôle au complet ne fonctionnerait plus et le système hybride serait réduit à l'opération manuelle des génératrices diesel jusqu'à au dépannage de la fonction du stockage. Avec les modes de fonctionnement différents, le système simplement passe au Mode 2 et continue à opérer comme un système éolien-diesel sans stockage. Ainsi, la défaillance d'un composant particulier ne rend pas nécessairement le système inopérant (Drouilhet, 2002).

Tableau 10. Modes du système de contrôle à Wales

Mode	Description
Manuel	Mode en génération diesel. L'opérateur contrôle manuellement les génératrices diesel depuis son interface. Le système tombe automatiquement dans ce mode lorsque le bus se trouve sans énergie
0	Mode en génération diesel. Au moins une génératrice diesel fonctionne en continu. Les éoliennes ne sont pas disponibles. Le système de contrôle dispache automatiquement les génératrices pour couvrir la charge.
1	Mode en pénétration éolienne moyenne. Au moins une génératrice diesel fonctionne en continu. Les éoliennes opèrent s'il y a du vent. Les génératrices contrôlent la fréquence et le voltage du système. La charge de dissipation maintient la charge minimale des génératrices.
2	Mode en haute pénétration sans stockage. Les génératrices diesel fonctionnent seulement si les éoliennes ne peuvent pas couvrir la charge avec une marge suffisante. Lorsque les génératrices fonctionnent, celles-ci contrôlent la fréquence et le voltage du système, et la charge de dissipation maintient la charge moyenne minimale des génératrices. S'il n'y a pas besoin de puissance réactive, la machine C.A. est arrêtée pour éliminer des pertes parasites. Lorsque les génératrices diesel ne fonctionnent pas, la machine C.A. contrôle le voltage du système, et la charge de dissipation contrôle sa fréquence.
3	Mode en haute pénétration avec stockage. Identique au mode 2, sauf que : Lorsque les génératrices diesel fonctionnent, on utilise leur énergie en excès pour charger le banc de batteries. Si la charge demandée surpasse pendant un court temps la capacité combinée des éoliennes et génératrices en ligne, le banc de batteries fournit l'énergie manquante pour éviter de démarrer une autre génératrice. Les génératrices contrôlent le voltage et la fréquence du système. Lorsque les génératrices diesel ne fonctionnent pas, l'énergie éolienne en excès est d'abord utilisée pour charger le banc de batteries. L'énergie éolienne additionnelle est envoyée vers la charge de dissipation. Si l'énergie éolienne est insuffisante pendant une courte période pour couvrir la charge, le banc de batteries fournit l'énergie manquante pour éviter de démarrer une génératrice diesel. La machine C.A. contrôle le voltage du système. La machine C.D. contrôle la fréquence du système. Si la charge de dissipation devient nécessaire, c'est elle qui contrôle la fréquence du système.

Source : Drouilhet, 2002

### 3.2.5 Similarités et différences pour les systèmes analysés

Les quatre exemples d'installations éolien-diesel présentées précédemment soulèvent les points suivants :

- Tous les exemples ont été conçus comme des systèmes éolien-diesel à haute pénétration : pourtant les données de la pénétration moyenne des trois exemples opérationnels (à Mawson, à l'île Ross, à Wales) indiquent qu'ils se comportent comme des systèmes à basse ou à moyenne pénétration.
- Les quatre exemples préconisent la cogénération. La récupération de la chaleur résiduelle du système de refroidissement se fait déjà à Mawson, à l'île Ross et à Wales, et la récupération de la chaleur résiduelle des gaz d'échappement est en train d'être installée ou a été proposée.
- Différences dans la cogénération : Dans tous les exemples, sauf à Wales, on utilise ou l'on propose une chaudière à diesel extra connectée avec les circuits de refroidissement des génératrices. La chaudière extra sert comme auxiliaire pendant les périodes de haute consommation ou de basse génération. On observe qu'à Wales il y a seulement une chaudière électrique en parallèle avec les circuits de refroidissement des diesels.
- Différences dans le stockage d'énergie : L'installation du NREL à Wales n'a qu'un stockage d'énergie dans un banc de batteries de 240 VCC et 130 Ah, qui est capable de fournir deux tiers de la charge moyenne primaire pendant 15 minutes. Le système à Mawson n'a pas de stockage, le système à l'Île Ross utilise les roues d'inertie comme système de stockage d'énergie. Il n'y a pas d'information sur le possible stockage proposé pour la base Eduardo Frei.
- Différences dans les composants : Seulement le système hybride à Wales utilise un compensateur synchrone, peut-être parce que les turbines éoliennes de ce système ont des génératrices asynchrones à induction, qui nécessitent de la puissance

réactive (vars) pour générer leurs champs magnétiques tournants. Les trois exemples restants utilisent ou proposent des turbines éoliennes avec génératrices synchrones, convertisseurs CA à CC et sans boîte d'engrenages.



## **CHAPITRE 4**

### **CONCEPTION ET MODÉLISATIONS**

Ce chapitre porte d'abord sur les recommandations et la méthodologie proposées par la série des spécifications techniques TS 62257 pour réaliser la conception et le dimensionnement d'un système hybride éolien-diesel. Dans ce chapitre sont indiquées les sections du mémoire où se trouvent les différentes parties de la proposition de conception d'un système hybride éolien-diesel pour la base Jubany, proposition rédigée selon les lignes directrices de la norme TS 62257-4.

Les recommandations et la méthodologie de la série TS 62257 sont utilisées pour prendre les premières décisions de la conception d'un système hybride pour Jubany : choisir le type de sous-système de production et dessiner un schéma fonctionnel de l'installation proposée.

La deuxième partie du chapitre traite des modélisations faites avec le logiciel Homer du : a) système électrique actuel, qui comporte la centrale et la charge; b) système électrique actuel avec cogénération thermique pour remplacer une chaudière à diesel qui fournit le chauffage du principal logement de la base, la « casa principal »; c) système hybride éolien-diesel pour deux types de turbines, la Excel-S de 10 kW de la compagnie Bergey et la Northwind 100 de 100 kW de la compagnie Northern Power. Les sous-sections correspondantes expliquent les hypothèses d'entrée et les résultats des modélisations Homer réalisées pour évaluer la performance des diverses architectures proposées.

La section finale de ce chapitre présente une évaluation préliminaire de la rentabilité de deux architectures de systèmes hybrides proposés pour la base Jubany.

#### 4.1 CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT SELON LA NORME TS 62257

Dans la série de spécifications techniques TS 62257, la norme spécifique qui traite de la conception et du dimensionnement d'un système isolé hybride d'électrification est la TS 62257-4. Le but de la norme est de clarifier le processus d'obtention et de présentation des informations nécessaires pour la conception et le dimensionnement d'un système hybride isolé, au moyen des critères techniques et économiques normalisés et transparents.

Même si chaque développeur peut choisir sa propre méthode de conception, l'avantage de suivre le cadre proposé par la norme est qu'il permet de comparer facilement les différentes options techniques-économiques proposées pour satisfaire le système requis par l'utilisateur. La norme TS 62257-4 prévoit que :

- Les participants dans le processus de conception et dimensionnement sont :
  - L'utilisateur : il exprime ses besoins d'électricité.
  - Le développeur du projet : il définit les conditions à satisfaire.
  - Le consultant d'ingénierie : il assiste le développeur dans la définition du projet et l'examen des propositions de conception.
  - L'exécutant du projet : il établit la conception et le dimensionnement appropriés.
- Les éléments essentiels pour comparer les différentes options de conception sont :
  - toutes les hypothèses utilisées pour préparer les options de conception,
  - les spécifications techniques et les pronostics de production d'énergie du processus de dimensionnement,
  - les dispositions prises pour réduire le risque de pannes d'énergie,
  - les coûts actualisés de l'équipement proposé,

- les évidences fournies par le concepteur de la crédibilité des calculs de conception,
- l'identification de la classe du système selon les types des systèmes isolés hybrides définis dans la TS 62257-2 (voir le Tableau 12),
- l'expérience du concepteur dans le domaine, et
- d'autres critères spécifiques du projet, par exemple *l'impact environnemental*.

C'est extrêmement important que les quatre participants dans le processus de dimensionnement accordent clairement les engagements contractuels sur le service et la qualité de l'énergie électrique souhaitée. Un problème que se présente souvent dans les systèmes hybrides isolés, est qu'après une certaine période d'utilisation, la demande électrique des utilisateurs augmente et le réseau commence à avoir des problèmes d'insuffisance de la puissance/énergie et d'une baisse de la qualité de l'électricité fournie.

#### **4.1.1 Parties à considérer dans la proposition de conception**

La TS 62257-4 prévoit que la proposition de conception et dimensionnement du système doit contenir les parties suivantes :

- 1) l'engagement général pour fournir la quantité d'énergie requise pour répondre aux besoins de la clientèle (*Chapitre 4*)
- 2) les hypothèses sur le site, la charge électrique et les données des ressources renouvelables (*Chapitres 1 et 4*)
- 3) les descriptions des toutes sortes d'événements climatiques sévères (d'importance essentielle dans le climat froid), et les prévisions prises pour réduire le risque de pannes électriques (*Chapitres 1 et 2*)

- 4) les spécifications techniques des équipements principaux (*Chapitre 1 et 2*)
- 5) les sorties pronostiquées d'énergie des divers générateurs (*Chapitre 4*)
- 6) les coûts avec toutes les hypothèses utilisées par le concepteur (*Chapitres 1 et 4*)
- 7) la documentation pour justifier la conception (*repartie dans l'ensemble du mémoire*)

Tableau 11. Gamme préliminaire des systèmes décentralisés d'électrification

Exigences	Sous-système de production proposé			Système d'électrification		Propositions d'engagements contractuels entre les fournisseurs, les opérateurs et les utilisateurs (si applicable)
	ER	Stockage	Genset	SEI	SEC	
L'utilisateur demande un résultat atteint du processus* sur une période donnée; aucune exigence de qualité	X			T <sub>1</sub> I	S.O.	Engagement d'approvisionnement : <ul style="list-style-type: none"> <li>le résultat du processus est défini pour une période d'un mois, d'une semaine, pour un certain nombre <i>n</i> de mois sur 12, <i>n</i> semaines sur 52 ou <i>n</i> jours sur 365</li> </ul>
Chaque jour, l'utilisateur souhaite disposer de multiples heures d'approvisionnement d'énergie à voltage constant avec quelques appareils en marche simultanément,  et accepte le manque d'énergie en raison des conditions climatiques défavorables	X	X		T <sub>2</sub> I	T <sub>2</sub> C	Engagement d'approvisionnement : <ul style="list-style-type: none"> <li>la quantité de puissance/énergie engagée définie pour une période d'un mois, d'une semaine, pour un certain nombre <i>n</i> de mois sur 12, <i>n</i> semaines sur 52 ou <i>n</i> jours sur 365</li> </ul>
Chaque jour, l'utilisateur souhaite disposer de multiples heures d'approvisionnement d'énergie à voltage constant avec quelques appareils en marche simultanément,  et nécessite de l'énergie même dans des conditions climatiques défavorables,  et accepte d'avoir de l'énergie uniquement pendant des périodes définies de la journée	X		X	T <sub>3</sub> I	T <sub>3</sub> C	Engagement d'approvisionnement : <ul style="list-style-type: none"> <li>La quantité de puissance/énergie engagée définie pour une période d'un mois, d'une semaine, pour un certain nombre <i>n</i> de mois sur 12, <i>n</i> semaines sur 52 ou <i>n</i> jours sur 365.</li> <li>Source (s) du carburant appropriée (s) et capacité de stockage du carburant suffisante pour soutenir l'opération du genset. REMARQUE : les systèmes basés en ER nécessitent moins du carburant que ceux non basés en ER</li> <li>la disponibilité du service est par périodes fixes</li> </ul>
ou, il souhaite avoir de l'énergie 24 h/jour	Mêmes solutions, mais dimensionnement et conditions d'opération différentes					même que ci-dessus, mais la disponibilité du service est par 24 h/jour
ER= Énergie renouvelable; SEI= Système d'électrification individuel; SEC= Système d'électrification collectif						

\*Exemples de processus sont production de glace, pompage d'eau, désalinisation d'eau

NOTE: Dans ce tableau, les pannes possibles du système ne comptent pas comme des jours d'indisponibilité. L'indisponibilité ici est considérée comme liée soit

- à la maintenance du système, ou
- à la révision du générateur (s'il existe), ou
- à des problèmes climatiques (nombre de jours consécutifs sans soleil ou sans vent)

Source : TS 62257-2 ; TS 62257-4

Tableau 12. Typologie des systèmes décentralisés d'électrification

Type de générateur	Classification des systèmes d'électrification	
	Individuel	Collectif
ER seulement, hybride ou non, sans stockage	T <sub>1</sub> I	T <sub>1</sub> C
ER seulement, hybride ou non, avec stockage	T <sub>2</sub> I	T <sub>2</sub> C
ER, hybride ou non, sans stockage + Genset	T <sub>3</sub> I	T <sub>3</sub> C
ER, hybride ou non, avec stockage + Genset	T <sub>4</sub> I	T <sub>4</sub> C
Genset seulement, sans stockage	T <sub>5</sub> I	T <sub>5</sub> C
Genset seulement, avec stockage	T <sub>6</sub> I	T <sub>6</sub> C
Explication de la notation : T <sub>i</sub> I= système individuel, type i; T <sub>j</sub> C= système collectif, type j ER= Énergie renouvelable; hybride signifie avec au moins deux types de technologies (ER + Genset ou deux types ou plus des ERs) Stockage= stockage d'énergie générée par un des générateurs du système et qui peut être reconvertie « sur demande » en électricité à travers le système. Ainsi, le stockage à utilisation finale est exclu.		

Source : TS 62257-2

Dans la suite, seront expliquées les différentes parties de la proposition de conception et dimensionnement du système hybride.

**1) L'engagement général pour l'approvisionnement d'énergie** entre l'exécuteur du projet et l'utilisateur implique que pour dimensionner le sous-système de production, l'exécuteur doit consulter l'utilisateur pour déterminer ses besoins en énergie selon certains indicateurs pertinents. Des exemples de ces indicateurs pertinents sont :

- Le « facteur de satisfaction » de puissance/énergie de l'utilisateur. L'utilisateur recevra une quantité spécifiée de puissance/énergie pendant une période déterminée, selon les exigences que le même utilisateur a exprimées. Le plus proche le service de ce but, le plus haut le « facteur de satisfaction ».
- Par rapport à la qualité de l'électricité, les attentes de l'utilisateur portent sur ses paramètres (stabilité de voltage, de fréquence, facteur de puissance) qui permettent l'usage satisfaisant des appareils électriques.
- La proportion de la couverture électrique prévue en provenance des sources renouvelables, qui se calcule mois à mois comme suit (les deux quantités sont mesurées dans le même point du système) :

$$\frac{\text{Quantité probable d'énergie qu'on peut produire de sources renouvelables}}{\text{Quantité désirée d'énergie à être consommée}}$$

D'autres indicateurs qui peuvent s'avérer pertinents pour l'utilisateur et/ou le reste des participants sont du type financier (si le prix de l'énergie est accessible), écologique (si l'impact écologique négatif du système est bas), etc. (TS 62257-4, 2005-07).

Une des contributions inédites de ce mémoire sont les informations sur la charge et le réseau électriques actuels de la base Jubany, présentées dans le chapitre 1 et les annexes et qu'antérieurement étaient méconnues, même de la DNA. Comme l'on a présenté à la sous-section « Les types de charges électriques à Jubany » du Chapitre 1, la seule information sur les besoins d'énergie à la base provient des mesures de la charge électrique réalisées de mars 2010 à février 2011. C'est en raison de la méconnaissance de la charge à la base Jubany que l'engagement général à l'offre entre la DNA et le concepteur peut, dans ce stade du projet, être accordé uniquement de façon générale. Le Tableau 11 (« Gamme préliminaire des systèmes décentralisés d'électrification »), est utilisé pour combler ce manque d'informations, et définir le niveau d'exigences énergétiques à Jubany.

Jubany, une base scientifique gouvernementale en climat antarctique, présente le niveau le plus haut d'exigences d'énergie. En effet, le Tableau<sup>o</sup>11 démontre que, dans le

cas Jubany, « L'utilisateur souhaite disposer chaque jour de 24 heures/jour d'approvisionnement d'énergie électrique à voltage constant avec quelques appareils en marche simultanément, et nécessite de l'énergie même dans des conditions climatiques défavorables ». Pour la génération de chaleur par des moyens différents que l'électricité, non illustrée dans la série TS 62257, c'est le même niveau d'exigence.

Pour ce niveau d'exigences, le Tableau°11 indique l'implantation de systèmes collectifs d'électrification du type T<sub>4</sub>C, à ER (Énergie renouvelable) plus genset, avec stockage, ou du type T<sub>5</sub>C, système à genset seulement, sans stockage (c'est-à-dire le système actuel à Jubany), présentés dans le Tableau 12. Il est à noter que le but du stockage électrique à Jubany serait de lisser les fluctuations de la puissance dans le système afin d'améliorer la qualité de l'électricité (stockage à court terme) et de réduire les cycles de démarrage/arrêt du genset (stockage de court à moyen terme) et non le but de stocker le surplus de l'énergie renouvelable à long terme (heures à jours), qui d'après la dimension du système à Jubany nécessiterait d'un banc de batteries très volumineux et coûteux, même sans considérer son transport vers l'Antarctique.

**2) La partie « Hypothèses et classifications des entrées »** donne l'encadrement pour évaluer le niveau et la qualité des hypothèses sur : 1) le site, 2) la charge électrique et 3) les données des ressources renouvelables. L'idée principale, ici, est d'évaluer la marge d'incertitude de ces données par leur classification selon des paramètres définis dans la norme TS 62257-4. Cela va permettre, en combinaison avec les hypothèses de conception, d'évaluer la qualité de celle-ci. Les sous-sections qui fournissent la structure de recollection et d'évaluation des facteurs mentionnés et qu'ont été déjà présentées à la section « Évaluation des données d'entrée » du chapitre 1 sont :

- Connaissance du site (sous-section 1.6.1)
- Connaissance de la charge électrique (sous-section 1.6.2)
- Connaissance des ressources renouvelables : vent (sous-section 1.6.3)

**3) La partie « Des mesures pour réduire l'impact des aléas climatiques sur la performance du système »** souligne que pour diminuer l'effet de la variabilité climatique sur le service offert par le système hybride, il est essentiel d'augmenter le niveau des détails de l'information sur les ressources renouvelables et sur la charge électrique. Un système hybride bien conçu a un risque réduit de pannes électriques provoquées par des facteurs climatiques comme la turbulence et le givre.

Jubany se caractérise par un climat froid avec de fortes variations toutes les saisons, ce qui rend la campagne d'évaluation du vent et des conditions météorologiques dans ce type de climat plus critique que pour des sites à climat tempéré parce que le froid et le givre peuvent affecter beaucoup la performance des éoliennes. Le climat froid de Jubany renforce ainsi les recommandations de cette section de la norme.

La recommandation pour améliorer la connaissance de la charge électrique avec l'installation d'un capteur-enregistreur automatique se trouve à la sous-section « Les faiblesses de l'information actuelle sur Jubany » du chapitre 1.

La recommandation pour améliorer la connaissance des rafales et du givre consiste en l'utilisation des anémomètres avec enregistrement automatique et taux élevé d'échantillonnage, par paire chauffée/non chauffée, et possiblement d'un détecteur de point de rosée à faibles températures. Cette recommandation est présentée à la sous-section « Le vent et le givre » du chapitre 2.

La recommandation pour que le système d'acquisition des données soit amélioré pour traiter pas seulement l'information des paramètres électriques de l'installation, mais aussi les informations sur la température et le givre qu'expérimentent les éoliennes et les capteurs comme anémomètres, girouettes, détecteurs du givre, de vibration, etc. se trouve à la section « Types d'information nécessaire pour la gestion du système » de ce même chapitre.

#### **4) Les spécifications techniques des équipements principaux**

Les renseignements sur les équipements existants à la base, les génératrices diesel et le réseau électrique, sont regroupées dans les sous-sections correspondantes de la section « Le système électrique et les autres générateurs d'énergie » au chapitre 1. Les données techniques retenues de ces équipements sont suffisantes pour une description à niveau architectural du système actuel d'électrification. Les informations techniques des éoliennes et de leurs tours se trouvent dans le chapitre 2, dans la sous-section « La turbine, la tour et les fondations ».

**5) Pronostiquer les sorties d'énergie des différents générateurs (dispatchables et non-dispatchables).** Toutes les informations collectées sur les besoins de l'utilisateur, le site, la charge électrique, les ressources renouvelables et les caractéristiques techniques des équipements principaux servent pour concevoir des architectures hybrides et au moyen de modélisations du système sous conception. L'exactitude des prévisions de production énergétique dépend des informations d'entrée, surtout pour les sources renouvelables. Ces prévisions d'énergie produite sont essentielles pour l'évaluation et la sélection de l'architecture du système sous conception. Pour Jubany, il est à noter que les informations d'entrées sont affectées par le froid, mais les effets de celui-ci ne sont pas bien connus.

Les tableaux de la sous-section « Modélisation du système hybride éolien-diesel » de ce chapitre montrent les prévisions de l'énergie produite par les différents générateurs du système, gensets, turbines éoliennes et stockage, pour certaines architectures proposées pour Jubany.

6) Les coûts du projet doivent être présentés de façon claire pour toutes les parties concernées dans les processus de conception. La partie « **Présentation des coûts** » de la proposition de conception recommande que les coûts soient répartis dans quatre domaines :

- coût d'investissement initial (équipements, infrastructure et installation)
- coûts d'exploitation (main d'œuvre et matériaux consommables)
- coûts de remplacement (équipements et installation)
- coûts de récupération et de démantèlement

L'utilisateur du système hybride doit avoir accès au moins aux formats de coûts suivants :

- flux annuels de trésorerie
- le coût total du cycle de vie
- le coût moyen actualisé de l'énergie
- frais annualisés de maintenance, exploitation et remplacement

L'information économique sur Jubany fournie par la DNA est limitée aux dépenses opérationnelles du système d'électrification actuel. En conséquence, parmi les différents formats de coûts proposés à l'utilisateur, seulement ont été présentés les « frais annualisés de maintenance, exploitation et remplacement » avec les hypothèses utilisées à la section « Coûts opérationnels pendant 2010-11 » du chapitre 1. Aussi, avec les résultats de production d'énergie, obtenus à partir de la modélisation sur Homer de la centrale électrique actuelle, il a été estimé le coût opérationnel du kilowattheure pendant cette année à la sous-section « Le coût opérationnel du kilowattheure » du chapitre 1.

7) **La documentation pour garantir la conception.** Une garantie de la conception d'un système hybride d'électrification est très difficile en raison qu'une des entrées au processus de conception, les données des ressources renouvelables, est très variable, et le climat froid ne fait qu'accentuer cette variabilité. Déterminer que la microcentrale hybride opère est facile, savoir qu'elle peut produire la quantité d'énergie spécifiée selon la conception dans les prochains dix ans, c'est presque impossible. Par exemple, les systèmes actuellement en service tous ont été conçus comme étant à haute pénétration, mais ils opèrent à basse ou moyenne pénétration renouvelable. Pourtant, le concepteur doit être capable de présenter les mesures nécessaires à prendre en cas de défaillance du dimensionnement ou de la performance du système.

La documentation pour garantir la conception se trouve répartie dans l'ensemble du mémoire. On peut mentionner notamment : toute l'information sur les entrées (site, ressources renouvelables, charge) et le système actuel d'électrification du chapitre 1, en incluant les jugements sur leur qualité, les informations des annexes, et les résultats des modélisations effectuées avec le logiciel Homer dans ce même chapitre.

#### **4.1.2 La gestion de l'énergie dans un système hybride**

La TS 62257-4 soutient que dans les systèmes hybrides isolés d'électrification, où la disponibilité des sources renouvelables est très variable et non-dispatchable, la gestion de l'énergie devient fondamentale pour réussir à fournir le service accordé avec la clientèle et simultanément protéger la vie opérationnelle de l'équipement. La gestion d'énergie a un impact sur les technologies retenues dans la conception et le dimensionnement du système électrique hybride isolé. La gestion d'énergie doit s'en occuper de :

- Toujours chercher un équilibre entre l'énergie totale produite par les sources renouvelables et celle de la consommation, et prendre les mesures nécessaires pour maintenir une correspondance entre l'offre et la demande d'énergie.

- Donner priorité à l'utilisation des énergies renouvelables pour réduire la consommation des énergies fossiles et diminuer le coût d'exploitation.
- Maximiser la vie utile et la performance de l'équipement, cela implique donner priorité à la protection de l'équipement par rapport à la fourniture d'énergie pour la clientèle.
- Bien gérer le système de stockage, une tâche fondamentale pour conserver la vie utile des batteries, laquelle impacte profondément la performance et le coût du cycle de vie du système.
- S'occuper de deux aspects de la gestion de la quantité disponible d'énergie : 1) maximiser l'utilisation de l'énergie produite par les sources renouvelables, 2) optimiser le partage de cette énergie entre la clientèle du réseau. Pour atteindre cette optimisation on peut avoir le réseau actif seulement une partie du jour, avoir le réseau actif une longue période du jour, mais limiter l'énergie disponible pour chaque client, ou bien appliquer une structure tarifaire envisagée à limiter la consommation d'énergie. Ces mesures ne sont pas applicables à une installation en climat froid comme Jubany où, en raison de la protection de la vie et des équipements contre le froid, l'énergie doit être toujours disponible. Une structure tarifaire pour contrôler la consommation n'est pas applicable non plus, étant donné qu'il s'agit d'une base scientifique gouvernementale. Pourtant, avec le système hybride installé, le délestage des charges électriques peut être effectué selon des priorités déterminées par l'opérateur du système.
- Gérer la qualité de l'énergie fournie : les aspects électriques à surveiller sont le niveau et le pourcentage de la variation du voltage, l'ondulation du voltage à CC, la fréquence et la proportion des harmoniques du voltage à CA
- Du point de vue de la gestion de la charge, il devient obligatoire l'utilisation des appareils électriques de haute efficacité et basse consommation et de prendre d'autres mesures de contrôle de la demande, comme le délestage par priorités des

charges, sans oublier de respecter la contrainte de l'utilisation des gensests à 50 %-80 % de leurs puissances nominales, pour ne pas nuire à la vie utile des génératrices.

#### **4.1.3 Types d'information nécessaire pour la gestion du système**

La TS 62257-4 liste les ensembles minimaux de paramètres à mesurer pour connaître l'état et les conditions d'opération actualisées d'un système hybride d'électrification. Il est nécessaire de disposer des informations spécifiques pour réaliser la gestion énergétique, manuelle ou automatique, du système. Cependant, les paramètres du système hybride à surveiller doivent être bien identifiés afin d'obtenir l'information sur l'opération du système. Il y a cinq types d'informations utiles à la bonne gestion d'un système hybride isolé d'électrification :

- 1) Information destinée à assurer l'opération satisfaisante de l'installation et de son système de gestion d'énergie.
- 2) Information destinée à vérifier que les engagements entre les différentes parties intéressées par l'opération du système sont tenus.
- 3) Information utile à la maintenance et au dépannage du système d'électrification.
- 4) Information destinée à l'utilisateur pour lui permettre de faire une bonne utilisation de son installation.
- 5) Information pour l'analyse scientifique.

Les bénéficiaires de ces informations, et les fins auxquelles ils les destinent sont :

- Le gestionnaire de l'énergie ou le système du contrôle de l'installation. Sa fonction principale étant de gérer automatiquement les conditions d'opération de l'installation, il doit se poser et répondre aux questions suivantes : combien

d'énergie est disponible à partir du sous-système de production? De combien d'énergie a besoin-t-il l'utilisateur du système? Combien de l'énergie produite, en excès par rapport à la charge, peut-elle être stockée (ou consommée dans la charge de dissipation)? Avec ces réponses, le gestionnaire de l'énergie doit gérer les flux d'énergie entre la production, la charge et le stockage, et les commandes démarrage/arrêt des génératrices diesel.

- L'opérateur de l'installation. L'opérateur requiert des informations reliées au respect des engagements contractuels. Pour faciliter le dépannage et la maintenance, il doit être en mesure de vérifier que la performance de l'installation est vraiment celle déclarée selon la conception du système, les spécifications des équipements et de la documentation de la mise en service. Également, il doit pouvoir analyser les paramètres de l'opération du système pour évaluer les améliorations pouvant augmenter son efficacité et pour faciliter le dépannage de problèmes pouvant apparaître lors de son opération.
- L'utilisateur de l'installation. Il veut faire le meilleur usage possible de l'installation et voudrait recevoir des préavis dans le cas du risque de manque d'énergie et tout autre événement susceptible de contrer sa consommation.

La TS 62257-4 montre que la quantité nécessaire des informations à collecter se trouve en relation directe avec la complexité du système à gérer et ainsi avec la classification des systèmes hybrides de la TS 62257-2, c'est-à-dire le Tableau 12. Le concepteur doit adapter la sophistication du système d'acquisition de données à la sophistication du système d'électrification.

Dans le contexte de la base Jubany, toute l'information reliée aux effets du climat froid est aussi très importante pour gérer le système hybride. De plus, la complexité intrinsèque du système d'électrification pourrait augmenter la complexité de son opération en climat froid. Le système d'acquisition des données devra être amélioré pour traiter rapidement les données en provenance des détecteurs du givre, d'humidité, de température

et de vibration, ainsi que pour traiter et enregistrer tous les événements (arrêts, diminutions de productivité, etc.) de l'exploitation des éoliennes reliés aux effets du climat froid.

#### **4.1.4 Méthodologie proposée de conception et dimensionnement**

La norme stipule que, en général, il y a six critères techniques de base qui affectent fortement la conception des systèmes hybrides de puissance (TS 62257-4, 2005-07) :

- La charge à être alimentée dans le site
- Les ressources renouvelables disponibles dans le site
- Le coût du diesel ou du carburant alternatif
- Le coût des différentes options technologiques
- Pour un système qui sert une communauté, la distribution spatiale de celle-ci et le coût des matériaux du sous-système de distribution.
- Le niveau des capacités techniques disponibles pour le service et la réparation du système et ses composants

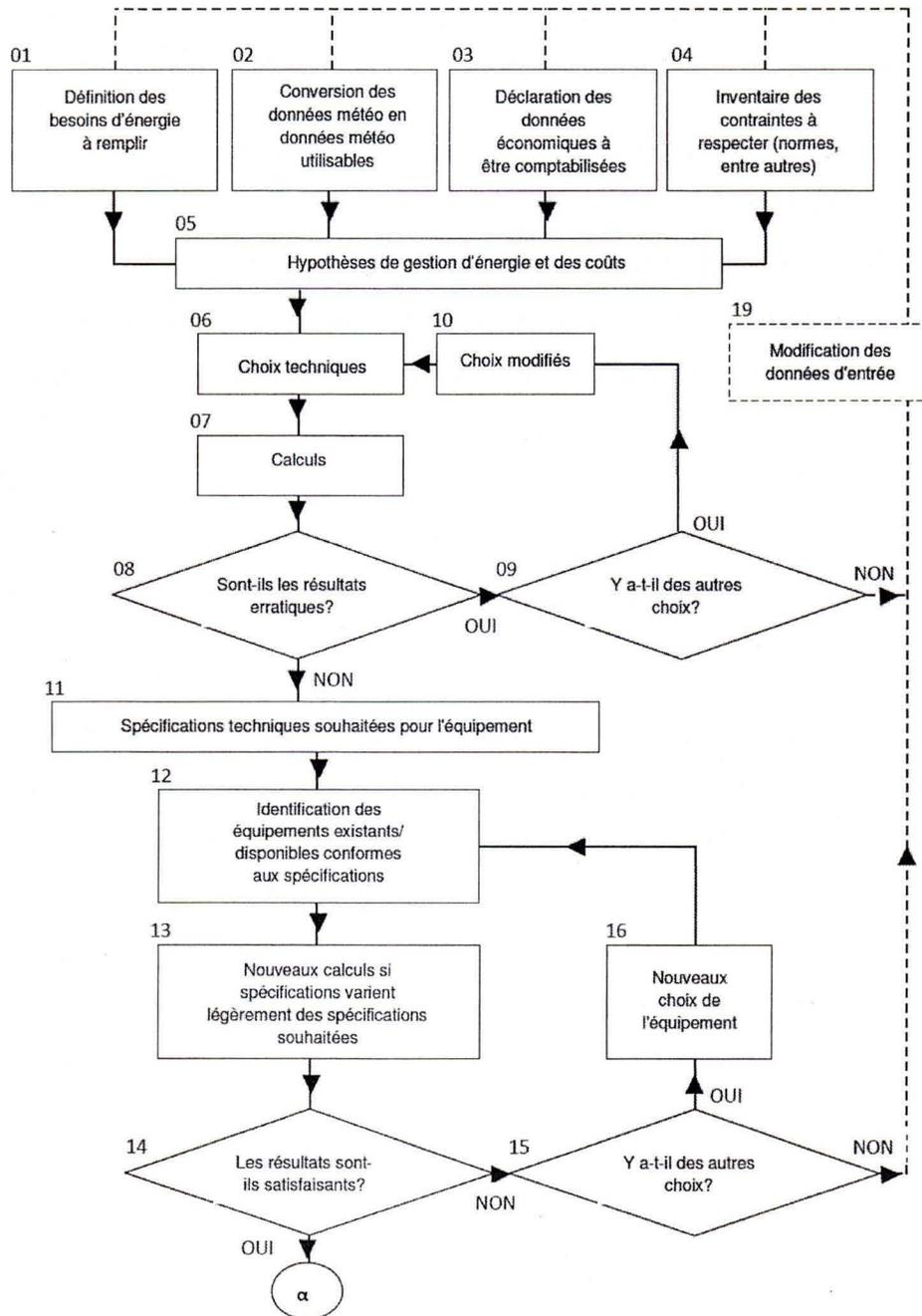
Il est essentiel d'obtenir les informations les plus précises reliées à chacun de ces critères pour arriver à une conception capable de les satisfaire. Ils sont souvent interdépendants, et s'ils sont évalués un à la fois, ils peuvent amener à des décisions de conception et dimensionnement contradictoires.

À part des facteurs fondamentaux des ressources renouvelables et de la charge à alimenter, les hypothèses adoptées pour la gestion de l'énergie et le niveau de la maintenance affectent aussi les choix de la conception et la taille du système. Par exemple : le nombre attendu des jours sans source renouvelable dicte le type des batteries; le fait que la génératrice diesel participe dans la production totale annuelle d'énergie, ou soit utilisée

seulement pour des urgences, dicte le type du gense; le niveau de la maintenance, normal ou minimal, dicte la qualité et la durabilité des composants choisis (TS 62257-4).

Après avoir considéré tous ces critères et hypothèses, le facteur final et décisif à prendre en considération est économique, et implique les divers coûts : d'investissement initial, d'opération, de maintenance et de démantèlement. Arrivés à cette étape, il peut s'avérer nécessaire de faire quelques itérations, c'est-à-dire modifications architecturales, des équipements, ou de la taille du système hybride d'électrification, pour arriver au meilleur compromis « critères techniques satisfaits versus coûts dedans budget » (TS 62257-4). C'est la même méthode recommandée par Hunter (1994) : 1) décider un type d'architecture, 2) évaluer sa performance, 3) utiliser les estimations de production d'énergie pour faire des calculs économiques, 4) répéter la procédure comme une boucle itérative d'optimisation.

La prise en compte de tous ces critères techniques/économiques peut rendre le processus de conception très laborieux. Pour cette raison, la norme recommande fortement de développer ou d'adopter une méthodologie de conception et dimensionnement des systèmes hybrides d'électrification, et de la mettre à l'essai dans un nombre de sites pour la perfectionner. La TS 62257-4 donne un exemple d'une telle méthodologie. Elle est présentée dans l'organigramme suivant.



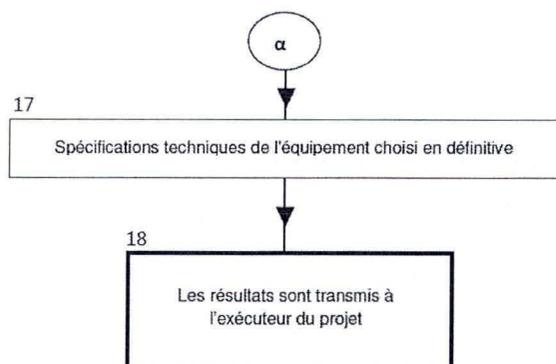


Figure 64. Méthodologie de conception et dimensionnement. Source : TS 62257-4

Dans cet organigramme, les étapes 01 à 10 représentent la boucle itérative d'optimisation. Les critères techniques et les hypothèses de gestion de l'énergie et des coûts permettent de faire des choix techniques (étape 06) qui, après des calculs, donnent des résultats. Si les résultats ne sont pas erratiques, des spécifications techniques pour l'équipement dans l'étape 11 sont établies. Sinon, les choix techniques (étape 10) doivent être changés, ou dans l'absence de plus d'options, l'itération doit être recommencée. Selon la TS 62257-4, les étapes 01 à 05, c'est-à-dire la récollecion des données d'entrée et la détermination des hypothèses de travail, doivent suivre une normalisation actualisée et répandue.

La deuxième boucle de l'organigramme (étapes 12 à 16) est reliée à l'existence/disponibilité ou non dans le marché des équipements qui puissent répondre aux spécifications techniques souhaitées. Si les résultats ne sont pas satisfaisants, une nouvelle recherche des équipements disponibles sur le marché (étape 16) doit être, alors, effectuée. S'il n'y a plus des choix des équipements, il faudra recommencer les étapes 01 à 04 pour modifier les critères techniques d'entrée. Si les résultats de l'équipement choisi sont satisfaisants, les spécifications techniques définitives (étape 17) seront établies et les résultats seront transmis à l'exécuteur du projet (étape 18). Ces deux dernières étapes doivent suivre une normalisation actualisée et répandue.

Dans ce qui suit, seront expliqués sommairement quelques termes/expressions utilisés dans l'organigramme :

- **Hypothèses de gestion d'énergie et des coûts.** Le but de la gestion d'énergie est de surveiller l'équilibre de la production/consommation des ER (Énergies renouvelables) afin de respecter autant que possible les engagements d'approvisionnement d'énergie et de conserver la durabilité de l'équipement. La gestion des coûts doit rechercher un équilibre acceptable pour l'ensemble : «°Coût d'investissement + Coût d'exploitation + Coût de remplacement°» en respectant les objectifs prioritaires recherchés pour la satisfaction de l'utilisateur.
- **Choix techniques.** Ils comprennent : 1) les choix architecturaux, a) schéma du système pour produire et distribuer de l'énergie, b) présence des convertisseurs ou non, leur quantité, le type d'électricité produite, c) emplacement et nature des points de débranchement/protection. 2) les choix des caractéristiques techniques des équipements (panneaux, éoliennes, groupe électrogène, batteries, etc.) parmi les valeurs possibles correspondantes aux équipements existants sur le marché.
- **Résultats erratiques.** Les résultats seront considérés comme « erratiques » lorsque a) un critère des étapes 01 à 06 n'a pas été respecté, b) les recommandations n'ont pas été respectées, c) le coût de l'investissement dépasse le budget (fourni ou estimé).
- **Spécifications techniques souhaitées pour l'équipement.** Selon le type des algorithmes utilisés, les calculs arrivent à un équilibre techno-économique acceptable entre les diverses caractéristiques de l'équipement.
- **Identification des équipements existants/disponibles conformes aux spécifications.** On prépare une liste précisant les équipements qui peuvent être utilisés avec certitude dans le système, en tenant compte de leur disponibilité dans le marché et des délais requis de leur livraison pour respecter le calendrier du projet.

- **Résultats satisfaisants.** L'analyse des résultats doit indiquer la capacité des équipements choisis pour satisfaire les objectifs techniques et économiques souhaités pour ce système.
- **Modification des données d'entrée.** Si les résultats sont insatisfaisants et si d'autres choix techniques sont possibles, des données d'entrée modifiées doivent être utilisées pour un nouveau processus de dimensionnement au complet.

D'autres outils pour aider à la conception des systèmes hybrides se trouvent dans les tableaux 11 et 12 (voir la sous-section 4.1.1). Le Tableau°11 montre les divers niveaux d'exigence des utilisateurs et la gamme des systèmes d'électrification isolés recommandés selon ces niveaux, y compris leurs architectures. Ce tableau présente, également, un encadrement très utile pour que l'utilisateur puisse exprimer de façon générale les services énergétiques qu'il veut recevoir et ainsi clarifier l'engagement à l'offre à accorder avec l'exécuteur du projet. Selon cet encadrement, l'utilisateur peut demander d'avoir un approvisionnement d'énergie de qualité (voltage, fréquence, etc.) constante, peut demander d'avoir un approvisionnement d'énergie pendant quelques heures par jour ou 24 heures sur 24, et peut demander l'approvisionnement d'énergie pendant les périodes de conditions climatiques adverses. Chaque ensemble d'exigences nécessite l'implémentation d'architectures différentes, et de plus en plus complexes, de systèmes hybrides d'électrification. Ainsi, la consultation du Tableau°11 permet, selon le niveau des exigences de l'utilisateur, une première approximation concernant :

- Le type de sous-système de production recommandé.
- Le type de générateurs (à ER ou fossile) recommandés.
- Les engagements contractuels entre fournisseur, opérateur et utilisateur.

La notation en T<sub>x</sub>Y du Tableau°11 fait référence aux typologies des systèmes définis dans le Tableau 12, présenté dans la TS 62257-2 « Des exigences pour une gamme de systèmes d'électrification ». Selon cette spécification technique, le sous-système de

production est sélectionné en fonction de critères qualitatifs sur la disponibilité d'énergie électrique et des contraintes reliées à son offre. Ensuite, les sous-systèmes de production et distribution doivent être dimensionnés afin de répondre aux exigences quantitatives de l'utilisateur.

Le Tableau°12 classe les sous-systèmes de production en termes des architectures possibles du système (types de générateurs d'énergie, sans ou avec stockage). La TS 62257-2 présente aussi des schémas fonctionnels pour chacun des types des systèmes hybrides d'électrification définis dans le Tableau°12. Le concepteur peut s'en servir de ces diagrammes comme un point de départ de l'architecture du système sous conception. Les schémas utiles à l'ébauche de l'architecture du système hybride proposé pour la base Jubany sont présentés dans l'annexe VII.

Des détails pour la conception avancée du sous-système de production, c'est-à-dire de la microcentrale hybride, tels que l'interconnexion des générateurs et leur montage, les travaux mécaniques et de génie civil, la sécurité contre le feu et la foudre, etc. sont approfondis dans la TS 62257-9-1 « Systèmes de la microcentrale ».

#### **4.1.5 Premiers pas de la conception pour Jubany**

Dans ce qui suit seront présentées les premières étapes de la conception d'un système hybride pour Jubany en suivant la procédure de la série TS 62257. La première étape est l'estimation du niveau d'exigences d'énergie électrique demandé par le client à l'aide du Tableau 11, qui donne une première approximation sur les types de sous-système de production et des générateurs recommandés d'énergie pour le cas.

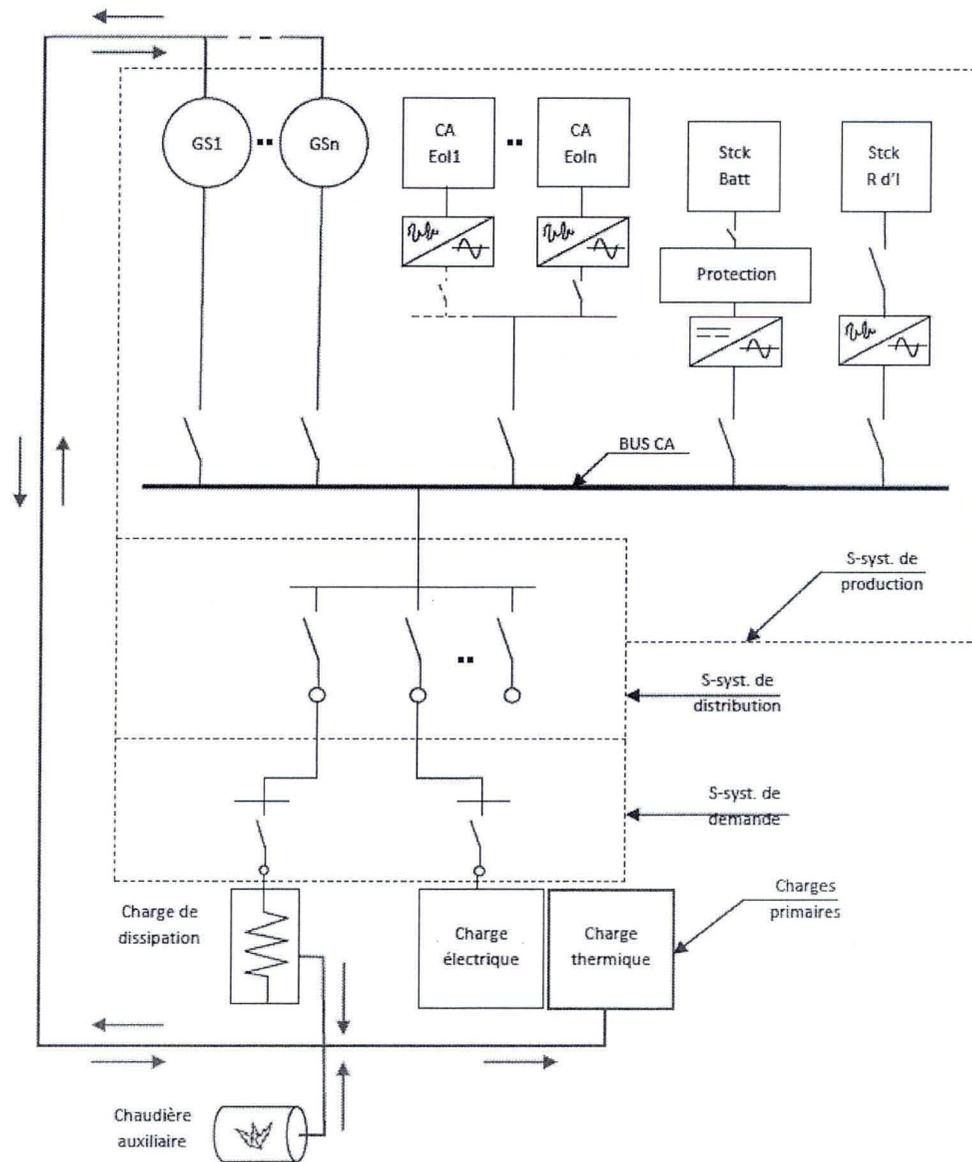


Figure 65. Schéma fonctionnel de l'architecture pour Jubany

Comme mentionné dans la partie 1 de la proposition de conception, les exigences de Jubany sont les plus hautes du Tableau 11 : « L'utilisateur souhaite disposer chaque jour de 24 heures/jour d'approvisionnement d'énergie électrique à voltage constant avec quelques appareils en marche simultanément, et nécessite de l'énergie même dans des conditions climatiques défavorables ». Pour ce niveau d'exigences et pour un système d'électrification

collectif, le Tableau 11 recommande les architectures du type T<sub>3</sub>C, T<sub>4</sub>C, T<sub>5</sub>C et T<sub>6</sub>C. Il est à remarquer qu'on requiert le même niveau élevé d'exigences pour l'énergie thermique générée par des moyens différents que l'électricité, aspect non mentionné dans la série TS 62257.

La deuxième étape est l'évaluation de l'utilité pour Jubany de chacune de ces architectures, à l'aide du Tableau 12. L'architecture T<sub>3</sub>C a un sous-système de production composé de genset(s) plus générateur(s) à ER (Énergies renouvelables), sans stockage. Il existe un seul exemple d'un système hybride éolien-diesel sans stockage en climat froid, celui du Saint-Paul, Alaska (Baring-Gould, 2007). Ce site a, pourtant, un régime de vent de classe 7, qualifié de « superbe » (Fay, 2010), tandis que le régime du vent à Jubany est méconnu, et son niveau de turbulence est inconnu. Les systèmes du type T<sub>3</sub>C ont besoin d'une pénétration éolienne très haute pour fournir de la réserve tournante et garder la stabilité électrique en cas de turbulence. Pour ces raisons, une architecture T<sub>4</sub>C, qui a un sous-système de production composé de genset(s) plus générateur(s) à ER (Énergies renouvelables), avec stockage correspondrait mieux à la situation de Jubany. Le stockage électrique aide à la stabilité du système électrique dans le cas d'un régime du vent de haute variabilité.

Les architectures T<sub>5</sub>C et T<sub>6</sub>C ont des sous-systèmes de production avec genset(s) seulement, sans stockage (T<sub>5</sub>C), et avec stockage (T<sub>6</sub>C). Notamment, l'architecture du type T<sub>5</sub>C, avec gensets seulement et sans stockage, est le système actuel à Jubany.

La troisième étape est l'élaboration d'un schéma fonctionnel de l'architecture souhaitée pour le système à Jubany. En se basant sur le schéma E.16 de la spécification technique TS 62257-2 correspondant à l'architecture du type T<sub>4</sub>C (voir l'annexe VII), le schéma fonctionnel antérieur (Figure 65) a été élaboré, où un circuit pour les flux de l'énergie thermique a été inclus. Les explications du schéma de la Figure 65 sont :

- Ce schéma est basé sur la figure E.16 correspondante à une architecture type T<sub>4</sub>C avec un bus à C.A.

- Le schéma ne spécifie pas le nombre de gensets (GS1 à GS<sub>n</sub>), non plus le nombre d'éoliennes du système (Eol1 à Eol<sub>n</sub>). « CA » signifie qu'il s'agit des sources à C.A. Cela permet de faire varier leur quantité dans les modélisations pour trouver le meilleur dimensionnement du système.
- Les dispositifs pour contrôler les divers générateurs d'énergie et maintenir la stabilité électrique et thermique du système hybride ne sont pas représentés sur le schéma.
- Dans ce schéma, les lignes noires représentent des flux électriques, tandis que les lignes rouges représentent des flux thermiques. Pour les flux thermiques, les flèches montrent le sens de ces flux. Ainsi, la charge de dissipation électrique et la chaudière auxiliaire à carburant fournissent de l'énergie thermique seulement, la charge thermique primaire la reçoit seulement, mais les génératrices diesel (GS1 à GS<sub>n</sub>) fournissent ou reçoivent de la chaleur selon leurs besoins d'opération.
- Le schéma montre deux types de stockage : stockage par batteries (Stck Batt) et stockage avec roues d'inertie (Stck R d'I). Il est à remarquer que les dimensions et les objectifs du stockage ne sont pas spécifiés. Il pourrait s'agir d'un stockage couvrant 10-15 minutes de fonctionnement de la charge électrique primaire, conçu pour lisser les fluctuations de la puissance afin de maintenir la stabilité électrique du système et aussi pour réduire les cycles de démarrage/arrêt des gensets, ou bien d'un stockage composé par les bancs des batteries des voitures électriques pour les déplacements du personnel de la base, avec l'objectif de fournir la stabilité électrique du système, mais aussi d'obtenir leur recharge.

L'avantage d'avoir un schéma fonctionnel très général est qu'il offre de la flexibilité pour proposer différentes solutions technologiques. Par exemple, pour le parc des turbines éoliennes, il peut être proposé : a) des turbines diverses entre les modèles présélectionnés (voir le chapitre 2) et en quantités différentes, b) des types de tours différents pour ces turbines. Pour un stockage d'une fraction de la charge primaire pour lisser les variations de

la puissance renouvelable, il est possible d'utiliser : a) des roues d'inertie, b) des bancs de batteries. Pour des charges de dissipation, les options suivantes se présentent : a) charges résistives pour le chauffage d'eau b) charges résistives pour le chauffage de locaux (c'est-à-dire chauffer de l'eau ou de l'air), c) combiner le stockage et la capacité de dissipation d'énergie avec la recharge des batteries des véhicules ou voitures électriques. Par rapport au circuit thermique, on aurait peut-être besoin d'un dispositif de dissipation (radiateur). En tenant compte de l'état actuel de l'information disponible sur Jubany, les décisions sur ces détails plus « fins » de l'architecture du système hybride pourront être prises dans une étape postérieure de conception, mais non dans le cadre de cette étude.

Après avoir rempli les exigences qualitatives du système hybride pour Jubany avec les tableaux 11 et 12 et la Figure 65, on procède à remplir les exigences quantitatives par le dimensionnement adéquat du système hybride. Pour cela, peut être utilisée la méthode itérative proposée par l'organigramme de la section antérieure (Figure 64). Selon l'état actuel de l'information disponible sur Jubany, on pourrait avancer de façon partielle dans l'organigramme jusqu'à l'étape<sup>o</sup>11 « Spécifications techniques souhaitées pour l'équipement » (avec les choix des turbines éoliennes et autres équipements spécifiques pour le climat froid, etc.). On souligne que de façon partielle parce que par rapport aux hypothèses de coût il n'y a pas de limites fixées en raison que la DNA n'a pas spécifié encore le budget destiné à ce projet. Ainsi, il n'y a pas des données pour remplir l'étape 3 de l'organigramme « Déclaration des données économiques à être comptabilisées ».

## 4.2 LES MODÉLISATIONS AVEC HOMER POUR LA BASE JUBANY

La version Homer utilisée est la 2.68 bêta du 24 juillet 2009. Les modélisations réalisées se trouvent dans le tableau suivant.

Tableau 13. Sujets et numéros des modélisations Homer

Sujet de la modélisation	Numéro de la modélisation
Système électrique actuel : centrale électrique et charge primaire actuelle seulement	No 6, 7, 7-Optim.
Système électrique actuel avec cogénération pour éliminer la chaudière à diesel qui sert la « Casa principal »	No 8, 9, 10
Système hybride éolien-diesel avec turbine Excel-S de 10 kW. Trois niveaux de pénétration éolienne.	No 15
Le même système hybride avec stockage de 15 min de la charge primaire	No 17
Système hybride éolien-diesel avec turbine Northwind 100 de 100 kW. Pénétration éolienne moyenne et haute.	No 16
Le même système hybride avec stockage de 15 min de la charge primaire	No 18

Les numéros manquants de modélisations sont des développements intermédiaires des éléments divers du système.

Dans les modélisations Homer, le taux de pénétration renouvelable moyen peut être évaluée afin d'estimer la production annuelle d'énergie des divers générateurs du système, autant diesel que renouvelables. Par contre, le taux de pénétration renouvelable instantané ne peut pas être évalué avec Homer, parce que ses modélisations sont faites pour représenter chaque heure d'une année (8760 résultats) tandis que les variations de la pénétration instantanée se passent dans des périodes de secondes et même des millisecondes. Pour l'analyse de la pénétration instantanée, l'utilisation de logiciels du type Hybrid2 serait nécessaire.

Un autre aspect qui ne peut pas être modélisé avec Homer est le délestage de charges selon des priorités prédéterminées afin d'augmenter la réserve tournante. C'est un sujet d'intérêt pour la base Jubany que pourra faire l'objet d'une étude subséquente.

#### 4.2.1 Modélisation du système électrique actuel

Pour modéliser le fonctionnement du système électrique actuel à la base Jubany, doivent être réalisées : 1) la modélisation de la charge électrique primaire actuelle, et 2) la modélisation de la centrale électrique actuelle.

##### 1) Modélisation avec Homer de la charge électrique primaire :

Tableau 14. Dates et conditions des mesures de la charge électrique primaire

Genset et date	Personnel présent à la base	Carburant dépensé pendant 24 h (Litres)	Puissance moyenne (kW)	Énergie consommée (kWh) <sup>c</sup>	Température moyenne de ce mois entre 1994-2008 (°C)
GS V, lundi 29 mars 2010	24	620	74,6	1 789,7	0,9 °C
GS II, vendredi 30 avril 2010 <sup>a</sup>	~30	825	91,8	2 202,0	-1,0 °C
GS III, dimanche 30 mai 2010 <sup>b</sup>	~30	750	79,2	1 900,8	-2,4 °C
GS I, mercredi 30 juin 2010	~30	780	88,1	2 114,4	-5,2 °C
GS III, vend. 30 juillet 2010	~30	650	82,1	1 971,2	-6,5 °C
GS I, lundi 30 août 2010	~30	750	81,7	1 961,4	-5,1 °C
GS IV, jeudi 30 sept. 2010 <sup>c</sup>	~30	640	74,0	1 776,6	-3,9 °C
GS IV, samedi 30 oct. 2010	33	640	67,8	1 626,8	-2,0 °C
GS III, lundi 29 nov. 2010	~40	615	62,6	1 501,5	-0,2 °C
GS III, jeudi 30 déc. 2010	74	650	72,0	1 727,1	1,3 °C
GS V lundi 31 janvier 2011 <sup>d</sup>	70	560	71,3	1 711,4	2,5 °C
GS III, lundi 21 février 2011	65	540	64,5	1 548,2	2,3 °C

NOTES :

a) Cette génératrice a dû être renvoyée en l'Argentine pour réparations générales (problèmes avec son gouverneur de vitesse; elle s'accélérait).

b) Peut-être en raison d'avoir pris les mesures un dimanche la puissance moyenne et l'énergie consommée sont plus basses que dans les mois adjacents.

c) On a opéré par première fois le nouveau genset Cat 3406.

d) Le technicien a commencé les mesures le 30 janvier à 23 h; on a déplacé cette première mesure aux 23 h du 31 janvier 2011.

e) La moyenne de cette colonne (l'énergie consommée par jour) est de 1819,3 kWh/jour

Comme il a été mentionné à la sous-section « Les types de charges électriques à Jubany » du chapitre 1, la charge a été mesurée pendant 24 heures consécutives, de 00 à 23 heures, chaque mois depuis mars 2010 jusqu'à février 2011. Le tableau suivant résume les informations concernant les génératrices et les dates de prise ces mesures, le nombre de personnes présent à chaque date et la température moyenne du mois.

Les données de chaque prise mensuelle de mesures sont utilisées par Homer, qui accepte des données différentes pour chaque mois. Les mesures des mois de janvier et février 2011 ont été déplacées à la position des mois de janvier et février 2010 pour compléter le profil annuel de la charge électrique nécessaire pour effectuer la modélisation. Comme des déséquilibres de puissance entre les trois phases du réseau ont été toujours constatés, la valeur utilisée par Homer est la moyenne des trois phases.

Dans la modélisation de la charge avec Homer, le paramètre « variabilité aléatoire du jour au jour » (« Random variability day-to-day) qui fait varier de façon aléatoire le profil de charge de jour en jour est préfixé à 10 %. Le paramètre « variabilité aléatoire intervalle à intervalle » (« Random variability time-step-to-time-step) qui fait varier de façon aléatoire le profil de charge d'heure en heure est préfixé à 15 %. Ces valeurs résultent dans une charge électrique modélisée moyenne de **75,5 kW**, pic de **155 kW** et énergie moyenne consommée par jour de **1812 kWh/jour**.

Comme présenté dans la sous-section 1.6.2 « Évaluation de la connaissance de la charge » au chapitre 1, il a été fait l'expérience de brancher toutes les charges à Jubany et on a mesuré 160-170 kW de puissance maximale demandée et une moyenne de 90 kW (Julieta Contreras, communication du 3 septembre 2009) ont été mesurés. Pour cette raison, la « variabilité aléatoire jour au jour » a été fixée à 11 % et la « variabilité aléatoire intervalle à intervalle » à 19 %. Ces valeurs donnent comme résultat une charge électrique modélisée moyenne de **75,5 kW**, avec un pic de **165 kW** et une énergie moyenne consommée par jour de **1812 kWh/jour**. Aussi, les dépenses modélisées de carburant des gensets augmentent dans un petit pourcentage.

## **2) Modélisation avec Homer de la centrale électrique actuelle**

La modélisation de la centrale électrique et de son scénario d'exploitation est approximative parce que : 1) la majorité des gensets ont déjà eu une vie opérationnelle longue, 2) le calendrier réel de 10 jours consécutifs d'opération de chaque genset ne peut

être modélisé par Homer, ce qui ne permet que des mois complets d'opération et pas de périodes plus courtes, 3) il n'y a pas assez d'informations sur les propriétés du carburant GOA consommé par les gensets à Jubany.

Une partie des données du Tableau 15 est une répétition des informations déjà présentées au Tableau 2, Chapitre 1 sur les génératrices diesel.

Tableau 15. Données de la vie opérationnelle des gensets

Genset	Puissance nominale (kW)	Capacité utilisée moyenne <sup>a</sup>	Heures d'opération au 16 sept 2011 (h) <sup>b</sup>	Courbe de consommation de carburant (L/h @ kW) <sup>d</sup>	Pourcentage annuel (2010-11) d'opération <sup>e</sup>
GS I	200	42 %	8 254	13,4@50, 26,7@100, 40@150, 53,3@200	38,74 %
GS II	180	42 %	60 529 <sup>c</sup>	38,7@135, 51,6@180	1,1 %
GS III	180	42 %	51 873	38,7@135, 51,6@180	32,14 %
GS IV	240	30 %	2 626	38,5@120, 53,8@180, 69,3@240	9,07 %
GS V	180	42 %	35 532	38,7@135, 51,6@180	18,96 %

NOTES :

- La capacité utilisée moyenne pendant les 12 jours qu'on a mesurée la charge électrique pour obtenir la courbe de la charge pendant 2010-11
- Données obtenues d'un courriel du lieutenant-colonel L. Balocchi de date 16 septembre 2011. L. Balocchi a été le chef de base 2011-12.
- Le Genset II a été renvoyé à l'Argentine continentale pour réparations majeures pendant l'été 2011 (à février ou mars 2011), avec 60 529 heures d'opération, équivalentes à 6,91 ans d'opération continue.
- Les points de la courbe de consommation de carburant ont été obtenus des fiches techniques des fabricants et sont valides pour des gensets nouveaux.
- Les pourcentages horaires annuels d'opération, c'est-à-dire le pourcentage horaire de l'année 2010-11 que chaque genset a opéré, ont été obtenus de la division par 8736 h et non par 8760 h, en raison de l'addition totale obtenue dans le Tableau 31 de l'annexe VIII.

Dans la **modélisation no 6**, le paramètre « variabilité aléatoire jour au jour » est fixé à 11 % et la « variabilité aléatoire intervalle à intervalle » à 19 %. Ces valeurs donnent comme résultat une charge électrique modélisée moyenne de **75,5 kW**, et un pic de **165 kW** et une énergie moyenne par jour de **1812 kWh/jour** et aussi produisent une très légère augmentation de 0,8 % des dépenses de carburant des gensets.

La centrale électrique actuelle est modélisée avec trois gensets : GS I, GS équivalent, GS 4. *Le GS I opère 5 mois, janvier, mars, mai, juillet, octobre. Le GS équivalent (parce qu'il équivaut aux gensets réels II, III et V) opère six mois, février, avril, juin, août,*

*novembre et décembre. Le genset 4 opère pendant septembre seulement.* On a modélisé les scénarios des gensets en raison du total des heures que chaque modèle de genset a opéré pendant 2010-11 selon le calendrier de l'annexe VIII. Les calculs sont :

Genset I : 12 mois (3 384 h/8 736 h)= 4,64~ 5 mois

Genset Équivalent : 12 mois (4 560 h/8 736 h)= 6,26~ 6 mois

Genset 4 : 12 mois (792 h/8 736 h)= 1,09~ 1 mois

Pour la distribution des mois, il peut être observé dans le calendrier réel à l'annexe VIII que le genset 4 a opéré surtout en septembre. Les gensets I et équivalent ont été simplement intercalés. Homer ne permet pas de modéliser le calendrier réel de périodes intercalées de 10 jours consécutifs d'opération de chaque genset.

Les valeurs des courbes de carburant pour les gensets I, 4 et équivalent sont les originales du Tableau 15. Le résultat pour la dépense annuelle totale de carburant est **192 969 L/année**. Cette dernière valeur **est de 23 %** inférieure à la consommation réelle de **237 980 L** pour 2010-11. Le prix du diesel est de 2,00041 \$ US par litre pour l'année 2010. La consommation de carburant pour les gensets a été limitée à 280 000 L ou 280 m<sup>3</sup>, qui est la capacité des réservoirs de carburant à la base, remplis une fois par année par bateau.

Tableau 16. Modélisation 6 : Données résultant des gensets modélisés

Genset modélisé	Énergie/année (kWh/année)	Carburant/année (L/année)	Opération/année (Heures/année)
GS I (200 kW)	283 765	75 854	3 720
GS equiv (180 kW)	337 759	96 837	4 320
GS 4 (240 kW)	57 497	20 279	720
<b>Total</b>	<b>679 021</b>	<b>192 969</b>	<b>8 760</b>

Il y a une série d'explications possibles de la différence entre la consommation réelle de carburant et celle de la **modélisation no 6** :

- 1) Pour la **modélisation no 6** on utilise les courbes de consommation de carburant des fabricants, valides pour des gensets en état nouveau, tandis que les génératrices diesel à Jubany ont eu déjà une vie opérationnelle longue (voire le Tableau 15) et opèrent presque toujours à faible charge, avec une maintenance plutôt sommaire et parfois incomplète. Ainsi, c'est très probable que les gensets à Jubany dépensent plus de carburant que les spécifications des fabricants.
- 2) Les propriétés du diesel GOA restent inconnues. Le Chef de Base, O. Interlandi m'avait informé qu'il s'agit d'un carburant exceptionnellement propre, et avec une très haute résistance au gel, mais les données nécessaires pour alimenter Homer ne sont pas connues. Son Pouvoir calorifique inférieur peut varier de celui préfixé pour la modélisation Homer de **43,2 MJ/kg**.
- 3) Les 5 gensets à Jubany ont opéré en 2010-11 par périodes intercalées de 10 jours consécutifs (des fois moins; voir le calendrier de l'annexe VIII), tandis que Homer ne peut pas modéliser que des mois complets d'opération pour chaque genset. Cette situation devient importante lorsqu'on considère les cinq génératrices à Jubany, d'âges, de modèles et ainsi de courbes de consommation de carburant différentes. La modélisation du scénario reste ainsi approximative.
- 4) La courbe de la charge électrique réelle pourrait varier de celle modélisée, obtenue à partir des données de 12 jours des mesures pendant 2010-11.

Dans son travail, Frye (2006) mentionne des raisons similaires pour expliquer la différence entre la consommation réelle et la consommation modélisée de carburant de la base Scott : modélisation des gensets basée dans les fiches techniques du fabricant plutôt que sur la courbe de consommation réelle des gensets, méconnaissance des propriétés du carburant consommé à la base Scott, seulement trois jours de mesures de puissance électrique pour extrapoler la courbe annuelle de la charge.

Tableau 17. Modélisation<sup>o</sup>7. Données résultant des gensets modélisés

Genset modélisé	Énergie/année (kWh/année)	Carburant/année (L/année)	Opération/année (Heures/année)
GS I (200 kW)	283 765	94 817	3 720
GS equiv (180 kW)	337 759	121 021	4 320
GS 4 (240 kW)	57 497	20 279	720
Total	679 021	<b>236 117</b>	8 760

Dans la **modélisation no 7** les valeurs des courbes de consommation de carburant pour les gensets I et équivalent **ont été augmentées de 25 % par rapport aux originales pour obtenir des résultats de consommation identiques à la réalité**. Les valeurs de la courbe de carburant du GS 4 restent les mêmes parce qu'il s'agit d'un genset neuf. Les variabilités aléatoires, la modélisation de la charge et les scénarios des gensets restent les mêmes que ceux de la **modélisation no 6**.

Le résultat pour la dépense annuelle totale de carburant est **236 117 L/année**. Cette valeur est proche (99,2 %) de la consommation réelle de **237 980 L** pour 2010-11. Le prix du diesel est de 2,00041 \$ US par litre pour l'année 2010. La consommation de carburant pour les gensets a été limitée à 280 000 L ou 280 m<sup>3</sup>, qui est la capacité des réservoirs de carburant à la base.

Dans la **modélisation no 7-Optim** Homer optimise l'utilisation des trois gensets GS I, GS équivalent et GS 4 pendant que tous les autres paramètres restent les mêmes. Le

scénario modélisé démontre une baisse de la consommation avec une consommation d'environ **225 866 L** de carburant durant l'année.

Tableau 18. Modélisation°7-Optim. Données résultant des gensets modélisés

Genset modélisé	Énergie/année (kWh/année)	Carburant/année (L/année)	Opération/année (Heures/année)
<b>GS I (200 kW)</b>	507 739	169 643	6 547
<b>GS equiv (180 kW)</b>	79 330	28 424	1 465
<b>GS 4 (240 kW)</b>	85 957	27 799	748
<b>Total</b>	673 026	<b>225 866</b>	8 760

La même modélisation montre que si le GS I de 200 kW fonctionne toute l'année, la consommation du carburant est réduite à **227 730 L/année**. Par contre, si le GS 4 opère toute l'année la consommation du carburant monte à **251 133 L/année**.

Tableau 19. Modélisation°7-Optim. Scénarios avec un seul genset

Genset modélisé	Énergie/année (kWh/année)	Carburant/année (L/année)	Opération/année (Heures/année)
<b>GS I (200 kW)</b>	681 597	227 730	8 760
<b>GS 4 (240 kW)</b>	716 782	251 133	8 760

Ces prévisions indiquent que le Genset IV de 240 kW est surdimensionné par rapport à la charge électrique primaire actuelle, et que son remplacement par un genset plus petit favoriserait la réduction de la consommation du carburant à Jubany.

#### 4.2.2 Modélisation de la cogénération

À Jubany, la chaleur produite par l'exploitation des génératrices diesel peut être exploitée pour réduire ou éliminer la consommation de carburant de la chaudière qui chauffe la « Casa principal » et la consommation électrique du chauffage des locaux proches à l'« Usina ». Comme il a été mentionné dans le chapitre 3, cette technique s'appelle cogénération. La série TS 62257 ne traite pas le sujet de la cogénération

électrique-thermique des génératrices diesel, mais, il est possible de la modéliser avec Homer.

Les informations de la chaudière de la maison principale se trouvent dans le chapitre 1. Sa consommation est d'environ 1 800 litres de GOA par mois. La cogénération peut être utilisée pour remplacer la chaudière parce que la « Casa principal » se trouve à 30-40 mètres de l'« Usina » et la chaleur de la cogénération, transportée usuellement au moyen des conduites d'eau, peut arriver là-bas sans de grandes pertes thermiques. C'est la même situation pour le remplacement du chauffage électrique des autres bâtiments proches de l'« Usina », numérotés (3) (10) (11) et (12) dans le plan du réseau électrique.

Les deux modélisations mentionnées dans le premier paragraphe sont affrontées au problème de l'insuffisance de données. La chaudière de la « Casa principal » chauffe de l'eau pour la climatisation, mais aussi pour la consommation de l'équipage et le volume de l'eau pour les deux usages est inconnu. Dans le cas des chauffages électriques, leurs puissances et leurs pourcentages de la charge électrique totale des bâtiments proches à l'« Usina » sont inconnus, ainsi que les dimensions et les pertes thermiques de ces bâtiments. Aussi, il doit être considéré qu'une réduction de la consommation électrique entraîne une charge plus faible pour les gensets, qui opèrent déjà très près de leurs capacités minimales. En conséquence, pour remplacer le chauffage électrique par la cogénération, il va falloir remplacer d'abord les génératrices diesel par des modèles plus petits, ou bien par génératrices à faible charge, pour éviter que la diminution de la charge électrique primaire soit contre-productive.

Il a été modélisé, seulement, le remplacement des besoins du chauffage de la « Casa principal » par la cogénération. Pour cela, un profil annuel de la charge thermique du chauffage de la « Casa principal » doit être modélisé. Cette modélisation est présentée à l'annexe IX. Des informations plus détaillées sur les dépenses thermiques de la base Jubany permettront des modélisations plus complètes dans l'avenir.

Tableau 20. Modélisation 8. Données thermiques des composants modélisés

Genset modélisé	Chaleur/année (kWh/année)	Carburant/année (L/année)	Opération/année (Heures/année)
GS I (200 kW)	207 756	94 817	3 720
GS equiv (180 kW)	272 981	121 021	4 320
GS 4 (240 kW)	45 455	20 279	720
Chaudière idéale	0	0	0
<b>Total</b>	<b>526 192</b>	<b>236 117</b>	<b>8 760</b>

La **modélisation no 8** considère, à part le système électrique actuel, la cogénération et la charge thermique du chauffage de la « Casa principal ». La **modélisation no 7** est utilisée pour élaborer ce fichier (tous les paramètres sont les mêmes). On assigne au paramètre « Taux de récupération de la chaleur » (« Heat Recovery Ratio ») une valeur de 32 % d'après les informations de Frye (2006) qui fait mention d'une récupération d'énergie thermique d'autour de 32 % dans les génératrices de la base Scott.

La limite de 280 m<sup>3</sup> à la consommation annuelle du diesel a été éliminée parce que le « boiler » ou « chaudière » est un composant idéal d'Homer qui fournit de la chaleur à une charge thermique illimitée. En conséquence les dépenses totales de diesel doivent être surveillées pour qu'elles ne dépassent pas les 280 mètres cubes, la réserve annuelle de la base Jubany.

Pour la modélisation du profil de la charge de chauffage, deux données réelles sont utilisées : le volume de la « Casa principal » qui est de 690 m<sup>3</sup> et les pertes thermiques par mètre carré de surface des bâtiments à la base Scott de 7 W/m<sup>2</sup> (Frye, 2006). Les détails de la modélisation sont présentés dans l'annexe IX.

La charge thermique résultante est si petite (5,22 kW de puissance moyenne, 125 kWh/jour) qu'on n'a jamais besoin d'utiliser la chaudière idéale. Au moins pour le chauffage, la consommation de carburant de la chaudière de la « Casa principal » peut, alors, être épargnée.

Tableau 21. Modélisation<sup>o</sup>9. Données thermiques des composants modélisés

Genset modélisé	Chaleur/année (kWh/année)	Carburant/année (L/année)	Opération/année (Heures/année)
GS I (200 kW)	116 863	94 817	3 720
GS equiv (180 kW)	153 551	121 021	4 320
GS 4 (240 kW)	25 568	20 279	720
Chaudière idéale	0	0	0
<b>Total</b>	<b>295 982</b>	<b>236 117</b>	<b>8 760</b>

Dans la **modélisation no 9**, on assigne au paramètre « Taux de récupération de la chaleur » une valeur réduite de 18 %. La raison de cela est que même si Frye (2006) mentionne 32 % de récupération d'énergie thermique dans les génératrices de la base Scott, le rapport « Alaska Energy » (Alaska Energy Authority, 2009) souligne que la technologie de cogénération, actuellement considérée mature pour les génératrices installées en Alaska, est la récupération de la chaleur du système de refroidissement, avec seulement un 18 % de récupération prévue de l'énergie thermique. Il est à remarquer que les modélisations Homer ne spécifient pas le type de cogénération, soit du système de refroidissement ou des gaz d'échappement, réalisée par le logiciel. Tous les autres paramètres restent les mêmes que dans la **modélisation no 8**.

Même avec un niveau de récupération de la chaleur réduit de 18 %, la charge thermique est si petite qu'on n'utilise jamais la chaudière idéale.

Dans la **modélisation no 10**, on assigne au paramètre « Taux de récupération de la chaleur » des trois gensets une valeur de zéro pour évaluer la dépense de carburant de la chaudière idéale qu'alimente la charge thermique. Une différence de **242 299 L – 236 117 L = 6 182 L** peut être remarquée. Cette consommation de la chaudière idéale (à laquelle l'efficacité a été réduite à 75 %) est loin de la consommation réelle de 20,8 m<sup>3</sup> de diesel de la chaudière de la « Casa principal » de Jubany. L'explication possible de cette grande différence dans la consommation du carburant est que la chaudière réelle de la « Casa principal » chauffe, à part l'eau pour le chauffage, un volume inconnu d'eau pour l'usage

du personnel (bain, cuisine). Ainsi, la charge thermique de la « Casa principal » n'inclut pas seulement le chauffage du local, mais aussi le chauffage de ce volume inconnu d'eau et donc elle serait plus grande que la seule estimation du chauffage du logement.

Tableau 22. Modélisation<sup>o</sup>10. Données thermiques des composants modélisés

Genset modélisé	Chaleur/année (kWh/année)	Carburant/année (L/année)	Opération/année (Heures/année)
GS I (200 kW)	0	94 817	3 720
GS equiv (180 kW)	0	121 021	4 320
GS 4 (240 kW)	0	20 279	720
Chaudière idéale	45 625	6 182	?
<b>Total</b>	45 625	242 299	8 760

#### 4.2.3 Modélisation du système hybride éolien-diesel

Pour modéliser le fonctionnement du système hybride éolien-diesel on doit modéliser, à part la charge électrique et les génératrices diesel : 1) le régime du vent à Jubany, 2) la turbine ou les turbines éoliennes, 3) le stockage électrique présent dans certaines modélisations.

##### 1) Modélisation du régime du vent à Jubany

La vitesse moyenne du vent à Jubany de 9,95 m/sec se trouve bien positionnée entre les autres vitesses moyennes des exemples du chapitre 3 : Mawson 11,2 m/sec, Île Ross 8,0 m/sec, base Eduardo Frei 8,7 m/sec, Wales 8,0 m/sec.

Pour réaliser la modélisation du régime du vent à Jubany, les 8760 valeurs de vitesse du vent que demande le logiciel Homer ont été récupérées en deux étapes : la première étape a été de calculer 366 moyennes des vitesses du vent des années 1994-2008, une pour chaque date du calendrier. On a éliminé la moyenne du vent correspondant aux journées de 29 février des années bissextiles (les 29 février 1996, 2000, 2004 et 2008) pour laisser seulement 365 moyennes. Chacune de ces valeurs a été répétée 24 fois (pour chaque heure

du jour et pour avoir un total de 8760 valeurs), en raison de la méconnaissance du profil journalier du vent à Jubany parce que, le fichier original fourni par la DNA avait seulement les moyennes journalières de la vitesse du vent du 1<sup>er</sup> janvier 1994 jusqu'au 31 mai 2008.

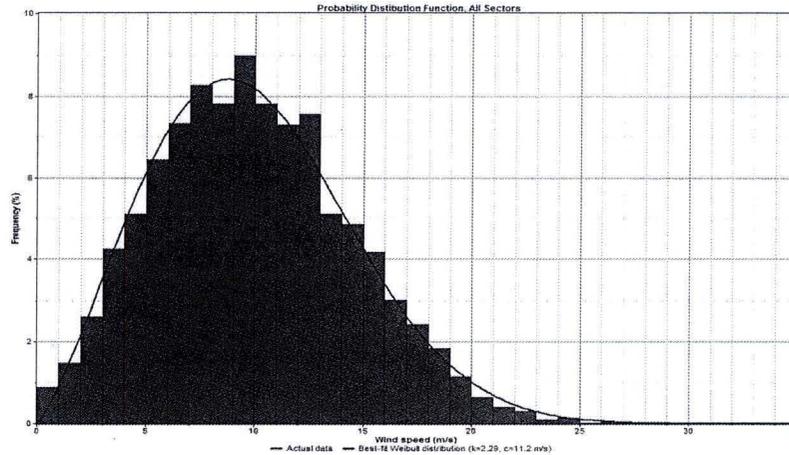


Figure 66. Courbe Weibull ( $k=2,29$ ,  $c= 11,2$  m/s) de la Fdp du vent de la DNA

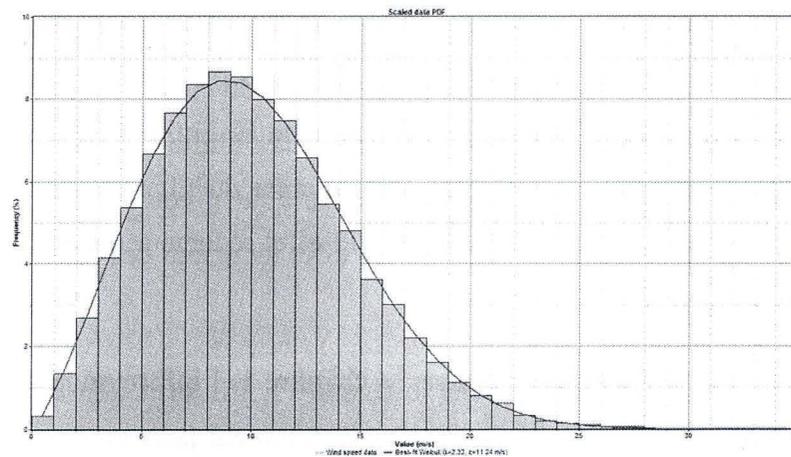


Figure 67. Courbe Weibull ( $k= 2,32$ ,  $c= 11,24$  m/s) de la Fdp des 365 moyennes

La moyenne annuelle de la vitesse du vent ainsi obtenue par le logiciel Homer est de 9,962 m/s, avec une courbe Weibull ayant comme paramètres  $k= 6,55$ ,  $c= 10,61$  m/s. La courbe résultante se rassemble peu à la courbe de la vitesse du vent à Jubany du chapitre 1

(Figures 6 et 66 calculées par le logiciel Windographer), en raison de la répétition 24 fois des 365 moyennes.

La deuxième étape a été de modifier  $k$  et  $c$  pour laisser Homer modéliser la distribution de la vitesse du vent produite par les moyennes des 365 dates du calendrier. Ainsi, la valeur de  $k$  a été modifiée de 6,55 à 2,29; cela ne modifie pas les moyennes mensuelles de la vitesse du vent et non plus les valeurs des autres paramètres obtenus à partir des 8760 valeurs alimentées, mais permet à Homer de faire varier la valeur des vitesses du vent d'heure en heure. Le résultat (Figure 67) est une approximation Weibull de paramètres  $k= 2,32$ ,  $c= 11,24$  m/s, qui se rassemble beaucoup à la fonction de densité de probabilité obtenue des moyennes journalières originales de la vitesse du vent fournies par la DNA, et qu'on peut utiliser pour les modélisations de production d'énergie éolienne.

Sachant que les mesures du vent à Jubany ont été effectuées à 10 m, a été utilisée pour recalculer la vitesse à la hauteur des éoliennes une valeur de  $z_0= 0,007$ , située entre les valeurs répertoriées par Homer d'une surface de neige (0,003) et de la pelouse (0,008).

Les effets du climat froid de Jubany doivent être pris en compte dans la modélisation de l'énergie produite par les éoliennes en écartant, lors du calcul, les périodes du vent où la température extérieure est plus basse que la température limite opérationnelle des éoliennes. De plus, doit être écartée la durée des événements du givrage du temps de production d'énergie des éoliennes. Aussi, doit être prévu l'effet réducteur des rafales sur la production d'énergie des éoliennes.

Toutefois, comme mentionné dans le chapitre 1, l'information disponible sur le site Jubany est limitée, et cela force à évaluer les facteurs qui peuvent être pris en considération pour la modélisation de la production d'énergie éolienne.

Pour les basses températures, les données reçues de la DNA démontrent que les températures ne descendent jamais en dessous des limites inférieures d'opération des quatre modèles d'éoliennes choisies pour Jubany, au moins en théorie. Pour la présence et la durée

du givre, il n'y pas d'information parce que ces événements ne sont pas enregistrés. Pour la présence des rafales dans le régime du vent, il n'y pas non plus d'information enregistrée.

Une façon possible de prendre en compte l'effet du givrage et des rafales dans le calcul de la production d'énergie serait de déduire un pourcentage de la production modélisée, mais ce pourcentage serait plutôt arbitraire en raison du manque total des données pour le site. **Pour cette raison, il a été décidé de ne pas modifier les résultats des modélisations de la production d'énergie éolienne.** En conséquence, on doit être conscient qu'un pourcentage inconnu des pertes est possible et qu'on devra travailler pour améliorer la connaissance de ces facteurs et leur incidence sur la production d'énergie éolienne à la base Jubany.

## 2) Modélisation des turbines éoliennes

La courbe de puissance et les autres caractéristiques de l'éolienne Bergey ont été obtenues de la bibliothèque Homer des turbines éoliennes. La hauteur de son moyeu a été fixée à 10 m. Les caractéristiques de la turbine Northern Power NW100 Arctique de 100 kW ont été obtenues des fiches techniques du fabricant. La hauteur de son moyeu a été fixée à 37 m. Le coût de la turbine NW100 a été obtenu de Alaska Envirothon (2007) et Pinard (2011) et le coût global d'installation de la NW100 de Maine Rural Partners (2011).

## 3) Modélisation du stockage électrique

Un système de stockage à court terme a été considéré dans la conception du système hybride pour Jubany avec l'objectif d'améliorer la qualité de la puissance électrique et réduire la consommation de carburant, le temps d'opération et les cycles de démarrage/arrêt des gensets. Selon l'information de la section « Types du stockage : objectifs, durée », il suffirait, pour atteindre ces objectifs, un stockage de 15 minutes de la charge électrique

primaire c'est-à-dire de 18,9 kWh pour une charge primaire de 1812 kWh par jour (et 75,5 kWh par heure à une puissance moyenne de 75,5 kW).

Un système de stockage par batteries (SSB) a été choisi, en raison que la version de Homer utilisée (2.68 bêta) n'inclut pas la modélisation de roues d'inertie. Néanmoins, les systèmes de stockage par roues d'inertie s'adaptent mieux aux fins d'un stockage à court terme et aussi ils ont des avantages dans l'environnement antarctique : coût de transport plus bas en raison de la densité de stockage plus élevée, meilleure adaptation à l'opération dans le froid, plus long cycle de vie (Frye, 2006).

La batterie choisie du répertoire Homer est au plomb-acide, modèle T-105 de la marque Trojan, de 225Ah (1,35 kWh), 6V, avec une profondeur maximale de décharge de 70 % (la taille totale du SSB devra être de  $18,9 \text{ kWh} / 0,7 = 27 \text{ kWh}$ ). Le SSB nécessite une interface pour passer de C.D. à C.A et vice-versa. Un convertisseur de 180 kW de puissance a été choisi pour qu'il puisse gérer tout seul la puissance maximale de la charge électrique primaire (165 kW) pendant les minutes nécessaires pour démarrer les gensets.

La **modélisation no 15** combine le système électrique actuel, plus la cogénération, plus un nombre d'éoliennes Excel-S de 10 kW de la marque Bergey (de 0 à 30 unités). La **modélisation no 17** ajoute aux architectures antérieures la présence d'un SSB de taille nominale 27 kWh, 18,9 kWh effectifs. Deux pourcentages de charge minimale (30 % et 7 %) ont été modélisés pour les trois gensets qui représentent la centrale (GS 1, GS equiv, GS 4). Il est à noter qu'un pourcentage de zéro % de la charge minimale ne signifie pas que le genset est arrêté, mais qu'il permet aux gensets de travailler à de très faibles charges, auxquelles les génératrices réelles ne peuvent pas opérer (Frye, 2006). Un pourcentage de 30 % de charge minimale est un niveau réel pour les gensets présents à Jubany. Un pourcentage plus bas de la charge minimale équivaldrait, en réalité, à un genset de capacité nominale plus petite, ou bien à un genset à faible charge. Par exemple, un pourcentage de 7 % de la charge minimale permettrait au GS I de 200 kW d'opérer à 14 kW, capacité possible pour un genset à faible charge.

Dix niveaux de charges moyennes journalières sont modélisés (1 400, 1 600, 1 812, 2 000, 2 200, 2 400, 2 600, 2 800, 3 000, 3 200 kWh/jour) afin d'observer le comportement des architectures proposées par rapport à la consommation de carburant. La taille du SSB, 27 kWh, reste pourtant la même pour toutes les modélisations.

Tableau 23. Modélisation<sup>o</sup>15, système hybride avec turbines Excel-S sans stockage

Charge moyenne journalière (kWh/jour)	Quantité XLS 10 kW	XLS énergie produite (kWh/année)	Capacité minimale gensets (%)	GS IV 240 kW (kWh/année)	GS Equiv 180 kW (kWh/année)	GS I 200 kW (kWh/année)	Fraction renouv.	Diesel consommé (L/année)
1 812	30	1 320 852	30	10 223	207 378	85 104	0,71	106 803
1 812	10	440 284	30	19 986	330 236	167 781	0,32	180 914
1 812	--	0	30	103 824	79 330	489 873	0,0	<b>225 831</b>
1 812	30	1 320 852	7	10 223	29 579	138 760	0,81	60 405
1 812	10	440 284	7	19 986	39 645	274 891	0,43	112 772
1 812	--	0	7	103 824	25,5	557 541	0,0	220 098
3 000	30	1 320 852	30	190 395	214 110	112 191	0,59	174 233
3 000	10	440 284	30	374 979	168 001	220 370	0,25	251 957
3 000	--	0	30	918 166	4 654	172 746	0,0	345 990
3 000	30	1 320 852	7	190 395	36 169	150 901	0,67	123 484
3 000	10	440 284	7	374 979	14 298	290 329	0,28	220 395
3 000	--	0	7	918 166	12,6	176 707	0,0	345 655

Tableau 24. Modélisation 17, système hybride avec Excel-S et stockage de 18,9 kWh

Charge moyenne journalière (kWh/jour)	Quantité XLS 10 kW	Batt énergie Ent/Sort (kWh/année)	Capacité minimale gensets (%)	GS IV 240 kW (kWh/année)	GS Equiv180 kW (kWh/année)	GS I 200 kW (kWh/année)	Fraction renouv.	Diesel consommé (L/année)
1 812	30	2 520/2 142	30	9 863	188 873	80 799	0,73	97 900
1 812	10	3 861/3 289	30	18 828	322 195	160 011	0,33	175 055
1 812	--	2 027/1 742	30	103 377	82 166	485 736	0,0	225 320
1 812	30	2 971/2 525	7	10 112	26 438	135 691	0,81	58 214
1 812	10	3 131/2 180	7	19 982	38 301	271 450	0,43	111 145
1 812	--	1/20	7	103 824	25,5	557 523	0,0	220 092
3 000	30	3 373/2 867	30	187 088	201 446	110 842	0,60	168 169
3 000	10	3 394/2 904	30	372 749	169 367	217 703	0,25	250 847
3 000	--	132/131	30	918 013	4 709	172 746	0,0	345 995
3 000	30	3 469/2 966	7	189 491	33 795	148 534	0,68	121 556
3 000	10	1 438/1 240	7	374 973	14 734	288 688	0,28	219 996
3 000	--	1,33/19,5	7	918 058	13	176 797	0,0	345 649

NOTE : La taille de 18,9 kWh est la capacité utile du SSB.

Dans les tableaux<sup>o</sup>23 et 24, peuvent être observées les productions d'énergie pour le stockage et les divers générateurs d'électricité de certaines architectures avec 300, 100, et zéro kilowatt de puissance éolienne installée.

Tableau 25. Modélisation 16. Système hybride avec turbines NW100 sans stockage

Charge moyenne journalière (kWh/jour)	Quantité NW100 100 kW	NW100 énergie produite (kWh/année)	Capacité minimale gensests (%)	GS IV 240 kW (kWh/année)	GS Equiv180 kW (kWh/année)	GS I 200 kW (kWh/année)	Fraction renouv.	Diesel consommé (L/année)
1 812	3	1 734 341	30	5 937	133 320	45 196	0,84	64 810
1 812	1	578 114	30	11 135	338 132	92 504	0,40	173 625
1 812	--	0	30	103 824	79 330	489 873	0,0	<b>225 831</b>
1 812	3	1 734 341	7	5 937	21 361	72 267	0,91	33 793
1 812	1	578 114	7	11 135	62 008	168 629	0,58	82 359
1 812	--	0	7	103 824	26	557 541	0,0	220 098
3 000	3	1 734 341	30	99 895	241 245	62 396	0,71	138 763
3 000	1	578 114	30	230 953	241 307	192 168	0,33	223 647
3 000	--	0	30	918 166	4 654	172 746	0,0	345 990
3 000	3	1 734 341	7	99 985	47 960	84 925	0,81	77 080
3 000	1	578 114	7	230 953	19 316	295 343	0,38	178 778
3 000	--	0	7	918 166	13	176 707	0,0	345 655

La **modélisation no 16** simule le fonctionnement du système électrique actuel, plus la cogénération, plus un parc d'éoliennes Northern Power NW100 Arctique de 100 kW composé de 0 et 3 unités. La **modélisation no 18** ajoute aux architectures antérieures la présence d'un SSB de taille nominale 27 kWh, 18,9 kWh effectifs. On modélise aussi deux pourcentages, de 30 % et de 7 %, de la charge minimale pour les trois gensests qui représentent la centrale (**GS 1, GS équivalent, GS 4**). Tous les autres paramètres restent les mêmes que ceux utilisés pour les modélisations antérieures (les nos 15 et 17).

Tableau 26. Modélisation 18. Système hybride avec NW100 et stockage de 18,9 kWh

Charge moyenne journalière (kWh/jour)	Quantité NW100 100 kW	Batt énergie Ent/Sort (kWh/année)	Capacité minimale gensets (%)	GS IV 240 kW (kWh/année)	GS Equiv180 kW (kWh/année)	GS I 200 kW (kWh/année)	Fraction renouv.	Diesel consommé (L/année)
1 812	3	1 961/1 667	30	5 346	116 765	42 790	0,85	57 885
1 812	1	2 942/2 501	30	10 547	371 074	87 436	0,41	165 633
1 812	--	2 027/1 742	30	103 377	82 166	485 736	0,0	225 320
1 812	3	2 405/2 044	7	5 673	18 397	69 997	0,91	31 887
1 812	1	4 238/3 615	7	10 902	60 463	163 477	0,58	79 996
1 812	--	1,32/19,5	7	103 824	26	557 523	0,0	220 092
3 000	3	2 702/2 297	30	97 549	213 583	61 101	0,73	127 679
3 000 <sup>a</sup>	1	4 651/3 971	30	227 949	244 925	186 896	0,33	222 220
3 000	--	132/131	30	918 013	4 709	172 722	0,0	345 955
3 000	3	3 198/2 719	7	99 022	42 174	82 734	0,82	74 004
3 000	1	1 931/1 659	7	230 833	19 677	293 540	0,38	178 265
3 000	--	1,33/19,5	7	918 058	13	176 797	0,0	345 649

NOTES : a) La taille de 18,9 kWh est la capacité utile du SSB. b) Le SSB de cette architecture a une durée de vie de 3,92 ans, comparable aux SSB des autres architectures qui ont des durées de vie de 4 ans.

Les résultats des modélisations du système hybride révèlent les informations suivantes :

- Le point de référence pour la consommation annuelle du carburant est de 225 831 L/année qui sont les dépenses modélisées de la centrale actuelle en exploitation et optimisée avec une charge électrique primaire de 1812 kWh par jour et une capacité de charge minimale de 30 % des gensets, plutôt que la consommation réelle de carburant de 2010-11 à Jubany. De la même façon que Frye (2006), les résultats des modélisations des architectures proposées éolien-diesel ont été comparés par rapport à ceux issus de la modélisation de la centrale électrique de la base Scott, et non pas par rapport aux données réelles.
- La NW100 permet une réduction plus importante de la consommation de carburant que l'Excel-S pour la même puissance nominale installée (1 NW100 de 100 kW équivaut à 10 Excel-S de 10 kW).

- Bien sûr, plus d'éoliennes diminuent davantage la consommation de carburant, mais l'investissement initial est plus élevé.
- Une capacité minimale des gensets plus bas (7 %) épargne plus du carburant.
- Comme prévu, l'ajout d'un stockage électrique de petite taille diminue la consommation du carburant, et aussi le nombre des cycles de démarrage/arrêt et le temps d'opération des gensets.

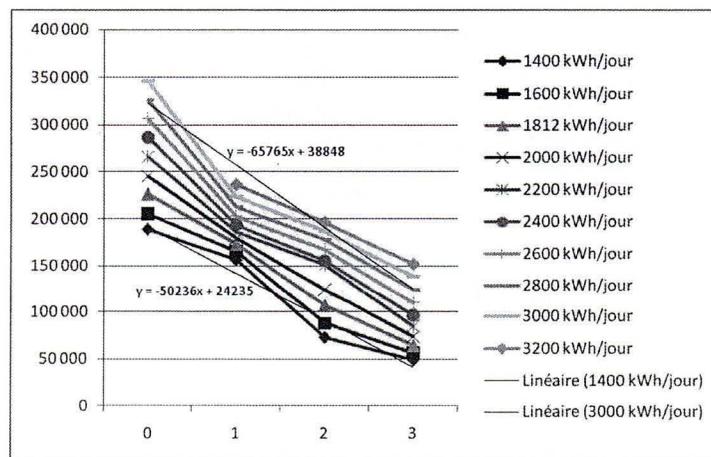


Figure 68. Taux d'économie de carburant pour dix niveaux de charge

Par rapport à l'étude de sensibilité de variation de la charge électrique moyenne journalière, la Figure 68 montre la consommation de carburant du système hybride avec 0, 1, 2 et 3 éoliennes NW100, pour 10 niveaux de charge électrique primaire. Il peut être constaté, selon la pente des lignes de tendance pour les charges de 1400 et 3000 kWh/jour, que plus la charge augmente, plus la réduction de consommation de carburant est importante. Pour une charge de 2000 kWh/jour, la relation est aussi presque linéaire.

Le fait de se baser sur un schéma fonctionnel très général qui permet de représenter de différentes solutions technologiques donne une grande flexibilité dans les choix du système hybride. Au-delà des résultats des modélisations, il y a des facteurs qui doivent être évalués pour chaque choix. Par rapport aux modèles d'éoliennes et le nombre d'unités qu'on peut utiliser, les facteurs suivants doivent être considérés lorsqu'on procède à des conceptions plus concrètes :

- L'utilisation d'éoliennes comme la Bergey Excel-S a l'avantage, en raison de leur taille et poids, de ne pas nécessiter une étude de sols très détaillée, comme c'est le cas de la Northwind 100 arctique qui utilise une tour plus haute et plus lourde. Ceci est en raison du mélange des pergélisols riches et pauvres en glace à Jubany. Aussi, la tour de l'Excel-S est typiquement à levage automatique, tandis que l'installation de la NW100 nécessite une grue. Du point de vue écologique, les haubans des tours des Excel-S pourraient poser des dangers aux populations d'oiseaux près de Jubany, un avantage pour la turbine NW100, qui a une tour sans haubans.
- Le surdimensionnement des gensets actuels à Jubany met une limite à l'ajout de turbines éoliennes dans le cadre d'un projet de faible pénétration, cas où les éoliennes agissent comme des « charges positives » dans le réseau. Même l'ajout d'une petite puissance éolienne forcerait les génératrices diesel à opérer en dessous de leur niveau minimal de charge. D'autre part, il est très difficile de transformer le système actuel en un système de haute pénétration éolienne parce que les gensets ne sont pas prêts à démarrer/arrêter de façon automatique et à garantir un service électrique sans interruption (Frye, 2006). Ainsi, pour arriver à une haute pénétration en énergie éolienne, plus d'investissements en turbines doivent être prévus, mais aussi dans l'opération automatique des gensets et en systèmes de contrôle qui puissent gérer toute l'énergie en excès produite par les éoliennes.

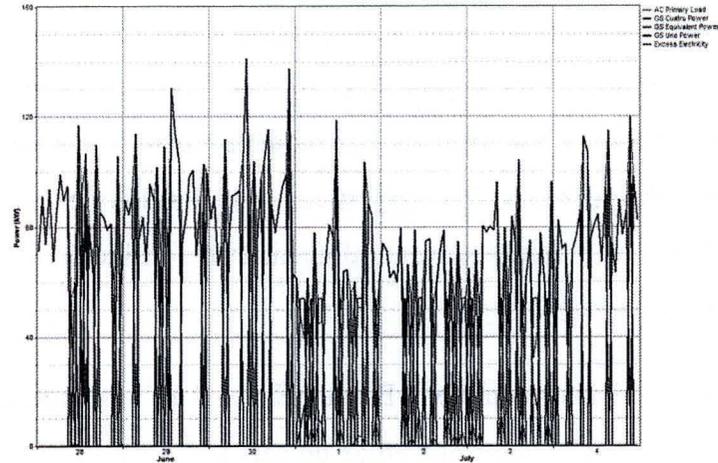


Figure 69. Graphe horaire de charge, genseis et électricité en excès

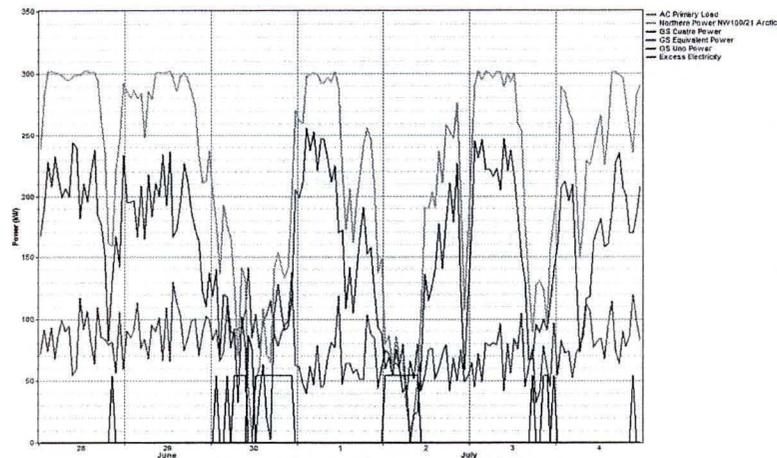


Figure 70. Graphe horaire de charge, genseis, éoliennes et électricité en excès

Les figures 69 et 70 montrent l'énergie excédentaire modélisée du système pour une architecture du système de Jubany avec trois turbines NW100 pour un total de 300 kW éoliens installés (charge électrique en bleu, électricité éolienne en vert, électricité des genseis en brun et électricité en excès en pourpre; la figure°69 montre comme les génératrices qui suivent la charge électrique ; la figure°70 montre l'électricité en excès produite par les éoliennes. Toute cette énergie en excès doit être consommée par des charges secondaires afin de pouvoir maintenir la stabilité électrique. Par contre, le contrôle

du système devient de plus en plus complexe et coûteux. Celui-ci doit disposer des informations sur les flux d'énergie de la production, de la charge et du stockage, et ceci avec une telle rapidité qu'elles permettent de maintenir la stabilité électrique du système.

#### **4.2.4 Aperçu préliminaire de la rentabilité du système hybride**

Pendant cette recherche, peu d'informations à caractère économique et financier ont été fournies par la DNA. Le coût du kilowatt « diesel » installé à Jubany reste inconnu. Ce coût ne serait pas seulement le coût de l'investissement de capital des génératrices diesel et leur coût d'exploitation et maintenance, mais selon la TS 62257-7-3 le coût du « groupe électrogène installé lui-même, les travaux de génie civil ou bâtiment préfabriqué liés, et tous les auxiliaires nécessaires pour le fonctionnement du genset comme réservoir de carburant, tuyauterie, mise à terre du système, etc. » (TS 62257-7-3, 2008). D'autre part, à ce stade de la recherche, une étude particulière du coût du kilowatt « éolien » installé dans les conditions particulières de Jubany n'a pas été réalisée. C'est ainsi que les résultats économiques des modélisations Homer, qui dépendent des investissements du capital initial en génératrices diesel et en éoliennes pour leur calcul, ne sont pas fiables.

Par rapport au coût du kilowatt « éolien » installé en sites du climat froid, les données fournies par Frye (2006) pourraient servir comme point de départ dans le cadre de cette étude. En effet, Frye souligne que le coût total de l'installation du système hybride à la station antarctique Mawson (un des cas d'exemple du chapitre 3) a été d'environ 7 millions de dollars Néozélandais répartis de la façon suivante :

- Gestion du projet : 10 %
- Deux turbines Enercon E-30 de 300 kW chacune : 25 %
- Fondations et infrastructure des turbines : 20 %
- Centrale et équipements : 20 %

- Transport : 10 %
- Contrôle de la centrale électrique : 8 %
- Mise en service : 5 %
- Pièces de rechange des turbines : 2 %

Si l'on considère qu'en 2006, 1,00 \$ NZ = 0,6500 \$ US (x-rates.com)

$$7\,000\,000\ \$\ NZ * 0,6500\ \$\ US\ par\ 1\ \$\ NZ = 4\,550\,000\ \$\ US$$

$$4\,550\,000\ \$\ US / 600\ kW = 7\,583\ \$\ US / kW\ à\ 2006$$

Pour cette raison Frye estimait en 2006, à la Base Scott, un coût par kilowatt éolien installé de 7 540 \$ US (Frye, 2006).

Des données plus récentes sont celles de (Fay, 2010) qui mentionne qu'en Alaska, en 2010, le coût moyen par kilowatt éolien installé en milieux urbains ou en endroits accessibles par autoroute était de 3 100 \$ US. Le coût moyen par kilowatt éolien installé en milieux ruraux variait entre 4 000 \$ et 15 000 \$ US et le coût de projets plus petits en endroits isolés était au-dessus de ces valeurs, selon les prix locaux de l'énergie, de la logistique et des conditions de construction.

Comme mentionné dans le chapitre 1, le coût du carburant GOA à Jubany a été en 2010 de 2,000 \$ US par litre, et son taux d'inflation annuelle a été de 20 % annuel. (Informations du chef de base O. Interlandi). Pour la base Scott, Frye mentionne un coût de 2,65 \$ NZ, ou 1,7225 \$ US en 2006 (Frye, 2006).

Avec les informations suivantes : le coût du kilowatt « éolien » (15 000 \$ US (Fay, 2010)), le coût du carburant GOA à Jubany et son taux d'actualisation en 2010, et les épargnes de GOA obtenues avec les modélisations Homer, des tableaux de flux de trésorerie sur 20 ans peuvent être élaborés afin d'examiner la rentabilité de deux systèmes hybrides proposés pour la base Jubany. Il s'agit des systèmes hybrides avec une et avec

trois éoliennes NW100 (100 kW et 300 kW éoliens installés), sans stockage électrique. Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau 27. Analyse financière du système avec une turbine NW100 Antarctique

Entrées	Résultats
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût total : 100 kW*15 000 \$= 1 500 000 \$</li> <li>• Coût du GOA : 2,000 \$ par L</li> <li>• Épargne annuelle GOA : 225 831 L 173 625 L = 52 206 L</li> <li>• Taux d'inflation GOA : 20 % annuel</li> <li>• Taux d'inflation global : 5 %</li> <li>• Coût d'O&amp;M : 4 % du coût total</li> <li>• Taux d'intérêt financier : 15 % annuel</li> <li>• Annualité : 239 642,20 \$</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Épargnes nettes (VF) : 12 709 662 \$</li> <li>• Épargnes nettes (VP) : 5 495 907 \$</li> <li>• Taux interne de récupération : 44,1 %</li> </ul>

Tableau 28. Analyse financière du système avec trois turbines NW100 Antarctique

Entrées	Résultats
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût total : 300 kW*15 000 \$= 4 500 000 \$</li> <li>• Coût du GOA : 2,000 \$ par L</li> <li>• Épargne annuelle GOA : 225 831 L 64 810 L = 161 021 L</li> <li>• Taux d'inflation GOA : 20 % annuel</li> <li>• Taux d'inflation global : 5 %</li> <li>• Coût d'O&amp;M : 4 % du coût total</li> <li>• Taux d'intérêt financier : 15 % annuel</li> <li>• Annualité : 718 926,61 \$</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Épargnes nettes (VF) : 39 803 298 \$</li> <li>• Épargnes nettes (VP) : 17 316 916 \$</li> <li>• Taux interne de récupération : 45,4 %</li> </ul>

Ces résultats peuvent être considérés comme préliminaires : le coût du kilowatt « éolien » installé à Jubany pourrait surpasser les 15 000 \$, l'épargne annuelle de carburant pourrait varier d'an en an selon la productivité énergétique des éoliennes, le taux d'inflation annuel du GOA pourra varier de la valeur de 20 %. Des informations météorologiques et économiques plus détaillées de la DNA aideront à raffiner les tableaux de flux de trésorerie en stades postérieurs du projet. Les tableaux des flux de trésorerie sont présentés à l'annexe X.

#### 4.2.5 Résultats des modélisations à Homer

Dans les tableaux des **modélisations 17 et 18**, il peut être observé que 300 kW éoliens et un stockage électrique ajoutés à la centrale actuelle permettent des économies annuelles maximales de carburant d'environ 127 931 litres pour l'éolienne Excel-S et de 167 946 litres pour l'éolienne NW100. Par contre, 100 kW éoliens et un stockage électrique ajoutés à la même centrale permettent des économies annuelles maximales de carburant de 50 776°L pour l'éolienne Excel-S et de 60 198°L pour l'éolienne NW100. Pourtant, plus importants que les résultats quantitatifs des modélisations, approximatifs à cause des bas niveaux de connaissance du régime du vent, des événements du givrage et de la charge électrique à Jubany, sont leurs résultats qualitatifs :

- Les modélisations Homer confirment ce qu'à première vue est indiqué par la vitesse moyenne du vent de 9,95 m/s à Jubany : Jubany est un bon site pour la génération d'électricité à partir de la ressource éolienne. Reste à savoir dans quelle mesure la turbulence du vent et le givrage affecteraient la productivité des éoliennes.
- La génératrice diesel no IV se trouve surdimensionnée par rapport à la charge électrique primaire modélisée de 1812 kWh/jour. Dans la modélisation no 7-Optim, il a été observé que si la génératrice opère la totalité de l'année, la consommation du carburant monte à 251 133 L/année, une augmentation de 5,5 % de la consommation réelle de **237 980 L** pour 2010-11 (sans modifier les valeurs de la courbe de carburant du fabricant pour le genset IV).
- L'implémentation de la cogénération thermique peut éliminer ou au moins réduire substantiellement la consommation de carburant de la chaudière qui chauffe la « casa principal ».
- L'ajout au système hybride d'un stockage électrique de 15 minutes de la charge primaire diminue le nombre de cycles de démarrage/arrêt, le temps d'opération et la consommation du carburant des génératrices diesel.

Les modélisations ont aidé pas seulement à évaluer les avantages de l'ajout des éoliennes, mais aussi à focaliser certaines informations qu'on devra rechercher pendant les étapes suivantes du projet. Ils soulignent l'intérêt de se questionner, par exemple, quel est le pourcentage de charges électriques de chauffage dans les bâtiments proches à l'« Usina » et quelles sont les pertes thermiques par unité de surface des bâtiments à Jubany?



## CONCLUSIONS

La première conclusion est que l'utilisation de la série des spécifications techniques TS 62257 a contribué à mettre en place un processus de conception d'un système hybride d'électrification en climat froid dans une configuration efficace, productive et durable, en se basant sur les méthodologies, recommandations et expériences les plus actualisées des organismes de normalisation et de l'industrie.

Dans le chapitre 1, il a été identifié et évalué l'ensemble des diverses sources d'informations. Dans le chapitre 4 ont été élaborées les premières étapes de conception et dimensionnement du système. Sont absents de la série TS 62257 les aspects reliés à la cogénération et des effets du climat froid sur la production d'énergie du système. Cependant, comme méthodologie de base pour concevoir un système hybride éolien-diesel de façon normalisée, la série TS 62257 s'est avérée très utile. En plus de suivre les recommandations de la norme, il a été pris en compte, identifié et caractérisé les modifications nécessaires pour que le système soit adapté à l'opération en climat froid.

L'avantage le plus important d'avoir utilisé la série TS 62257 a été qu'elle a permis d'identifier les données manquantes essentielles pour la bonne continuation du projet.

### **Conclusions sur l'état actuel du projet**

Dans ce qui suit sont présentées les conclusions par rapport à l'état présent des connaissances du site, du système d'électrification et des modélisations :

#### *La connaissance des facteurs climatiques :*

- Il a été utilisé un fichier avec 14 ans (1994-2008) de mesures trihoraires prises à 10 mètres de hauteur. À partir de ce fichier, les logiciels Windographer et Homer ont calculé une vitesse moyenne annuelle du vent de 9,95 m/s et des vitesses maximales de 44 m/s, avec des vents prédominants de l'ouest. La méthodologie de mesures météorologiques à Jubany est celle d'un aéroport, sans possibilité de mesurer la turbulence, qui pourrait être provoquée par l'élévation « Tres Hermanos » près de la base. Ainsi, le niveau de connaissance du régime du vent est bas, de niveau 5 selon la TS 62257-4.
- La station météorologique à Jubany n'enregistre pas les événements de givrage, ainsi le niveau de connaissance du danger de givrage est bas (niveau 3 selon la TS 62257-4).
- La température minimale enregistrée dans 14 ans est de -25 °C. Elle n'atteint pas les limites opérationnelles minimales des turbines éoliennes présélectionnées pour le projet à Jubany. Au moins en théorie, les basses températures n'affectent pas la production éolienne.

#### *L'état actuel du système d'électrification et les autres générateurs d'énergie :*

- Après avoir réalisé 12 mesures manuelles de 24 heures de la charge électrique entre mars 2010 et février 2011 et avoir modélisé ces données avec le logiciel Homer, une charge moyenne journalière de 1812 kWh/jour a été calculée, à une puissance moyenne de 75 kW et un pic de 155 kW. Selon la TS 62257-4, le niveau de connaissance de la charge électrique primaire est bas (niveau 5).
- La centrale électrique était composée, en 2010-11, de 5 génératrices diesel, desquelles le genset no II de 180 kW a été renvoyé en 2011 en Argentine pour

réparations, avec 60 529 heures d'opération. Les génératrices restantes sont : no I, 200 kW, 8 254 heures d'opération; no III, 180 kW, 51 873 heures; no IV, 240 kW, 2 626 heures; no V, 180 kW, 35 532 heures. Les seuls compteurs électriques du réseau actuel sont ceux du courant et voltage des gensets. Le réseau n'a pas d'autres dispositifs pour mesurer la charge, c'est la raison d'avoir dû mesurer la charge manuellement.

- Pour la charge électrique primaire actuelle, les gensets sont surdimensionnés : les mesures de la charge réalisées montrent que, les gensets de 180 et 200 kW ont opéré à des capacités de 42 % et le genset de 240 kW à une capacité de 30 %, tandis que la TS 62257-4 recommande que les gensets opèrent à des capacités de 50 % à 80 %. Selon le personnel technique, les génératrices ont montré des signes d'usure prématurée.
- Le réseau électrique est triphasé, et la majorité des bâtiments de la base restent branchés directement au bâtiment de la centrale, l'« Usina », où se trouvent trois génératrices et le tableau général (la quatrième génératrice, qui est dans un bâtiment proche, reste elle aussi branchée directement au tableau général). Les trois courants de phase sont différents, possiblement parce que la quantité de charges branchée à chaque phase n'est pas la même. Le câblage du réseau est de types divers, certains très âgés.
- La chaudière à diesel qui chauffe la « casa principal » a consommé pendant 2010-11 20 800 L de carburant. La « casa principal », le principal logement de la base, se trouve à quelques 30 m de l'« Usina » où sont les génératrices diesel. Deux réchauffeurs d'air de la marque « Boker », l'un dans le garage de réparation des véhicules et l'autre dans la menuiserie, ont consommée 12 000 L de carburant pendant la même période. Au total, les générateurs thermiques ont dépensé 32 800 L de carburant pendant 2010-11.
- Le coût opérationnel annuel pour la génération d'électricité à Jubany pour l'année 2010-11 a été de 669 332 \$ US, le coût annuel du carburant dépensé par chaudière et « Bokers » a été de 65 613 \$ US pour un total de 734 946 \$ US dépensés en

2010-11 pour générer l'électricité et la chaleur. D'après le coût opérationnel électrique mentionné, et pour une énergie électrique générée entre 664 045 kWh/année et 679 021 kWh/année, le coût opérationnel du kilowattheure à Jubany pendant 2010-11 se trouverait dans la fourchette de 1,008 \$ US/kWh à 0,986 \$ US/kWh.

*Les conclusions des modélisations :*

- Jubany est un bon site pour la génération d'énergie électrique par éoliennes.
- Le genset IV est surdimensionné pour la charge électrique actuelle;
- La cogénération peut éliminer ou au moins réduire la consommation de la chaudière de la « casa principal »;
- L'ajout d'un petit stockage électrique au système hybride peut réduire davantage la consommation de carburant et l'usure des génératrices diesel.

### **Recommandations**

Les recommandations suivantes permettront à la DNA d'augmenter le niveau de connaissance des facteurs climatiques :

- Réaliser la mesure de la ressource éolienne à Jubany, les rafales et la turbulence incluses, au moyen d'anémomètres avec enregistrement automatique et taux élevé d'échantillonnage, d'environ une seconde (Manwell, 2002). Ils doivent être installés à 10 mètres de hauteur, pendant une campagne de mesures d'au moins une année.
- Détecter les évènements de givrage et leur durée avec la méthode de la paire d'anémomètres chauffés/non chauffés et un protocole d'identification du givre adapté aux conditions climatiques de Jubany.
- Utiliser les observations de visibilité (hauteur des nuages) de type aéroport réalisées d'habitude à Jubany et les registres historiques reliés pour estimer la présence dans le site de nuages givrants. Si les mesures de détection confirment que les nuages givrants sont une des sources du givre à Jubany, on recommanderait aussi l'installation d'un détecteur de point de rosée d'utilisation à températures de moins zéro degré.

Les recommandations à suivre par la DNA afin d'améliorer le niveau de connaissance du système d'électrification et le préparer pour l'implantation du système hybride éolien-diesel sont:

- Le sous-système de distribution nécessite une mise à niveau qu'inclut le remplacement de l'ancien câblage et l'équilibrage des charges électriques branchées à chacune des trois phases.
- Le tableau général à l'« usina » nécessite une actualisation qu'inclut l'installation d'un dispositif automatique de mesure et d'enregistrement de la charge électrique. Le but est d'améliorer la connaissance de la courbe de la charge électrique.
- Implémenter la cogénération thermique des génératrices actuelles à l'« Usina » pour éliminer ou réduire la consommation de carburant de la chaudière de la « casa principal » (la chaudière resterait comme système d'appui). Cette installation pourra

se réaliser de façon indépendante du projet du système hybride éolien-diesel, mais il est très recommandable de considérer les mises à niveau de la centrale qui seront nécessaires au projet du système hybride.

- Réaliser une vérification de l'énergie électrique dans la base Jubany. Cela signifie mesurer toutes les charges présentes dans la base, leur type (résistive, inductive, capacitive) et leurs périodes d'utilisation.
  - Un des aspects importants à mesurer est le pourcentage exact des charges résistives pour le chauffage de locaux près de l'« Usina », parce que ce pourcentage de la charge électrique pourrait être couvert par une deuxième étape de cogénération. Néanmoins, cela nécessite des gensets plus petits, pour ne pas forcer les gensets actuels à fonctionner sous un régime de charge plus faible que celui actuel.
  - Établir une priorité pour le délestage automatique des charges électriques afin de fournir de la réserve tournante du côté de la demande lors d'une faible productivité éolienne. Le réseau électrique à Jubany devrait pouvoir débrancher des charges selon un ordre de priorités établi entre la DNA et le concepteur. Par exemple, une charge de haute priorité serait le chauffage électrique et une charge de basse priorité serait le chauffage d'eau pour faire la lessive, qui serait débranchée en premier.
  - Les informations obtenues de la vérification permettront à la DNA d'élaborer, de commun accord avec le concepteur du projet, la liste de buts, services, contraintes et niveaux de performance détaillés à remplir pour les sous-systèmes de production et de distribution selon la TS 62257-4. Cela permettra de fixer les objectifs à atteindre pour ces deux sous-systèmes et ainsi d'avoir une référence solide pour la suite du processus de conception et le dimensionnement de toute l'installation.
- Réaliser une vérification de toutes les charges thermiques : les besoins de chauffage des locaux, de l'eau, des équipements, pour élaborer un profil annuel de la charge thermique par rapport aux températures extérieures (Hunter, 1994). Ceci est requis

afin d'évaluer le remplacement, dans un système hybride, de l'énergie des chaudières « Bokers » par le chauffage électrique fourni par l'excès d'énergie éolienne et la cogénération des gensets.

- En considérant les données de la vérification d'énergie électrique, planifier un remplacement des génératrices diesel actuelles à Jubany par des génératrices plus petites (Frye, 2006), toutes du même modèle et fabricant, et avec démarrage/arrêt et opération automatique et rapide (Drouilhet, 2001). *Il est à souligner que tôt ou tard tous les gensets à Jubany devront être remplacés, soit à cause du vieillissement soit du surdimensionnement.*
  - Cela aurait les avantages de a) diminuer immédiatement la consommation de carburant b) éviter les problèmes d'encrassement causés dans les génératrices diesel actuelles par la faible charge c) permettre peut-être d'installer une basse pénétration éolienne, impossible dans les conditions actuelles de la centrale électrique, d) préparer la centrale pour une pénétration éolienne moyenne ou haute.
  - Un aspect important des génératrices nouvelles est qu'elles aient la capacité de faire la cogénération par la récupération soit de la chaleur du système de refroidissement, soit des gaz d'échappement. Cette capacité serait la source d'un circuit thermique pour alimenter en chaleur les bâtiments proches de l'« Usina », similaire au circuit thermique de la station australienne Mawson.
  - La vérification de l'énergie électrique permettra de détecter certaines charges qui, comme le moteur triphasé de l'équipement pour la fabrication de l'azote liquide, sont des charges « dispatchables » en raison du fait qu'on peut programmer leur démarrage avec anticipation. La connaissance de leurs puissances consommées et périodes d'utilisation permettrait l'utilisation d'une petite génératrice diesel dédiée pour compenser leur demande de pointe, ou bien de programmer le démarrage de ces charges lors des périodes de faible charge électrique dans le réseau de Jubany.

- Cette mise à niveau de la centrale des gensets devra être faite selon les dispositions pertinentes des spécifications techniques TS 62257-7, 7-3, 9-1.

Avec les résultats des vérifications d'énergie électrique et thermique, et les mesures de la ressource éolienne et du givrage de niveau 1 selon les définitions de la TS 62257-4, deux scénarios sont proposés pour la partie éolienne du système hybride :

**A) Installer un total de 100 kW de turbines Bergey Excel-S, Proven WT, ou Fortis Alizé**

**B) Installer une turbine Northwind Arctique de 100 kW**

Les deux options nécessitent à priori la modernisation de la centrale et du réseau électrique. La partie éolienne opérerait ensemble avec la centrale électrique actualisée des gensets automatiques plus petits et l'équipement électrique nécessaire pour le conditionnement électrique et le maintien de la qualité de l'électricité générée (convertisseurs AC-AC, charges de dissipation, stockage de 15 minutes de la charge par roues d'inertie ou par batteries, etc.).

**L'option A** présente l'avantage d'une possible installation graduelle. Cela permettrait d'obtenir de l'expérience opérationnelle avec le passage par la pénétration basse et moyenne. Les coûts d'installation seraient repartis dans un délai plus long. La taille et le poids plus petits de ces éoliennes ne nécessitent pas une étude très approfondie des sols. Leurs tours à levage automatique ne nécessitent pas de grue. Pourtant, le mécanisme auto-enrouleur de protection peut s'avérer sensible à la turbulence et aux rafales.

**L'option B** a l'avantage de l'expérience opérationnelle de la turbine Northwind 100 en climat froid. Cette turbine possède déjà toutes les adaptations recommandées pour le froid par l'IEA. Selon les informations disponibles, c'est la seule turbine de puissance nominale adaptée à la charge de Jubany. Leur tour autoportante n'a pas de haubans, pourtant l'installation nécessite une bonne étude de sols, de bonnes fondations et une grue.

Le niveau proposé de 100 kW de puissance éolienne installée pourrait être modifié selon des connaissances plus approfondies du vent, du givrage et de la charge. On pourrait aussi proposer une deuxième étape d'installation de plusieurs turbines.

### **Travaux futurs**

Des travaux futurs devront permettre de mieux connaître les données économiques, dont seuls les coûts opérationnels de 2010-11 à Jubany sont actuellement disponibles. Parmi ces données se retrouvent le prix original et d'installation du dernier genset arrivé à Jubany, le Cat 3406C et les coûts des autres gensets plus anciens. Présentement, le coût du kilowatt « diesel » installé à Jubany dans le passé et dans le présent reste inconnu.

Les prix locaux de l'énergie (du carburant surtout), des turbines, des tours et des autres matériaux nécessaires, de la logistique et de la construction à l'Antarctique argentine doivent être évalués de façon plus rigoureuse pour estimer adéquatement le coût du kilowatt éolien à Jubany.

La connaissance du profil annuel de la charge thermique à la base Jubany permettra d'entreprendre la conception d'un réseau thermique comme celui de la station Mawson. Une fois le système hybride éolien-diesel installé, l'énergie thermique de la cogénération, des charges électriques secondaires/de dissipation et des chaudières auxiliaires chaufferait un volume d'eau importante qui serait transporté entre les bâtiments de la base proches à l'« Usina » au moyen d'une conduite isolée. Cette installation nécessite une pénétration éolienne moyenne ou haute pour disposer de l'énergie électrique excédentaire à être consommée dans les charges de dissipation.

Un autre travail serait l'installation de charges électriques secondaires/de dissipation pour le chauffage d'eau à la menuiserie (numéro 20 dans le plan du réseau électrique) et à l'atelier des véhicules (vers l'ouest, hors du plan du réseau électrique). La cogénération des gensets de l'« Usina » ne peut pas être utilisée pour éliminer ou réduire la consommation de carburant des réchauffeurs d'air « Boker » qui chauffent ces bâtiments en raison des longues distances et des pertes thermiques conséquentes. Par contre, la transmission de l'électricité en excès vers les charges secondaires ne pose pas de problèmes. Ces deux points de chauffage resteraient isolés du circuit thermique des bâtiments près de l'« Usina ». Dans ces deux bâtiments, les réchauffeurs « Boker » continueraient à avoir le rôle de systèmes auxiliaires du chauffage. Cette installation nécessite une pénétration éolienne moyenne à haute pour alimenter ces deux charges secondaires additionnelles.

Il y a une certaine dépense de carburant reliée à l'utilisation d'un incinérateur pour brûler des déchets du type organique, une exigence des protocoles antarctiques. Il doit être étudié la possibilité de brûler ces déchets dans les chaudières auxiliaires du circuit thermique, et épargner ainsi le carburant dépensé par cet incinérateur.

Le document « Alaska Energy » mentionne que « la consommation d'énergie à chaque communauté se compose de trois éléments principaux : l'électricité, le chauffage des locaux et le transport » (Alaska Energy Authority, 2009). Ces trois éléments de consommation apparaissent aussi à Jubany. Actuellement, il n'y a pas assez d'informations sur les dépenses d'énergie reliées à la transportation, c'est-à-dire la consommation de carburant des véhicules. Une proposition d'actualité dans le domaine des systèmes hybrides est d'utiliser des véhicules soit électriques, soit hybrides pour pouvoir intégrer leur consommation d'énergie dans le système. Les bancs des batteries de ces véhicules seraient rechargés par l'électricité en excès du système hybride éolien-diesel. Ainsi, on épargnerait une partie de la consommation de carburant et, en plus, ces bancs, lorsqu'ils seraient branchés au réseau électrique, agiraient comme un réservoir d'énergie pour améliorer la stabilité du système. Alors, un autre travail à prévoir dans l'avenir sera d'étudier la consommation d'énergie reliée au transport dans la base Jubany.

*ANNEXE I*  
*LES ANTÉCÉDENTS DU PERSONNEL TECHNIQUE*

Les données du personnel technique à la base antarctique Jubany montrent qu'il y a quatre techniciens qui travaillent avec les génératrices diesel, le réseau électrique et d'autres installations. Les deux autres travaillent comme mécaniciens de véhicules automoteurs. On a conservé le format du rapport original reçu du lieutenant-colonel O. Interlandi.

**Antecedentes del Personal de la Base Antártica Jubany**

- 1. Sargento Ayudante Mecánico de Ingenieros: Omar Luís GAONA.**
  - a. Egresó: Escuela de Suboficiales de los Servicios para Apoyo de Combate ``General LEMOS`` en el año 1990.
  - b. Secundario: Completo.
  - c. Estudios Terciarios: Escuela Superior Técnica/Universidad Tecnológica Nacional (Falta rendir tres finales).
  - d. Especialidades: Técnico en Mantenimiento y conservación de equipos y maquinas viales. En grupos electrógenos.  
Técnico en automotores y maquinas térmicas.
  - e. En la Base Antártica Jubany se desempeña como Encargado de la Usina.
- 2. Sargento Primero Mecánico Motorista a Oruga Raúl SERAPIO.**
  - a. Egresó: Escuela de Suboficiales de los Servicios para Apoyo de Combate ``General LEMOS`` en el año 1994.
  - b. Secundario: Completo.
  - c. Es Encargado de los vehículos a oruga.
  - d. Posee la Aptitud Antártica
- 3. Sargento Mecánico Motorista: Abel SANDOVAL**

a. Egresó: Escuela de Suboficiales de los Servicios para Apoyo de Combate ``General LEMOS`` en el año 1999.

b. Secundario: Completo.

c. Especialista en motores de vehículos.

**4. Cabo Primero Mecánico Electricista Gustavo VASQUEZ.**

a. Egresó: Escuela de Suboficiales ``General LEMOS`` en el año 2002.

b. Secundario: Completo.

c. Es Auxiliar del Encargado de la Usina.

**5. Cabo Primero Mecánico de Instalaciones Walter Daniel CANCINO.**

a. Egresó: Escuela de Suboficiales de los Servicios para Apoyo de Combate ``General LEMOS`` en el año 2000.

b. Secundario: Completo.

c. Es Encargado del mantenimiento y reparación de todas las instalaciones de agua, gas, electricidad de la base.

**6. Cabo Primero Mecánico de Instalaciones Jorge Alberto ARRUA.**

a. Egreso: Escuela de Suboficiales ``General LEMOS`` en el año 2003.

b. Secundario: Completo.

c. Es Auxiliar del Encargado de mantenimiento y reparación de las instalaciones de la base.

**Nota:** Ninguno de los nombres antes mencionado, realizó trabajos con Aerogeneradores.

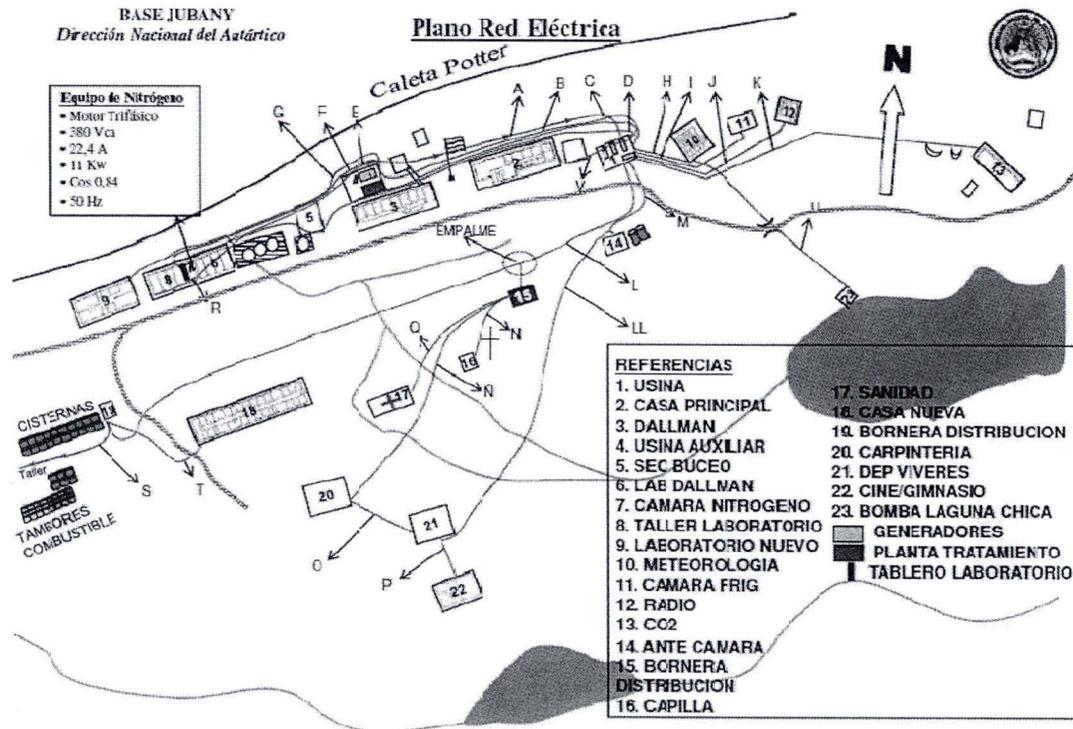
Teniente Coronel Orlando Rubén Interlandi

Jefe de la Base Antártica Jubany

**ANNEXE II**  
**PLAN DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE**

Ce plan du réseau électrique de la base antarctique Jubany a été élaboré par le caporal Walter Daniel CANCINO au cours de la semaine du 1 à 7 août 2010.

Figure 71. Plan du réseau électrique de Jubany, août 2010









**ANNEXE IV**  
**COTISATIONS PESO ARGENTIN – DOLLAR DES É.U.A.**

Le tableau suivant montre les cotisations mensuelles (à la fin de chaque mois) du peso argentin par respect au dollar américain pendant l'année 2010, ainsi que la moyenne annuelle.

Tableau 29. Cotisations mensuelles du peso argentin –dollar américain en 2010

<b>Año</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>
<b>2010</b>	3,835 \$	3,859 \$	3,878 \$	3,888 \$	3,929 \$	3,931 \$

<b>Año</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Valor Promedio</b>
<b>2010</b>	3,940 \$	3,950 \$	3,960 \$	3,957 \$	3,988 \$	3,976 \$	<b>3,924 \$</b>

Source : Wikipédia, « Categorías: Economía de Argentina | Monedas de Argentina | Historia numismática de Argentina | Anexos: Numismática | Anexos: Argentina ». Consulté pendant mars 2011



**ANNEXE V**  
**MATRICE DE DÉCISION DES ÉOLIENNES DE 10 kW**

Tableau 30. Matrice de décision des éoliennes de 10 kW

Turbine	TOWER TYPE	Tower Height	Blade color	nacelle weight	MIN TEMPERATURE AVAILABILITY	OPERATIONAL AVAILABILITY	power coefficient	TPE HOMER	TPE WINDOGRAPHER	price	total
RATING	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	1
PROVEN WT 6kW	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	2.85
BERGEY EXCEL S	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	2.70
FORTIS ALIZE 10kW	3	2	1	3	1	3	3	3	2	3	2.50
VERGNET GEV 6/5	3	2	2	1	1	1	3	3	1	3	2.00
WESTWIND 10kW	2	1	3	1	1	1	3	3	2	2	1.95
PROVEN WT 15kW	1	3	2	3	1	3	1	1	3	1	1.85
VERGNET GEV 7/10	1	2	2	1	1	1	3	3	2	1	1.75
EOLTEC 10-25kW	2	1	2	3	1	1	3	1	3	2	1.95
VERGNET GEV 10/15	1	2	2	1	1	1	2	2	1	1	1.35
VERGNET GEV 10/20	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1.25
WESTWIND 20kW	2	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1.30

La matrice de décision qui a servi pour déterminer le choix des éoliennes de 10 kW présélectionnées pour le système éolien-diesel en climat froid à Jubany est présentée ci-dessus. (Corral, 2009).

Les facteurs pris en considération pour faire la présélection sont la température minimale d'exploitation, le prix estimé, les performances théoriques de chaque turbine et les économies de carburant annuelles calculées avec Homer et Windographer. Un facteur de pondération (de 1 à 3) a été attribué à chaque facteur afin de refléter l'importance de ce facteur dans le choix de la turbine la plus adaptée pour la base Jubany.

## ANNEXE VI CONFIGURATIONS DES SYSTÈMES HYBRIDES

La figure suivante montre la configuration de base de systèmes conventionnels à génératrices diesel et des configurations de systèmes hybrides à pénétration faible, moyenne et haute en énergie éolienne. Il y a d'autres variantes de ces configurations (Fay, 2010).

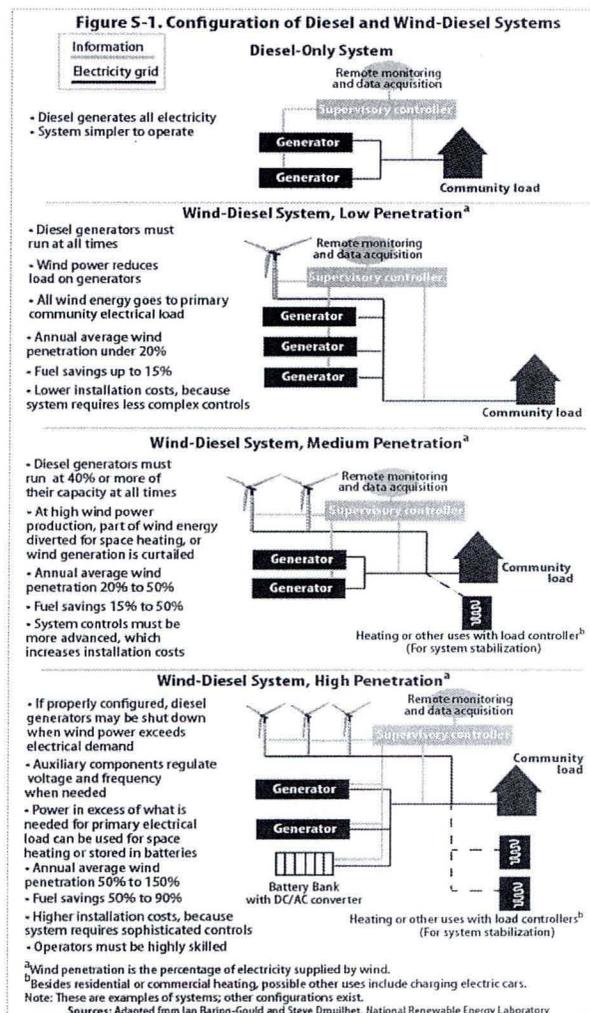


Figure 73. Configurations de systèmes hybrides



## *ANNEXE VII*

### *SCHEMAS FONCTIONNELS DE LA TS 62257-2*

On présente dans cette annexe les schémas fonctionnels de la TS 62257-2 reliés à l'architecture du système hybride éolien-diesel proposé pour la base Jubany. Il s'agit des systèmes de type T<sub>4</sub>C et T<sub>5</sub>C comme il a été présenté dans le Tableau<sup>o</sup>11.

Il est à noter que la série des spécifications techniques TS 62257 est conçue pour la mise en place de systèmes hybrides jusqu'à 750 V de courant continu, 500 V de courant alternatif et 100 kVA de puissance nominale.

Pourtant, les diagrammes montrés dans la TS 62257-2 sont des schémas fonctionnels et non des diagrammes électriques. Ils sont très généraux dans leur nature et capables de s'adapter à une grande variété de situations. Ces schémas fonctionnels sont fournis comme des exemples des systèmes susceptibles d'être utilisés partout dans le monde, autant dans les pays développés que dans ceux en développement. Les points de commutation indiqués dans les schémas sont d'usage général, sans aucune indication quant au type spécifique de l'appareillage à utiliser. Les limites entre les types des sous-systèmes (production, distribution, demande/applications) sont dessinées (TS 62257-2, 2004).

Le système du type T<sub>4</sub>C, illustré par la figure 75, est constitué d'une microcentrale hybride (énergie renouvelable plus diesel) avec stockage d'énergie, alimentant un microréseau. Ce type de système inclut une génératrice de réserve qui fournit, au minimum périodiquement, une charge d'égalisation pour les batteries. La disponibilité de ce générateur d'énergie de réserve permet aussi de sécuriser l'approvisionnement des utilisateurs ayant un besoin critique d'énergie électrique en continu comme les dispensaires médicaux, réfrigérateurs à vaccins, etc. Il faut signaler qu'en Antarctique, tous les utilisateurs ont un besoin critique d'approvisionnement d'énergie en continu. Le nombre des utilisateurs à sécuriser affecte les dimensions du générateur de réserve et, dans un certain degré, détermine le niveau du service rendu par la microcentrale. La distribution des

activités sécurisées et non sécurisées peut varier selon les besoins et ainsi dans certains cas on peut sécuriser un nombre maximal d'applications tandis que dans d'autres on ne sécurise aucune (TS 62257-2, 2004).

**Annex E**  
**(informative)**  
**Functional diagrams**  
**(See Clause 6)**

**E.1 Glossary of symbols**

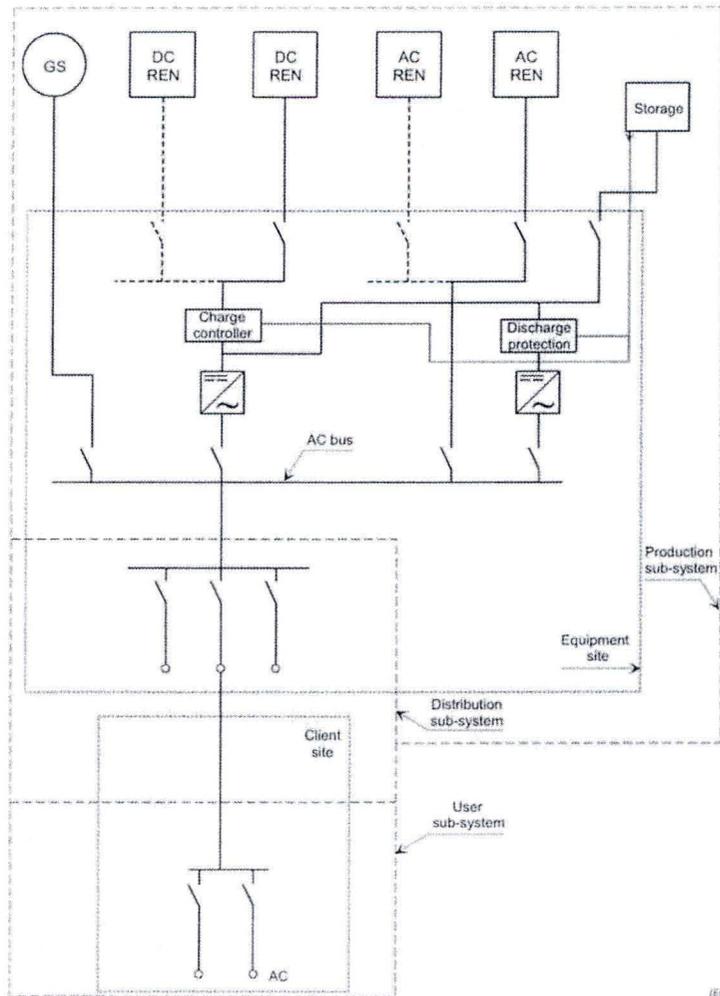
**Table E.1 – Glossary of symbols**

Symbol	IEC 60617 Reference (DB:2001-7) <sup>a)</sup>	Description	Specific note				
	IEC 60617-2-500059 (DB:2001-7) <sup>a)</sup>	Object (equipment, functional unit, component)	Suitable legends should be inserted in or added to the symbol outline to indicate the type of object. For example: <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr> <td>DC</td> <td>DC generator using renewable energy</td> </tr> <tr> <td>AC</td> <td>AC generator using renewable energy</td> </tr> </table>	DC	DC generator using renewable energy	AC	AC generator using renewable energy
DC	DC generator using renewable energy						
AC	AC generator using renewable energy						
	IEC 60617-6-500819 (DB:2001-7) <sup>a)</sup>	Synchronous generator	Alternatively genset (synchronous generator of the genset)				
	IEC 60617-6-500894 (DB:2001-7) <sup>a)</sup>	Rectifier					
	IEC 60617-6-500896 (DB:2001-7) <sup>a)</sup>	Inverter					
	IEC 60617-3-500017 (DB:2001-7) <sup>a)</sup>	Terminal					
	IEC 60617-2-500154 (DB:2001-7) <sup>a)</sup>	Mechanical interlock between two devices					
	IEC 60617-6-501342 (DB:2001-7) <sup>a)</sup>	Battery of secondary cells					
	IEC 60617-9-501410 (DB: 2001-11) <sup>a)</sup>	Frame, chassis					
	IEC 60617-2-500200 (DB:2001-7) <sup>a)</sup>	Ground (earth), general symbol					
	IEC 60617-7-500227 (DB:2001-7) <sup>a)</sup>	General symbol for a switch, make contact					
	IEC 60617-7-500229 (DB:2001-7) <sup>a)</sup>	Break contact					
	IEC 60617-7-500973 (DB:2001-7) <sup>a)</sup>	Lightning arrester					

<sup>a)</sup>DB<sup>1</sup> refers to the IEC on-line database.

Figure 74. Glossaire des symboles des schémas fonctionnels

Le système du type T<sub>5</sub>C, illustré par la figure 76, a une microcentrale composée d'une ou quelques génératrices diesel alimentant un microréseau. La seule source d'énergie est le genset qui fournit l'approvisionnement électrique directement au réseau. En général, le genset opère pendant des périodes de temps prédéterminées (TS 62257-2, 2004).

Figure E.16 – Type T<sub>4</sub>C-b system

IEC 61804

Figure 75. Système du type T<sub>4</sub>C, avec bus à C.A.

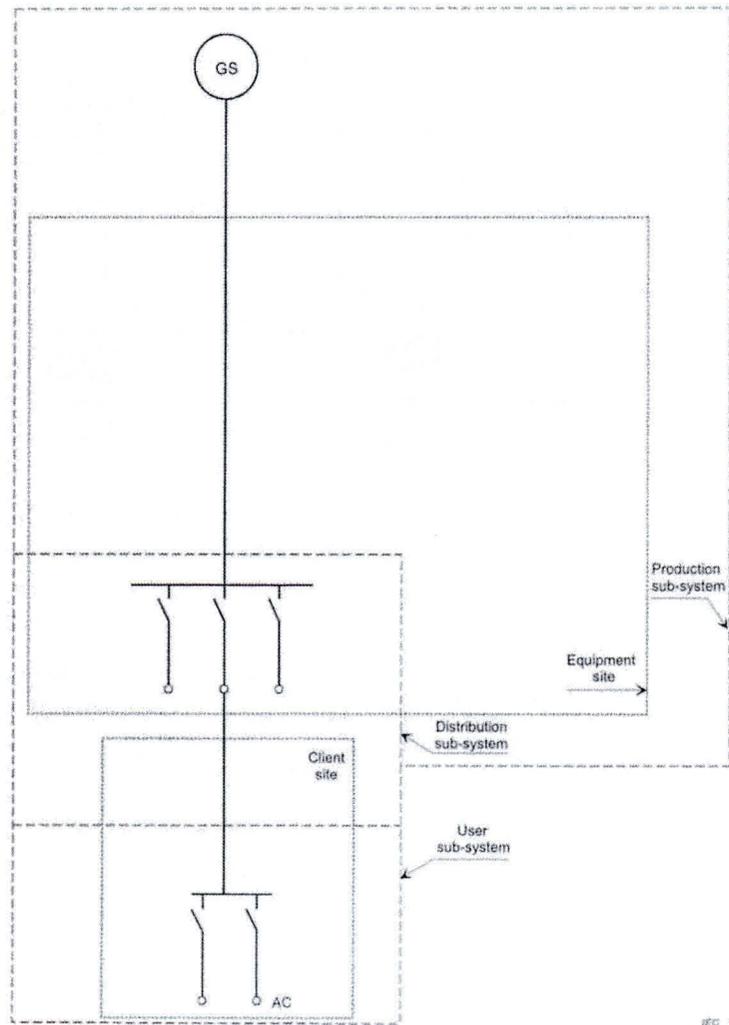


Figure E.17 – Type T<sub>5</sub>C system

REC 81

Figure 76. Système du type T<sub>5</sub>C, avec seulement genset

**ANNEXE VIII**  
**CALENDRIER 2010-2011 DES GENSETS A JUBANY**

Le Tableau 31 montre le calendrier 2010-2011 de l'opération des cinq groupes électrogènes à la base Jubany. La période d'opération considérée normale a été de 10 jours continus (240 heures).

Tableau 31. Calendrier 2010-11 des gensets à Jubany

**Tabla de operación grupos electrógenos durante campaña 2010-11**

Periodo 10 días	GenSet I	GenSet II	GenSet III	GenSet IV	GenSet V
24ene10-04feb10					264
04feb-14feb10	240				
14feb10-24feb10					240
24feb10-06mar10	240				
06mar10-16mar10					240
16mar10-26mar10	240				
26mar10-05abr10					240
05abr10-15abr10			240		
15abr10-19abr10					96
19abr10-29abr10	240				
29abr10-03may10		96			
03may10-13may10			240		
13may10-23may10	240				
23may10-02jun10			240		
02jun10-12jun10	240				
12jun10-22jun10			240		
22jun10-02jul10	240				
02jul10-12jul10			240		
12jul10-22jul10	240				
22jul10-01ago10			240		
01ago10-11ago10	240				
11ago10-21ago10			240		
21ago10-01sep10	240				
01sep10-03sep10			48		
03sep10-06sep10				72	
06sep10-11sep10			120		
11sep10-21sep10				240	
21sep10-01oct10	240				
01oct10-11oct10			240		
11oct10-21oct10				240	
21oct10-01nov10	264				
01nov10-11nov10			240		
11nov10-21nov10	240				
21nov10-01dic10			240		
01dic10-05dic10					96
05dic10-15dic10	240				
15dic10-25dic10					240
25dic10-04ene11			240		
04ene11-14ene11					240
14ene11-24ene11				240	
<b>Total de Horas</b>	<b>3 384</b>	<b>96</b>	<b>2 808</b>	<b>792</b>	<b>1 656</b>



## *ANNEXE IX*

### *MODÉLISATION DE LA CHARGE THERMIQUE*

Cette Annexe présente la modélisation de la charge thermique de la « Casa principal ». Pour modéliser cette charge, deux données réelles ont été utilisées : 1) le volume de la « Casa principal » est de 690 m<sup>3</sup> (courriel du Chef de Base Interlandi daté du 1<sup>er</sup> décembre 2010), 2) les bâtiments de la base Scott présentent une perte thermique de 7 W/m<sup>2</sup> de surface (Frye, 2006), et l'on considère quelques hypothèses : a) les dimensions de la « Casa principal » (inconnues) seraient longueur = 25 m, largeur = 5 m, hauteur = 5,52 m (25 x 5 x 5,52 = 690 m<sup>3</sup>), b) la surface de la « Casa principal » serait alors (25 m x 5,52 m x 4) + (5 m x 5,52 m x 2) = 607,2 m<sup>2</sup>, b) la perte de chaleur de 7 W/m<sup>2</sup> se produirait à Jubany à la température extérieure plus haute, 2,5 °C à janvier selon le Tableau 14 du chapitre 4, c) le coefficient K de transfert de chaleur aurait un comportement linéaire en fonction de l'intervalle des températures considérées (de 2,5 °C à -6,5 °C) dans l'équation suivante du transfert de la chaleur :

$$Q = \frac{KSt\Delta t^{\circ}}{l}$$

Où

Q = Énergie thermique

K = Coefficient de transfert de la chaleur

S = Surface

t = temps

$\Delta t^{\circ}$  = Différence des températures entre les deux côtés de la surface

l = épaisseur de la surface

Comme K est inconnu, on peut écrire

$$P = \frac{Q}{t} = \frac{KS\Delta t^\circ}{l} \sim \frac{S\Delta t^\circ}{l}$$

Une autre hypothèse utilisée est que d) l'épaisseur « l » de toute la surface de la « Casa principal » est la même et ainsi la puissance P de la perte thermique dépend de la température extérieure étant donné que la température intérieure reste constante toute l'année (18 °C ou 20 °C pour la base Scott selon Frye, 2006).

Comme K est supposé d'avoir un comportement linéaire, on peut calculer la puissance de la perte thermique pour chaque température extérieure mensuelle moyenne par une règle de trois. Par exemple pour la température plus basse de -6,5 °C :

$$\frac{7 \text{ W/m}^2}{(20^\circ\text{C} - 2,5^\circ\text{C})} = \frac{X}{(20^\circ\text{C} - (-6,5^\circ\text{C}))}$$

$$X = 10,6 \text{ W/m}^2$$

$$P_{TOTALLE \text{ à } 2,5^\circ\text{C}} = 607,2 \text{ m}^2 * 7 \text{ W/m}^2 = 4250,4 \text{ W}$$

$$P_{TOTALLE \text{ à } -6,5^\circ\text{C}} = 607,2 \text{ m}^2 * 10,6 \text{ W/m}^2 = 6436,3 \text{ W}$$

Il peut être remarqué que lorsque la température extérieure est à son plus bas niveau, les pertes et la charge thermique sont à leur plus haut niveau. Cette relation inverse entre les températures extérieures et la charge thermique se présente aussi à la base Scott (Frye, 2006).

Ainsi on obtient le tableau suivant, avec les informations pour alimenter les modélisations d'Homer :

Tableau 32. Pertes thermiques selon les températures extérieures

Dimensiones Hipoteticas de la Casa Principal											
Mes	Ancho	Largo	Alto	Superf. Total (m2)	Temp. Interior	Temp. Exterior	Perdida a 2,5°C (W/m2)	Perdida a Temp. Ext.(W/m2)	Perd. Total (W)	Perd. Total (kW)	
Enero	5	25	5,52	607,2	20	2,5	7	7	4250,4	4,250	
Febrero	5	25	5,52	607,2	20	2,3	7	7,08	4299,0	4,299	
Marzo	5	25	5,52	607,2	20	0,9	7	7,64	4639,0	4,639	
Abril	5	25	5,52	607,2	20	-1	7	8,4	5100,5	5,100	
Mayo	5	25	5,52	607,2	20	-2,4	7	8,96	5440,5	5,441	
Junio	5	25	5,52	607,2	20	-5,2	7	10,08	6120,6	6,121	
Julio	5	25	5,52	607,2	20	-6,5	7	10,6	6436,3	6,436	
Agosto	5	25	5,52	607,2	20	-5,1	7	10,04	6096,3	6,096	
Septiembre	5	25	5,52	607,2	20	-3,9	7	9,56	5804,8	5,805	
Octubre	5	25	5,52	607,2	20	-2	7	8,8	5343,4	5,343	
Noviembre	5	25	5,52	607,2	20	-0,2	7	8,08	4906,2	4,906	
Diciembre	5	25	5,52	607,2	20	1,3	7	7,48	4541,9	4,542	

Dans cette modélisation de la charge thermique de la « Casa principal », on ne considère pas le chauffage d'une quantité inconnue d'eau pour la consommation humaine réalisé par la chaudière réelle. Cela pourrait expliquer la différence observée dans la consommation de carburant de la chaudière réelle et de la chaudière idéale des modélisations. La bonne connaissance des charges thermiques à la base Jubany est une tâche encore à réaliser.



**ANNEXE X**  
**TABLEAUX DE FLUX DE TRÉSORERIE DES SYSTÈMES**

Cette annexe présente les tableaux de flux de trésorerie des systèmes hybrides éolien-diesel avec 100 kW éoliens (une turbine NW100) et 300 kW éoliens (trois turbines NW100).

On considère que l'investissement du capital initial est obtenu par un emprunt bancaire à taux de 15 % annuel. L'annualité est le paiement annuel d'intérêt et du principal. Si l'on considère le même compte comme un investissement, on peut calculer le taux interne de récupération, qui est le taux d'intérêt nécessaire pour qu'un investissement bancaire ait plus de rentabilité que l'investissement dans le système hybride à Jubany.

On considère un coût annuel d'opération et maintenance (O & M) du 4 % de l'investissement du capital annuel. Il a été décidé de dupliquer la valeur de 2 % proposée par Gipe pour l'opération et la maintenance des systèmes éoliens en climat tempéré (Gipe, 1993). Ce coût est affecté par un taux d'inflation annuel du 5 %.

La valeur future des épargnes est la somme des épargnes après les 20 ans du projet. La valeur présente est cette valeur future moins l'inflation du 5 % annuel, et est la valeur des épargnes à l'année zéro.

Tableau 33. Flux de trésorerie du système hybride avec 100 kW éoliens

AÑO	\$ Lt GOA orig.	Inflac.	Precio GOA	AHORROS BRUTOS	INF. GLOBAL	O&M+S	HIPOT.D.I	CAPITAL	TASA	INTERES	ANUALIDAD	Abono Capit.	SALDO	AHORROS NETOS	VP AHORR. N.
1	2,00041	\$	1,0000	\$104 433	1,0000	\$60 000	\$239 642,20	\$1 500 000,00	\$0,15	\$225 000,00	\$239 642,20	\$14 642,20	\$1 485 357,80	-\$195 208,80	-\$195 208,80
2	2,00041	\$	1,2000	\$125 320	1,0500	\$63 000	\$239 642,20	\$1 485 357,80	\$0,15	\$222 803,67	\$239 642,20	\$16 838,53	\$1 468 519,27	-\$177 322,11	-\$168 878,20
3	2,00041	\$	1,4400	\$150 384	1,1025	\$66 150	\$239 642,20	\$1 468 519,27	\$0,15	\$220 277,89	\$239 642,20	\$19 364,31	\$1 449 154,96	-\$155 408,10	-\$140 958,73
4	2,00041	\$	1,7280	\$180 461	1,1576	\$69 458	\$239 642,20	\$1 449 154,96	\$0,15	\$217 373,24	\$239 642,20	\$22 268,96	\$1 426 886,00	-\$128 638,78	-\$111 123,01
5	2,00041	\$	2,0736	\$216 553	1,2155	\$72 930	\$239 642,20	\$1 426 886,00	\$0,15	\$214 032,90	\$239 642,20	\$25 609,30	\$1 401 276,71	-\$96 019,47	-\$78 995,45
6	2,00041	\$	2,4883	\$259 864	1,2763	\$76 577	\$239 642,20	\$1 401 276,71	\$0,15	\$210 191,51	\$239 642,20	\$29 450,69	\$1 371 826,01	-\$66 355,36	-\$44 155,90
7	2,00041	\$	2,9860	\$311 836	1,3401	\$80 406	\$239 642,20	\$1 371 826,01	\$0,15	\$205 773,90	\$239 642,20	\$33 868,30	\$1 337 957,71	-\$38 211,46	-\$21 127,52
8	2,00041	\$	3,5832	\$374 204	1,4071	\$84 426	\$239 642,20	\$1 337 957,71	\$0,15	\$200 693,66	\$239 642,20	\$38 948,54	\$1 299 009,17	-\$5 135,54	\$35 630,40
9	2,00041	\$	4,2998	\$449 045	1,4775	\$88 647	\$239 642,20	\$1 299 009,17	\$0,15	\$194 851,38	\$239 642,20	\$44 790,82	\$1 254 218,35	\$120 755,00	\$81 731,74
10	2,00041	\$	5,1598	\$538 853	1,5513	\$93 080	\$239 642,20	\$1 254 218,35	\$0,15	\$188 132,75	\$239 642,20	\$51 509,45	\$1 202 708,90	\$206 131,54	\$132 874,23
11	2,00041	\$	6,1917	\$646 624	1,6289	\$97 734	\$239 642,20	\$1 202 708,90	\$0,15	\$180 406,33	\$239 642,20	\$59 235,67	\$1 143 473,03	\$309 248,24	\$189 851,59
12	2,00041	\$	7,4301	\$775 949	1,7103	\$102 620	\$239 642,20	\$1 143 473,03	\$0,15	\$171 520,95	\$239 642,20	\$68 121,25	\$1 075 351,79	\$433 686,38	\$253 567,44
13	2,00041	\$	8,9161	\$931 139	1,7959	\$107 751	\$239 642,20	\$1 075 351,79	\$0,15	\$161 302,77	\$239 642,20	\$78 339,43	\$997 012,35	\$583 745,14	\$325 051,14
14	2,00041	\$	10,6993	\$1 117 366	1,8856	\$113 139	\$239 642,20	\$997 012,35	\$0,15	\$149 551,85	\$239 642,20	\$90 090,35	\$906 922,01	\$784 585,32	\$405 475,92
15	2,00041	\$	12,8392	\$1 340 840	1,9799	\$118 796	\$239 642,20	\$906 922,01	\$0,15	\$136 038,30	\$239 642,20	\$103 603,90	\$803 318,11	\$982 401,67	\$496 179,60
16	2,00041	\$	15,4070	\$1 609 008	2,0789	\$124 736	\$239 642,20	\$803 318,11	\$0,15	\$120 497,72	\$239 642,20	\$119 144,48	\$684 173,62	\$1 244 629,82	\$598 688,23
17	2,00041	\$	18,4884	\$1 930 809	2,1829	\$130 972	\$239 642,20	\$684 173,62	\$0,15	\$102 626,04	\$239 642,20	\$137 016,16	\$547 157,47	\$1 580 194,58	\$714 743,12
18	2,00041	\$	22,1861	\$2 316 971	2,2920	\$137 521	\$239 642,20	\$547 157,47	\$0,15	\$82 073,62	\$239 642,20	\$157 568,58	\$389 588,89	\$1 939 807,81	\$846 331,74
19	2,00041	\$	26,6233	\$2 780 365	2,4066	\$144 397	\$239 642,20	\$389 588,89	\$0,15	\$58 438,33	\$239 642,20	\$181 203,87	\$208 385,02	\$2 396 325,98	\$995 722,94
20	2,00041	\$	31,9480	\$3 336 438	2,5270	\$151 617	\$239 642,20	\$208 385,02	\$0,15	\$31 257,75	\$239 642,20	\$208 384,45	\$0,57	\$2 945 179,19	\$1 165 507,41
														<b>\$12 719 662,13</b>	<b>\$5 495 906,85</b>

Costo Total 100 kW	\$1 500 000,00
Ahorro anual de Lts GOA	\$2 206
AUMENTO ANUAL Precio GOA	0,2
INFLACION GLOBAL	0,05
TASA O&M	0,04
TASA INTERES	0,15
ANUALIDAD	\$239 642,20
AHORRO NETO TOTAL EN VAL. FUTUROS	\$12 719 662,13
AHORRO NETO TOTAL VP	\$5 495 906,85

Tableau 34. Flux de trésorerie du système hybride avec 300 kW éoliens

AÑO	\$ Lt GOA orig.	Inflac.	Precio GOA	AHORROS BRUTOS	INF. GLOBAL	O&M+S	HIPOT.D.I	CAPITAL	TASA	INTERES	ANUALIDAD	Abono Capit.	SALDO	AHORROS NETOS	VP AHORR. N.
1	2,00041	\$	1,0000	\$322 108	1,0000	\$180 000	\$718 926,61	\$4 500 000,00	\$0,15	\$675 000,00	\$718 926,61	\$43 926,61	\$4 456 073,39	-\$576 818,59	-\$576 818,59
2	2,00041	\$	1,2000	\$386 530	1,0500	\$189 000	\$718 926,61	\$4 456 073,39	\$0,15	\$668 411,01	\$718 926,61	\$50 515,60	\$4 405 557,79	-\$521 396,59	-\$496 586,58
3	2,00041	\$	1,4400	\$463 836	1,1025	\$198 450	\$718 926,61	\$4 405 557,79	\$0,15	\$660 833,67	\$718 926,61	\$58 092,94	\$4 347 464,85	-\$453 541,06	-\$411 375,11
4	2,00041	\$	1,7280	\$556 603	1,1576	\$208 373	\$718 926,61	\$4 347 464,85	\$0,15	\$652 119,73	\$718 926,61	\$66 806,88	\$4 280 657,96	-\$370 696,45	-\$320 221,53
5	2,00041	\$	2,0736	\$667 923	1,2155	\$218 791	\$718 926,61	\$4 280 657,96	\$0,15	\$642 098,69	\$718 926,61	\$76 827,92	\$4 203 830,05	-\$269 794,55	-\$221 960,64
6	2,00041	\$	2,4883	\$801 508	1,2763	\$229 731	\$718 926,61	\$4 203 830,05	\$0,15	\$630 574,51	\$718 926,61	\$88 352,10	\$4 115 477,95	-\$147 149,47	-\$115 296,46
7	2,00041	\$	2,9860	\$961 809	1,3401	\$241 217	\$718 926,61	\$4 115 477,95	\$0,15	\$617 321,69	\$718 926,61	\$101 604,92	\$4 013 873,03	\$1 665,56	\$1 242,87
8	2,00041	\$	3,5832	\$1 154 171	1,4071	\$253 278	\$718 926,61	\$4 013 873,03	\$0,15	\$602 080,95	\$718 926,61	\$116 845,66	\$3 897 027,37	\$181 966,58	\$129 320,25
9	2,00041	\$	4,2998	\$1 385 006	1,4775	\$265 942	\$718 926,61	\$3 897 027,37	\$0,15	\$584 554,11	\$718 926,61	\$134 372,50	\$3 762 654,87	\$400 136,93	\$270 828,43
10	2,00041	\$	5,1598	\$1 662 007	1,5513	\$279 239	\$718 926,61	\$3 762 654,87	\$0,15	\$564 398,23	\$718 926,61	\$154 528,38	\$3 608 126,49	\$663 840,94	\$427 917,79
11	2,00041	\$	6,1917	\$1 994 408	1,6289	\$293 201	\$718 926,61	\$3 608 126,49	\$0,15	\$541 218,97	\$718 926,61	\$177 707,64	\$3 430 418,85	\$982 280,31	\$603 034,90
12	2,00041	\$	7,4301	\$2 393 290	1,7103	\$307 861	\$718 926,61	\$3 430 418,85	\$0,15	\$514 562,83	\$718 926,61	\$204 363,78	\$3 226 055,07	\$1 829 501,85	\$798 965,33
13	2,00041	\$	8,9161	\$2 871 947	1,7959	\$323 254	\$718 926,61	\$3 226 055,07	\$0,15	\$483 908,26	\$718 926,61	\$235 018,35	\$2 991 036,72	\$1 829 766,70	\$1 018 882,57
14	2,00041	\$	10,6993	\$3 446 337	1,8856	\$339 417	\$718 926,61	\$2 991 036,72	\$0,15	\$448 665,51	\$718 926,61	\$270 271,10	\$2 720 765,62	\$2 387 993,48	\$1 266 403,93
15	2,00041	\$	12,8392	\$4 135 604	1,9799	\$356 388	\$718 926,61	\$2 720 765,62	\$0,15	\$408 114,84	\$718 926,61	\$310 811,77	\$2 409 953,85	\$3 080 290,03	\$1 545 654,42
16	2,00041	\$	15,4070	\$4 962 725	2,0789	\$374 207	\$718 926,61	\$2 409 953,85	\$0,15	\$361 493,08	\$718 926,61	\$357 433,53	\$2 052 520,32	\$3 869 591,51	\$1 861 339,68
17	2,00041	\$	18,4884	\$5 955 270	2,1829	\$392 917	\$718 926,61	\$2 052 520,32	\$0,15	\$307 878,05	\$718 926,61	\$411 048,56	\$1 641 471,75	\$4 843 426,19	\$2 218 829,35
18	2,00041	\$	22,1861	\$7 146 324	2,2920	\$412 563	\$718 926,61	\$1 641 471,75	\$0,15	\$246 220,76	\$718 926,61	\$472 705,85	\$1 168 765,91	\$6 014 834,37	\$2 624 252,31
19	2,00041	\$	26,6233	\$8 575 589	2,4066	\$433 191	\$718 926,61	\$1 168 765,91	\$0,15	\$175 314,89	\$718 926,61	\$543 611,72	\$625 154,18	\$7 423 471,06	\$3 084 605,56
20	2,00041	\$	31,9480	\$10 290 707	2,5270	\$454 851	\$718 926,61	\$625 154,18	\$0,15	\$93 773,13	\$718 926,61	\$625 153,48	\$0,70	\$9 116 929,31	\$3 607 878,51
														<b>\$39 803 297,72</b>	<b>\$17 316 915,98</b>

Costo Total 300 kW	\$4 500 000,00
Ahorro anual Lts GOA Sist. Hibr.	161 021
AUMENTO ANUAL Precio GOA	0,2
INFLACION GLOBAL	0,05
TASA O&M	0,04
TASA INTERES	0,15
ANUALIDAD	\$718 926,61
AHORRO NETO TOTAL VAL. FUTUROS	\$39 803 297,72
AHORRO NETO TOTAL VP	\$17 316 915,98

## ***RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES***

- Ackermann, T., Editor, 2005. **Wind Power in Power Systems**. Chapter 14: Isolated systems with wind power. John Wiley and Sons, Ltd. ISBN: 0-470-85508-8.
- Alaska Energy Authority, Alaska Center for Energy and Power, 2009. **Alaska Energy. A Guide for Alaskan Communities to Utilize Local Energy Resources**. Anchorage, Alaska, USA.
- Alaska Envirothon Competition, 2007. **An Analysis of Energy Alternatives for the Village of Akutan, Alaska**. April 25 th, 2007, Chena Hot Springs Resort, AK
- Australian Antarctic Division, [s.d.]. « Mawson wind-diesel ». En ligne <<http://www.antarctica.gov.au/living-and-working/stations/mawson/mawson-water-making>>. Consulté le 8 avril 2010.
- Baring-Gould, Ian, [s.d.] **Wind/Diesel Power Systems Basics and Examples**. PowerPoint presentation. National Renewable Energy Laboratory 1617 Cole Blvd. Golden, CO 80401-3393, USA
- Baring-Gould, I., Flowers L., Lundsager P., 2002. **Worldwide Status of Wind-Diesel Applications**. The 2002 DOE/AWEA/CanWEA wind-diesel workshop, Anchorage, Alaska, USA
- Baring-Gould, I., Robichaud, R., McLain K., 2005. **Analysis of the Use of Wind Energy to Supplement the May 2005 Power Needs at McMurdo Station and Amundsen-Scott South Pole Station, Antarctica**. Technical Report NREL/TP-500-37504, May 2005. National Renewable Energy Laboratory 1617 Cole Blvd. Golden, CO 80401-3393. Accurate Engineering.
- Baring-Gould, I., Corbus D. 2007. **Status of Wind-Diesel Applications in Arctic Climates Preprint**. National Renewable Energy Laboratory 1617 Cole Blvd. Golden, CO 80401-3393
- Baring-Gould, I., et al. 2009a. **Expert Group Study on Recommendations for Wind Energy Projects in Cold Climates**. Research and Development on Wind Energy Conversion Systems. International Energy Agency Programme.

- Baring-Gould, I., 2009b. **Commercial, Technical and Policy Challenges of Wind-Diesel Applications.** Power point presentation at the 2009 Wind-Diesel Workshop “Building the Momentum”, June 1-2, 2009. The Pembina Institute, Ottawa, Ontario. National Renewable Energy Laboratory, U.S.A.
- Baring-Gould, I., 2009c. **Successful Project Development.** Power point presentation at the 2009 Wind-Diesel Workshop “Building the Momentum”, June 1-2, 2009. The Pembina Institute, Ottawa, Ontario. National Wind Technology Center & Industrial Partnerships Centers, May 31<sup>st</sup> 2009.
- Baring-Gould, I., Dabo, M., Petrie, B., 2009d. **Wind-Diesel Power Systems Experiences and Applications.** Power point presentation at the 2009 Wind-Diesel Workshop “Building the Momentum”, June 1-2, 2009. The Pembina Institute, Ottawa, Ontario. National Renewable Energy Laboratory, U.S.A.
- Baring-Gould, I., Dabo M., 2009e. **Technology, Performance, and Market Report of Wind-Diesel Applications for Remote and Island Communities.** EWEC 2009 presentation. National Renewable Energy Laboratory; Alaska Energy Authority.
- Bégin-Drolet, A., Ruel, J., Lemay, J., 2009. **Développement d'un anémomètre antiglace chauffant.** Présentation Power point au Colloque de l'industrie éolienne du Technocentre éolien. Carleton-sur-mer, Québec, 2 au 4 juin 2009. Université Laval, CRSNG.
- Beyer, H.G., Degner, T., Gabler, H., 1995. **Operational behaviour of wind diesel systems incorporating short-term storage: an analysis via simulation calculations.** Solar Energy, Vol. 54, No. 6, pp. 429-439, 1995. Elsevier Science. 0038-092X(95)00015-1.
- Bolund B., Bernhoff, H., Leijon M., 2005. **Flywheel energy and power storage systems.** [www.elsevier.com/locate/rser](http://www.elsevier.com/locate/rser). Renewable and Sustainable Energy Reviews 11 (2007) Pages 235–258.
- Cahill, R., 2009. **Ross Island Wind Diesel Project.** Power point presentation at the 2009 Wind-Diesel Workshop “Building the Momentum”, June 1-2, 2009. The Pembina Institute, Ottawa, Ontario. Powercorp, Export Drive, Darwin Business Park, Berrimah, Northern Territory, Australia, 0828
- Clausen, N-E., Bindner, H., Frandsen, S., Hansen, J. C., Hansen, L. H., Lundsager, P., June 2001. **Isolated Systems with Wind Power. An Implementation Guideline. Risø-R-1257(EN).** Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark.

- Comeau, M., 2008. **La Caractérisation du Climat Givrant de Sites Éoliens : Mesure, Analyse de Modèles et Cartographie du Givrage Atmosphérique.** Mémoire présenté à l'École de Technologie Supérieure. Montréal, Québec, Canada.
- Corral, R., Jacob M., 2009. **Assesment of a wind-diesel system at Jubany – A Technical prefeasibility study.** UQAR, ATI Éolien. Rimouski, Québec, Canada.
- Cullin, M. 2010. **Making Wind Work for Alaska: Supporting the Development of Sustainable, Resilient, Cost-Effective Wind-Diesel Systems for Isolated Communities. TASK AREA 3: Cold Climate Operation.** UAA School of Engineering. USA
- DNA, [s.d.]. « 50 aniversario de la Base Jubany. Antecedentes ». <<http://www.dna.gov.ar/DIVULGAC/50JUB2.HTM>> Consulté pendant 2009.
- Drouilhet, S., Shirazi, M., 1997. **An Analysis of the Performance Benefits of Short-Term Energy Storage in Wind-Diesel Hybrid Power Systems.** *1997 ASME Wind Energy Symposium Reno, Nevada January 6–9, 1997.* National Renewable Energy Laboratory, 1617 Cole Boulevard, Golden, Colorado 80401-3393
- Drouilhet, S.M., 1999. **Power Flow Management in a High Penetration Wind-Diesel Hybrid Power System with Short-Term Energy Storage.** National Wind Technology Center. National Renewable Energy Laboratory, 1617 Cole Boulevard, Golden, Colorado 80401-3393
- Drouilhet, S.M., 2001. **Preparing an Existing Diesel Power Plant for a Wind Hybrid Retrofit: Lessons Learned in the Wales, Alaska, Wind-Diesel Hybrid Power Project.** National Renewable Energy Laboratory. 1617 Cole Blvd. Golden, CO 80401-3393. USA
- Drouilhet, S., Shirazi M., 2002. **Wales, Alaska High-Penetration Wind-Diesel Hybrid Power System Theory of Operation.** May 2002 • NREL/TP-500-31755, National Renewable Energy Laboratory. 1617 Cole Blvd. Golden, CO 80401-3393. USA
- Electrogis, °[s.d.]. <<http://www.electrogis.com/cables-sintenax-tripolar-semiduro.htm>>. Consulté le 10 septembre 2010.
- EmergencyPower.com, °[s.d.]. <<http://www.emergencypower.com/diesel-generators-cold-weather/>>. Consulté le 17 janvier 2011.

- Fay, G., Schwörer, T., Keith\*, K. June, 2010. **Executive Summary: Alaska Isolated Wind-Diesel Systems Performance and Economic Analysis (Review Draft)**. Institute of Social and Economic Research, University of Alaska Anchorage.\*Wind Diesel Application Center; Alaska Center for Energy and Power.University of Alaska Fairbanks USA.
- Fikke S., Ronsten G., Heimo A., Kunz S., Ostrozlik M., Persson P.-E., Sabata J., Wareing B., Wichura B., Chum J., Laakso T., Sääntti K., Makkonen L., 2006. **COST-727, Atmospheric Icing on Structures: 2006, Measurements and data collection on icing: State of the Art Publication** of MeteoSwiss, 75, 110 pp. ISSN: 1422-1381. Switzerland.
- Frye, J. A., 2006. **Performance-Objective Design of a Wind-Diesel Hybrid Energy System for Scott Base, Antarctica**. Gateway Antarctica, University of Canterbury, Private Bag 4800, Christchurch 8140, New Zealand
- Germanischer Lloyd, 2010. **Guideline for the Certification of Wind Turbines**. Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, Hamburg, Germany.
- Gipe, P., 1993. **Wind Power for Home and Business. Renewable energy for the 1990s and beyond**. A Real Goods Solar Living Book. Chelsea Green Publishing Co. P.O. Box 428. White River Junction, Vermont 05001
- Hamsic, N., Schmelter, A., Mohd, A., Ortjohann, E., Schultze, E., Tuckey, A. Zimmerman, J., 2006. **Stabilising the grid voltage and frequency in isolated power systems using a flywheel energy storage system**. The Great Wall world renewable energy forum.23-27 October 2006, Beijing, China. Souht-Westphalia University of Applied Sciences/ Division Soest, Germany. Powercorp Group, Australia.
- Hamsic, N., Schmelter, A., Mohd, A., Ortjohann, E., Schultze, E., Tuckey, A. Zimmerman, J., 2007. **Increasing renewable energy penetration in isolated grids using a flywheel energy storage system**. POWERENG. Portugal, April, 2007. Souht-Westphalia University of Applied Sciences/ Division Soest, Germany. Powercorp Group, Australia.
- Holdmann,Gwen et al. 2010. **Making Wind Work for Alaska: Supporting the Development of Sustainable, Resilient, Cost-Effective Wind-Diesel Systems for Isolated Communities**. Submitted by the University of Alaska (at Anchorage, at Fairbanks) under DE-PS02-09ER09-12. Alaska, USA.
- Homola, M.C., Nicklasson, P.J., Sundsbo, P.A., 2006. **Ice sensors for wind turbines**. Cold Regions Science and Technology 46, 125–131.

- Hunter, R., Elliot G., 1994. **Wind Diesel Systems: A guide to the technology and its implementation.** Cambridge University Press 1994.
- Ibrahim, H., Younès, R., Ilinca, A., Dimitrova, M., Perron, J., 2009. **Study and design of a hybrid wind–diesel-compressed air energy storage system for remote areas.** Wind Energy Research Laboratory (WERL), Université du Québec à Rimouski, 300, allée des Ursulines, Québec, Canada G5L 3A1
- IEC, 2004-05. **IEC TS 62257-2: Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification – Part 2: From requirements to a range of electrification systems.** First edition, 2004-05. International Electrotechnical Commission. Geneva, Switzerland.
- IEC, 2005-07. **IEC TS 62257-4: Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification – Part 4: System selection and design.** First edition, 2005-07. International Electrotechnical Commission. Geneva, Switzerland.
- IEC, 2006-10. **IEC TS 62257-9-2: Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification – Part 9-2: Microgrids.** First edition, 2006-10. International Electrotechnical Commission. Geneva, Switzerland.
- IEC, 2008-04. **IEC/TS 62257-7: Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification – Part 7: Generators.** Edition 1.0, 2008-04. International Electrotechnical Commission. Geneva, Switzerland.
- IEC, 2008-04. **IEC/TS 62257-7-3: Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification – Part 7-3: Generator set – Selection of generator sets for rural electrification systems.** Edition 1.0, 2008-04. International Electrotechnical Commission. Geneva, Switzerland.
- IEC, 2008-09. **IEC/TS 62257-9-1: Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification – Part 9-1: Micropower systems.** Edition 1.0, 2008-09. International Electrotechnical Commission. Geneva, Switzerland.
- Jargstorf, B. [s.d.]. **A Wind/ Diesel System for the Antarctic Base Eduardo Frei – Conceptual Approach.** Factor 4 Energy Projects GmbH. Wismar, Germany. Santiago de Chile, Chile.
- Kraus, S.; Del Valle, R., 2008. **Geology, tectonics and Ar-Ar ages of the magmatic dykes from Potter Peninsula (King George Island, South Shetland Islands).**

- Editor Gustavo A. Ferreyra et al. Reports on polar and marine research, 571-2008.
- Laakso T., Baring-Gould, I., Durstewitz M., Horbaty, R., Lacroix, A., Peltola, E., Ronsten, G., Tallhaug, L., Wallenius, T. August 2009. **State-of-the-art of wind energy in cold climates**. The International Energy Agency (IEA) R&D Wind Programme. Task 19 – Wind Energy in Cold Climates.
- Lundsager, P., Bindner, H., Clausen, N-E., Frandsen, S., Hansen, L.H., Hansen, J.C., June 2001. **Isolated Systems with Wind Power. Main Report. Risø-R-1256(EN)** Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- Maine Rural Partners, 2011. **Wind Turbine Buyer's 2011**. Maine Rural Partners, February 24, 2011.
- Maissan, J. F., 2001. **Wind Power Development in Sub-Arctic Conditions with severe Rime Icing**. Circumpolar Climate Change Summit and Exposition, March 19-21, 2001. Whitehorse, Yukon, Canada.
- Maissan, J. F., 2006. **A Report on the State-of-the-art and Economic Viability of Wind Power Development in Arctic Communities**. Leading Edge Projects Inc. Whitehorse Yukon Y1A 4M6, Canada.
- Manwell, J.F. McGowan J.G. Rogers, A.L., 2002. **Wind Energy Explained – Theory, Design and Application**. Copyright © 2002 John Wiley & Sons Ltd. ISBNs: 0-471-49972-2 (Hardback); 0-470-84612-7 (Electronic)
- McGillivray, R., 2009. **Using Hydrogen Energy Storage in Remote Communities**. PowerPoint presentation. June 1, 2009 International Wind-Diesel Workshop. www.hydrogenics.com. 220 Admiral Boulevard, Mississauga, Ontario, Canada L5T 2N6
- McGowan, J.G., Manwell, J.F., 1999. **Hybrid Wind/PV/Diesel System Experiences**. Renewable Energy Laboratory. Department of Mechanical and Industrial Engineering. University of Massachusetts. Amherst, MA 01003, USA. Renewable Energy 16 (1999) 928-933.
- McKay, C., 2009. **Technology Requirements for Cold and Tropical Wind-Diesel Applications**. Power point presentation at the 2009 Wind-Diesel Workshop "Building the Momentum", June 1-2, 2009. The Pembina Institute, Ottawa, Ontario. Northern Power Systems, Barre, VT 05673, USA. www.northernpower.com

- McLaughlin, C., 2009. **Challenges and Solutions: Implementation and Supporting Complex Wind-Diesel Applications in Remote Locations.** Power point presentation at the 2009 Wind-Diesel Workshop “Building the Momentum”, June 1-2, 2009. The Pembina Institute, Ottawa, Ontario. Northern Power Systems, Barre, VT 05673, USA. [www.northernpower.com](http://www.northernpower.com)
- Muljadi, E., Wang, C., Nehrir, M.H., 2004. **Parallel Operation of Wind Turbine, Fuel Cell, and Diesel Generation Sources.** National Renewable Energy Laboratory, 1617 Cole Boulevard, Golden, Colorado 80401-3393, 303-275-3000 • [www.nrel.gov](http://www.nrel.gov)
- Parent, O., Ilinca, A. 2010. **Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: Critical review.** Cold regions science and technology. (2010), doi: 10.1016/j.coldregions.2010.01.005
- Pinard, J.-P., Maissan, J.F., Trimble, A. 2011. **Lutselk’e Wind Energy Pre-Feasibility Analysis.** March 31, 2011. 703 Wheeler St., Whitehorse, Yukon Y1A 2P6.
- Powercorp Group, [s.d.]. **Low Load Diesel Product Specification.** Version 20060519. [www.pcorp.com.au](http://www.pcorp.com.au) Export Drive, Darwin Business Park, Berrimah, Northern Territory, Australia, 0828. Page visitée le 16 mars 2011.
- Powercorp°Group,°[s.d.].°« Mawson°wind-diesel ».  
<[http://www.pcorp.com.au/index.php?option=com\\_content&task=view&id=12&Itemid=73](http://www.pcorp.com.au/index.php?option=com_content&task=view&id=12&Itemid=73)>. Consulté le 8 avril 2010.
- Rabinovich, G., 2009. **Análisis de la Situación de Precios y Tarifas de los Servicios Públicos de Gas Natural y Electricidad.** Presentación PowerPoint, 16/33 Instituto Argentino de la Energía “Gral. Mosconi”. Bs. As., 4 de noviembre del 2009.
- Rebours, Y., Kirschen, D., 2005. **What is spinning reserve?** The University of Manchester. The School of Electrical and Electronic Engineering PO Box 88 Manchester M60 1QD United Kingdom
- Rogers, A. L., 1996. **Variable speed diesel power generation design issues** (January 1, 1996). *Electronic Doctoral Dissertations for UMass Amherst.* Paper AAI9639021. <http://scholarworks.umass.edu/dissertations/AAI9639021> Massachusetts, USA
- Schmitt, A., 2006 (Project leader; EDF Research and Development). Power Point presentation **IEC TS 62257 series Recommendations for small renewable**

**energy and hybrid systems for rural electrification.** IEC Centenary Event for Africa Electrification. February 2006.

Service°Météorologique°Argentin,°[s.d.].

<<http://www.smn.gov.ar/?mod=pron&id=49>>. Consulté pendant 2010.

Rozell, N., 2004. **Of Wales and Wind Power. Article #1686.** Alaska Science Forum. February 19, 2004. <http://www2.gi.alaska.edu/ScienceForum/ASF16/1686.html>. Page web visitée le 23 juin. 2011.

Secrétariat du Traité sur l'Antarctique, [s.d.]. **Plan de gestion de la zone spécialement protégée de l'Antarctique no 132. PENINSULE POTTER, ILE DU 25 MAI (ILE DU ROI GEORGES), ILES SHETLAND DU SUD.** Date inconnue (après 2002 selon le texte).

Silva Busso, A. Á., [s.d.]. **El agua en el norte de la Península Antártica, capítulo 3: Aguas superficiales y subterráneas en el área norte de la península antártica.** DSH-Instituto Nacional de Agua, Subsecretaría de Recursos Hídricos, Autopista Ezeiza – Cañuelas. Tramo J. Newbery Km 1,620, Ezeiza, Buenos Aires, Argentina (1824). [pntsas@ina.gov.ar](mailto:pntsas@ina.gov.ar).

Stander, J., 2008. **Selecting a Small Wind Turbine for the South African Antarctic Research Base SANAE IV.** Power Point presentation. Winter Wind Conference Sweden December 2008.

Tin\* T., Sovacool B., Blake D., Magill P., El Nagggar S., Lidstromf S., Ishizawa K., Berte J., 2009. **Energy efficiency and renewable energy under extreme conditions: Case studies from Antarctica.** \*Antarctic and Southern Ocean Coalition, BP 80358, 45 163 Olivet, CEDEX 3, France. National University of Singapore, Singapore. British Antarctic Survey, United Kingdom. Australian Antarctic Division, Australia. Alfred Wegener Institute, Germany. Swedish Polar Research Secretariat, Sweden. National Institute of Polar Research, Japan. International Polar Foundation, Belgium.

Waterhouse, D., 2009. **Remote Power Supply Case Study: Wind Turbines at Australia's Mawson Station, Antarctica.** Australian Antarctic Division. Session Eight, Regional Electrical Engineering Forum 2009 – IDC Technologies. Tasmania — July 1st & 2nd 2009.

Wikipédia, 11 février 2011. « Catégories: Economía de Argentina | Monedas de Argentina | Historia numismática de Argentina | Anexos: Numismática | Anexos: Argentina. ». <[http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Cotizaci%C3%B3n\\_hist%C3%B3rica\\_de\\_monedas\\_de\\_la\\_Argentina](http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Cotizaci%C3%B3n_hist%C3%B3rica_de_monedas_de_la_Argentina)>. Consulté pendant mars 2011.

- Wikipedia, [s.d.]. « Cogeneration ». En ligne  
<<http://en.wikipedia.org/wiki/Cogeneration>>. Consulté le 19 mai 2011.
- Wikipedia, [s.d.]. « Diesel Engine ». En ligne  
<[http://en.wikipedia.org/wiki/Diesel\\_engine](http://en.wikipedia.org/wiki/Diesel_engine)>. Consulté le 17 janvier 2011.
- Wikipedia, [s.d.]. « Operating Reserve ». En ligne  
<[http://en.wikipedia.org/wiki/Operating\\_reserve](http://en.wikipedia.org/wiki/Operating_reserve)>Consulté le 22 mars 2011.
- Wikipedia, [s.d.]. « Synchronous Condenser ». En ligne  
<[http://en.wikipedia.org/wiki/Synchronous\\_condenser](http://en.wikipedia.org/wiki/Synchronous_condenser)>. Consulté le 29 mai 2011
- Wildi, T., Sybille, G., 2009. **Électrotechnique, quatrième édition**. Les presses de l'Université Laval. Canada.
- x-rates.com, [s.d.]. <[www.x-rates.com](http://www.x-rates.com)>. Consulté le 18 novembre 2011
- Youtube, [s.d.] (a). Cadre du vidéo « Día movido en Base Jubany ». En ligne  
<<http://www.youtube.com/watch?v=sf772vA3h54&NR=1>>.Consulté le 9 février 2011.
- Youtube, [s.d.] (b).Cadre du vidéo « IVS-4500 en Base Esperanza, Antártida Argentina - "Hielos míticos" par Daniel Bazan, 2008 ». En ligne  
<<http://www.youtube.com/watch?v=nWocJM0th6U>>. Consulté le 9 février 2011.





