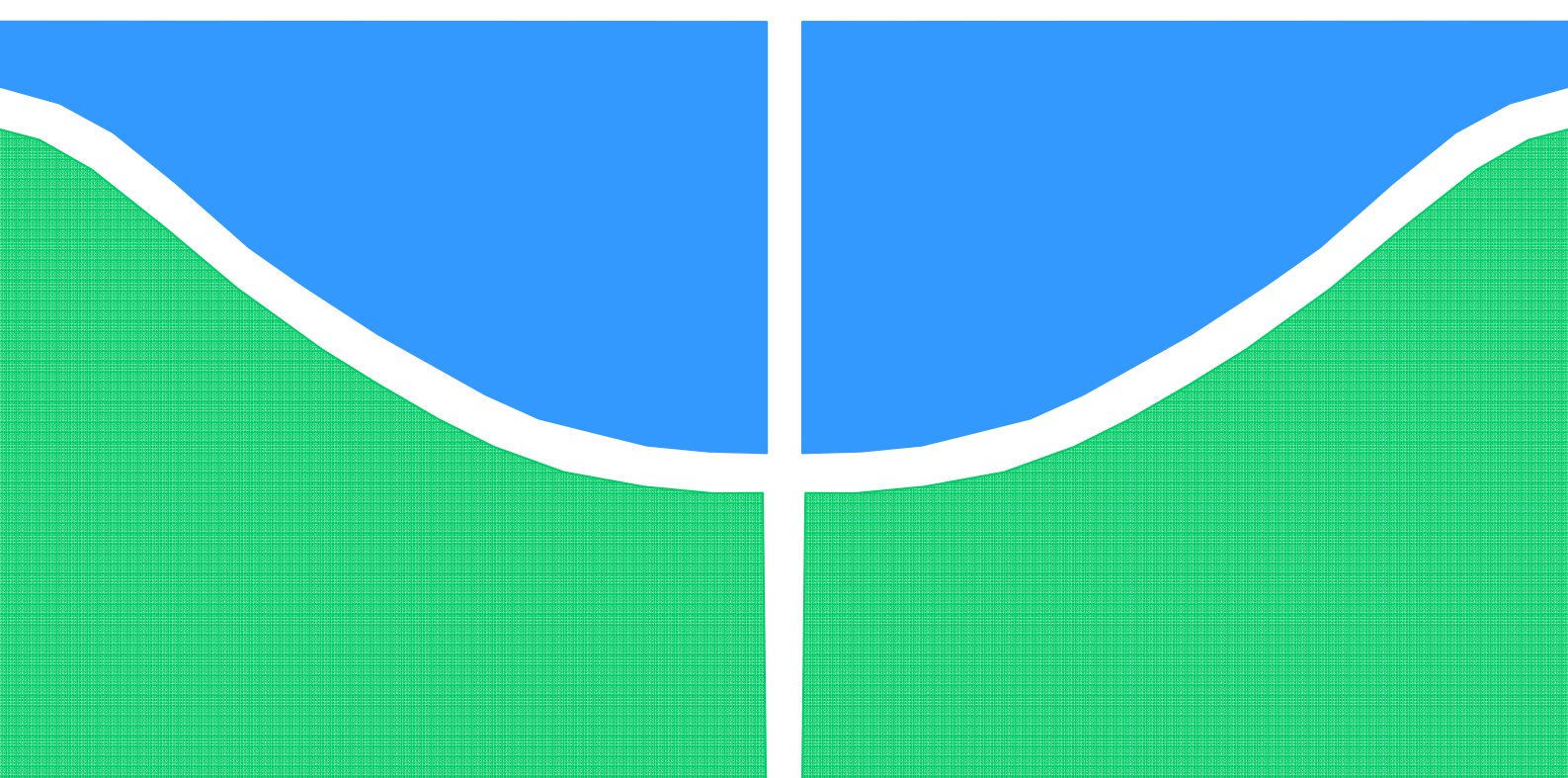




PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**INTEGRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO SISTEMA
ELÉTRICO DO AVIÃO MILITAR
EMBRAER KC-390**

Lucas Costa Amaro

Brasília, julho de 2015

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**INTEGRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO SISTEMA
ELÉTRICO DO AVIÃO MILITAR
EMBRAER KC-390**

Lucas Costa Amaro

Relatório submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica
como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Eletricista

Banca Examinadora

Prof. M. Miloud Frikel, GREYC/ Ensicaen
(Orientador)

Prof. Olivier Gehan, GREYC/ Ensicaen

M. Eric Polin, SAFRAN Labinal Power Systems

FICHA CATALOGRÁFICA

AMARO, L.C.

Integração e validação do sistema elétrico do avião militar Embraer KC-390
[Paris] 2015.

50p., 297mm (ENE/FT/UnB, Graduação, Engenharia Elétrica, 2009)
Projeto Final de Graduação, Universidade de Brasília.
Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Sistemas elétricos aeronáuticos
3. ARINC 429

2. Qualidade da energia elétrica
4. Normas

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AMARO, L.C. (2015). Integração e validação do sistema elétrico do avião Embraer KC-390. Projeto Final de Graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 51p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Lucas Costa Amaro

ORIENTADORES: Miloud Frikel e Olivier Gehan

TÍTULO: Integração e validação do sistema elétrico do avião militar Embraer KC-390

ANO: 2015

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste projeto final de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste projeto final de graduação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Dedicatória

Dedico esse trabalho aos meus pais, Raimunda Edna Costa Martins e José Hiltom Amaro, por terem me criado e me educado. Aos meus irmãos, Danilo Costa Amaro e Izabela Costa Amaro, pelo apoio dado ao longo da minha vida. À Marina Ramos e ao Afonso Henrique, pela amizade compartilhada ao longo dessa trajetória. Aos amigos de intercâmbio, por terem me proporcionado viver os melhores momentos da minha vida. Aos amigos da graduação, pelas experiências vivenciadas ao longo do curso.

Lucas Costa Amaro.

REMERCIEMENTS

Je remercie tout particulièrement M.Eric Polin, mon tuteur de stage et chef du service COPPER Bird chez Safran, qui m'a concédé l'opportunité de réaliser mon projet de fin d'études chez Labinal Power Systems. Son soutien, sa disponibilité et ses nombreux conseils tout au long de mon stage ont été indispensables pour la réalisation de mon projet de fin d'études.

Je tiens à remercier également l'ensemble de l'équipe du service COPPER Bird pour m'avoir accueilli comme un membre de l'équipe. Cet accueil m'a permis d'améliorer mes connaissances de la vie en entreprise et de mener à bien mon projet de stage. J'ai apprécié la disponibilité de chacun et j'espère avoir su rendre dans ce rapport la qualité de l'ambiance du service.

Je remercie l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Caen (ENSICAEN) pour m'avoir accueilli comme étudiant pendant les années scolaires 2012/2013 et 2013/2014. Le support fournit par l'Ecole a été essentiel pour le développement de mes compétences dans le domaine de l'ingénierie électronique.

Je remercie aussi les coordinateurs du programme Brésil France Ingénieur Technologie (BRAFITEC), à savoir Mme Chantal GUNTHER en France et M. Alexandre ROMARIZ au Brésil, pour m'encourager de venir en France afin de faire une partie de mes études et d'approfondir mes connaissances en Ingénierie Électrique et Electronique.

Finalement, je remercie la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), l'entité brésilienne qui s'occupe de financer les étudiants brésiliens à l'étranger, pour m'avoir fourni le soutien financier adéquat pour la réalisation de mes études en France.

Lucas Costa Amaro

Integração e validação do sistema elétrico do avião Embraer KC-390**Autor: Lucas Costa Amaro****Orientador: Miloud Frikel****Co-orientador: Olivier Gehan****Brasília, julho de 2015**

Sistemas elétricos aeronáuticos são sistemas robustos baseados na presença de redundâncias como requisito imprescindível para correta operação das aeronaves. Nesse âmbito, faz-se necessário integrar e validar todos os seus componentes de geração de e transmissão de potência, além de estabelecer os critérios de operação viáveis para previsão e eliminação de falhas elétricas durante o funcionamento da aeronave.

Nesse contexto, a Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A. (Embraer) selecionou a empresa Safran Labinal Power Systems para integração e validação do sistema elétrico do avião Embraer KC-390. O projeto se iniciou no ano de 2012 e tem previsão para ser finalizado em julho de 2016. Entre os meses de março e setembro de 2014 foi realizada a etapa Safety of Flight (SOF) do projeto, cujo propósito era o de testar o funcionamento dos componentes do sistema elétrico da aeronave, tais como geradores, conversores, inversores, baterias, contadores e relés, e compará-lo com as normas internacionais de aviação. Como resultado da etapa SOF, foi realizado o primeiro voo do avião KC-390 no dia 3 de fevereiro de 2015 na base da Embraer em Gavião Peixoto, São Paulo.

Os resultados e análises de dois dos quarenta testes realizados na etapa SOF serão apresentados ao longo desse projeto final de graduação. Uma análise técnica acerca do funcionamento do sistema de geração principal e de emergência será realizada.

Vale ressaltar que esse projeto final de graduação foi desenvolvido na França no âmbito do acordo de duplo diploma do programa Brasil France Ingénieur Technologie (BRAFITEC). Por isso, todo o conteúdo será apresentado no idioma francês, conforme previsto no acordo. Além disso, como o trabalho foi escrito baseando-se em dados das empresas Safran Labinal Power Systems e Embraer, que são empresas de aeronáutica e defesa, algumas análises realizadas e apresentadas nessa entidade foram retiradas do escopo desse projeto final de graduação, visto que ambas as empresas alegaram detenção dos direitos autorais de maior parte dos testes desenvolvidos.

SOMMAIRE

1 Introduction	1
2 Safran Labinal Power Systems	2
2.1 Le groupe safran.....	2
2.2 Chiffre d'affaires du groupe safran	3
2.2 Safran dans le monde	4
2.3 Sociétés du groupe safran.....	4
2.3.1 Labinal Power Systems	5
2.3.2 Division Power	6
2.3.3 Cooper Bird	6
3 L'avion Embraer KC-390.....	9
3.1 Aspects généraux de l'avion KC-390.....	9
3.2 Système électrique de l'avion KC-390.....	9
3.2.1 Génération électrique	9
3.2.2 Distribution électrique.....	12
3.3 Banc d'essai Electrical System Rig KC-390.....	13
3.3.1 Integrated Drive Generators	16
3.3.2 Auxiliary Power Unit	16
3.3.3 Transformer Rectifier Unit.....	16
3.3.4 Static Inverter	17
3.3.5 Batteries.....	17
3.3.6 Banc de charges.....	18
3.3.7 Systeme de contrôle et commande highpmaac	18
2.2.8 Protocole de communication ARINC 429	19
3.4 État de l'art du banc ESR KC-390	21

3.4.1 Mise en place d’essais et analyse des resultats avec le logiciel DIAdem	22
3.4.2 Planning de deroulement du stage.....	22
3.4.3 Validation du logiciel highpmaac	23
3.4.4 Tests d’acceptation du logiciel	24
3.4.5 La fiche d’incidents FSIE.....	24
3.4.6 Logiciel d’analyse des essais : DIAdem	24
3.4.7 Rapatriement et extraction des données	25
3.4.8 Analyse des resultats des essais	28
3.4.9 Procedure pour le rapatriement, l’extraction et la sauvegarde des données.....	36
4 Bilan de la mise en situation d’ingenieur	37
4.1 Point de vue technique	37
4.2 Point de vue gestion de projet	37
4.3 Point de vue professionnel	37
4.4 Difficultés rencontrées.....	38
4.5 Perspectives	38
4 Conclusion.....	39
5 Références bibliographiques	40

FIGURES

Figure 1. Le moteur GP-7200 Airbus A380.[1]	2
Figure 2. Moteur civil de la famille SAM146.....	2
Figure 3. Moteur civil de la famille CFM56	2
Figure 4. Safran est leader européen des systèmes de drones tactiques.....	3
Figure 5. Les terminaux d’empreintes digitales	3
Figure 6. Jumelles infrarouges développées par Safran.....	3
Figure 7. Répartition du chiffre d’affaires de l’an dernier par activité	3
Figure 8. Chiffre d’affaires du groupe Safran en millions depuis 2011.....	3
Figure 9. Organisation du groupe Safran dans le monde	4
Figure 10. Les sociétés qui intègrent le groupe Safran	5
Figure 11. Activités développées par Labinal Power Systems	6
Figure 12. Illustration du banc ETB CleanSky	7
Figure 13. Structure hiérarchique du COPPER Bird.....	7
Figure 14. Organigramme de la société Labinal Power Systems.....	8
Figure 15. Avion Embraer KC-390	9
Figure 16. Architecture primaire simplifiée de l’avion KC-390.....	10
Figure 17. Générateur Synchrone à trois étages.....	11
Figure 18. Générateur Synchrone à trois étages.....	11
Figure 19. Plante de l’intérieur du banc ESR KC-390.....	15
Figure 20. Batteries de Lithium-ion	17
Figure 21. Banc de charges disposés dans le banc KC-390	18
Figure 22. Interactions entre les plusieurs baies et les équipements de l’avion.....	19
Figure 23. Description du bus ARINC 429.....	20
Figure 24. Découpage d’un mot de l’ARINC 429	20

Figure 25. Présentation du logiciel DIAdem.....	25
Figure 26. Arborescence d'enregistrement de données sur les cibles RT.....	26
Figure 27. Arborescence d'enregistrement de données sur les PCs de dépouillement.....	27
Figure 28. Premier fenêtre de l'outil Automatic Extratic Tool.....	27
Figure 29. Seconde fenêtre de l'outil Automatic Extratic Tool.....	27
Figure 30. Processus conduisant à l'analyse des données d'essais ESR KC-390.....	28
Figure 31. Configuration de l'essai IDG2 full charge.....	31
Figure 32. Fréquence de rotation de l'IDG2 ainsi que les paramètres électriques d'une charge connecté sur la Barre 1 AC	32
Figure 33. État de charge de l'IDG2 ainsi que les courbes de tension et courant de trois charges DC installées sur la barre 1 DC.....	33
Figure 34. Représentation des charges DC installées sur la barre 3 DC, la tension et le courant mesurés sur la sortie de la batterie ainsi que le contacteur TRU1C	33
Figure 35. Représentation d'une d'une machine électrique triphasée	34
Figure 36. Tension, facteur de puissance et fréquence de d'oscillation de la phase A mesurés sur la sortie de la RAT.....	35
Figure 37. Enveloppes concernant les limites en tension des régimes transitoires et permanents définies dans la spécification MIL-STD-704F	36

TABLEAUX

Tableau 1. Spécifications des bancs de charge du banc ESR KC-390.....	18
Tableau 2. Description du bus ARINC 429	20
Tableau 3. Planning du développement du banc ESR KC-390.....	22
Tableau 4. Planning du projet de fin d'études.....	23
Tableau 5. Représentation des bits du signal Data11_30 envoyé par la GCU	30
Tableau 6. Signification de chaque bit du signal Data11_30	30

SYMBOLES

VDC	Tension continue	[V]
VCA	Tension alternative	[V]
A	Courant	[A]
Ω	Impédance	[Ω]
P	Puissance active	[Watt]
Q	Puissance réactive	[VAr]
S	Puissance apparente	[VA]
T	Couple	[N.m ²]
ω	Fréquence angulaire	[rad/s]
f	Fréquence linéaire	[Hz]
B	Densité de champ magnetique	[T]
S	Surface	[m ²]
t	Temps	[s]
RPM	Tour par minute	[rpm]

1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente les aspects généraux relatifs au projet de fin d'études réalisée au sein de la société Safran Labinal Power Systems.

J'ai réalisé mon stage de fin d'études au sein du groupe Safran dans la société Labinal Power Systems, du 03 mars au 25 août 2014. J'ai été rattaché à l'équipe chargée du développement du banc d'essai aéronautique Electrical System KC-390. Ce banc a été conçu spécialement pour l'intégration et validation de l'avion Embraer KC-390, un avion de transport militaire actuellement en voie de développement par la société brésilienne Embraer.

Dans le cadre du développement de l'avion, Labinal Power Systems a remporté les lots relatifs à la distribution électrique primaire, la distribution électrique secondaire, la génération électrique de secours et l'intégration complète du système électrique.

Pour réaliser l'intégration complète du système électrique de l'avion, le banc ESR KC-390, installé sur le site de Colombes, Ile de France, accueille tous les équipements électriques de l'avion (y compris les équipements qui proviennent des autres fournisseurs d'EMBRAER).

Les objectifs de la construction du banc ESR KC-390 incluent la vérification du bon fonctionnement des équipements et le comportement du système électrique de l'avion KC-390, la vérification de la qualité du réseau électrique suivant les normes applicables, la garantie de la sécurité du premier vol et la réalisation de l'ensemble des essais liés à la certification civile et militaire pour le système électrique.

Dans ce contexte, l'objectif de mon stage a consisté principalement à analyser les résultats des essais réalisés dans le banc d'essais pendant l'étape de Pré-Intégration du banc d'essai et au début de l'étape de SOF (*Safety of flight*). Le but de ces analyses était la validation du système HighPMAAC (système de contrôle et commande du banc d'essais) et la première vérification du bon fonctionnement du système électrique de l'avion vis-à-vis des critères de succès et des résultats attendus.

Mon stage a consisté ainsi à contribuer à la mise en place des essais, à soutenir l'équipe dans le paramétrage des procédures (surtout en ce qui concerne la configuration du logiciel HighPMAAC), à participer aux essais et finalement à assister l'équipe pour le bon déroulement des essais du point de vue des résultats attendus.

Dans ce rapport, après avoir présenté la société Safran et son entité Labinal Power Systems, je rendrai compte des différentes étapes de mon projet qui ont contribué à une mise en situation d'ingénieur. Pour finir, je dresserai un bilan de cette expérience.

2 SAFRAN LABINAL POWER SYSTEMS

La société Safran Labinal Power Systems sera présentée dans cette section. Les informations relatives au chiffre d'affaires, les sociétés du groupe dans le monde et à la filiale Labinal Power Systems seront décrites au long du texte.

2.1 LE GROUPE SAFRAN

Le groupe Safran est un équipementier aéronautique international dont les trois domaines d'activités sont l'aéronautique, la défense et la sécurité. Safran propose à ses clients des solutions de haute technologie pour la propulsion d'avions, d'hélicoptères, de missiles, de lanceurs spatiaux, et de satellites pour l'équipement d'avions, en comprenant les marchés civils et militaire.

Le groupe Safran commercialise dans le monde entier des systèmes propulsifs et des équipements aéronautiques qu'il développe, en assurant leur maintenance et réparation. Safran conduit ses opérations au travers de nombreuses sociétés, seul ou en partenariat.

Les principaux marchés visés par le groupe Safran sont la propulsion aéronautique et spatiale et les équipements aéronautiques. Concernant les équipements de propulsion, Safran est leader dans la conception des moteurs d'avions civils, moteurs d'avions militaires, moteurs d'hélicoptères et moteurs spatiaux. Au-delà de cela, ce groupe développe également d'autres équipements aéronautiques, tels que nacelles moteurs, systèmes d'atterrissage, systèmes de freinage et systèmes de transmission de puissance. Les **Figures 1-3** ci-dessous montrent trois types de moteurs qui ont déjà été conçus par des sociétés intégrantes du groupe Safran.



Figure 3. Moteur civil de la famille CFM56 propulsent de nombreuses versions d'avions d'Airbus (A320) et de Boeing (737).^[1]

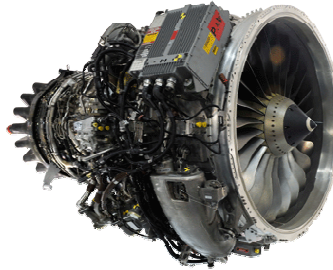


Figure 2. Moteur civil de la famille SAM146 destiné à la propulsion d'avions régionaux de 60 à 100 places.^[1]

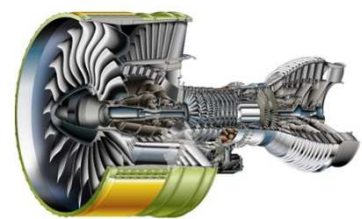


Figure 1. Le moteur GP-7200 a été conçu et développé par la société Engine Alliance pour motoriser le très gros porteur Airbus A380.^[1]

Dans le champ de la défense, le groupe Safran propose une gamme complète d'équipements dans les secteurs clés de l'optronique, de l'avionique, de la navigation, de l'électronique et des logiciels critiques embarqués, pour les marchés civils et militaires. Ses solutions facilitent les missions de sécurité intérieure des forces de police, des douanes, des secours en mer et en montagne. Elles contribuent à l'efficacité des forces armées aériennes, maritimes et terrestres dans nombreuses pays.

^[1] Source : <http://www.safran-group.com/site-safran/aerospatial/propulsion-aeronautique-et/moteurs-d-avions-civils>

Le groupe Safran contribue aussi à la sécurité des populations et des Etats. Elles garantissent la sûreté des transports et des transactions et améliorent la protection des biens et de personnes. Safran détient notamment l'ensemble des technologies nécessaires pour couvrir les besoins de sécurité dans les aéroports, telles que la détection d'explosifs, l'identification biométrique et la sécurisation des documents de voyage. Les **Figures 4-6** illustrent des exemples d'équipements développés par le groupe Safran.



Figure 6. Safran développe aussi des jumelles infrarouges multifonctions à longue portée. Elle équipe plusieurs nations de l'OTAN, dont la France.^[2]



Figure 5. Les terminaux d'empreintes digitales apportent la sécurité de la biométrie à tous types d'installation dans des locaux de prestige ou de points d'accès extérieurs.^[2]



Figure 4. Safran est leader européen des systèmes de drones tactiques. Plus de 130 drones ont été produits à ce jour, pour cinq pays.^[2]

2.2 CHIFFRE D'AFFAIRES DU GROUPE SAFRAN

Le groupe Safran a réalisé un chiffre d'affaires de 14 695 M€ en 2013, ce qui représente une progression annuelle de 8.4%. Cette croissance traduit les performances des activités aéronautiques, notamment la forte dynamique des services pour moteurs civils.

Les activités aéronautiques et spatiales ont enregistré une forte progression selon l'an dernier: 11.2 % pour la propulsion et 11.6% pour les équipements. Les activités de défense et de sécurité ont connu, l'une et l'autre, une légère croissance de 2.8%. Les **Figures 7-8** ci-dessous montrent l'évolution du chiffre d'affaires du groupe Safran dans les trois dernières années, aussi bien que la répartition par activité du chiffre d'affaires de 2013.

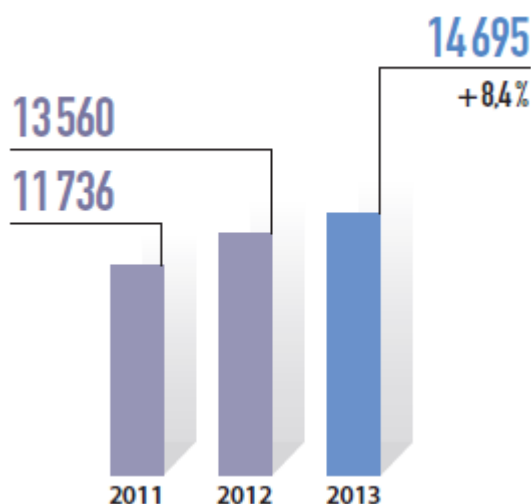


Figure 8. Chiffre d'affaires du groupe Safran en millions depuis 2011

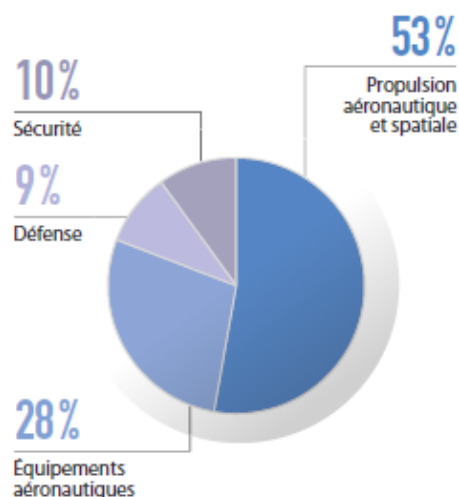


Figure 7. Répartition du chiffre d'affaires de l'an dernier par activité

[2] Source : <http://www.safran-group.com/site-safran/defense/defense-terrestre>

[3] Source : http://www.safran-group.com/IMG/pdf/Safran_RA2013_FR.pdf

2.2 SAFRAN DANS LE MONDE

Le groupe Safran emploie 66300 collaborateurs dans 50 pays, en garantissant une plus grande proximité et réactivité avec ses clients. La **Figure 9** ci-dessous montre l'organisation du groupe Safran dans le monde.

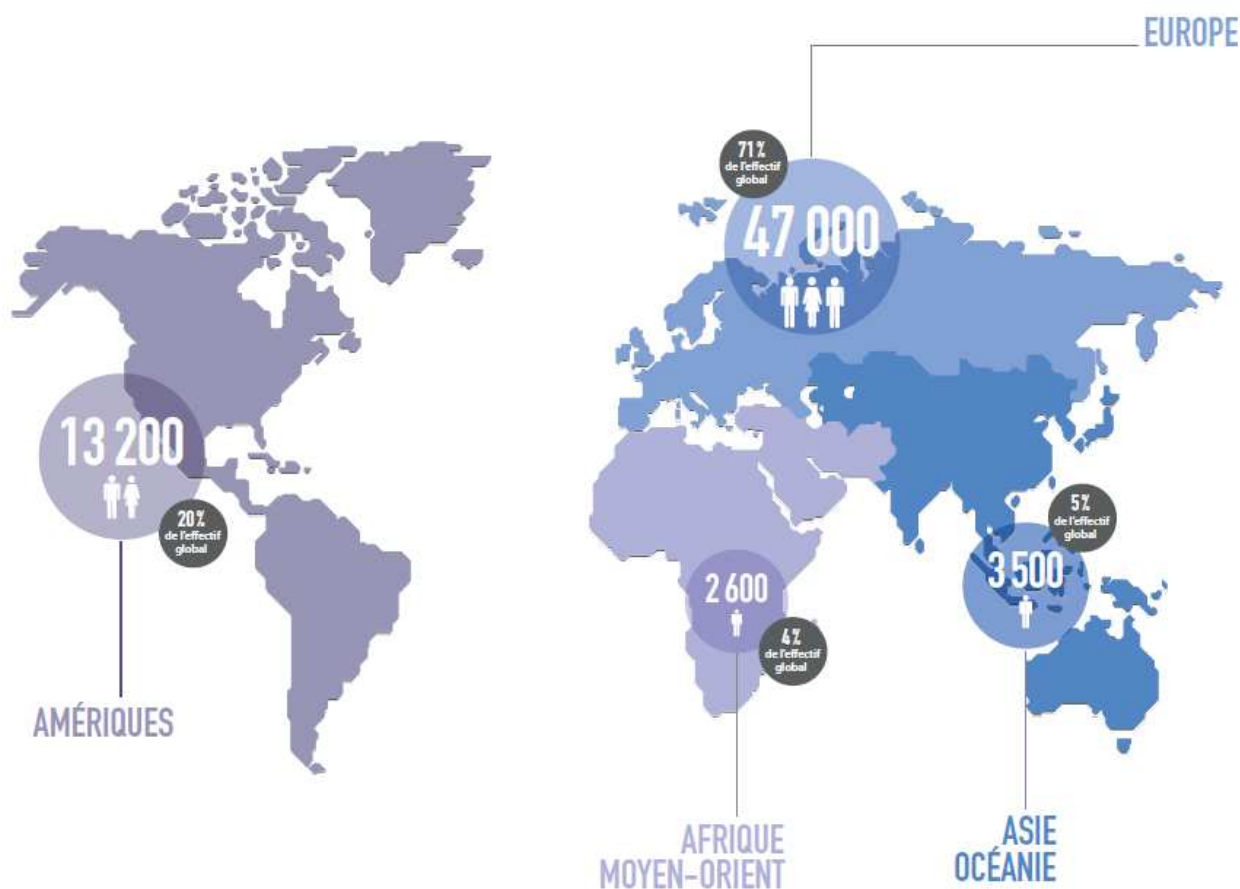


Figure 9. Organisation du groupe Safran dans le monde^[3]

2.3 SOCIÉTÉS DU GROUPE SAFRAN

Le groupe Safran est composé de dix sociétés liées à la conception et au développement d'équipements dans le champ de l'aéronautique, de la défense et de la sécurité. Ces sociétés ainsi que leurs activités sont décrites dans la **Figure 10**.

J'ai effectué mon stage au sein de la **division Power** société **Labinal Power Systems (LPS)**, dont le siège se trouve à Réau, Ile-de-France. Cependant, dû à la magnitude des projets développés par LPS, une partie de ses activités sont aussi exécutées sur le site de la société Hispano-Suiza, à Colombes, Ile-de-France. Parmi ces activités, le projet dans lequel je suis inséré peut être mis en évidence : l'intégration et la validation du système électrique de l'avion Embraer KC-390.

[3] Source : http://www.safran-group.com/IMG/pdf/Safran_RA2013_FR.pdf

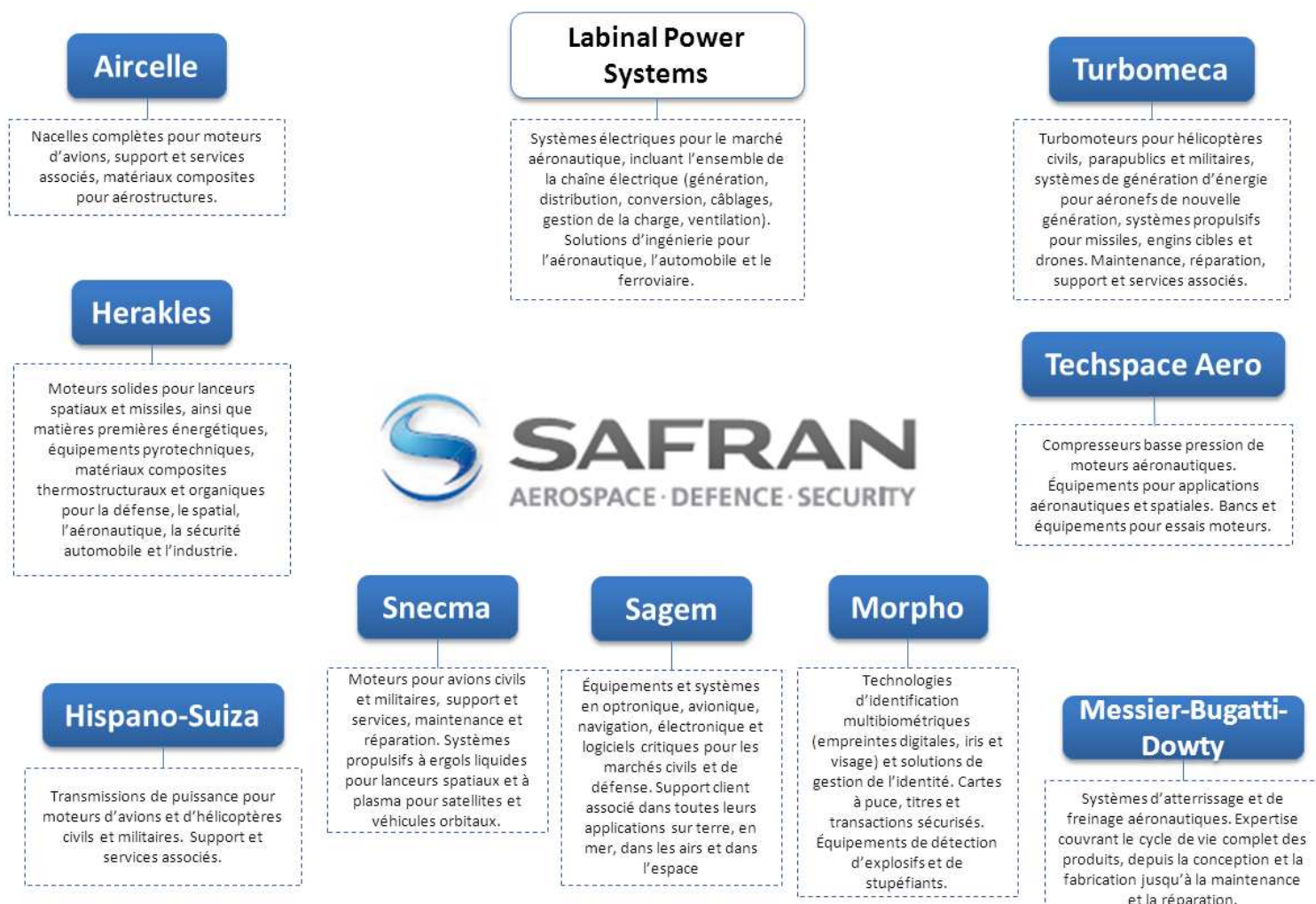


Figure 10. Les sociétés qui intègrent le groupe SAFRAN

2.3.1 LABINAL POWER SYSTEMS

En janvier 2014, Safran a créé l'entité Labinal Power Systems afin de rassembler dans une seule société les activités électriques du groupe. Ce nouveau pôle d'expertise est né du regroupement de la société Labinal, leader mondial de systèmes d'interconnexions électriques, Safran Power, spécialiste de l'énergie électrique à bord des avions, et Aerosource, spécialiste de la maintenance et réparation d'équipements électriques.

Labinal Power Systems comprend aussi Safran Engineering Services, spécialiste des services d'ingénierie notamment dans le domaine des systèmes électriques, et Technotan, spécialiste des équipements de ventilation et moteurs électriques. Labinal Power Systems comprend un total de 12000 salariés répartis dans 45 établissements en France et dans le monde.

En créant Labinal Power Systems, Safran a créé un leader mondial des systèmes d'interconnexions électriques et des systèmes de puissance, destinés tout particulièrement à l'avion « plus électrique ».

Labinal Power Systems propose à ses clients une offre électrique globale centrée sur la génération d'énergie (générateurs principaux, les générateurs de démarrage, les générateurs auxiliaires « APU » et les générateurs de secours), conversion, distribution primaire et secondaire, équipements électriques et électronique de puissance, câblage, intégration de systèmes, support et

services, ce qui représente les briques technologiques indispensables à la génération et à la distribution électriques dans les avions. La **Figure 11** ci-dessous illustre les principales activités dans le domaine de l'aéronautique développées par la société Labinal Power Systems.

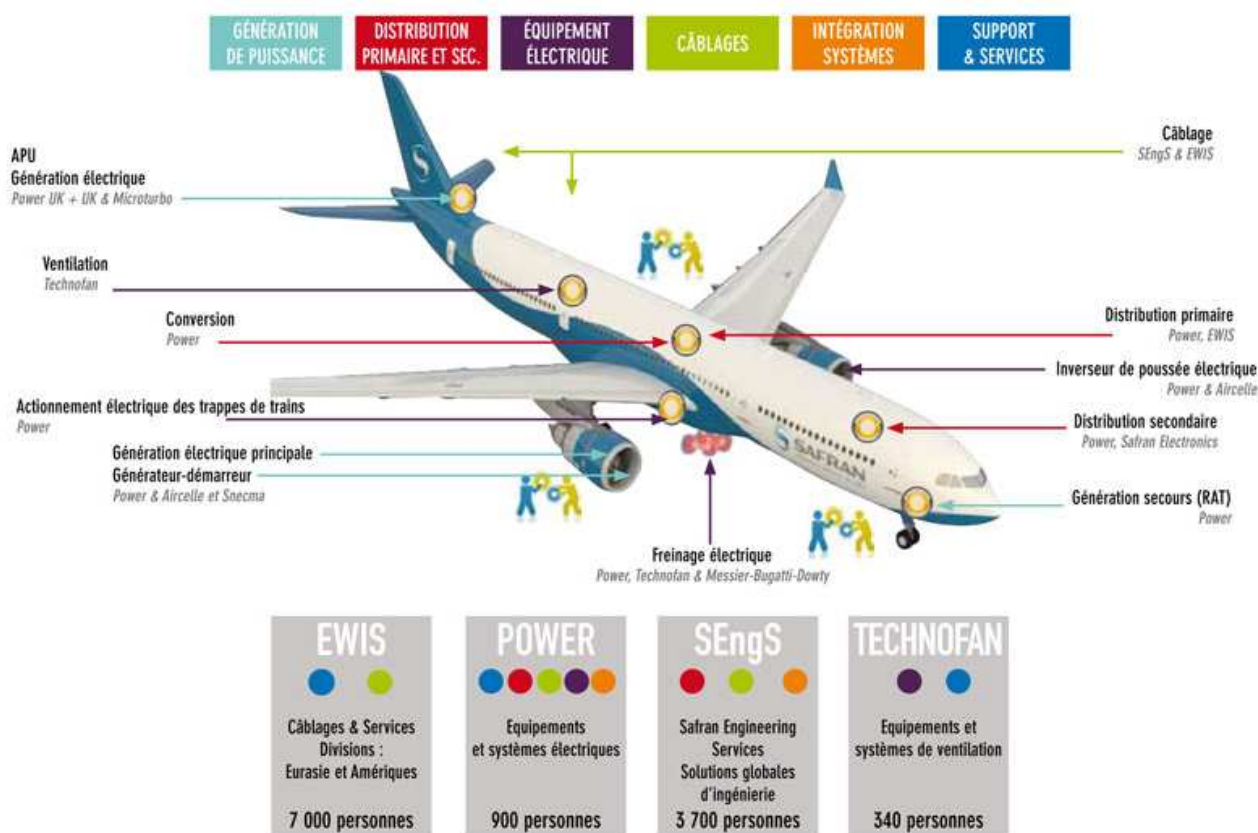


Figure 11. Activités dans le domaine de l'aéronautique développées par Labinal Power Systems

2.3.2 DIVISION POWER

La division Power de la société Labinal Power Systems fournit le meilleur de l'électronique de puissance et de la gestion de l'énergie électrique pour la mise en service des équipements et sous-systèmes avioniques. Cette division propose aux avionneurs mondiaux une architecture système intégrée comprenant la génération et la distribution électrique.

La division Power est chargée également de la vérification de performances et certifications dans le domaine des systèmes d'actionnement de commandes de vol, des systèmes d'atterrissage et de freinage, de l'ensemble propulsif d'un avion (moteur et nacelle) et de la chaîne de transport et de distribution de l'énergie.

Pour ce faire, la division Power compte sur la coopération d'autres sociétés qui font partie du groupe Safran dans le secteur d'équipements et services. Parmi d'autres activités, actuellement ces sociétés contribuent à la mise en œuvre du **Characterization and Optimization of Power Plant and Equipment Rig** (Copper Bird®), un banc d'essai dédié à tester le système électrique des avions tant civils que militaires.

2.3.3 COOPER BIRD

Le banc d'essai COPPER Bird est dédié au développement, à l'optimisation et aux essais des réseaux électriques pour avion. Il permet l'étude de l'ensemble d'un système électrique d'un avion, de

la génération jusqu'à distribution en utilisant des charges réelles et simulées, un système de harnais semblable à ce que l'on peut trouver dans un appareil réel ainsi que les systèmes annexes autour de l'électrique (fluides, refroidissement).

Il a été développé et financé en 2002 dans le cadre du programme de recherche européen **Power Optimized Aircraft (POA)**. Ce banc a été retenu en 2008 comme plateforme d'essais des réseaux électriques avion utilisée dans le cadre du programme européen CleanSky. En 2012, le Copper Bird a évolué pour accueillir le banc d'essais d'intégration du système électrique complet de l'avion de transport militaire EMBRAER KC-390. Actuellement, le service COPPER Bird est donc un ensemble d'installations regroupant le banc Electrical Test Bench (ETB) CleanSky et le banc Electrical System Rig KC-390.

La **Figure 12** ci-dessous montre le banc ETB CleanSky.



Figure 12. Illustration du banc ETB CleanSky^[4]

La **Figure 13** illustre l'organisation des services Copper Bird ainsi que le positionnement des stagiaires dans cette équipe. L'organigramme de la **Figure 14** ci-dessous représente la structure hiérarchique de la société Labinal Power Systems.

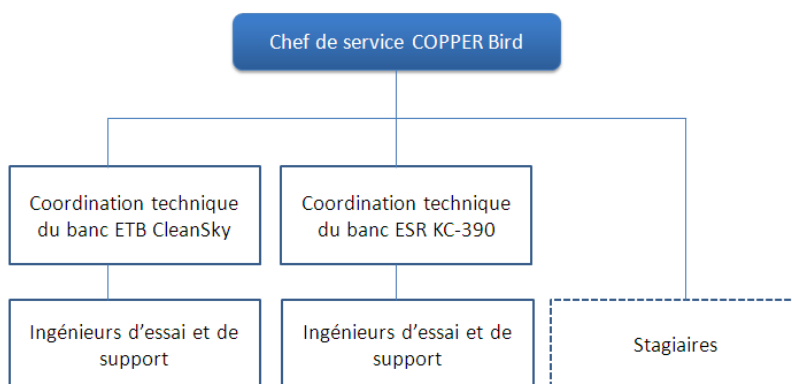


Figure 13. Structure hiérarchique du COPPER Bird

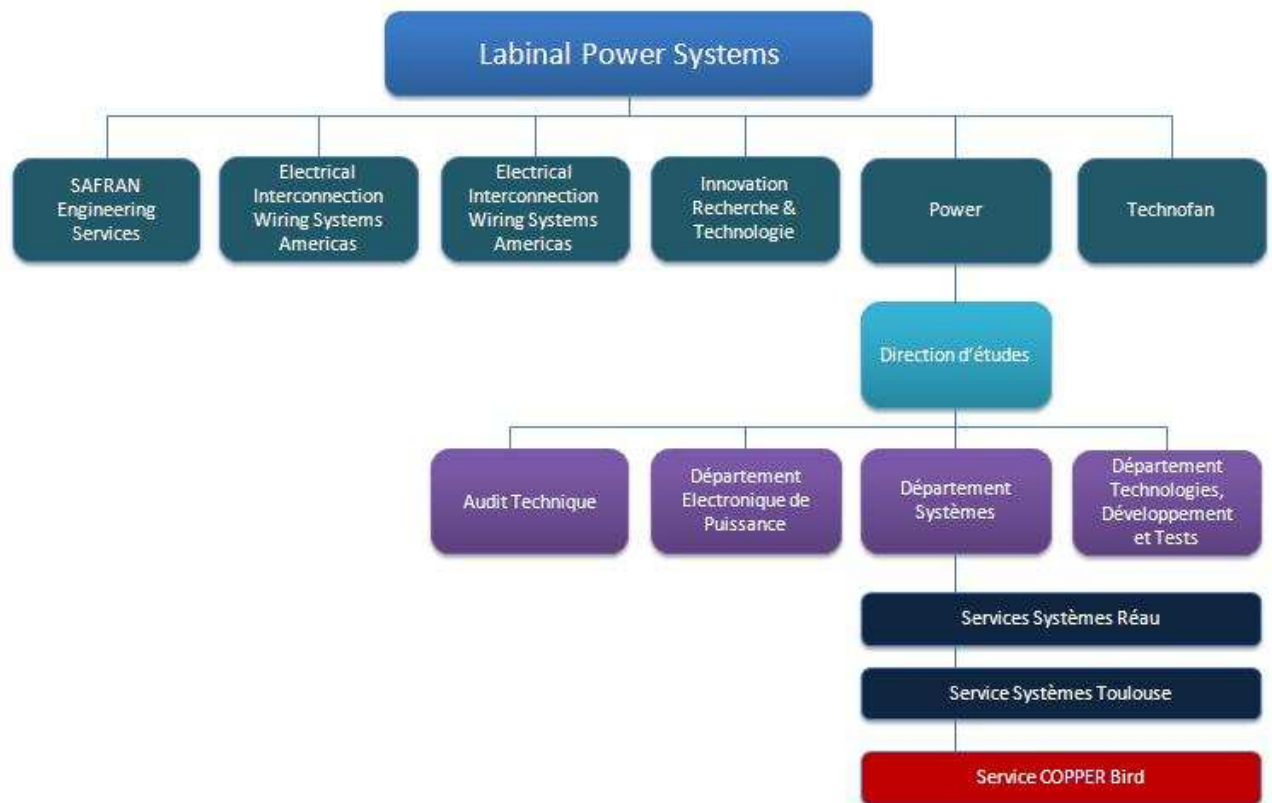


Figure 14. Organigramme de la société Labinal Power Systems

3 L'AVION EMBRAER KC-390

Dans cette section les aspects techniques du système électrique de l'avion Embraer KC-390 seront présentés.

3.1 ASPECTS GÉNÉRAUX DE L'AVION KC-390

L'avion KC-390 est un avion de transport militaire moyen, avec l'option avion ravitailleur, conçu par EMBRAER, dont le premier vol est prévu pour le troisième trimestre 2014 (cf. **Figure 15** ci-contre). Deux prototypes de cet avion ont été commandés par la force aérienne brésilienne (FAB), qui pourra en acquérir d'autres 28 exemplaires.

Dans le contexte de son développement, Labinal Power Systems a remporté les lots relatifs à :

1. La distribution électrique primaire de l'avion
2. La distribution électrique secondaire de l'avion
3. La génération électrique de secours, grâce au développement du système dit *Ram Air Turbine* (RAT)
4. L'intégration complète du système électrique



Figure 15. Avion Embraer KC-390

Afin de réaliser l'intégration complète du système électrique de cet avion, le banc ESR KC-390 contient tous les équipements électriques de l'avion, incluant les équipements provenant d'autres fournisseurs d'Embraer, tels que les Integrated Drive Generators. Ce banc a été conçu notamment pour valider le système électrique de l'EMBRAER KC-390.

3.2 SYSTÈME ÉLECTRIQUE DE L'AVION KC-390

Le système électrique de l'avion KC-390 est composé d'un système de génération et de distribution d'électricité, deux systèmes fondamentaux pour le bon fonctionnement de cet avion, comme le montre l'architecture primaire de la **Figure 16**. Le système de génération est responsable de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Le système de distribution garantit la gestion et distribution de cette énergie dans l'ensemble de l'appareil. Dans les prochaines sections, ces deux sous-systèmes seront détaillés.

3.2.1 GÉNÉRATION ÉLECTRIQUE

La génération électrique est réalisée par des générateurs entraînés par une boîte d'accessoires nommé *Accessory Gear Box* (AGB) ou par l'*Auxiliary Power Unit*. (APU). Ces deux systèmes auxiliaires seront détaillées au long du texte.

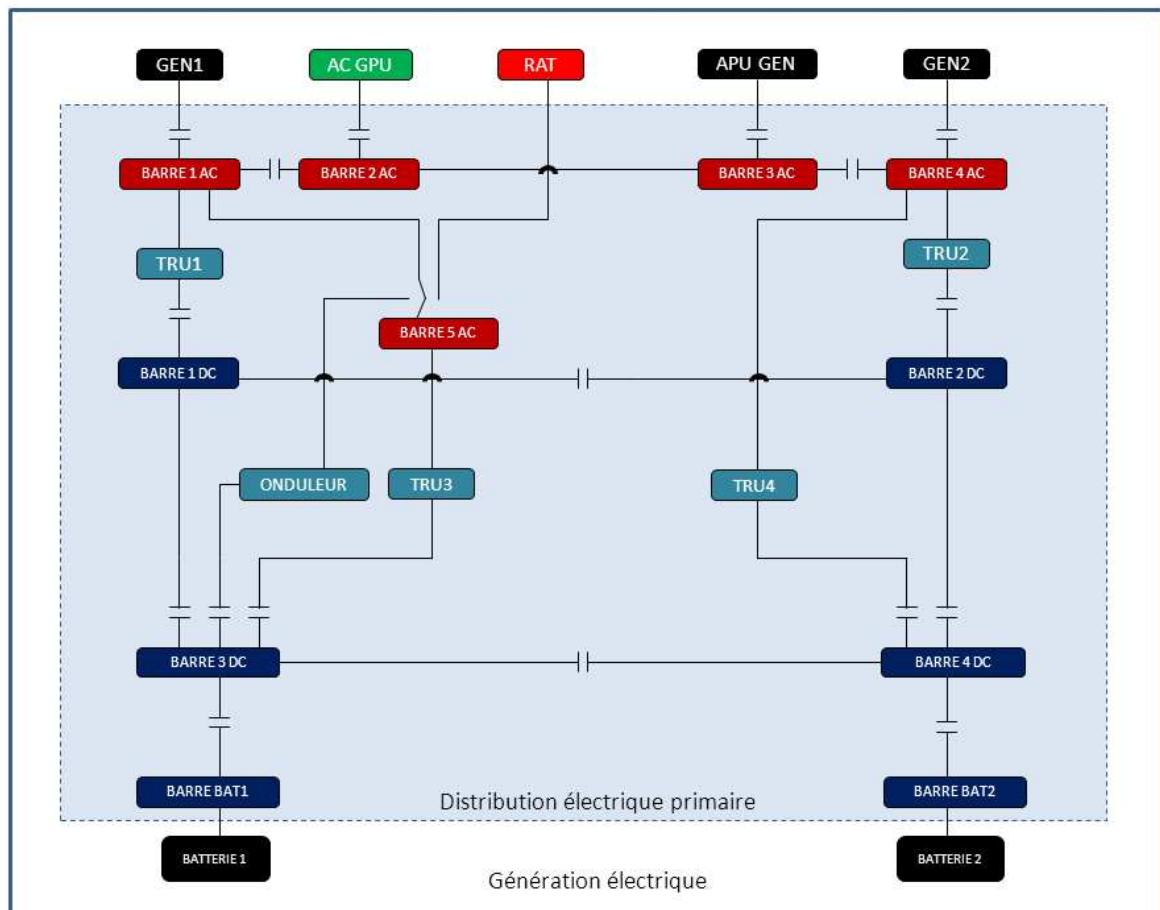


Figure 16. Architecture primaire simplifiée de l'avion KC-390

L'avion KC-390 contient deux générateurs électriques nommés Integrated Drive Generators (IDGs). Ces deux IDGs sont des machines synchrones triphasées régulées pour fournir une tension de 115 VAC/400 Hz ainsi que le courant nécessaire pour alimenter les équipements présents dans l'avion. Les machines synchrones triphasées utilisées dans le système de génération du KC-390 sont des machines dites à trois étages, comme l'illustre les **Figures 17 et 18**.

Le premier étage correspond à une machine électrique à aimant permanents. Dans cette machine, l'aimant permanent tourne de sorte à créer un flux magnétique $\varphi(t)$ dans le stator de cette machine électrique. Ce flux magnétique induit un courant triphasé dans le stator de la machine. Ce phénomène peut être expliqué à travers la loi de **Faraday-Neumann-Lenz**, qui dit :

« Un champ magnétique variable induit un courant électrique dans un circuit placé ainsi qu'un champ magnétique constant induit un courant électrique dans un circuit en se déplaçant ».

Le courant induit dans le stator du premier stage de la machine électrique sera redressé par le *Generator Control Unit* (GCU) et fourni au stator de l'excitatrice (deuxième stage de la machine électrique). A ce moment, ce courant continu est utilisé pour induire un courant triphasé dans le rotor de l'excitatrice. Le courant triphasé induit dans le rotor de l'excitatrice est encore une fois redressé par un pont redresseur et ensuite, fourni au rotor de la machine principale. Enfin, le courant d'excitation sur le rotor de la machine principale induit un courant triphasé sur son stator triphasé (troisième stage de la machine électrique).

Le GCU joue également le rôle de surveiller la qualité de l'énergie qui est fournie à l'avion. Pour ce faire, elle contrôle l'ouverture et la fermeture des contacteurs localisés à la sortie de l'IDG à travers un signal intitulé *power ready*.

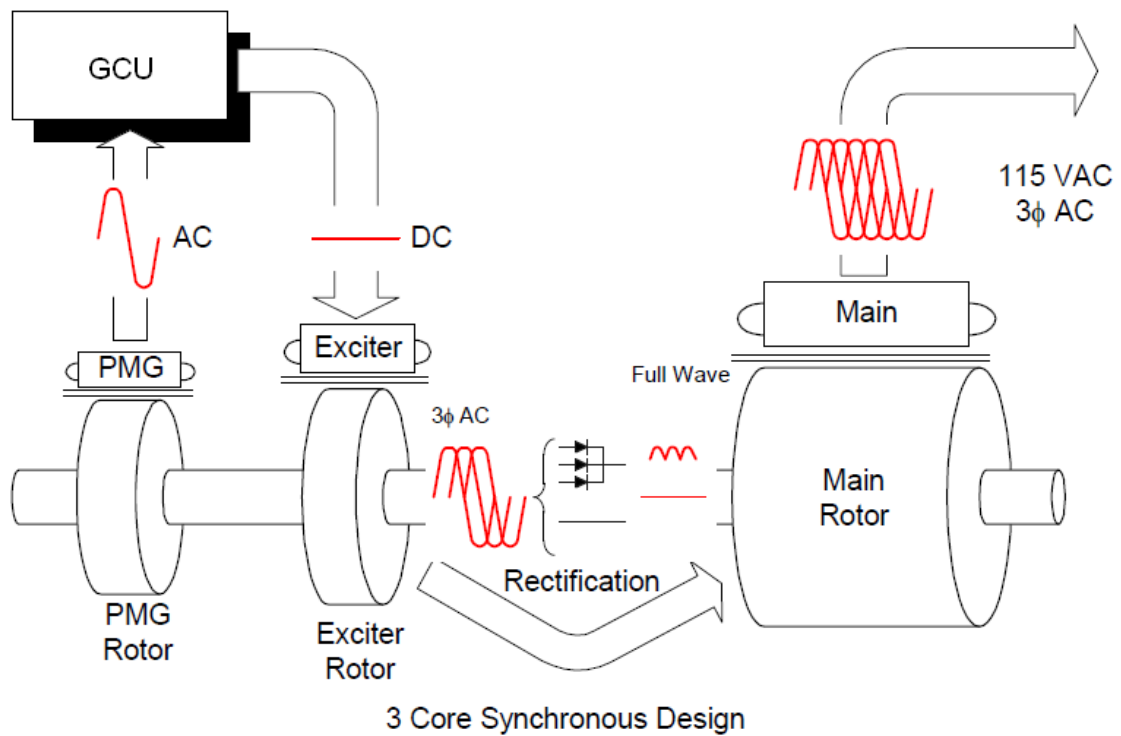


Figure 17. Générateur Synchrone à trois étages

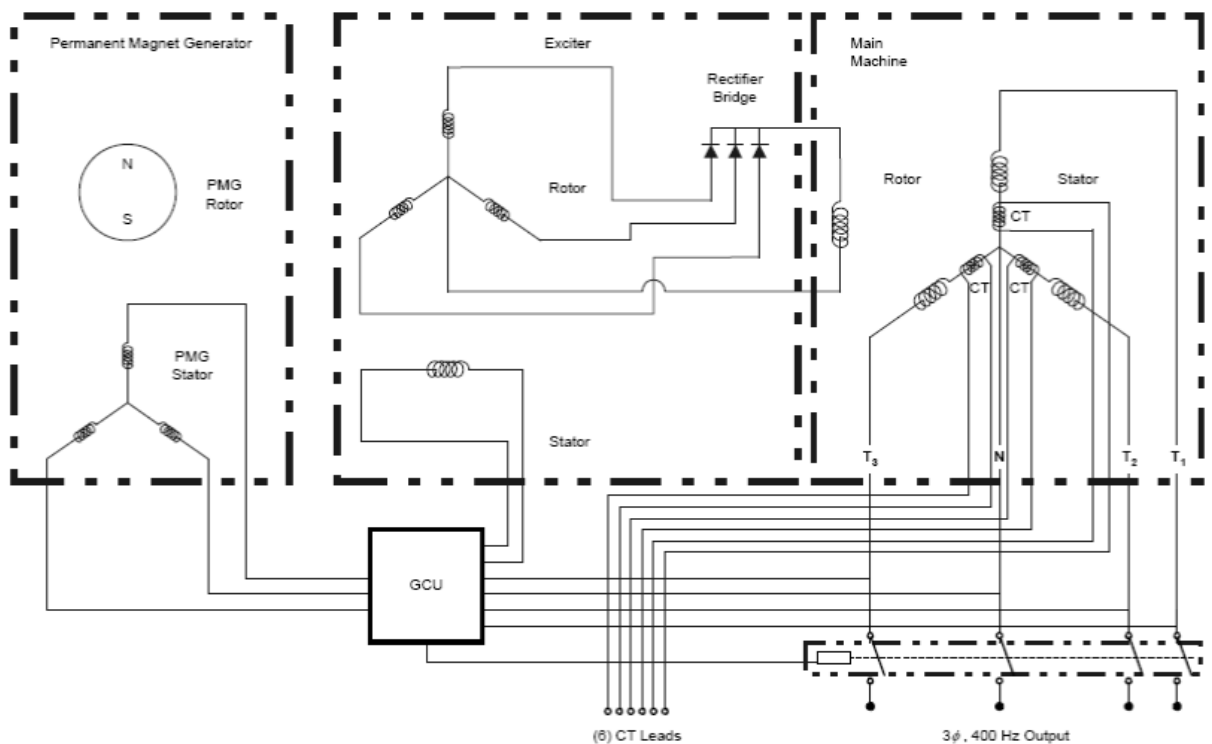


Figure 18. Générateur Synchrone à trois étages

Dans le cas où les paramètres de tension et fréquence au niveau du stator de la machine principale sont égaux à 115 VAC/400 Hz, le GCU envoie une commande de fermeture aux quatre contacteurs localisés à la sortie de l'IDG, en assurant l'alimentation des charges avec la tension et la fréquence spécifiées.

Fréquence fixe à 400 Hz. Pourquoi ?

L'avantage de faire fonctionner un système électrique à 400 Hz au lieu de 50 ou 60 Hz (fréquences des réseaux électriques traditionnels) c'est que ses sources d'énergie sont plus petites et plus légères. Cet avantage est important à bord des avions vu que dans un avion l'intérêt est toujours minimiser le poids avec un maximum de performance.

D'une manière plus formelle, nous pouvons écrire l'expression du flux électromagnétique produit par un aimant permanent tournant à vitesse constante comme suit :

$$\varphi(t) = B \cdot S \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad \text{Equation 1}$$

d'où B représente le module du champ magnétique qui traverse une bobine de surface S .

D'après la loi de Faraday-Neumann-Lenz, nous pouvons exprimer la force électromagnétique induit par un champ magnétique dans une bobine comme suit :

$$f_{em} = N \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} = -N \cdot B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad \text{Equation 2}$$

En analysant les équations 1 et 2, nous pouvons conclure que pour maintenir la tension de f_{em} constante dans une bobine (égale à 115VAC dans notre cas), nous pouvons augmenter la fréquence d'oscillation du réseau et diminuer le nombre de spires de la bobine. En diminuant le nombre de spires des bobines, nous diminuons aussi leurs poids, ce qui permet un gain de poids dans la structure de l'avion.

Une règle de base dans la conception d'avion dit que la suppression d'un kilo de poids peut effectivement réduire le poids global d'au moins cinq kilo à cause de toute la structure supplémentaire et du carburant qui ne sont plus nécessaires à la réalisation de ce poids d'1 kilo.

3.2.2 DISTRIBUTION ÉLECTRIQUE

Le système de distribution sera chargé de convertir les tensions et les courants obtenus à travers le système de génération à des niveaux adaptés. Les transformateurs rectificateurs, l'onduleur, les barres AC et DC ainsi que les différents contacteurs appartiennent au réseau de distribution électrique de l'avion.

Le système de distribution gère aussi toute la logique de fourniture de puissance aux charges, pouvant isoler celles-ci du réseau principal ou permettant de reconfigurer le réseau de bord. Les règles d'alimentation diffèrent en fonction des phases de vol et également des scénarios de défauts dans lesquels peut se trouver l'appareil (perte d'une génératrice, d'un convertisseur, d'une charge). De plus, le système de distribution assure la protection de l'ensemble du réseau contre une charge ou une partie défectueuse, tel que des court-circuits, surtensions, génération d'harmoniques parasites, etc.

En plus, le système de distribution est caractérisé par ses nombreuses redondances permettant de continuer à assurer les fonctions d'approvisionnement en électricité malgré un défaut sur une partie du réseau.

Distribution électrique primaire

La distribution électrique primaire est responsable de l'alimentation directe des charges de forte puissance (supérieures à 20A en courant). Pour ce faire, elle distribue généralement le courant électrique sorti du système de génération AC ou DC, provenant des génératrices ou des batteries, respectivement. Elle répartit également l'énergie électrique vers la distribution secondaire. La distribution électrique primaire est composée de deux cœurs bien centralisés, responsables de l'approvisionnement d'énergie pour les côtés droit et gauche de l'avion.

Les technologies d'interrupteurs et protections mises en œuvre dans ces deux cœurs sont de types mécaniques, thermiques et magnétiques (disjoncteurs classiques, relais, contacteurs). La distribution primaire reste généralement figée. On peut la comparer au réseau haute tension d'un pays.

Distribution électrique secondaire

La distribution électrique secondaire gère l'alimentation des charges de plus faibles puissances. Elle peut fonctionner avec une tension de 115 VAC, mais gère également des tensions de 28VDC. Les cœurs peuvent être décentralisés et ramenés au plus près des charges, car ceux-ci sont de plus faibles volumes.

Dans la distribution électrique secondaire, des relais électroniques avec une fonction de protection programmable sont souvent utilisés. Nous pouvons comparer la distribution électrique au réseau électrique domestique chez un particulier.

Distribution électrique d'urgence

Les redondances présentes dans le système électrique d'un avion permettent de maintenir en fonctionnement ses équipements vitaux même à l'occasion de perte d'une ou de plusieurs sources d'énergie. Grâce aux plusieurs configurations possibles pour alimenter les charges, on dit que le système électrique est le système le plus fiable dans un avion.

Comme le montre la **Figure 16**, la fourniture de puissance aux charges localisées dans les barres AC et DC peut être faite de plusieurs manières. L'une de ces possibilités consiste à alimenter les charges en mode nominal, c'est-à-dire, en utilisant l'IDG1 et l'IDG2 comme sources d'alimentation pour tout le système. Si jamais l'un de ces IDGs tombe en panne, l'autre qui reste en alimentant les charges fournit aussi de courant aux charges qui étaient alimentées pour celui qui a présenté un dysfonctionnement.

La perte de l'un des génératrices de puissance est classé comme « Catastrophique » et la probabilité d'un tel événement doit être inférieure à 10^{-9} occurrences par heures de vol, soit une occurrence toutes les 10^9 heures, autrement dit jamais pour un avion qui vol 150 heures sans avoir faire un entretien au niveau du système électrique.

3.3 BANC D'ESSAI ELECTRICAL SYSTEM RIG KC-390

Le banc Electrical System Rig (ESR) KC-390 est un banc d'essai dédié à la validation et à l'intégration du système électrique de l'avion Embraer KC-390. Localisé sur le site de l'entité Safran

Hispano-Suiza, à Colombes, Ile de France, le banc d'essai ESR comporte les équipements responsables de la génération et de la distribution électrique de l'avion, tels que les générateurs placés sous les ailes et dans la queue de l'avion afin de lui fournir de l'énergie électrique. Depuis 2012 l'équipe LPS travaille à la mise en place de cette plate-forme, dont les principaux objectifs sont de :

1. Vérifier le bon fonctionnement des équipements et le comportement du système électrique de l'avion KC-390.
2. Vérifier la qualité du réseau électrique suivant les normes applicables.
3. Garantir la sécurité du premier vol (SOF : Safety of Flight).
4. Réaliser l'ensemble des essais liés à la certification civile et militaire pour le système électrique.
5. Assurer la maturité et la robustesse de la conception durant la vie de l'appareil.

Cette plate-forme peut s'adapter à des nombreuses conditions et configurations d'essais, telles que la connexion de charges électriques variées et la vérification du système de protection de l'avion en cas de pannes.

Concernant l'infrastructure du banc ESR, il est composé d'une salle de contrôle et de commande de 50 m², permettant de piloter les infrastructures du banc et du bâtiment aussi bien que les équipements de l'avion, suivant le scénario du test requis. Au-delà de cela, le banc ESR est composé aussi d'une salle d'essais de 400 m² équipée des servitudes électriques, hydrauliques, climatisation. La **Figure 19** montre la plante de l'intérieur du banc.

Au-delà des génératrices de puissance, telles que les *Integrated Drive Generators (IDGs)*, l'*Auxiliary Power Unit (APU)*, le *Ground Power Unit (GPU)* et la *Ram Air Turbine (RAT)*, ce banc d'essai est doté aussi des boîtes de distribution primaire et secondaire de l'avion KC-390. Les bancs de charges AC et DC sont aussi disposés dans le banc et permettent de simuler les charges électriques placées dans l'avion.

Le banc ESR comporte aussi quatre transformateurs rectificateurs responsables de la conversion d'énergie électrique en courant alternatif en énergie électrique en courant continu. De plus, ce banc d'essai possède également un onduleur, aussi nommé *Static Inverter*, dont le rôle est de convertir énergie électrique en courant continu en énergie électrique en courant alternatif.

Finalement, les variateurs de vitesse sont responsables de commander les moteurs qui entraînent les génératrices de puissance. Ces variateurs de vitesse convertissent les paramètres de tension et fréquence de l'énergie électrique fournies par l'usine en des paramètres utilisés par les machines électriques.

Le banc ESR est doté d'un complexe système d'acquisition de données, dont fait partie les capteurs de signaux et le système de câblage. Ces capteurs sont capables d'acquérir une vaste gamme de signaux, tels que les signaux de tension, courant, fréquence, puissance, facteur de puissance, température de l'huile dans les génératrices, état de contacteurs, etc.

Une fois mesurés par ces capteurs, les échantillons de ces signaux sont envoyés via câble réseau à six baies intitulés *Local Control Command (LCC)*. Chacune de ces baies est responsable de

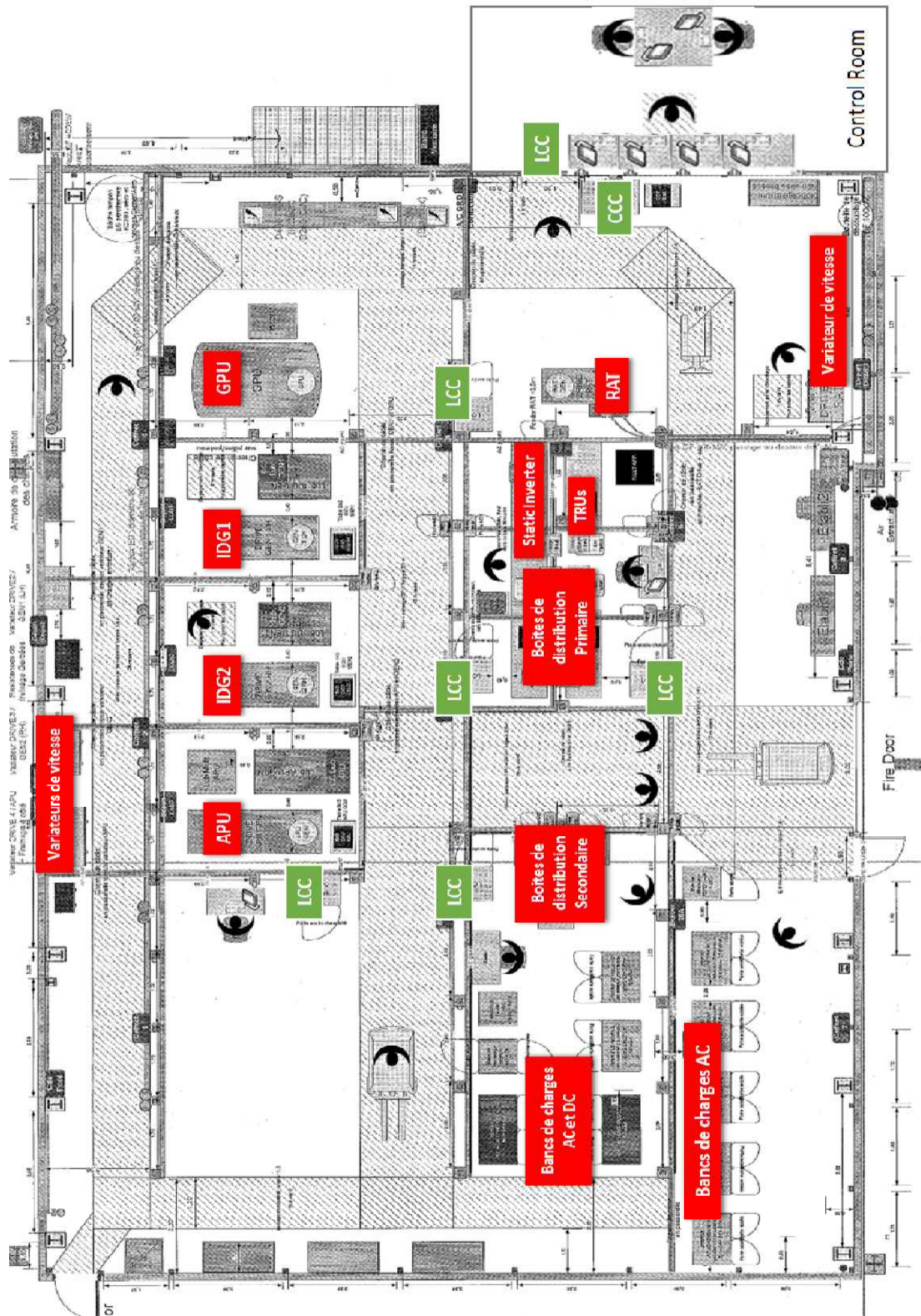


Figure 19. Plante de l'intérieur du banc ESR KC-390

l'acquisition et stockage d'une gamme spécifique de données. Ces LCCs, à leur tour, sont liés à une baie principale nommée *Central Control Command* (CCC), qui joue le rôle de commander tous les autres LCCs.

Les prochaines sous-sections présentent chacun des équipements qui intègrent le banc ESR. Cependant, en raison du caractère confidentiel du projet, ces équipements seront expliqués de manière succincte.

3.3.1 Integrated Drive Generators

Les *Integrated Drive Generators* (IDGs), aussi appelés alternateurs à entraînement intégré en français, constituent la principale source d'alimentation pour le fonctionnement en vol des circuits en courant alternatif et en courant continu. Chaque IDG comprend aussi un entraînement hydromécanique à vitesse constante et un alternateur. La partie entraînement à vitesse constante est conçue pour fournir une vitesse de rotation de sortie constante, quelle que soit la vitesse de rotation d'entrée provenant du boîtier d'entraînement des accessoires moteur. Cette vitesse constante produit une sortie constante de 400 Hz.

Les IDGs utilisés dans l'avion KC-390 sont capables de supporter une charge de 90 kVA en permanence. De plus, ils sont désignés pour supporter également une charge de 112.5 kVA pendant cinq minutes et 150 kVA pendant 5 secondes. Ces deux cas de surcharge peuvent arriver lors de la perte de l'un de ces IDGs.

3.3.2 Auxiliary Power Unit

L'*Auxiliary Power Unit* (APU), aussi appelé Groupe Auxiliaire de Puissance, désigne un groupe auxiliaire destiné à produire de l'énergie à bord des avions pour permettre d'alimenter au sol les différents systèmes de bord (tension électrique, pressions pneumatique et hydraulique, climatisation) quand les moteurs sont arrêtés afin d'économiser le carburant.

Les APUs sont généralement positionnés à l'arrière de l'avion, dans le cône de queue et alimentés par le kérosène des réservoirs de l'avion. Ils produisent l'énergie (pneumatique, hydraulique ou électrique selon le type d'appareil) utilisée pour démarrer les moteurs.

L'avion KC-390 possède le certificat *Extended Range Twin-engine Operation* (ETOPS). Ce certificat est un règlement permettant aux avions commerciaux équipés de deux moteurs d'utiliser des routes aériennes comportant des secteurs à plus d'une heure d'un aéroport de secours donc, en particulier, les parcours océaniques.

Les APUs équipant les avions ayant reçu un certificat de navigation ETOPS ont un niveau de sécurité de fonctionnement plus élevé que ceux qui ne sont utilisés qu'au sol car ils fournissent en secours l'électricité et l'air comprimé à la place d'un moteur en panne pendant le vol. Alors que certaines APUs n'ont pas été conçues pour fonctionner en vol, les APUs ayant un certificat ETOPS doivent pouvoir être démarrés dans certaines périodes du vol, en dépendant notamment de l'altitude de l'avion.

3.3.3 Transformer Rectifier Unit

Le Transformer Rectifier Unit (TRU) est un transformateur redresseur responsable de la conversion de la tension triphasée de 115 VAC 400 Hz en tension monophasée de 28 VDC. Dans l'avion KC-390, les équipements en fonctionnant en courant continu seront alimentés principalement du courant fourni à travers la conversion AC/DC réalisée par ce transformateur.

Le KC-390 est équipé de quatre TRU en fournissant un courant nominal de 300 A aux barres 1, 2, 3 et 4 DC. Les TRUs, ensemble avec les batteries 1 et 2, sont nécessaires pour alimenter tous les équipements en exigeant de courant continu pour fonctionner.

Tous les équipements en fournissant des puissances triphasées sont spécifiés en kVA, comme pour les IDGs et pour l'APU. Cependant, les équipements qui fournissent des puissances continues sont spécifiés en courant au lieu de puissance.

3.3.4 Static Inverter

L'avion KC-390 est équipé également d'un onduleur (Static Inverter), dont la puissance nominale est de 8 kVA. Cet onduleur joue un rôle inverse à celui du TRU, à savoir, il convertit la puissance continue provenant des batteries en puissances triphasées. Il est utilisé en cas de perte des sources AC de l'avion, telles que les IDGs et les APUs.

3.3.5 Batteries

L'avion KC-390 possède deux batteries de Lithium-ion, comme le montre la **Figure 20**. Ces deux batteries jouent le rôle de stocker l'énergie électrique et d'alimenter le système électrique dans certaines conditions de fonctionnement :



Figure 20. Batteries de Lithium-ion

1. Alimentation de systèmes au sol : Lorsque l'avion n'est relié à aucune source d'énergie extérieure, les batteries peuvent être utilisées pour faire démarrer le générateur APU et pour alimenter des charges DC.
2. Alimentation sans interruption : Au moment de la reconfiguration du système électrique (sortie d'une source d'alimentation et entrée d'une autre source d'alimentation), les batteries garantissent l'approvisionnement d'énergie au système pendant tant que la nouvelle source d'alimentation ne soit pas démarré.
3. Alimentation d'urgence : En cas de perte d'une ou plusieurs sources d'alimentations du système électrique, les batteries peuvent fournir de l'énergie électrique sous forme d'une tension de 28V DC et un courant de 400 A aux éléments fondamentaux pour le fonctionnement de l'avion.

Comme l'avion possède également des charges AC, il est nécessaire de convertir la tension et le courant DC fournies par la batterie en tension et courant AC. Les onduleurs sont les équipements responsables de cette conversion. Normalement trouvés couplés aux batteries, les onduleurs réalisent la conversion DC/AC et fournissent de la puissance à des éléments critiques qui nécessitent de la fourniture de l'électricité en courant alternatif.

Les principaux avantages des batteries Lithium-ion sont :

- Le stockage des volumes énergétiques bien supérieures à celles des batteries Nickel-Cadmiun (deux à cinq fois plus).
- Absence d'effet mémoire.
- Poids très faible, grâce aux propriétés du lithium (très bon poids/potentiel électrique).
- Ils peuvent permettre une meilleure sécurité que les batteries purement lithium.

3.3.6 Banc de charges

Les bancs de charges disposés dans le banc ESR KC-390 simulent les consommations électriques des équipements de l'avion. Les banc de charges se trouvent à l'intérieur de 8 armoires, qui à leur tour, contiennent plusieurs charges AC triphasées ou DC.. Dans ce banc nous avons aussi la présence de charges électroniques, qui peuvent être configurées comme des charges AC ou DC, selon le besoin pour la réalisation de l'essai. La **Figure 21** ci-dessous illustrent comment les bancs de charges sont organisés.

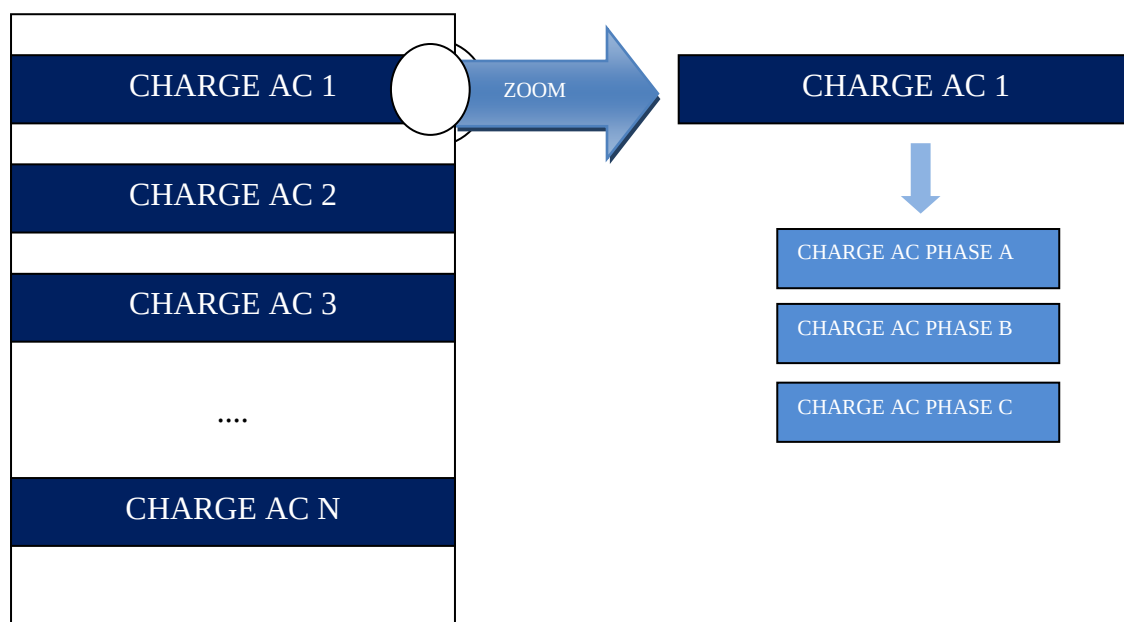


Figure 21. Banc de charges disposés dans le banc KC-390

Les spécifications de ces bancs de charge sont montrées dans le **Tableau 1** ci-dessous.

Banc de charges	Distribution	Puissance	Tension nominale
AC triphasé	Primaire Secondaire	150.5 kVA	115V/400 Hz
DC	Primaire	40 kW	28 VDC
DC	Secondaire	15 kW	28 VDC
AC et DC électroniques	La configuration des charges électroniques est faite à distance à travers le réseau de communication interne du banc		

Tableau 1. Spécifications des bancs de charge du banc ESR KC-390

3.3.7 Système de contrôle et commande HighPMAAC

Commandé en 2012 par Labinal Power Systems à son prestataire de services Clemessy, la plate-forme d'essai *High Performance Modular Architecture of Acquisition and Control* (HighPMAAC) joue le rôle d'interface entre les opérateurs des essais et les équipements disposés dans le banc KC-390.

Cette plate-forme d'essai a été basée sur la suite National Instruments (NI) et incorpore une partie Hardware (des Chassis PXI et ses cartes d'acquisition associées ainsi qu'un ordinateur de supervision et un contrôleur temps réel) et une partie Software (Veristand, TestStand et DIAdem).

L'architecture physique du système de contrôle-commande HighPMAAC est constitué également de plusieurs baies connectées au réseau du banc. Ces baies sont des passerelles de communication entre les équipements localisés à l'intérieur du banc et l'ordinateur de contrôle et commande localisé dans la control room. Durant un test, elles sont responsables aussi d'acquérir toutes les données de mesure depuis tous les capteurs positionnés dans les équipements. Il existe dans le banc ESR KC-390 un total de six baies, dont cinq sont intitulées Local Command Control N $\{N \in 1,2,3,4,5\}$ et une Control Command Control.

La **Figure 22** ci-dessous illustre l'interaction de ces plusieurs baies avec les équipements avion.

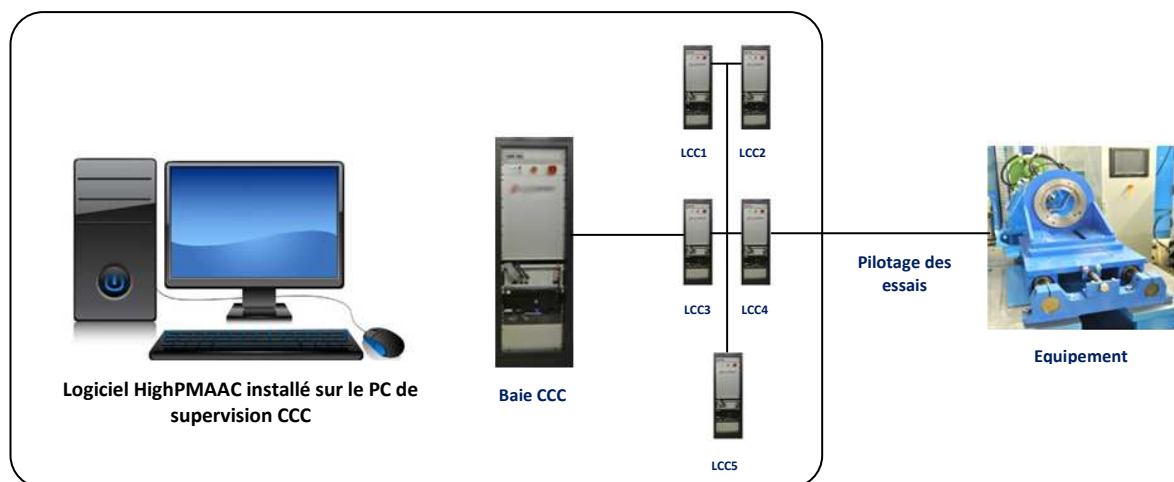


Figure 22. Interactions entre les plusieurs baies et les équipements de l'avion

Le logiciel HighPMAAC est en charge de configurer les baies de communication à travers les outils VeriStand et TestStand. L'outil Veristand est utilisé pour configurer les baies de communication en temps réel alors que l'outil Testsand permet l'écriture et le lancement de séquences automatiques de test.

2.2.8 Protocole de communication ARINC 429

La communication entre le logiciel HighPMAAC et les baies de communication est réalisée surtout à travers le protocole ARINC 429. Ce protocole est une norme pour l'aéronautique qui décrit à la fois une architecture, une interface électrique et un protocole pour véhiculer des données numériques. Aujourd'hui, l'ARINC 429 est le bus informatique le plus répandu sur les systèmes avioniques complexes.

La topologie de l'ARINC 429 décrit un bus de données série unidirectionnel standard. La norme impose également qu'il n'y ait qu'un seul émetteur par bus. En revanche, le nombre de récepteurs peut aller jusqu'à 20, comme l'illustre la **Figure 23**.

La connexion est réalisée par l'intermédiaire d'une paire torsadée blindée composée de deux lignes, A et B. Le transfert de données est réalisé en différentiel entre les deux lignes de la paire. L'impédance de l'émetteur doit être maintenue en permanence à $75 \pm 5 \Omega$

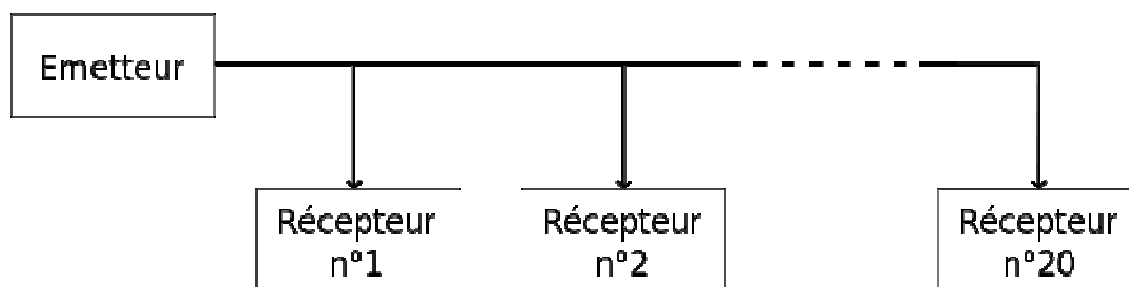


Figure 23. Description du bus ARINC 429

quel que soit le niveau High, Low ou Null, divisée de manière égale entre les deux lignes de la paire. Cette valeur a été choisie pour être approximativement égale à l'impédance caractéristique de la paire blindée.

La résistance de chaque récepteur entre les lignes A et B et entre chacune de ces lignes à la masse doit être maintenue supérieure à 12kΩ. La capacitance, à son tour, doit être inférieure à 50 pF entre les deux lignes mais également entre chacune des lignes à la masse. La résistance totale des récepteurs (jusqu'à 20) mis en parallèle doit rester supérieure à 8kΩ.

Les données sont codées sous forme de mots de 32 bits qui peuvent être découpés en cinq champs distincts, à savoir : label, SDI, donnée, SSM et parité, comme l'illustre le **Tableau 2** et la **Figure 24** ci-après.

Bits	Signification
1-8	Label correspondant à la mesure
9-10	Source Destination Identifier (SDI)
11-29	Donnée mesurée
30-31	Sign/Status Matrix (SSM) et peut avoir plusieurs significations en fonction du type de la donnée
32	Bit de parité

Tableau 2. Description du bus ARINC 429

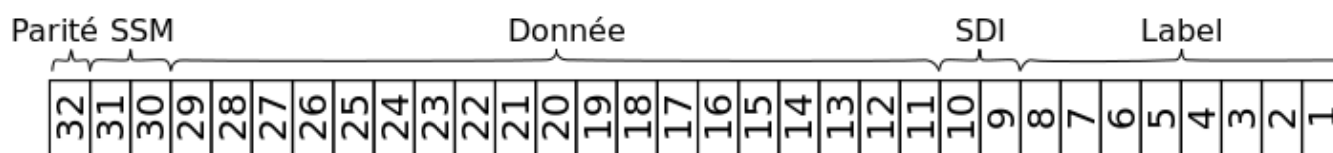


Figure 24. Découpage d'un mot de l'ARINC 429

L'ordre de la transmission des bits est particulier. En effet, l'octet correspondant au label est le premier à être transmis, en commençant par le bit de poids fort. Les autres bits sont ensuite envoyés tels quels, en commençant par le bit de poids faible, ce qui donne concrètement une transmission comme suit : 8,7,6,5,4,3,2,1,9,10,11,12,13...29,30,31,32.

Le label est l'identifiant de la donnée codé sur 8 bits. Il peut ainsi prendre 256 valeurs différentes. Dans la documentation officielle de l'ARINC 429, le label est exprimé en octal.

Le champ SDI peut être utilisée de deux manières. D'abord, il peut définir le récepteur de la donnée sur un bus ayant plusieurs récepteurs. À titre d'exemple, sur un même bus, on connecte deux équipements identiques, mais sur lesquels on veut envoyer des informations différentes. Il suffit de configurer le premier équipement pour qu'il ne lise que les données avec le champ SDI placé à « 01 » et de la même manière pour le second équipement avec le champ SDI placé à « 02 ». Ainsi, l'émetteur n'a plus qu'à modifier le champ SDI en fonction de l'équipement auquel il désire envoyer la donnée.

Le champ SDI peut également indiquer quel sous-système de l'émetteur a émis la donnée. Si on dispose d'un équipement tel que l'IDG, lorsque l'on veut envoyer la donnée correspondante à la fréquence de rotation du générateur, on place le champ SDI à « 01 ». En revanche, lorsque il s'agit d'envoyer le couple du générateur, on place le champ SDI à « 02 ».

Le bit de parité est utilisé pour vérifier que le mot n'a pas été altéré pendant la transmission. Le bit de parité est définie comme pair ou impair. Dans la plupart des cas, le bit a une valeur impaire, ce qui signifie que le bit est positionné, lors de l'émission, de telle manière que le nombre des bits à « 1 » dans le mot est impair. Dans ces cas précis, si le nombre de bits à « 1 » est pair, à la réception, cela veut dire qu'un des bits du mot a été altéré pendant la transmission.

3.4 État de l'art du Banc ESR KC-390

En 2012, l'équipe COPPER Bird ® a évolué pour accueillir le banc d'essais d'intégration du système électrique pour l'avion KC-390. Afin de concevoir le banc ESR KC-390, l'équipe s'est servie de l'expertise retenue grâce au banc CleanSky, qui avait déjà été construit. Le **Tableau 3** illustre le planning du développement du banc ESR KC-390, avec les événements et dates les plus importants.

Banc ESR KC-390	Novembre 2011	Juillet 2012	Janvier 2012	Septembre 2013	Mars 2014	Juillet 2014	Octobre 2014	2015-2016
Embraer sélectionne Safran pour : 1. Validation de la distribution primaire et secondaire du KC-390. 2. Développement de la génération de secours. 3. Intégration électrique du KC-390								
Premier concept du banc d'intégration KC-390								
Début des travaux de génie civil dans le banc ESR KC-390								
Fin des travaux de génie civil dans le banc ESR KC-390								

Début de l'étape de pré-intégration									
Début de l'étape Safety of Flight (SOF)									
Premier vol du KC-390									
Tests de certification									

Tableau 3. Planning du développement du banc ESR KC-390

L'étape de **pré-intégration** comprend une série d'essais définie par Labinal Power Systems et Embraer afin de vérifier et de valider le bon fonctionnement du banc ESR, tel que le système de câblage, les armoires électriques, les protections, les drivers, les moteurs, les bancs de charges, les groupes de lubrification, les boîtes de distribution, etc). Tous ces équipements ont été testés individuellement chez leurs fabricants et c'est lors de cette étape qu'ils ont été testés ensemble pour la première fois. Cependant, il s'agit de l'intégration électrique du banc de l'essai. L'intégration électrique de l'avion est réalisée dans l'étape Safety of Flight (SOF).

L'étape SOF comprend une totalité de cinquante essais définis par Embraer qui a pour but vérifier le bon fonctionnement et les performances minimales des équipements de l'avion KC-390 pour garantir le premier vol en toute sécurité. Lors de cette phase, il est possible de tester les protections de chaque équipement (surcharge, survitesse, parallélisme de générateurs, court-circuit, situations d'urgence, etc).

Mon stage s'est déroulé pendant les phases de pré-intégration et l'étape SOF (depuis 03 mars jusqu'au 25 août). Durant les premiers mois de stage, le banc ESR KC-390 était encore en phase de développement. La génératrice APU et les TRUs ont été livrés pendant cette période.

3.4.1 Mise en place d'essais et analyse des résultats avec le logiciel DIADEM

Pendant l'étape de pré-intégration, mon rôle dans l'équipe ESR KC-390 consistait en analyser les résultats des essais réalisés à l'aide des logiciels HighPMAAC et DIADEM. Le but de ces analyses étaient la validation du logiciel HighPMAAC, la validation du système électrique du banc ESR KC-390 et la validation du système électrique primaire et secondaire de l'avion KC-390. Encore en phase de développement, le logiciel HighPMAAC a eu plusieurs modifications pendant l'étape de pré-intégration. Depuis le 03 mars 2014, huit versions de ce logiciel ont été installées, sans compter le nombre de *patches* d'amélioration qui ont été installés entre deux versions subséquentes.

3.4.2 Planning de déroulement du stage

Depuis le 03 mars 2014, date de mon premier jour de stage, j'ai exécuté les tâches décrites dans le tableau ci-dessous :

Tâches effectuées	Mars 2014				Avril 2014				Mai 2014				Juin 2014				Juillet 2014				Août 2014			
Numéro de la semaine	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Étude de documents et schémas du banc ESR KC-390																								

3.4.4 Tests d'acceptation du logiciel

Tests d'acceptation du logiciel, aussi appelés *Acceptance Test Procedures (ATPs)*, ont été réalisés afin de formaliser les modifications réalisées entre une version de l'autre de ce logiciel. Les tests d'acceptation ont été créés par Labinal Power Systems en collaboration directe avec le fournisseur Clemessy.

Les ATPs consistent à réaliser un ensemble de procédures dans le but de tracer le périmètre des fonctionnalités du système HighPMAAC ainsi que de valider certaines spécifications imposées par Labinal Power Systems. Les ATPs ont été déroulés au long de mon stage. Le fait de participer à ces tests d'acceptation m'a aidé à comprendre le système HighPMAAC et à identifier ces dysfonctionnements.

3.4.5 La fiche d'incidents FSIE

Afin d'organiser l'ensemble de dysfonctionnements relevés du concernant le système HighPMAAC, une fiche d'incidents a été créée sur l'Excel présentant la description du problème. Pour chaque incident, je devais renseigner son numéro, sa date d'identification, le sous-système HighPMAAC concerné, la version logicielle pour les problèmes d'origine software, la criticité du problème, ainsi qu'une description précisant dans quelle situation avait eu lieu tel défaut.

Pour les incidents qui avaient besoin d'une description plus détaillée, j'ai écrit des rapports afin d'expliquer le problème plus clairement. Ces rapports ainsi que la version à jour de cette liste d'incidents étaient envoyés tous les vendredis à Clemessy. Ainsi, Clemessy était en mesure de réaliser les modifications et améliorations demandées selon les besoins de l'équipe du banc ESR KC-390.

3.4.6 Logiciel d'analyse des essais : DIAdem

DIAdem est un logiciel National Instruments utilisé pour visualiser, analyser et présenter des données générées à partir de systèmes physiques ou de systèmes conçus via logiciel. Il répond aux exigences des environnements de test d'aujourd'hui, en permettant l'accès rapide à un grand volume de données écrites en multiples formats, tels que .tdms, .tdm, .txt et .csv.

DIAdem permet d'améliorer l'efficacité et l'évolutivité de la gestion des données grâce à des caractéristiques qui dépassent les limitations de Microsoft Excel dans la plupart des applications de post-traitement des données. La **Figure 25** ci-dessous montre l'onglet Analysis de ce logiciel.

Le logiciel DIAdem a été sélectionné face à d'autres logiciels surtout grâce à sa capacité de lecture d'un énorme volume de données. DIAdem dispose d'une capacité de 65 536 labels qui peuvent être analysés simultanément. Le nombre des données stockées dans chacun de ses labels peut aller jusqu'à 2 147 483 648. Pour cette raison, l'équipe ESR a choisi d'exploiter toutes les 7000 labels acquises simultanément du banc ESR KC-390 avec un outil super puissant, tel qu'il est DIAdem.

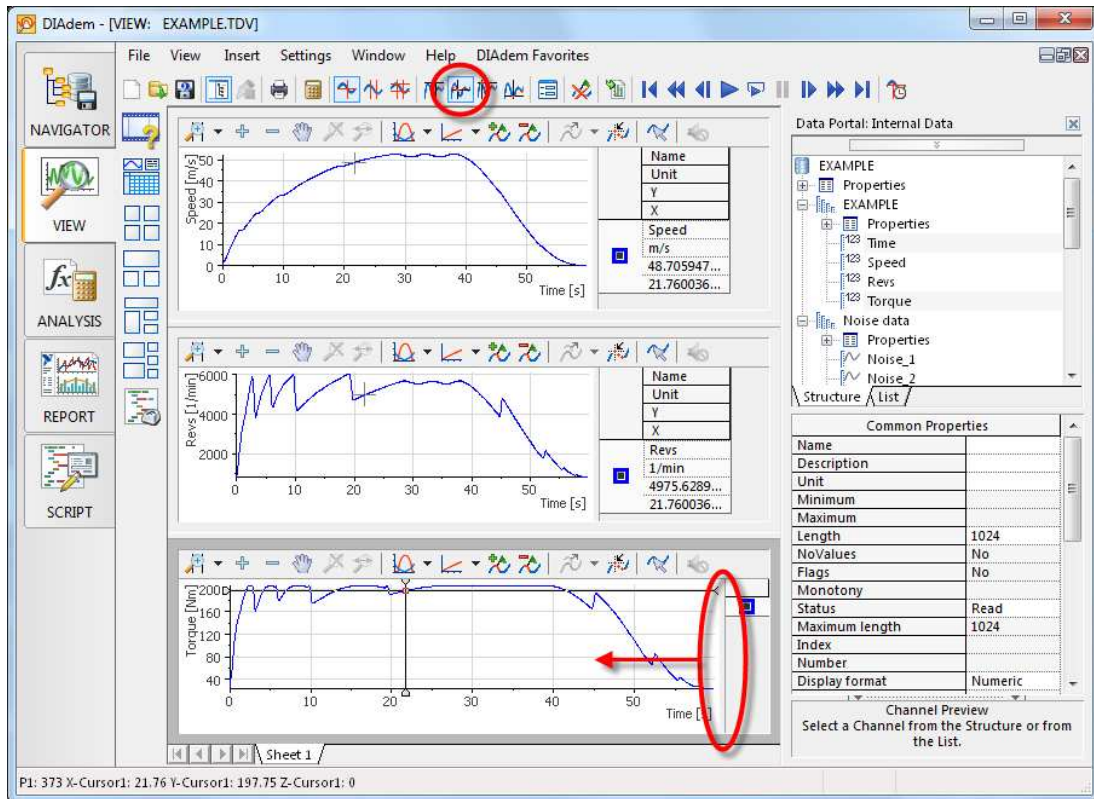


Figure 25. Présentation du logiciel DIAdem

3.4.7 Rapatriement et extraction des données

Durant un essai, les données provenant des capteurs positionnés dans tous les équipements du banc ESR KC-390 sont sauvegardées en format binaire et en temps réel sur toutes les six cibles real-time, dit aussi cibles RT. Pour chacune des ces cibles RT, les données sont stockées dans des dossiers portant un nom de 20 caractères codés en double. Ce nom correspond à la date et l'heure de réalisation de l'essai. Dans chacun de ces dossiers, il existe des sous-dossiers nommées s0000, s0060, s0120, s0180, etc. Les chiffres 0000, 0060, 0180 indiquent qu'un nombre maximal de 60 données binaires sont enregistrées dans chaque sous-dossier.

Pendant la réalisation d'un essai, une donnée est enregistrée dans toutes les cibles RT toutes les 30 seconds. La première donnée binaire enregistrée est nommée comme m.0000, la deuxième comme m.0001, la troisième comme m.0002, la n-ième comme m.000(n-1). Ainsi, nous pouvons conclure que chaque dossier dit sxxxx a une capacité maximale d'enregistrer 30 minutes de l'évolution des alias qui sont enregistrés dans une cible RT spécifique. La **Figure 26** ci-dessous illustre un exemple de processus d'enregistrement de ces données binaires sur la cible RT 1 pour le cas de l'essai « SOF IDG Power Transfer with APU GEN ».

Une fois que l'essai a terminé, il est nécessaire de réaliser le rapatriement de ces données depuis les cibles RT aux PCs de dépouillement. LPS utilisait l'outil Fillezilla pour réaliser ce type de téléchargement de données. En revanche, une fois que les données ont été rapatriées aux PCs de dépouillement, il fallait encore réaliser plusieurs adaptations pour qu'elles soient correctement lues par le logiciel HighPMAAC. À titre d'exemple, les adaptations réalisées pour les données stockées sur la cible 1 pour l'essai « SOF IDG Power Transfer with APU GEN » sont décrites ci-dessous :

1. Déplacer tous les fichiers binaires m.XXXX qui se trouvent dans le dossier r4749658742136589521 vers un dossier dont le nom correspond à l'adresse IP de la cibles RT 1.

2. Renommer tous les fichiers binaires avec le nom du dossier r4749658742136589521 sans prendre en compte le premier caractère, soit 4749658742136589521.
3. Répéter les pas 1 et 2 pour toutes les autres cibles RT.

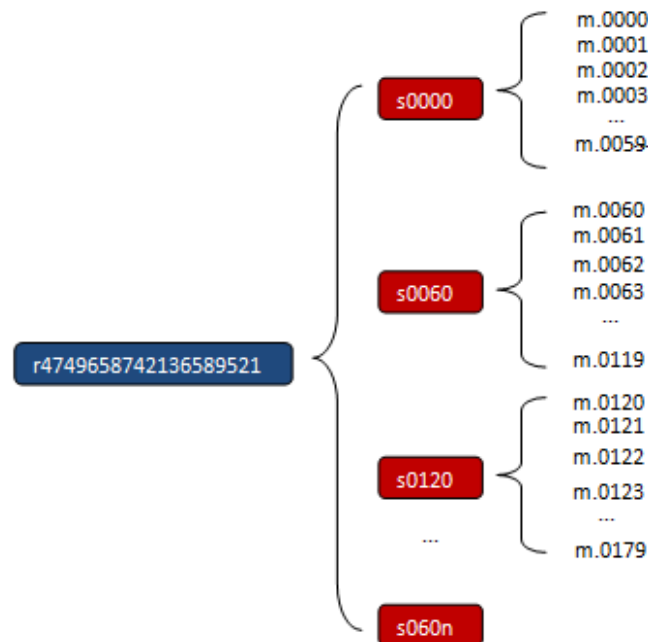


Figure 26. Arborescence d'enregistrement de données sur les cibles RT

Lorsque ces adaptations sont terminées, il reste encore réaliser deux autres adaptations pour être en mesure de commencer l'exploitation des données avec HighPMAAC. Ces deux autres adaptations sont également décrites ci-dessous :

1. Copier les fichiers de prévisualisation des données depuis l'ordinateur CCC au dossier *Recordings* du PC de dépouillement dans lequel les données binaires sont maintenant enregistrées.
2. Copier le fichier .exec depuis l'ordinateur CCC au dossier YMMDD_HHMMSS (Year-Year-Month-Month-Day-Day_Hour-Hour-Minute-Minute-Second-Second) du PC de dépouillement.

La **Figure 27** ci-dessous illustre na nouvelle arborescence dans laquelle les données binaires seront stockées en regard de l'essai « SOF IDG Power Transfer with APU GEN ».

Néanmoins, l'utilisation de l'outil Filezilla demande beaucoup de travail manuel et répétitif si l'on considère les adaptations dont on a besoin de réaliser pour commencer l'exploitation des données. Ainsi, j'ai développé un outil qui réalise non seulement le rapatriement des données depuis les cibles RT, mais également toutes les adaptations nécessaires pour que les données soient lues par HighPMAAC. De plus, cet outil est capable d'extraire toutes les données de plusieurs essais en simultanéité, ce qui ni FileZilla ni HighPMAAC arrivent à le faire. Lors de l'exécution de cet outil, les deux fenêtres illustrées dans les **Figures 28** et **29** sont affichées.

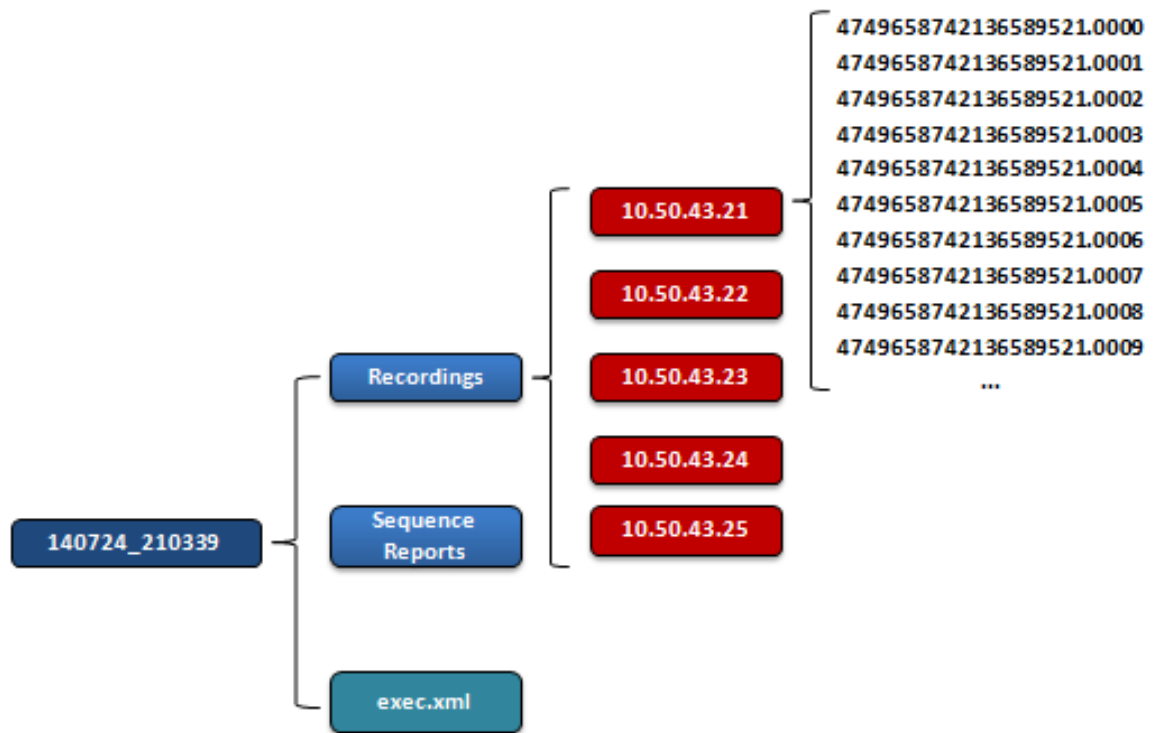


Figure 27. Arborescence d'enregistrement de données sur les PCs de dépouillement

La première fenêtre demande l'insertion de la date de réalisation de l'essai dans le format YMMDD_HHMMSS. La seconde, à son tour, demande l'insertion du chemin du dossier dans lequel les données seront enregistrées. Ensuite, en appuyant sur la touche « Ok », le rapatriement des données commencera.

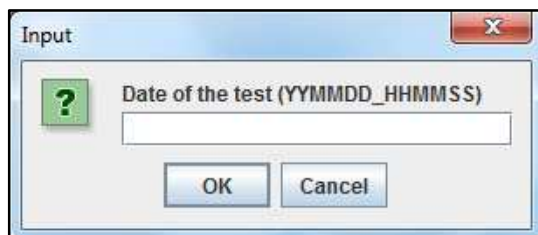


Figure 29. Premier fenêtre de l'outil Automatic Extratic Tool

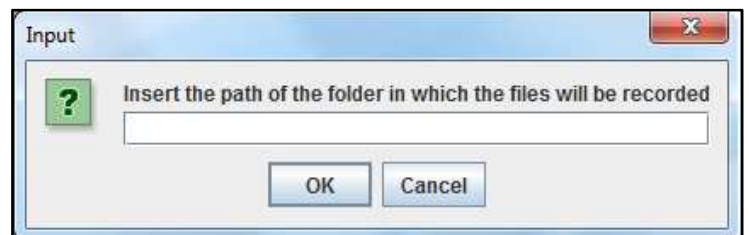


Figure 28. Seconde fenêtre de l'outil Automatic Extratic Tool

La **Figure 30** représente le processus conduisant à l'analyse des données d'essais réalisés dans le banc ESR KC-390. D'abord, les données sont téléchargées depuis les cibles RT et envoyées vers les PCs de dépouillement afin d'être analysées à posteriori. En raison du grand volume de données téléchargées, les fichiers binaires sont souvent stockés sur des disques durs externes. A titre d'exemple, un essai de 45 minutes produit un volume d'environ 150 Gb de données. En réalisant trois essais, nous remplissons le disque dur interne du PC de dépouillement. Pour cette raison, nous avons choisi de les enregistrer sur des disques durs externes.

Ensuite, ces toutes les données binaires doivent être rassemblées afin de créer un fichier .a2c, qui sera ouvert à par la suite sur le logiciel DIAdem. Une fois ouvertes par DIAdem, nous pouvons enregistrer toutes ces données dans le format .tdms. Ce format d'enregistrement de données a été choisi grâce à son énorme praticité de stockage et de chargement sur plate-formes autres que DIAdem.

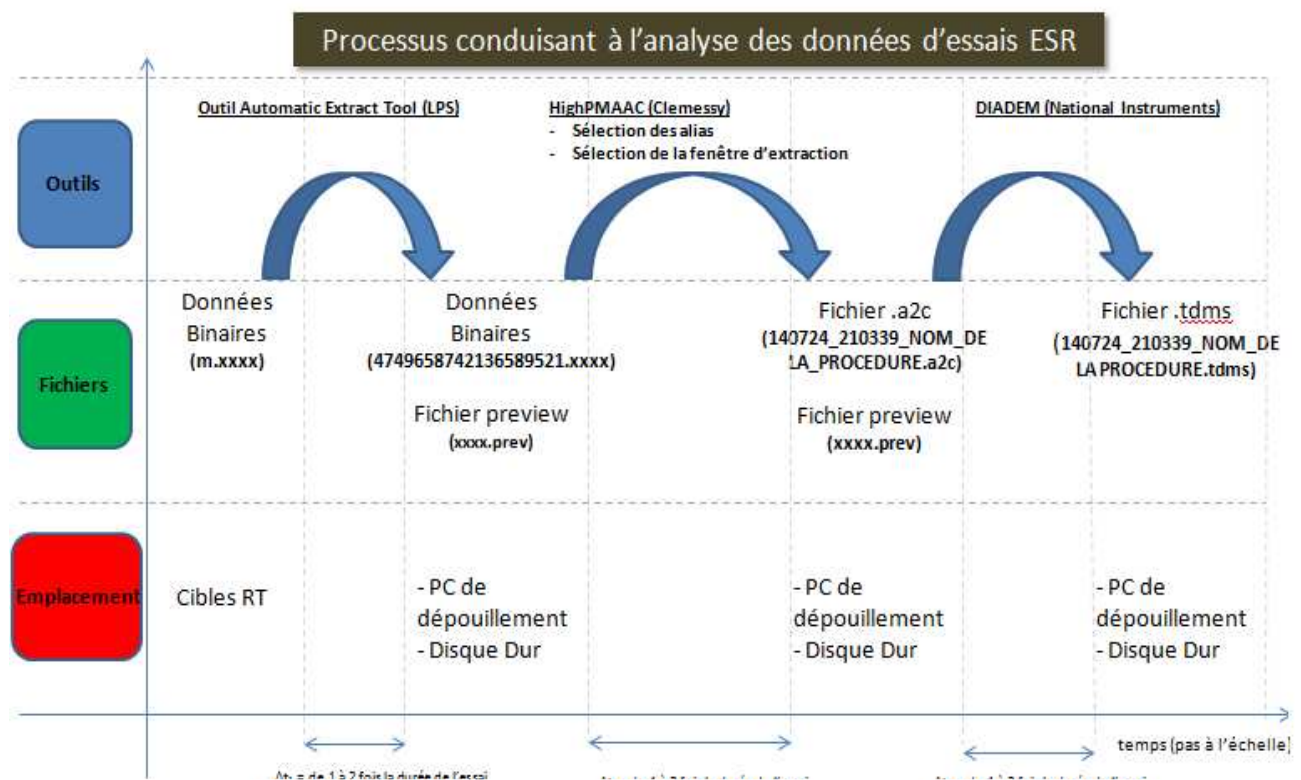


Figure 30. Processus conduisant à l'analyse des données d'essais ESR KC-390

La durée de chacune de ces étapes de conversion varie d'une à deux fois la durée de l'essai.

3.4.8 Analyse des résultats des essais

Durant mon stage je me suis chargé également de l'analyse des essais qui nous avons réalisé avec le support du logiciel DIADEM. Ainsi, pour chaque essai, je récupérais les données les plus importantes, telles que tension, courant, puissance, facteur de puissance, fréquence, états des contacteurs, et ensuite je les analysais. Pour ce faire, je rédigeais un rapport sur lequel je mettais en évidence tout ce qui s'est passé pendant le test. Les rapports des essais ont été écrits en anglais pour pouvoir envoyer aux ingénieurs responsables d'EMBRAER après la validation des analyses par les ingénieurs de Safran.

Afin d'exécuter cette mission, il me fallait une connaissance approfondie du fonctionnement des machines électriques. Cette compétence je l'avais déjà acquise au Brésil lors de mes cours de systèmes de puissance à l'Université de Brasília. Néanmoins, quand je ne comprenais pas un ou plusieurs aspects à propos de l'essai, je venais vers les ingénieurs plus expérimentés à la recherche d'explications plus claires.

En plus, je soutenais l'équipe dans l'avancement des essais en mettant en place chacun des tests. J'ai participé également de tous les essais en assistant l'équipe pour le bon déroulement du point de vue des résultats attendus. J'ai participé aussi des réunions quotidiennes entre les membres de l'équipe Labinal Power System, son client EMBRAER et leurs fournisseurs, tels que Clemessy. Lors de ces réunions, nous discutons les essais qui ont été réalisés le jour, les résultats obtenus, les prochaines tâches à réaliser par chacun des membres de l'équipe du banc ESR KC-390 ainsi que les possibles solutions aux problèmes rencontrés. Ces actions m'ont permis de comprendre mieux le

fonctionnement du système électrique de l'avion ainsi que comment fonctionnent les relations entre clients et fournisseurs.

Concernant la méthode d'analyse des essais, le principe consistait à comparer les résultats obtenus aux exigences pour la qualité de l'énergie électrique définies par les autorités de certification (normes MIL-STD-704F - Aircraft Electrical Power Characteristics et DO-160F - Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment) et aussi aux exigences d'EMBRAER définies dans un document spécifique de l'avion.

Les rapports qui ont été envoyés vers le client avaient une partie « Test Setup » dans laquelle je présentais la configuration de l'essai. Ensuite, il y avait une partie « Test Overview », où je présentais toutes les données discrètes et analogiques enregistrées lors des essais. Après, il y avait une partie « Analysis », dans laquelle j'analysais ces données et je mettais en évidence les comportements inattendus. Pour certains cas, je parvenais à expliquer ces comportements. Pour d'autres, je proposais des hypothèses qui pourraient les expliquer. Ainsi, les équipes de systèmes et de conception pouvaient lire les rapports et étudier en profondeur ces comportements. Finalement, il y avait un topique « Conclusion » pour synthétiser l'analyse.

Analyse des résultats des essais avec les générateurs IDG

Comme il est possible de le vérifier sur le **Tableau 4** (Planning du projet de fin d'études), les essais avec les générateurs principaux ont duré trois semaines avec deux semaines en plus de Troubleshooting. J'ai contribué à la mise en place des essais et j'ai soutenu l'équipe dans le paramétrage des procédures (surtout en ce qui concerne le paramétrage du plan d'archivage des données qui seront extraites après un essai).

Lors des deux premières semaines, nous n'avons pas eu de courant d'excitation sur le stator du « Exciter » et donc il n'y a pas eu de tension à la sortie du générateur. Par conséquent, toute l'équipe du banc ESR KC-390 a été mobilisée pour investiguer et solutionner le problème.

Il y a eu plusieurs échanges entre l'équipe du banc et les représentants d'EMBRAER pour comprendre ce problème. Après quelques jours d'investigation, EMBRAER a décidé d'envoyer un ingénieur de l'entreprise qui a fourni les générateurs pour aider à solutionner le problème. L'ingénieur a donc décidé de réaliser certains essais d'investigation. Dans ce contexte, j'ai assisté à tous les essais, j'ai participé aux réunions où les résultats étaient discutés et j'ai apporté mes idées. En outre, après chaque essai d'investigation, je récupérais les données, je présentais les résultats à l'équipe et je rédigeais des rapports avec les analyses. Ces analyses ont aidé l'équipe pour identifier la cause du problème.

Pour exemplifier les analyses des essais d'investigation, les **Tableaux 5 et 6** montrent comment un signal envoyé par le GCU (Generator Control Unit) du générateur par le bus ARINC 429 a été interprété. Il s'agit du signal Data11_29. Les bits de ce signal donnent des informations sur certains paramètres du générateur. Les signaux discrets (bits 11 à 29) sont envoyés dans une trame ARINC et on les enregistre sous forme d'un entier.

Il faut d'abord effectuer la conversion du signal entier de décimale en binaire et ensuite interpréter chaque bit. Le bit 12 indique une erreur sur le générateur. Dans les spécifications du générateur, il est montré les possibles raisons pour lesquelles ce bit est à 1 (surtension, sous-tension, sous-fréquence, court-circuit, **protection différentiel**, etc.). Ensuite, d'autres signaux ont été interprétés de manière similaire afin d'identifier plus spécifiquement l'erreur.

Data11_30 decimal	2 ¹⁹	2 ¹⁸	2 ¹⁷	2 ¹⁶	2 ¹⁵	2 ¹⁴	2 ¹³	2 ¹²	2 ¹¹	2 ¹⁰	2 ⁹	2 ⁸	2 ⁷	2 ⁶	2 ⁵	2 ⁴	2 ³	2 ²	2 ¹	2 ⁰	2 ² = 4
Data_1130 binary	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0100
Bit number	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	

Tableau 5. Représentation des bits du signal Data11_30 envoyé par la GCU

Nb	Bit value	Meaning of the bit	Bit = 0		Bit = 1	
11	0	TRU1 Ripple	TRU1 ripple OK		TRU1 overripple	
12	0	TRU1 Overvoltage	TRU1 no overvoltage		TRU1 overvoltage	
13	1	TRU1 Undervoltage	TRU1 no undervoltage		TRU1 undervoltage	
14	0	TRU2 Ripple	TRU2 ripple OK		TRU2 overripple	
15	0	TRU2 Overvoltage	TRU2 no overvoltage		TRU2 overvoltage	
16	0	TRU2 Undervoltage	TRU2 no undervoltage		TRU2 undervoltage	
17	0	TRUE2 Ripple	TRUE2 ripple OK		TRUE2 overripple	
18	1	TRUE2 Overvoltage	TRUE2 no overvoltage		TRUE2 overvoltage	
19	1	TRUE2 Undervoltage	TRUE2 no undervoltage		TRUE2 undervoltage	
20	0	Spare Bit 20 10Hz	N/A		N/A	
21	0	Spare Bit 20 10Hz	N/A		N/A	
22	0	Spare Bit 20 10Hz	N/A		N/A	
23	0	Spare Bit 20 10Hz	N/A		N/A	
24	0	Spare Bit 20 10Hz	N/A		N/A	
25	0	Spare Bit 20 10Hz	N/A		N/A	
26	0	Spare Bit 20 10Hz	N/A		N/A	
27	0	Spare Bit 20 10Hz	N/A		N/A	
28	0	Spare Bit 20 10Hz	N/A		N/A	
29	0	Spare Bit 20 10Hz	N/A		N/A	
			Bit = 00		Bit = 11	
			Bit = 01		Bit = 10	
30	00	SSM	Normal operation	No computed data	Functional test	Failure warning

Tableau 6. Signification de chaque bit du signal Data11_30

Après les deux semaines d'investigation et de *troubleshooting*, nous avons résolu le problème sur les deux générateurs principaux. Il s'agissait tout simplement d'un faux contact entre une des boîtes de distribution électrique et les GCUs. Le connecteur male qui arrivait de la boîte n'était pas adaptable au connecteur femelle des GCUs. Nous avons fait plusieurs tests de continuité, cependant aucun test ne concernait cette connexion. Nous avons pensé qu'il n'y avait pas de problème à ce niveau, vu que les GCUS avaient déjà été testés. Sans cette connexion, les GCUs ne recevaient pas les signaux « Power Ready » émis par les IDGs et n'envoyaient donc pas de courant d'excitation pour le stator du « Exciter » des générateurs.

Une fois ce problème résolu, nous avons performé les essais de pré-intégration que nous avions prévu de faire au début de cette phase. Un des essais réalisés concerne le test de l'IDG2 chargé en 90kVA. Les charges ont été distribués entre les barres 1 AC, barre 4 AC, barre 1 DC, barre 2 DC, barre 3 DC et barre 4 DC, comme l' illustre la **Figure 31** ci-dessous.

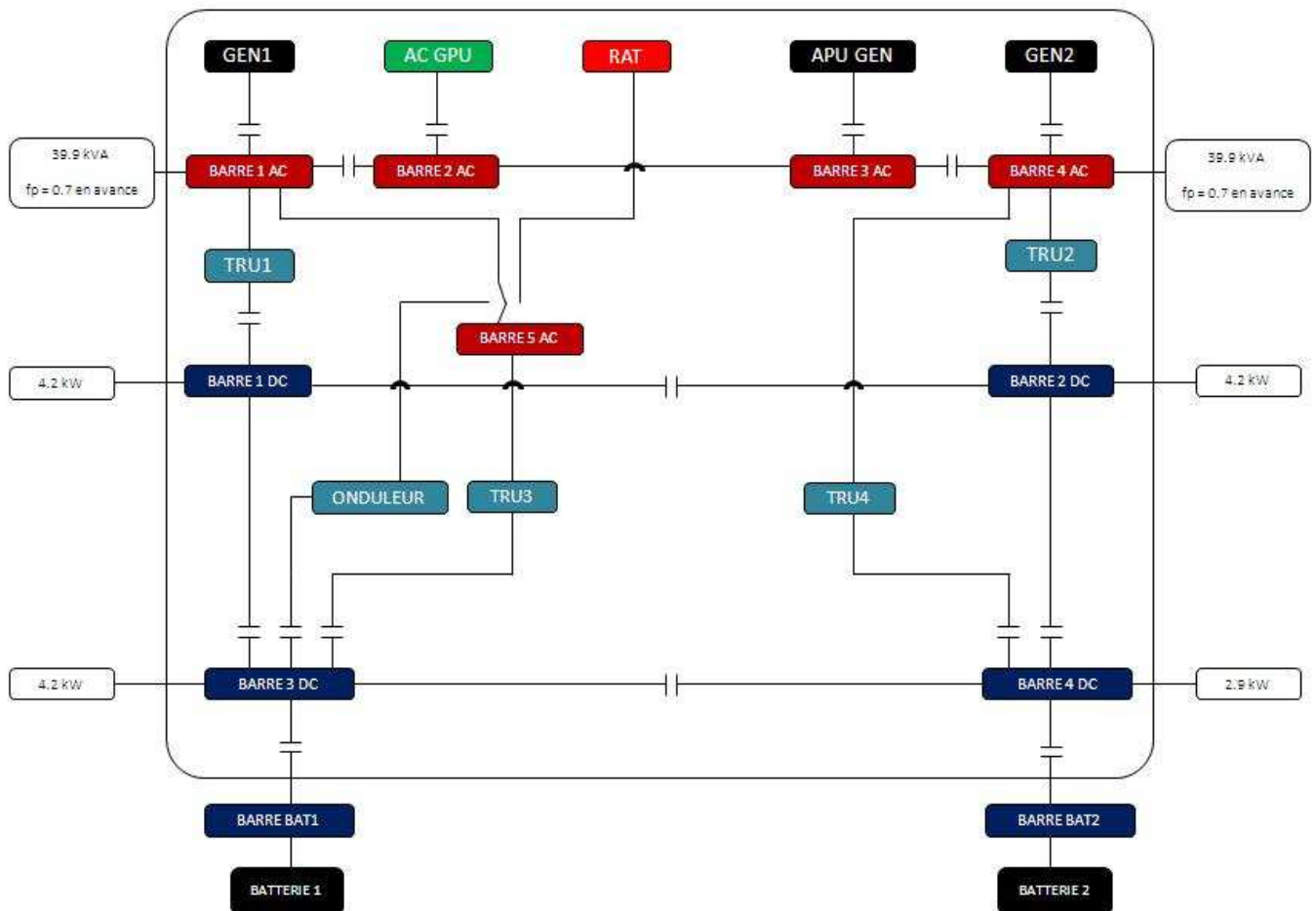


Figure 31.. Configuration de l'essai IDG2 full charge

Comme il a été expliqué dans la section « banc des charges », les charges du système électrique sont distribués en armoires. Ces armoires peuvent contenir tant des charges DC que des charges AC. Dans le cadre du test IDG2 chargé à 90kVA, nous représentons ci-dessous les la fréquence de rotation du générateur IDG2, l'état de du contacteur ACTC1 ainsi que les courbes de tension, courant, puissance, facteur de puissance et fréquence de la phase A d'une des charges triphasées connectées sur la Barre 1 AC. Nous avons observé un comportement similaire dans le contexte des paramètres analysées pour les phases B et C de cette même charge.

Quand la fréquence de rotation de l'IDG2 atteint 4820 rpm, la tension à sa sortie est égale à 115 VAC/400Hz (paramètres nominaux pour l'alimentation du système électrique). Ainsi, la GCU envoie une commande dit « power ready » en ordonnant la fermeture du contacteur GLC2, vu que l'IDG2 est prêt à alimenter en puissance le système. Ensuite, les contacteurs ACTC2 et ACTC1 se ferment l'un après l'autre afin que la puissance provenant de l'IDG2 puisse alimenter les charges installées sur la barre 1 AC et barre 4 AC en simultanéité.

Comme l'illustre la **Figure 32** ci-dessous, nous n'avons pas ordonné le chargement du système tout de suite à la fermeture du contacteur ACTC1. Il y a eu un écart entre les deux moments. Nous pouvons vérifier également que lorsque nous avons chargé le système, la tension sur la charge AC a baissé légèrement. De même, nous pouvons noter une élévation de la tension lorsque nous déchargeons le système. Ces deux phénomènes peuvent être observés en regardant les flèches verticales sur la Figure 32 affichée ci-dessous.

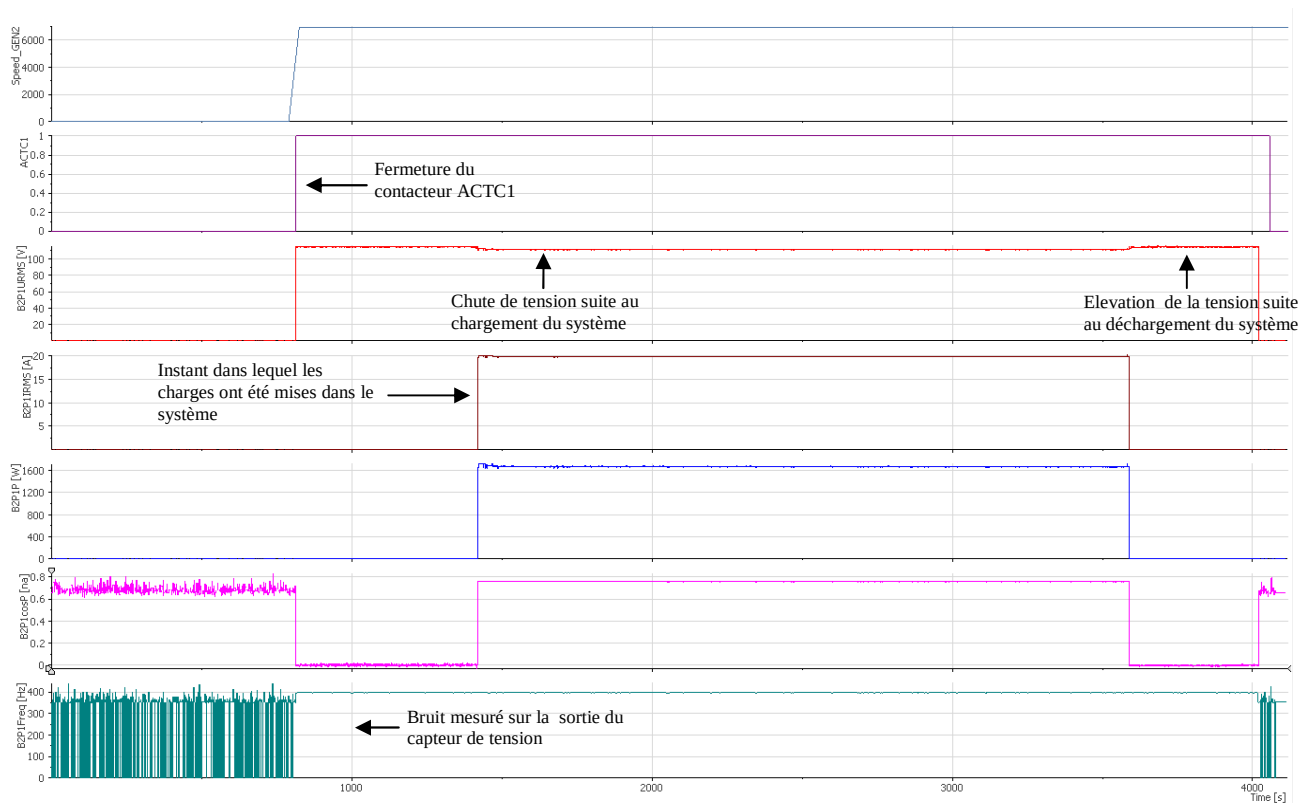


Figure 32. Fréquence de rotation de l'IDG2 ainsi que les paramètres électriques d'une charge connecté sur la Barre 1 AC

La courbe correspondante à la mesure de la fréquence de la tension de la sinusoïde oscille entre 0 et 400 Hz avant la fermeture du contacteur ACTC1. Cela est dû au fait que les capteurs sont réglés pour lire les signaux dont la gamme de fréquence varie entre 350 et 400 Hz. En supposant que le bruit sur les capteurs de tension est un bruit blanc, l'amplitude de son spectre est différente de zéro pour toutes les fréquences. Ainsi, la société responsable de l'installation des équipements dans le banc d'essai a proposé d'installer un filtre juste après le capteur pour que nous n'aurions plus ce problème de bruit sur les mesures des paramètres du banc.

La **Figure 33** ci-dessous montre l'état de charge de l'IDG2 ainsi que les courbes de tension et courant de trois charges DC installées en parallèle sur la Barre 1 DC. Le niveau de charge de l'IDG2 varie entre 128 (0% de charge) et 228 (100% de charge). Quand cet essai a été réalisé, nous avions un offset de 128 sur la valeur de charge sur l'IDG2. Cet offset a été corrigé par le fournisseur Clemessy.

La **Figure 34** ci-dessous montre le courant des charges DC installées sur la barre 3 DC, la tension et le courant mesurés sur la sortie de la batterie ainsi que l'état du contacteur TRU1C au fil du temps. Nous pouvons vérifier que lorsque le contacteur TRU1Cs'est ouvert, nous avons un appel de courant de 100 A sur la batterie 1. En effet, pendant le régime transitoire, la batterie 1 était responsable d'alimenter les charges installées sur les barres 1 DC et barre 3 DC.

Quelques millisecondes après, le contacteur DCTC s'est fermé et le contacteru EC1 s'est ouvert en séquence. Dans cette nouvelle configuration, la batterie 1 n'alimentait que les charges connectées sur la Barre DC. A ce moment-là, la puissance provenant du TRU2 était responsable d'alimenter les charges connectées sur la barre DC BUS 1.

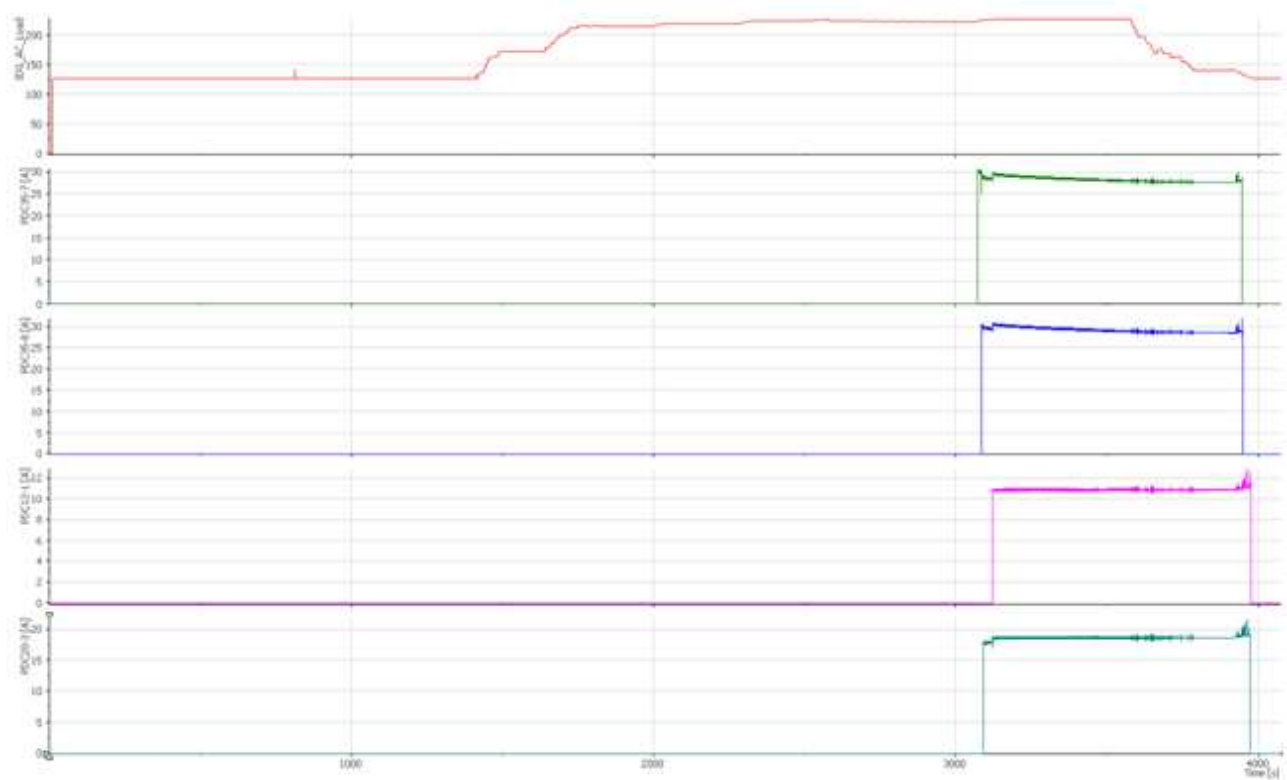


Figure 33. État de charge de l'IDG2 ainsi que les courbes de tension et courant de trois charges DC installées sur la barre 1 DC

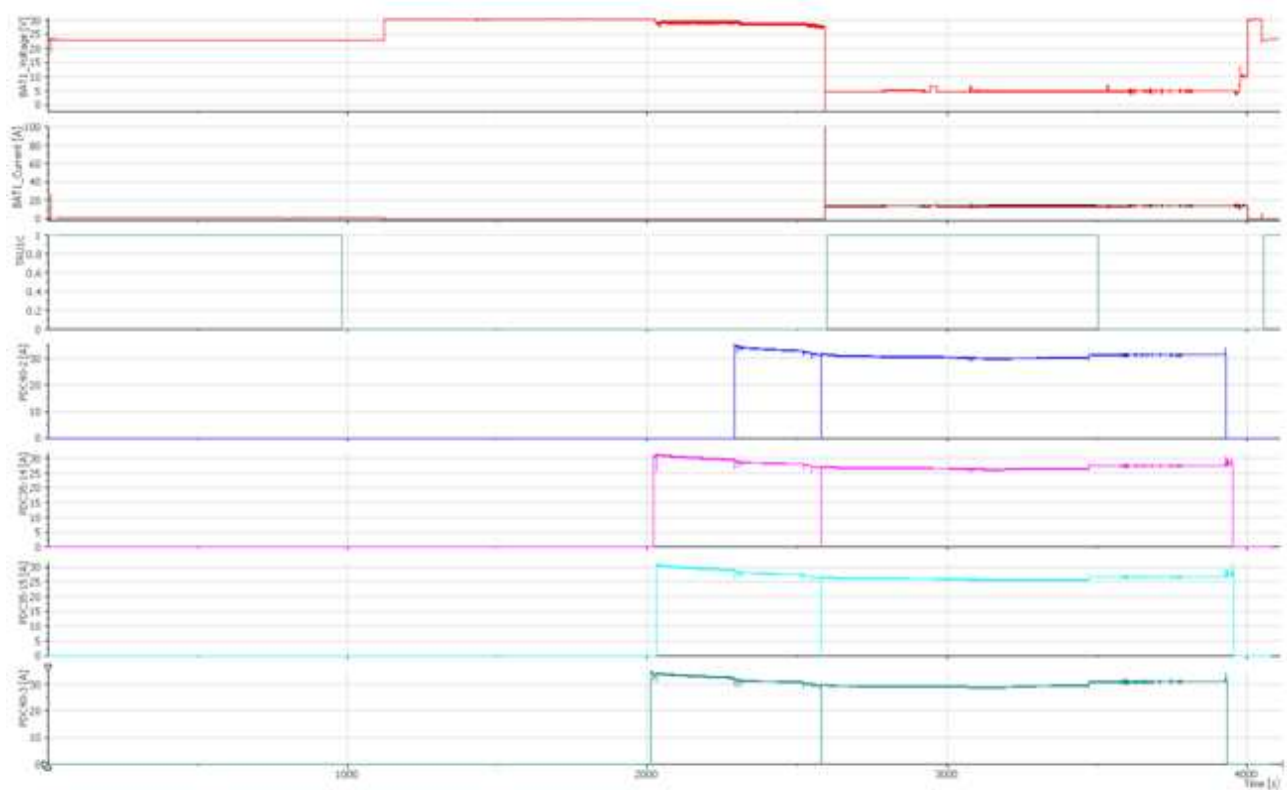


Figure 34.. Représentation des charges DC installées sur la barre 3 DC, la tension et le courant mesurés sur la sortie de la batterie ainsi que le contacteur TRU1C

Suite aux analyses à propos de la tension, courant et puissance fournies par l'IDG2 aux charges installées sur les barres AC et DC, il a été également requis le calcul du rendement de l'IDG2. Le rendement d'une machine tel que l'IDG2 peut être calculé comme le rapport entre la puissance électrique active à sa sortie et la puissance mécanique mesurée à son entrée, comme l'illustre la **Figure 35**.

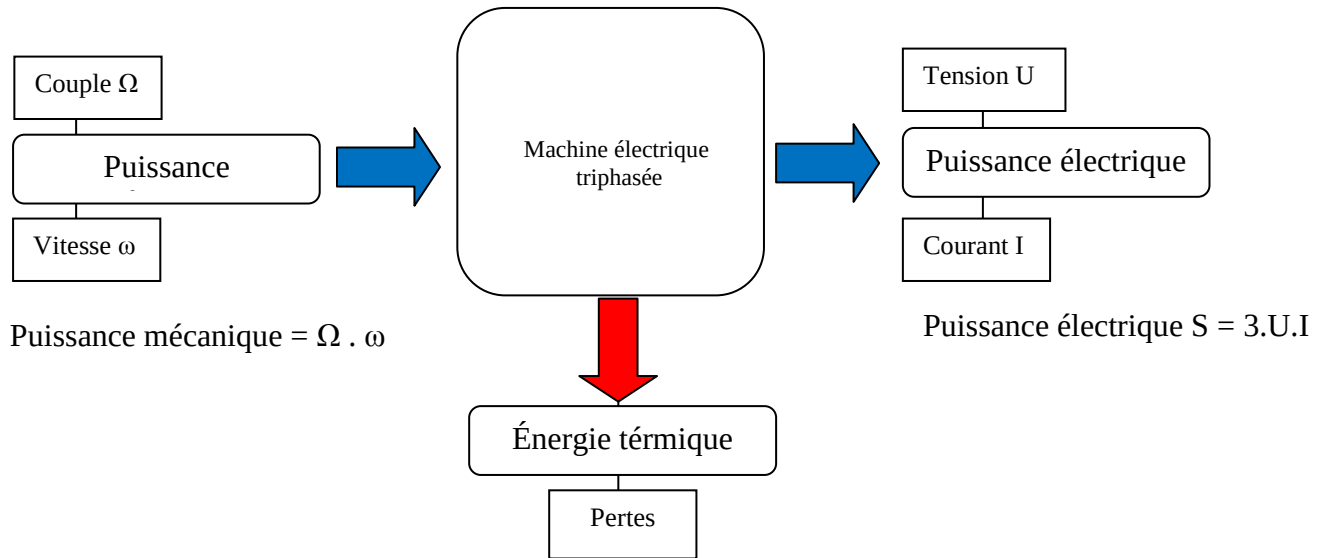


Figure 35. Représentation d'une machine électrique triphasée

Le rendement de l'IDG2 peut être calculé comme suit :

$$\eta = \frac{Pe}{Pm} = \frac{\text{puissance électrique}}{\text{puissance mécanique}}$$

La puissance électrique qui doit être prise en compte pour réaliser ce calcul correspond à la puissance active fournie aux charges AC et DC. Ainsi, la puissance active doit être égale à $Pe = \text{facteur de puissance} \cdot \text{puissance apparente} = 0.7 \cdot 90000 = 63 \text{ kW}$. D'autre part, la puissance mécanique fournie sur l'entrée du moteur triphasé peut être calculée comme suit :

$$Pm = \Omega \cdot \omega = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot (\text{rot}) \cdot T$$

D'où Ω est le couple du moteur, qui est égal à 160 N.m, « rot » correspond à la fréquence de rotation de l'IDG2 mesurée en rpm, qui à son tour est égal à 7000 rpm. La puissance mécanique est calculée comme suit :

$$Pm = T \cdot \omega = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot 7000 \cdot 160 = 117,23 \text{ kW}$$

En conséquence, le rendement de l'IDG2 est égal à :

$$\eta = \frac{Pe}{Pm} = \frac{63 \text{ kW}}{117.23 \text{ kW}} = 0.537$$

Analyse des résultats des essais avec le générateur RAT

Plusieurs essais ont été réalisés avec le générateur RAT, tels que l'essai à vide, l'essai avec charge AC et DC (20 kVA), l'essai de survitesse et l'essai de surcharge (30 kW pendant 5 minutes et 40 kW pendant 5 secondes). Pour certains essais, le générateur RAT a présenté des comportements soit inattendus, soit attendus mais qui ne correspondent pas aux besoins d'EMBRAER. En effet, le générateur RAT avait été déjà testé par l'équipe qui l'a développé et donc ils connaissaient déjà son comportement.

Par exemple, afin d'illustrer les problèmes liés à l'acquisition et le traitement des données, la **Figure 36** montre la tension, le facteur de puissance et la fréquence d'une des phases du générateur RAT pendant l'essai en charge 20 kVA. Les bruits et discontinuités ont été corrigés par Clemessy ultérieurement.

Afin d'illustrer la méthode d'analyse basée sur la comparaison des résultats d'essais par rapport aux exigences définies par les autorités de certification, la **Figure 37** montre la tension sur les trois phases du générateur RAT pendant un régime transitoire lors de l'essai de surcharge. La MIL-STD-704F définit les limites permises pour le régime transitoire pour chaque phase du 115 VAC - 400 Hz. Les courbes de tension devaient respecter l'enveloppe en rouge.

Tous les enveloppes concernant les limites des régimes transitoires et permanents définies dans la MIL-STD-704F pour le 115 VAC/400 Hz et 28 VDC ont été tracées sur DIADEM et utilisées pour les analyses des essais.

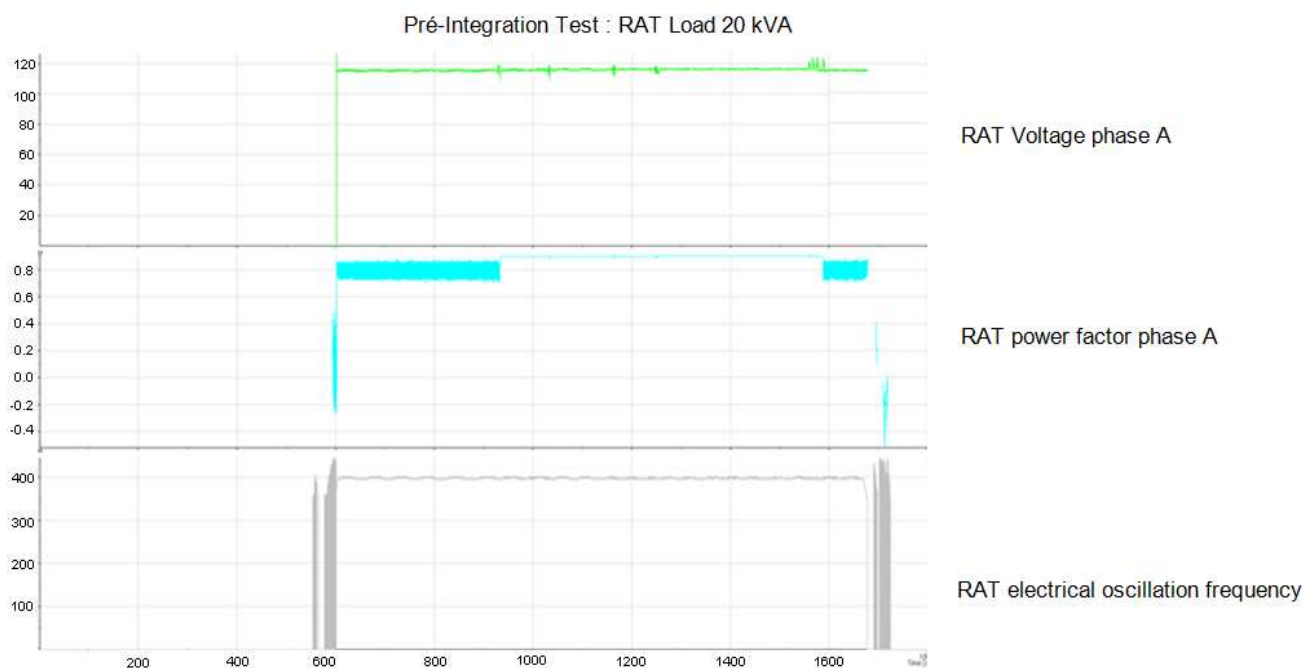


Figure 36. Tension, facteur de puissance et fréquence de d'oscillation de la phase A mesurés sur la sortie de la RAT

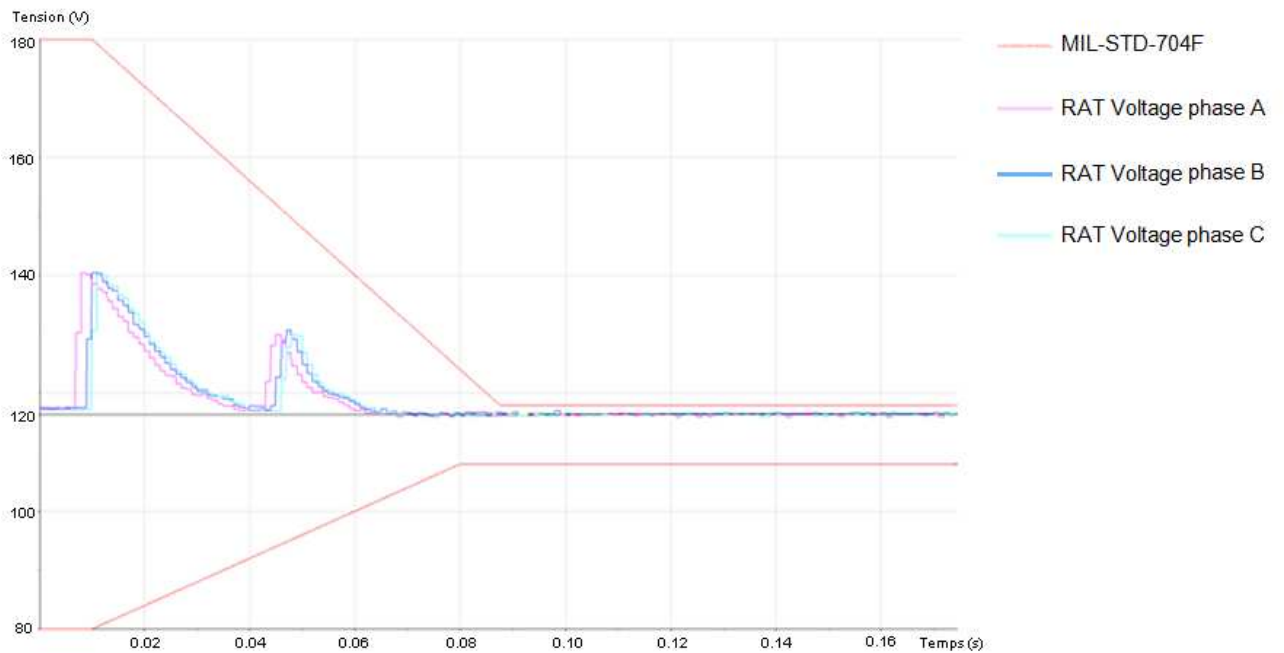


Figure 37. Envelopes concernant les limites en tension des régimes transitoires et permanents définies dans la spécification MIL-STD-704F

3.4.9 Procédure pour le rapatriement, l'extraction et la sauvegarde des données

Après la réalisation de chaque essai, le rapatriement des données binaires et l'extraction dans un format accepté par DIADEM devra être réalisé sur les ordinateurs de dépouillement dans la salle de commande. D'abord, on extrait les données binaires depuis les cibles RT à l'aide de l'outil Automatic Extraction Tool. Pour un essai d'une durée égale à 45 minutes, nous avons 100 Gb de données binaires à rapatrier depuis les cibles RTs aux PCs de dépouillement. Une fois que ces données binaires sont enregistrées sur les PCs de dépouillement, nous initialisons leur conversion dans un format .a2c. Nous réalisons cette étape afin que ces données soient lisibles par le logiciel DIADEM. Lorsque nous avons ces données disponibles sur DIADEM, nous réalisons leur enregistrement dans le format .tdms. Ce format a été choisi depuis le début du projet pour stocker les données des essais.

4 BILAN DE LA MISE EN SITUATION D'INGÉNIEUR

Cette section présente le bilan du stage développé chez Safran Labinal Power Systems ainsi que les perspectives pour l'avenir de l'ingénieur.

4.1 POINT DE VUE TECHNIQUE

Ce stage m'a fait découvrir le domaine de l'aéronautique et plus spécifiquement le système électrique des avions. J'ai pu connaître la fonction et le fonctionnement des différents équipements qui intègrent les systèmes de génération et de distribution électrique d'un avion. J'ai ainsi été en contact avec les normes internationales d'aéronautique, ce qui m'a permis d'apprendre comment s'opère la certification du système électrique d'un avion.

Ce stage m'a également permis de participer à la validation et à l'utilisation d'un système de contrôle-commande avec le logiciel HighPMAAC. En ce qui concerne la validation, j'ai appris sur la gestion des dysfonctionnements relevés et sur la relation avec le fournisseur du système. Concernant l'utilisation du système, j'ai appris comment manipuler le logiciel DIADEM, outil pratique et efficace pour l'analyse des données de mesure.

Finalement, en participant à l'organisation du banc ESR-KC390, à la mise en place des essais et aux analyses des résultats d'essais, j'ai pu apprendre sur la bonne gestion d'un banc d'essais et son fonctionnement.

4.2 POINT DE VUE GESTION DE PROJET

J'ai participé à un projet important pour le groupe Safran, lequel a un calendrier très resserré. Cela m'a imposé d'être très polyvalent dans mes compétences. Comme il a été décrit dans ce rapport, j'ai réalisé des tâches qui ont un rapport avec plusieurs domaines de l'ingénierie électrique et électronique. Le développement de l'outil de rapatriement de données sur une plate-forme Java et l'analyse des essais qui demandent une connaissance profonde à propos du fonctionnement des machines électriques sont des exemples de tâches totalement antagoniques dans la large gamme d'actuation d'un ingénieur électronicien et électrique.

Un autre point important de mon stage a été bien évidemment l'apprentissage de la relation entre client et fournisseur. D'un côté, il y avait le client EMBRAER, lequel supervisait le travail du fournisseur Labinal Power System, afin de garantir ses besoins et ses exigences en concordance avec le planning établi. D'autre part, il y avait le fournisseur Clemessy, qui devait développer le système HighPMAAC selon les besoins et les exigences du client Labinal Power System. Cela m'a permis d'apprendre comment la communication entre client et fournisseur se passe et quels sont les éléments nécessaires pour le bon déroulement des projets.

4.3 POINT DE VUE PROFESSIONNEL

Travailler avec chaque personne du banc ESR KC-390 a été une expérience très enrichissante. J'ai apprécié le fait de pouvoir discuter avec chaque membre de l'équipe et écouter leur parcours leurs points de vue sur différents sujets. J'ai appris que l'échange entre les personnes est primordial pour l'avancement des projets de l'entreprise et aussi pour le bien-être des employés.

En plus, le contexte de stage fortement internationalisé (chez une entreprise française, avec des partenaires industriels français et étrangers et un client brésilien) a été très important pour ma formation. Effectuer un stage à l'étranger m'a fait gagner en autonomie et en maturité et ainsi m'a ouvert l'esprit et m'a permis de développer ma capacité d'adaptation. J'ai pu voir une réalité différente de celle de mon pays : culture, habitudes, modes de travail différents. Cela constitue un enrichissement personnel et professionnel certain.

4.4 DIFFICULTÉS RENCONTRÉES

Pour réaliser mes analyses, il fallait bien comprendre les essais, l'objectif de chaque procédure de test et ainsi le fonctionnement de chaque équipement et du système électrique complet intégré. Compte tenu de la durée de ce stage, j'ai dû me familiariser rapidement avec chacun de ces points. Pour ce faire, je n'ai jamais hésité à poser des questions aux membres de l'équipe. À titre d'exemple, l'équipe du banc ESR KC-390 me fournissait des feedbacks sur mes rapports, en m'indiquant ce qu'il fallait améliorer et en me guidant afin d'obtenir une analyse pertinente. Ainsi, surtout au début de mon stage, pour chaque rapport j'écrivais plusieurs versions afin de prendre en compte les commentaires de l'équipe. En outre, quand je n'étais pas sûr de la cause d'un comportement inattendu, je proposais des hypothèses qui pouvaient les expliquer, au lieu de donner des explications incorrectes.

4.5 PERSPECTIVES

Cette expérience dans le domaine de l'aéronautique m'a permis de découvrir que ce secteur est très attrayant. Je souhaiterais donc poursuivre dans ce domaine. En rentrant au Brésil, je participerai au processus de recrutement d'EMBRAER. Compte tenu de mon expérience avec un projet d'EMBRAER et de mon parcours international dans une société équipementier aéronautique qui travaille en partenariat avec EMBRAER, j'espère que cela se passera bien.

4 CONCLUSION

À la fin de ce stage, les objectifs de mon projet de fin d'étude ont été atteints. En effet, l'étape de Pré-Intégration a fini et nous avons validé le système HighPMAAC dans une version fonctionnel et déjà bien performante. Les tests nous ont également permis de valider le système électrique du banc ESR KC-390 et de réaliser une première vérification du système électrique de l'avion. Cela sera très important lors de l'étape SOF et les étapes suivantes, car elle a notamment permis aux membres de l'équipe du banc de corriger les dysfonctionnements liées à l'acquisition et le traitement de données et aussi de rectifier les erreurs de câblage, d'installation, etc.

J'ai pu contribuer au bon déroulement des essais pendant la Pré-Intégration avec mes analyses, ma participation à la mise en place des tests, mon soutien dans les paramétrages des procédures et mon assistance durant les essais. J'ai pu également apporter mon concours au bon déroulement du projet (de manière plus globale) en apportant mes idées et mes avis lors des réunions avec le client et les fournisseurs. Autrement dit, j'ai découvert le métier d'un ingénieur d'essais dans une entreprise et son importance. Cela a été sans doute une expérience très positive et enrichissante pour ma formation professionnelle.

J'ai également découvert au cours de ce stage le milieu de l'aéronautique, un milieu très intéressant qui m'attire énormément. J'ai acquis de nombreuses connaissances dans ce domaine. J'y ai appris comment fonctionne un secteur industriel de pointe où les enjeux stratégiques et politiques internationaux sont le quotidien. J'ai apprécié prendre part à un grand projet et contribuer au développement d'un avion militaire brésilien. Je souhaite poursuivre ma carrière sur des projets d'envergure. L'aéronautique est un des secteurs permettant cela.

Pendant toute la durée de mon stage, j'ai été particulièrement intéressé par le fonctionnement des différents équipements qui intègrent les systèmes de génération et de distribution électrique d'un avion. Cela a renforcé mon envie de continuer dans ces domaines de connaissance.

4 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Aircraft Systems: Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration, Third Edition ; Ian Moir and Allan Seabridge, John Wiley & Sons, 504 pages, 2008.

[2] Aircraft Electrical and Electronic Systems: Principles, Maintenance and Operation; Mike Tooley and David Wyatt, Butterworth–Heinemann, 408 pages, 2009.

[3] Aviation Electricity and Electronics – Power Generation and Distribution; Naval Education and Training, Nonresident Training Course, 2002.

* Les autres références sont des documents de la propriété des sociétés Safran Labinal Power Systems et Embraer. Ainsi, elles ne peuvent pas être décrites dans ce rapport.