



RAPPORT FINAL PUBLIC DE FIN DE PROJET 2023

FAITS SAILLANTS



5 ANS
DE DÉVELOPPEMENT



4
SOUS-PROJETS



4
OBJECTIFS
FONDAMENTAUX

L'INNOVATION TECHNOLOGIQUE, L'ENVIRONNEMENT,
LA MOBILISATION DE L'INDUSTRIE ET LES RETOMBÉES
ÉCONOMIQUES POUR LE QUÉBEC



4
PARTENAIRES



5
COLLABORATEURS



6
UNIVERSITÉS
MOBILISÉES



6
CENTRES DE RECHERCHE
MOBILISÉS



13
PME MOBILISÉES



52,2 M\$
D'ENVERGURE



29,1 M\$
DE FONDS PRIVÉS



23,1 M\$
DE FONDS PUBLICS

TABLE DES MATIÈRES

MOT DU PRÉSIDENT.....	04
MOT DE LA DIRECTRICE.....	05
MISE EN CONTEXTE ET MODALITÉS DU PROJET.....	06
GOVERNANCE.....	07
CONSEIL D'ADMINISTRATION.....	08
COMITÉ D'AUDIT.....	10
BILAN DES PROJETS MOBILISATEURS DONNÉS.....	11
PROPULSION POUR DES OPÉRATIONS URBAINES SÉCURITAIRES, SILENCIEUSES, ÉCOLOGIQUES ET EFFICACES (POUSSÉE).....	12
AILE INTELLIGENTE ET LÉGÈRE POUR L'ENVIRONNEMENT (AILE).....	18
AVIONIQUE MODULAIRE INTÉGRÉE POUR ÉCONAVIGATION (ÉCONAV-3).....	24
MODULES PHOTONIQUES COMPACTS HAUTE FIABILITÉ POUR SYSTÈMES DE NAVIGATION ET DE COMMUNICATION AÉROPORTÉS (AÉROP HI-FI).....	28
BILAN ENVIRONNEMENTAL.....	33
EN CONCLUSION.....	36



MOT DU PRÉSIDENT

L'industrie aéronautique québécoise est reconnue pour sa capacité d'innovation. Afin d'appuyer le secteur aérospatial québécois dans ses efforts pour s'adapter aux nouvelles réglementations environnementales, le gouvernement du Québec a mis en place le projet mobilisateur Systèmes aéronautiques d'avant-garde pour l'environnement (SA²GE). La première phase de ce projet mobilisateur s'est échelonnée de 2010 à 2015 et a regroupé six sous-projets. Quant à la deuxième phase, une des mesures de la Stratégie québécoise de l'aérospatiale 2016-2026, celle-ci a rassemblé, de 2016 à 2020, cinq sous-projets de démonstration technologique.

En raison de la dynamique dégagée par ces deux projets et du besoin d'un effort continu, le gouvernement du Québec a procédé à un nouvel appel de projets au printemps 2018. La troisième phase du projet mobilisateur SA²GE a permis de regrouper l'expertise de quatre partenaires et de leurs cinq collaborateurs, avec l'appui de PME, de centres publics de recherche et d'universités du Québec afin de développer quatre technologies porteuses. Elles visent toutes, à travers l'innovation et la mobilisation, une réduction significative de l'empreinte écologique de l'industrie aéronautique.

De nombreux objectifs ont été atteints dans le cadre de SA²GE-3, et ce, malgré les embûches qui se sont dressées en cours de projet : pandémie, rareté de main-d'œuvre et difficultés d'approvisionnement. Le bilan des prochaines pages détaille la nature de ces innovations technologiques. Ainsi, Bell Textron a conçu un nouveau système de propulsion pouvant être électrifié pour les opérations urbaines. Bombardier a développé une aile intelligente pour avions d'affaires et CMC Électronique a travaillé sur une évolution de son avionique modulaire intégrée pour faciliter l'éconavigation. Quant à TeraXion, l'entreprise a développé des modules photoniques de haute fiabilité pour systèmes de communications et de navigation aéroportés.

Les partenaires impliqués dans SA²GE ont toujours été conscients du rôle qu'ils doivent jouer pour permettre une transition plus verte dans les transports aériens. Les technologies développées dans le cadre de SA²GE-3 permettront de diminuer les émissions de CO₂ de 532 KtCO₂-eq, soit l'équivalent de 28 929 vols évités.

Je souhaite remercier le conseil d'administration du Regroupement pour le développement de l'avion plus écologique de m'avoir fait confiance en me nommant président il y a maintenant cinq ans. C'est un honneur de présider le conseil d'administration d'un organisme aussi dynamique. Soutenue par l'équipe d'IODS, la collaboration entre le gouvernement du Québec et les partenaires a rendu possible l'atteinte de résultats impressionnants en matière d'innovation.

Le travail n'est toutefois pas terminé et l'industrie a encore de nombreuses idées innovantes pour réduire son impact sur l'environnement. Merci encore à tous les partenaires et à leurs collaborateurs, ainsi qu'au gouvernement du Québec de faire progresser l'innovation en aéronautique permettant ainsi au Québec de maintenir son avantage concurrentiel dans un marché aéronautique mondial en pleine mutation. Le développement de technologies propres contribue à la transformation de notre économie vers une économie plus verte, plus durable et plus sobre en carbone. Cette résilience profitera à tous et toutes!

GHISLAIN LAFRANCE

Président du conseil d'administration

**REGROUPEMENT POUR LE DÉVELOPPEMENT DE L'AVION
PLUS ÉCOLOGIQUE**

Président et chef de la direction, TeraXion



MOT DE LA DIRECTRICE

Tout comme les phases qui l'ont précédé, la troisième phase du projet Systèmes Aéronautiques d'Avant-Garde pour l'Environnement (SA²GE-3) constitue un succès. Le projet regroupait quatre sous-projets et a pris fin le 31 mars dernier. Ce rapport dresse un bilan des avancées technologiques, de la mobilisation et des gains environnementaux des sous-projets des partenaires de la phase 3.

Bell Textron, Bombardier, CMC Électronique et Teraxion ont pu compter sur la précieuse participation de 5 collaborateurs, 6 universités, 6 centres de recherche et 13 PME québécoises. L'apport et le soutien de tous et toutes se sont avérés essentiels à la réussite de SA²GE-3.

Souignons l'esprit de détermination dont les partenaires ont fait preuve tout au long du projet. Avec les contrecoups de la pandémie, les ralentissements sur la chaîne d'approvisionnement et une rareté de main-d'œuvre, de nombreux défis se sont dressés sur leur chemin. En ces temps de grands changements, un tel investissement en recherche et développement reflète mieux que jamais la volonté de l'industrie de miser sur l'innovation pour assurer son avenir.

En investissant dans l'innovation et le développement durable, le gouvernement du Québec contribue à la réduction de l'empreinte environnementale de l'industrie aéronautique et au positionnement stratégique du secteur aéronautique québécois à l'échelle mondiale. Appuyer la troisième phase de SA²GE a certes aussi permis de relancer le secteur en sortie de pandémie.

Je profite enfin de cette tribune pour féliciter tous nos partenaires pour leur dévouement aux projets et à l'atteinte des gains environnementaux. Les innovations développées ont des implications importantes pour notre industrie et assurent un rayonnement de notre secteur auprès d'une relève motivée à poursuivre sa transition verte.

DOMINIQUE SAUVÉ

Directrice

**REGROUPEMENT POUR LE DÉVELOPPEMENT
DE L'AVION PLUS ÉCOLOGIQUE**

MODALITÉS DU PROJET

FONDEMENT

Communément nommé SA²GE pour Systèmes aéronautiques d'avant-garde pour l'environnement, le projet vise à développer de manière collaborative des technologies innovantes plus respectueuses de l'environnement.

La troisième phase du projet mobilisateur de l'avion plus écologique a été mise en place à l'automne 2018 en réponse à la volonté du gouvernement du Québec de maintenir la position concurrentielle du Québec en aéronautique et de maintenir les efforts de réduction de gaz à effet de serre.

À la suite d'un appel à projet mené par le ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie, les partenaires industriels sélectionnés pour réaliser ce projet sont Bell Textron Canada Limitée, Bombardier inc., CMC Électronique inc. et TeraXion inc.

CARACTÉRISTIQUES D'UN PROJET MOBILISATEUR

Par l'entremise des projets mobilisateurs, le gouvernement du Québec appuie financièrement des entreprises privées afin qu'elles combinent leurs efforts pour mener à bien des projets de développement d'un produit, d'un procédé ou d'un service novateur en mobilisant des universités, des centres publics de recherche ainsi que des PME.

FINANCEMENT

Le budget du projet s'élève à plus de 52 millions de dollars en dépenses réalisées. De ce montant, 29 millions de dollars provient de l'investissement des quatre partenaires industriels et 23 millions de l'aide financière du gouvernement du Québec. Les investissements privés et publics favorisent la reprise économique postpandémique du secteur aéronautique québécois.

LES COLLABORATEURS

Comme leur nom l'indique, les collaborateurs travaillent en étroite collaboration avec les partenaires industriels, puisqu'ils participent au développement technologique et au financement d'une partie du projet. Ils négocient également la gestion de propriété intellectuelle qu'ils développent dans le cadre du projet. Les collaborateurs se distinguent des entreprises dans la mesure où bien qu'ils travaillent sous la direction d'un partenaire industriel, ils investissent directement dans le projet et bénéficient ainsi de subventions. Par conséquent, ils sont tenus de rendre des comptes au même titre que les partenaires industriels.



Plusieurs partenaires industriels ont identifié des collaborateurs établis au Québec.

GOUVERNANCE

GOUVERNANCE

Le projet mobilisateur est administré par un organisme à but non lucratif, le Regroupement pour le développement de l'avion plus écologique, responsable de la reddition des comptes et de l'évolution des travaux en vertu de la convention de subvention, ainsi que d'autres ententes régissant le projet. L'organisme est gouverné par un conseil d'administration élu aux deux ans et siégeant plusieurs fois par année.

Le conseil d'administration est composé d'une majorité de partenaires industriels, ainsi que d'autres organisations telles que Aéro Montréal, la grappe aérospatiale du Québec, le Consortium de recherche et d'innovation en aérospatiale du Québec (CRIAQ) et Air Canada qui représente la clientèle.

52,2 M\$
EN DÉPENSES
RÉALISÉES

23,1 M\$

L'aide annoncée du gouvernement s'élève à 23,1 millions de dollars sur cinq ans.

29,1 M\$

Les quatre partenaires industriels ont investi collectivement plus de 29,1 millions de dollars.

CONSEIL D'ADMINISTRATION



Ghislain Lafrance
PRÉSIDENT DU CONSEIL
D'ADMINISTRATION ET
MEMBRE DU COMITÉ EXÉCUTIF
*Président TeraXion et vice-président
exécutif indie Semiconductor*



Michel Dion
VICE-PRÉSIDENT, MEMBRE DU COMITÉ
EXÉCUTIF ET DU COMITÉ D'AUDIT
*Directeur principal, Innovation,
Bell Textron Canada*



Patrick Champagne
TRÉSORIER, MEMBRE DU COMITÉ
EXÉCUTIF ET PRÉSIDENT DU
COMITÉ D'AUDIT
*Conseiller stratégique, CMC
Électronique*



Karen Magharian
SECRÉTAIRE ET MEMBRE
DU COMITÉ EXÉCUTIF
*Directrice, Affaires juridiques & Contrats,
Thales Canada*



Fassi Kafyeye
PRÉSIDENT SORTANT ET MEMBRE
DU COMITÉ EXÉCUTIF
*Conseiller principal recherche, innovation et
collaborations, Bombardier Aviation*



Houssam Alaouie
MEMBRE DU COMITÉ D'AUDIT
*Directeur principal, Programmes de recherche
et développement et Relations avec les
institutions d'enseignement supérieur, CAE*



Mélanie Lussier
ADMINISTRATRICE
*Présidente – directrice générale,
Aéro Montréal*



Geneviève Laverdure
ADMINISTRATRICE
*Chef Satisfaction Clients et
Développement des affaires, Services
à la Clientèle Airbus A220*



Gilles Néron
ADMINISTRATEUR
*Directeur général, Approvisionnement
stratégique et Biens immobiliers,
Air Canada*



Alain Aubertin
ADMINISTRATEUR
Président – directeur général, CRIAQ



Sylvain Larochelle
ADMINISTRATEUR
*Directeur, Bureau de la collaboration
technologique, Pratt & Whitney Canada*



Arnaud Thioulouse
ADMINISTRATEUR
*Directeur général, Les dirigeables
Flying Whales Québec inc.*



Mouhad Meshreki
OBSERVATEUR
*Directeur général, Centre de
recherches en aérospatiale, CNRC*



Wendy Bailey
OBSERVATRICE
*Chef, Protection de l'environnement
et des normes, Aviation civile,
Transports Canada*



Philippe Sabat
OBSERVATEUR¹
*Conseiller en développement industriel
Direction des transports et de la logistique
Ministère de l'Économie, de l'Innovation et de
l'Énergie*



Dominique Sauvé
OBSERVATRICE
*Directrice, Regroupement pour
le développement de l'avion plus
écologique*

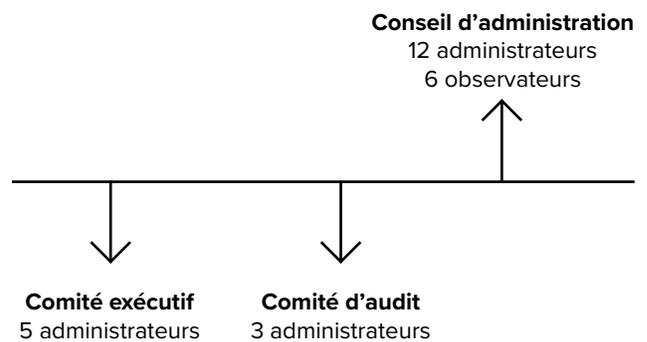
¹ Au moment de la rédaction du rapport

COMITÉ D'AUDIT

Le comité d'audit aide le conseil d'administration à remplir ses fonctions de surveillance à l'égard de la présentation de l'information financière, des vérifications par un auditeur externe, ainsi que de la gestion des risques et des contrôles internes de l'organisme.

Dans la dernière année, 3 rencontres ont eu lieu. Le comité a procédé à l'examen des états financiers vérifiés en août 2022. À cette occasion, les trois membres ont rencontré l'auditeur du Regroupement pour le développement de l'avion plus écologique qui leur a présenté le résultat de sa vérification 2021-2022.

Sous l'autorité du conseil d'administration, le comité exécutif exerce les pouvoirs et remplit les fonctions et devoirs que le conseil d'administration lui délègue.



Québec



BILAN DES SOUS-PROJETS

FORMANT SA²GE-3



Propulsion pour des opérations urbaines sécuritaires, silencieuses, écologiques et efficaces (POUSSÉE)

BOMBARDIER

Aile intelligente et légère pour l'environnement (AILE)



Avionique modulaire intégrée pour éconavigation (ecoNav-3)

TeraXion

Modules photoniques compacts haute fiabilité pour systèmes de navigation et de communication aéroportés (AéroP Hi-Fi)



PROPULSION POUR DES OPÉRATIONS URBAINES SÉCURITAIRES, SILENCIEUSES, ÉCOLOGIQUES ET EFFICACES (POUSSÉE)

Le sous-projet POUSSÉE vise le développement de technologies qui permettront la conception de nouveaux systèmes de propulsion pouvant être électrifiés, pour les appareils à décollage vertical.

« La phase 3 du projet SA²GE a donné l'opportunité à Bell Textron de faire des avancées majeures dans ses efforts d'électrification d'appareils à décollage vertical, mais aussi dans ses efforts de rendre ses appareils plus respectueux de l'environnement en général. »

Les technologies sont étudiées sous trois aspects, soient l'efficacité énergétique, la réduction du poids et la réduction du bruit externe généré. L'objectif est de démontrer les bénéfices potentiels de ces technologies selon ces trois aspects à l'aide notamment de tests. Ensuite, les technologies les plus concluantes sont intégrées dans un prototype de système de propulsion pour la validation aux différents apprentissages faits durant le sous-projet.

Le sous-projet POUSSÉE représente les premiers efforts directs de Bell Textron vers une réduction de l'empreinte carbone des véhicules à décollage vertical à l'aide de sources d'énergie alternatives. Enfin, un système de propulsion hybride électrique pour un drone à grande capacité (charge utile de 300 livres) a été réalisé pour démontrer l'intégration possible des diverses technologies à un niveau TRL 5.

FAITS SAILLANTS

L'ensemble du sous-projet POUSSÉE a été fort en démonstrations et prouesses technologiques. Quelques faits saillants importants ont été retenus.

Tout d'abord, l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes de propulsions par l'introduction de carénage autour des pales des rotors a été montrée à l'échelle 1/4 pour des cas de décollage vertical ou vols sans vitesse axiale passant par l'axe du rotor. Ces améliorations énergétiques sont importantes pour l'électrification partielle ou complète d'appareils à décollage vertical, spécialement pour des véhicules de type taxi aérien avec de courtes et moyennes missions. Les connaissances permettant cette éventuelle électrification ont d'ailleurs été fortement approfondies dans le cadre de ce sous-projet à l'aide de plusieurs démonstrateurs et d'analyses poussées.

Par ailleurs, la mise en place d'un banc d'essai acoustique permanent a permis de mieux caractériser et comprendre les différents mécanismes de bruits générés par des pales, carénées ou non. Des modèles de prédiction du bruit ont d'ailleurs pu être développés et validés.

De plus, une combinaison de techniques de fabrication, d'analyse et de matériaux avancés a démontré une capacité de réduction du poids importante pour les composantes d'un système de propulsion. Ces technologies ont d'ailleurs la possibilité d'être appliquées pour un aéronef complet et ainsi contribuer à la réduction de l'énergie requise pour accomplir une mission avec un appareil à décollage vertical.

Enfin, un système de propulsion hybride électrique pour un drone à grande capacité (charge utile de 300 livres) a été réalisé pour démontrer l'intégration possible des diverses technologies à un niveau TRL 5.

GAINS TECHNOLOGIQUES CLÉS — AVANCÉES MAJEURES

Les activités de recherche et de développement effectuées dans le cadre du sous-projet POUSSÉE de SA²GE ont permis à Bell Textron et à ses partenaires d'accroître leurs connaissances et de développer des technologies importantes pour l'amélioration de la performance des systèmes de propulsion, la réduction du bruit externe généré par ceux-ci ainsi que la réduction de la masse globale des composants d'un appareil.

Les travaux menés sur la performance aérodynamique des soufflantes carénées ont permis d'améliorer, entre autres, leur tolérance au décrochage. De plus, il a été possible de comprendre l'impact des paramètres géométriques principaux des soufflantes carénées et d'ainsi développer un outil de conception pour celles-ci prenant en compte le profil de mission désiré. L'outil a permis de mettre en lumière l'avantage des soufflantes carénées pour des missions de courtes et de moyennes distances sans phase de vol horizontal. Les soufflantes sont cependant non désirables dans le cas d'une mission à vol axial prolongé où le plan des hélices serait perpendiculaire à la direction de vol étant donné la traînée de la soufflante combinée à des phénomènes aérodynamiques qui rendent nul son apport de poussée.

L'ensemble des efforts portant sur l'évaluation des technologies d'électrification a permis d'établir un plan de maturation technologique pour l'électrification des futurs aéronefs à décollage vertical que ce soit pour optimiser l'efficacité énergétique, le bruit et le poids.

En outre, des technologies et des méthodes d'analyses ont été développées résultant en un important potentiel de réduction de la masse des composantes et du bruit. Des méthodes de fabrication ainsi qu'un raffinement des méthodes d'analyse ont démontré une réduction potentielle de plus de 50 % de la masse par rapport à une fabrication courante et un potentiel de réduction du bruit de 80 %.

MOBILISATION

MOBILISATION DES PME

Les activités menées dans le cadre du sous-projet POUSSÉE ont aussi permis de parfaire le savoir-faire québécois dans les domaines de la fabrication de matériaux composites, la réduction de bruit ainsi que la performance de systèmes de propulsion. Les avancées technologiques réalisées ont effectivement permis à des PME québécoises comme Exonetik, Optis Engineering et Ruiz Aerospace d'approfondir leur expertise à un niveau encore plus élevé. De plus, les ententes de partenariat avec les PME leur permettent d'utiliser pleinement la propriété intellectuelle générée dans des domaines hors du champ de compétence de Bell Textron et ainsi raffiner leur offre de service et leurs compétences dans le but de renforcer et faire croître leur entreprise.

MOBILISATION DES CENTRES DE RECHERCHE ET UNIVERSITÉS

Les exercices réalisés dans le cadre du sous-projet ont également permis de faire avancer la science dans plusieurs domaines.

COUP DE CHAPEAU!



Plus de 15 articles scientifiques ont été rédigés par nos collaborateurs d'institutions postsecondaires soient Polytechnique Montréal, l'Université de Sherbrooke, McGill ainsi que l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) et le groupe CTT. Les travaux ont ainsi permis de former un nombre important d'étudiants aux cycles supérieurs qui sont ainsi devenus du personnel hautement qualifié pour l'industrie aérospatiale.

Les différents projets ont de plus permis de renforcer et de créer des liens entre l'industrie et les centres de recherche et les universités mobilisées desquels découleront encore plus de collaborations futures.

INSTITUTION DE RECHERCHE

Université de Sherbrooke

Étude des moteurs à haute vitesse tangentielle

Polytechnique Montréal

Revêtement de protection contre la foudre

Université McGill — Optimisation topologique multidisciplinaire

Université Laval — Étude des moteurs à haute vitesse tangentielle

Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)

Solutions de dégivrage et d'antigivrage

Centre Multiservices pour l'industrie textile du Cégep Saint-Hyacinthe (GCTT) — Tressage de préforme sèche en fibre de carbone

Centre de Développement des Composites du Québec du Cégep Saint-Jérôme (CDCQ) — Moulage de pièces en composite par vessie

COALIA (anciennement Centre de Technologie Minérale et de Plasturgie du Cégep de Thetford-Mines — CTMP)

Matériaux haute performance par impression 3D & injection de plastique haute performance.

Université de Sherbrooke (GAUS)

Réduction du bruit d'hélice carénée

PME

Optis Engineering + Mecanum

Réduction du bruit d'hélice carénée

A7 Integration

Fabrication de maquettes pour test en soufflerie

Centre de Technologies Avancées (CTA)

Optimisation du groupe électrique pour un système de propulsion

Optimoule Inc — Fabrication de moules pour injection de plastique haute performance

Ruiz Aerospace — Fabrication de pièces composites tressées par injection de résine

Maya HTT — Développement et caractérisation du procédé d'injection de plastique haute performance

Exonetik — Développement d'un système d'embrayage à fluide magnétorhéologique

TRL : DU DÉBUT À LA FIN

Étant donné la portée du sous-projet POUSSÉE et la variété des activités qui ont été conduites, l'avancement des niveaux de TRL est dépendant d'activités précises. Certains projets plus fondamentaux avec, entre autres, les universités ont permis de faire croître des technologies du niveau 2 vers le niveau 4. Également, des éléments plus matures technologiquement, les pales par exemple, ont été amenés à échelle de démonstrateurs technologiques (TRL 7).

MOBILISATION — DES HISTOIRES À SUCCÈS

Bell Textron a pu compter sur une multitude de collaborateurs mobilisés, pour le développement des technologies du sous-projet POUSSÉE. Ce réseau de partenaires a permis à l'industrie aérospatiale québécoise de progresser vers la maîtrise de nouvelles technologies avancées qui sont applicables non seulement aux hélicoptères, mais à tout autre véhicule aérien. En plus de renforcer des liens existants avec des partenaires, de nouvelles collaborations ont été créées.

Comme initialement prévue, une stratégie de partage de la propriété intellectuelle avec les PME ainsi qu'avec les institutions postsecondaires et les centres de recherche du Québec a été implantée. Celle-ci permet aux PME d'exploiter la propriété intellectuelle qu'elles auront développée sans restriction à l'extérieur des champs d'activités de Bell Textron, comme c'est le cas pour Ruiz Aerospace avec les processus manufacturiers de tissage et d'infusions de pièces creuses. Il en va de même pour les universités et les centres de recherche qui pourront utiliser les résultats de leurs projets avec Bell Textron à des fins d'enseignement et de recherche. Il en est d'ailleurs déjà le cas pour les expériences en soufflerie effectuées à l'Université de Sherbrooke dont le processus expérimental et les résultats ont déjà intégré le cours d'aérodynamique.

RENFORCEMENT DE LA CHAÎNE DE FOURNISSEURS DE LA GRAPPE

Toutes les collaborations ont été réalisées de façon semblable. Prenons par exemple le développement de pales ultralégères effectué en collaboration avec le groupe CTT et la PME Ruiz. Le projet a permis de conjuguer un développement technologique des renforts, en repoussant les limites des techniques de tissage du groupe CTT, combiné au développement du procédé de moulage final de la pale par la PME Ruiz Aerospace. Le produit a permis une réduction de 50 % du poids par rapport au procédé de fabrication conventionnel. Il en va de même pour tous les partenaires impliqués sur le sous-projet qui ont été appelés à innover pour résoudre les défis de l'industrie aérospatiale.

CONTRIBUTION À LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GES ET AU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Parmi les technologies développées dans le cadre du projet, deux aspects principaux ont été évalués à travers une analyse de cycle de vie détaillée, c'est-à-dire l'extraction des matières premières, la production, l'utilisation et la mise au rebut en fin de vie.

Dans un premier temps, l'équipe a étudié les avantages environnementaux qu'apporterait le remplacement de la fibre de carbone par la fibre de lin en tant que renfort structurel pour les pièces en matériaux composites dans certaines applications spécifiques. Chaque remplacement de renfort similaire à la pièce de référence étudiée pourrait essentiellement permettre une réduction de 16 tonnes de CO₂ équivalentes, et ce, sur 10 ans par appareil. Le potentiel d'acidification, d'eutrophisation, de création d'ozone photochimique et de pénurie d'eau serait également réduit de 16 kg de SO₂-éq, 1 kg de phosphate-éq, 2 kg d'éthylène-éq et 1 m³-éq respectivement. Ainsi, compte tenu du volume de production, la réduction de GES serait de plus de 3 500 tonnes de CO₂ équivalent, grâce à la substitution des renforts. Plusieurs étapes sont encore nécessaires pour la mise en production et la certification de pièces à base de fibre de lin pour le domaine aéronautique, avec entre autres une qualification complète du matériau.

Dans une deuxième phase, l'équipe a étudié les avantages potentiels de l'intégration d'un système de propulsion électrique hybride au sein d'un véhicule à décollage vertical destiné au transport de marchandises, par opposition à un hélicoptère classique à essence. L'étude a permis de démontrer qu'une réduction d'environ 139 000 à 161 000 tonnes de CO₂ est envisageable sur une période de dix ans. Les réductions varient en fonction de la charge de cargo et de la possibilité de recharge des batteries durant les missions. Il a pu être identifié que les phases d'extraction et de fin de vie pour la propulsion hybride avaient cependant un impact environnemental négatif plus important, principalement en raison des batteries et du nombre de composantes additionnelles nécessaires. La phase d'exploitation permet toutefois de réaliser des économies significatives sur le cycle de vie du drone cargo hybride par rapport à l'hélicoptère, de sorte que, dans l'ensemble, le drone cargo hybride présente un avantage environnemental substantiel.

Outre les réductions mentionnées ci-dessus, ces études ont permis à Bell Textron de mieux comprendre l'ensemble des éléments à prendre en compte dans une démarche d'écoconception, et de valider plusieurs hypothèses qui contribueront à garantir une bonne direction pour le développement des technologies propres du futur dans le secteur aéronautique.

EN CONCLUSION

Le premier élément distinctif du sous-projet POUSSÉE consiste en l'étude et le développement des technologies visant l'électrification des aéronefs à décollage vertical. En plus de projets de recherche concrets, par exemple celui du développement d'un moteur électrique haute vitesse à haute densité de puissance, l'équipe et les partenaires mobilisés ont pu analyser plusieurs configurations de véhicules dans l'optique de réduire la quantité de GES émis, que ce soit par une électrification complète ou par une hybridation (voir images 2 et 3). Bell Textron est maintenant mieux positionnée et a acquis un bagage de connaissances pour guider sa stratégie d'électrification, malgré le défi que cela représente toujours pour l'industrie.

L'élément distinctif principal concernant l'amélioration des performances aérodynamiques de systèmes de propulsion est sans contredit la campagne de tests exhaustive qui a été effectuée sur les soufflantes carénées et l'analyse des données qui s'en est suivie. Il s'agit, d'après la revue de littérature conduite par Bell Textron, de la plus grande campagne de tests jamais effectuée afin de mieux comprendre les soufflantes carénées. Ces données seront utilisées pendant longtemps pour améliorer l'efficacité des systèmes de propulsion carénés chez Bell Textron et seront aussi utilisées dans

les établissements d'enseignement mobilisés pour cette portion du projet.

Les données et apprentissages générés dans le cadre de SA²GE ont permis de bien comprendre les avantages et les limites des soufflantes carénées. Bien qu'elles aient un avantage pour des phases de décollage et de vol en mode hélicoptère, plusieurs phénomènes aérodynamiques rendent la technologie inefficace énergétiquement pour des vols de croisière à grande vitesse d'avance.

Cependant, pour toute configuration où la vitesse induite de vent dans le rotor est faible, le carénage montre un certain avantage. C'est le cas pour, par exemple, un rotor de queue comme le EDAT présenté à l'image 1. Il ne s'agissait que d'un prototype. Cependant, les travaux de SA²GE ont permis une analyse poussée du concept et ainsi, plusieurs pistes d'amélioration de l'efficacité énergétique ont été identifiées. L'avantage des soufflantes carénées serait aussi évident pour des missions de courte portée. Une variante sur la mission de taxi présentée dans le livre blanc d'UBER (REF) en est un exemple. De ce fait, Bell est persuadé qu'un véhicule pleinement électrique conçu autour des soufflantes carénées pourrait remplir une telle mission.

Image 1 : Prototype du système EDAT, système qui pourra être optimisé à l'issue des apprentissages réalisés dans le cadre de SA²GE





Image 2 : Banc d'essai de propulsion hybride électrique

L'élément distinctif principal du volet réduction du poids est l'élaboration des différentes techniques de fabrication de pales. Les techniques développées — allant de l'injection de plastique pour les pales de petite taille jusqu'au tissage pour les pales de taille plus conséquente — en passant par la technique de vessie gonflable (voir Image 4), ont toutes montré une réduction du poids par rapport aux méthodes de fabrication traditionnelles en plus d'offrir des propriétés mécaniques similaires ou même meilleures.

La phase 3 du projet SA²GE a permis de créer un environnement collaboratif dans lequel il a été possible de conduire des activités de recherche et de maturation technologique impliquant des

acteurs industriels et universitaires dans le but de rendre l'aviation plus écologique. De ce fait, ces efforts ont permis à plusieurs PME québécoises de développer des technologies qui leur permettront de détenir un avantage concurrentiel dans leur marché et de se positionner comme chefs de file dans leur domaine respectif. Les résultats des activités menées lors de la phase 3 de SA²GE représentent une contribution considérable et pertinente pour l'industrie aéronautique québécoise.

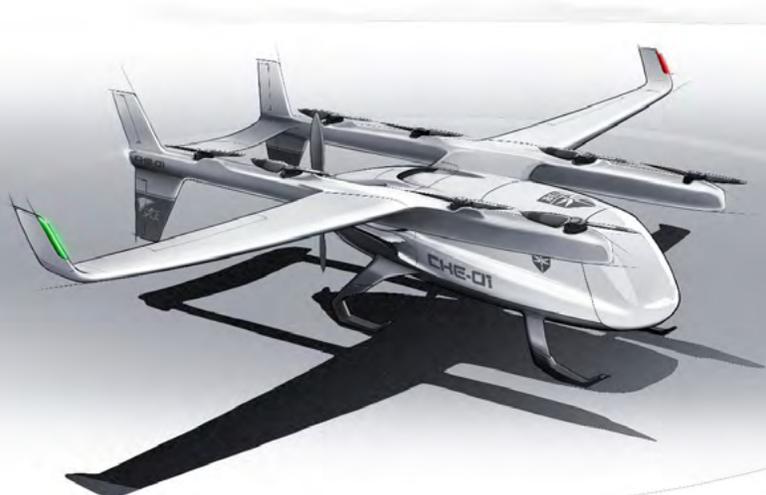


Image 3 : Concept de drone cargo hybride-électrique



Image 4 : Prototype de pale fabriquée par moulage par vessie gonflable

BOMBARDIER

AILE INTELLIGENTE ET LÉGÈRE POUR L'ENVIRONNEMENT (AILE)

« Chez Bombardier, le projet AILE a été un projet phare, permettant d'établir une fondation solide pour le développement technologique utilisant les bancs d'essai. Le banc développé et utilisé pour valider tous les aspects de conception de l'aile à commandes de vol multifonctionnelles pour les avions d'affaires, a été un franc succès, grâce à des collaborateurs engagés et à l'implication de PME et d'universités, dont l'expertise a été mise à profit pour réaliser les différentes facettes du projet. »

Le projet AILE avait pour objectif principal de développer le concept de l'aile à commandes de vol multifonctionnelles pour les avions d'affaires de prochaine génération. L'introduction récente de la technologie des commandes de vol électriques, sur le Global 7500 en 2018, a ouvert la voie au développement de nouvelles fonctions. Ainsi, une nouvelle fonction incluant la synchronisation automatique des mouvements des volets et déporteurs permet d'alléger la structure de l'aile et d'optimiser davantage la performance aérodynamique de l'avion.

Ayant démontré dans un projet antérieur le potentiel aérodynamique de cette fonction, Bombardier a lancé le projet AILE avec des

fournisseurs de premier rang pour développer les innovations clés du système de commandes de vol, notamment Thales Canada et Eaton Aerospace. La feuille de route couvrait toutes les briques technologiques et les aspects d'ingénierie nécessaires pour faire évoluer la technologie d'un simple concept (TRL 3) à une maturité prête pour une insertion sur un produit (TRL6). La performance, la robustesse et la compatibilité aux exigences de sécurité de l'aile à commandes de vol multifonctionnelles ont ainsi été validées par une série de démonstrations sur un nouveau banc d'essai et sur le simulateur de vol intégrant cette nouvelle technologie.

COUP DE CŒUR!



Après plus de cinq années de développement technologique et avec la réussite des tests sur le banc d'essai du système intégré et des essais en vol virtuels, le projet AILE a atteint tous ses objectifs. L'atteinte de la maturité TRL6 marque pour Bombardier une étape clé vers la prochaine génération d'ailes intégrant un système de commandes de vol multifonctionnelles. Cette nouvelle génération d'ailes plus légères et performantes pourra être considérée pour de nouveaux développements d'avions, en ligne avec l'engagement de Bombardier pour une aviation durable. Quelque 250 ingénieurs et technologues de Bombardier ont travaillé sur le projet AILE.

FAITS SAILLANTS

- Conception détaillée multidisciplinaire et intégration niveau avion de l'aile à commandes de vol multifonctionnelles.
- Montée en maturité plus rapide de la plateforme logicielle grâce à de nouveaux outils de Thales Canada.
- Intégration d'un système novateur d'actionnement électrique des volets développé par Eaton Aerospace.
- Développement d'un banc d'essai du système intégré en étroite collaboration entre Bombardier, Thales Canada et Eaton Aerospace. Le banc d'essai comprend la représentation physique à échelle réelle et à une haute-fidélité mécanique pour le volet de l'aile gauche, tandis que l'aile droite est simulée.
- Validation de la maturité TRL6 de la technologie de l'aile à commandes de vol multifonctionnelles par les essais sur le simulateur de vol et le banc d'essai avec les performances ciblées initialement.
- Intégration dans un mini-manche actif de la technologie d'actionnement à fluide magnétorhéologique développée par Exonetik et essais en vol virtuel sur le simulateur de vol de Bombardier.
- Conception d'une charnière de volet plus légère — par optimisation topologique — fabrication par FusiA par impression 3D métallique (ALM «Additive Layer Manufacturing») et validation des limites.

GAINS TECHNOLOGIQUES CLÉS

La technologie de l'aile à commandes de vol multifonctionnelles est le résultat de la synergie de nouvelles interactions bénéfiques entre des systèmes existants. Son développement a demandé d'intervenir de façon intégrée et détaillée entre plusieurs domaines d'expertises au moment des phases d'architecture, de conception, de validation et de vérification. Les axes de développement ont été concentrés selon quatre grandes facettes : l'aérodynamique et les structures, le système de commandes de vol, les lois de contrôle de l'avion, et l'intégration de la technologie au niveau de l'avion.

Le premier axe de développement a mis l'accent sur la conception de l'aérodynamique et des structures, plus particulièrement en ce qui concerne les volets et les déporteurs et leurs nouvelles interactions. Différentes solutions ont été étudiées pour définir une configuration optimale, incluant de nouveaux carénages et des structures d'interfaces détaillés. Les structures des volets et des déporteurs ont été conçues pour être robustes et légères, permettant des mouvements précis pour un contrôle optimal de l'aérodynamique. Les tests sur le banc d'essai ont validé les modèles d'éléments finis détaillés des structures.

Le second axe de développement s'est concentré sur la conception des systèmes de contrôle, la définition des nouvelles fonctions dans le système de commandes de vol et notamment l'intégration du système d'actionnement des volets. Cet axe a grandement profité de l'expertise et collaboration étroite de Thales Canada dans le développement des plateformes logicielles du système de commandes de vol. L'intégration du système à architecture novatrice d'actionnement électrique des volets développé par Eaton Aerospace était un autre élément clé. Son fonctionnement a été démontré et vérifié dans un environnement représentatif du vol sur le banc d'essai, permettant de vérifier les exigences de performance, de robustesse et de sécurité. Le développement

du banc d'essai du système intégré en étroite collaboration avec Thales Canada et Eaton Aerospace constitue un élément phare du projet AILE.

Le troisième axe a mis l'accent sur l'intégration des nouvelles fonctions dans les lois de contrôle de l'avion. Des essais en vols virtuels sur le simulateur de vol d'ingénierie, effectués par le pilote d'essai en chef de Bombardier, ont confirmé la compatibilité des nouvelles fonctions avec les exigences strictes de qualité de vol et de sécurité, des conditions nécessaires pour une insertion de la technologie dans un futur produit de Bombardier.

Le quatrième axe de développement a englobé l'intégration de la nouvelle technologie au niveau de l'avion, notamment pour évaluer l'impact potentiel sur l'optimisation globale de la configuration d'un nouvel avion. Deux études de conception pour différentes configurations des avions d'affaires de moyenne à grande taille ont été réalisées et ont confirmé le potentiel significatif et réel de la technologie pour réduire la masse de l'aile et la consommation de carburant et donc baisser les émissions des gaz à effet de serre (GES).

AVANCÉES TECHNOLOGIQUES

Le niveau de maturité technologique de l'aile aux commandes de vol multifonctionnelles au début du projet était à un TRL 3, soit un simple concept. Le projet AILE a permis d'avancer la maturité de cette technologie novatrice dans tous ses aspects et d'atteindre une maturité TRL 6 par la réalisation d'une série de démonstrations et vérifications dans un environnement représentatif du vol sur le banc de vérifications et sur le simulateur de vol intégrant cette nouvelle technologie. À ce stade de maturité, la technologie est considérée comme prête à être intégrée dans un produit, c'est-à-dire dans un prochain développement commercial de Bombardier.

MOBILISATION

Le projet AILE a permis à un réseau de fournisseurs aéronautiques de travailler avec Bombardier sur des développements technologiques stratégiques — en tant que collaborateurs du projet pour Thales Canada, Eaton Aerospace, FusiA et Exonetik et dans le cadre de mandats mobilisateurs pour une dizaine de PME.

Le projet AILE a su mobiliser de grands industriels de l'écosystème québécois de l'industrie aérospatiale, notamment avec Thales Canada. De plus, Eaton Aerospace s'est établi localement au Québec, renforçant la chaîne de fournisseurs de la grappe aérospatiale.

COLLABORATEURS

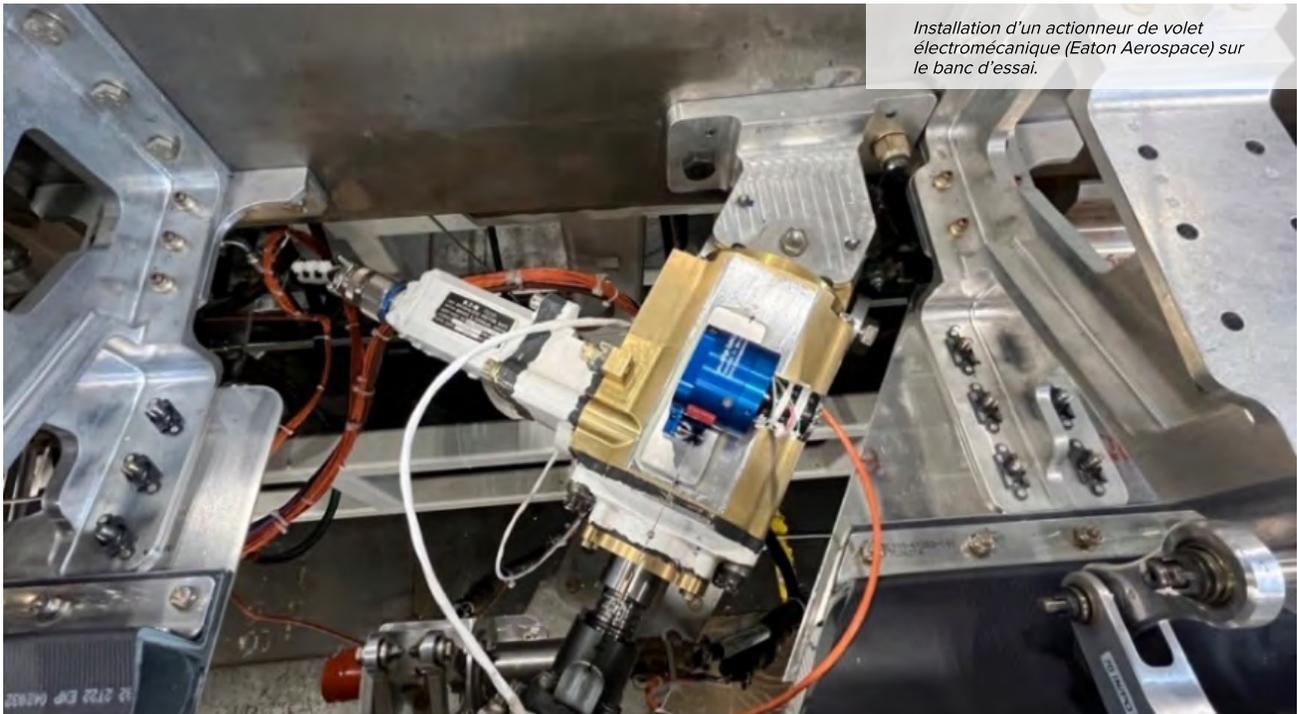
Les réalisations de Thales ont couvert plusieurs aspects :

- Le développement technologique pour la prochaine génération des calculateurs de commande de vols et les calculateurs multiapplication supportant les commandes de vol.
- Le développement d'une suite d'outils et d'un environnement de test simulé en support de la plateforme logicielle.
- L'intégration de nouvelles fonctions de contrôle spécifiées par Bombardier dans la plateforme logicielle du système de commandes de vol et le développement en étroite collaboration avec Bombardier du banc d'essai du système intégré.

Un élément clé dans la réussite du projet AILE était la modélisation du système des commandes de vol et le développement d'un banc d'essai virtuel. Ceci a permis de tester le logiciel dans le fonctionnement du système intégré et de le faire avancer en maturité bien avant la mise en place du banc d'essai réel à Bombardier. Cette collaboration a également permis à Thales d'entreprendre le développement d'une nouvelle fonction de maintenance prédictive pour des actionneurs dans les calculateurs multiapplication.

Grâce à son partenariat avec Bombardier, Eaton Aerospace a pu faire progresser ses technologies de synchronisation électrique pour un système innovant de contrôle électromécanique des volets, qui permet d'améliorer les performances et de réduire le poids tout en garantissant une sécurité et une disponibilité élevées du système. Les performances ont été validées dans un environnement représentatif de l'avion grâce à des essais de prototype du système sur le banc d'essai chez Bombardier.

Ce travail a contribué à la réalisation des objectifs d'Eaton Aerospace en matière d'investissement dans des technologies écologiquement durables, notamment par le développement de solutions plus électriques «More Electric Aircraft». Il a également permis de développer l'expertise d'Eaton en matière de systèmes de contrôle et d'intégration de la synchronisation des actionneurs.



Installation d'un actionneur de volet électromécanique (Eaton Aerospace) sur le banc d'essai.

Eaton a apprécié l'opportunité de collaborer et de développer de solides relations de travail avec Bombardier dans le cadre du projet AILE, ce qui l'a conduit à établir une présence technique locale au Québec dans le but de collaborer avec Bombardier sur de nouveaux projets technologiques.

Exonetik a intégré dans un mini-manche actif de pilotage leur technologie d'actionnement à fluide magnétorhéologique et soutenu les tests fonctionnels et d'intégration avec les autres systèmes. Ce développement constitue une autre brique technologique à part de l'aile intelligente et à un plus bas niveau de maturité technologique, approchant un TRL 5.

Quant à FusiA, la PME a participé à la conception d'une ferrure de volet par optimisation topologique et fabriqué des prototypes par impression 3D, qui ont ensuite été testés chez Bombardier, confirmant des résultats prometteurs pour ces deux technologies.

MOBILISATION DES PME

Différentes PME ont également contribué au projet. PCM Innovation a été impliqué pour la fabrication des composants de prototypes de volets et déporteurs pour le banc d'essai, soit un projet majeur de fabrication d'un prototype de structure secondaire d'avion. L'entreprise Mendax Mycrosystèmes a eu le mandat d'établir l'architecture du serveur du système d'acquisition de données du banc d'essai. Neosoft a eu le mandat de mettre en fonction les logiciels du système d'acquisition de données du banc d'essai. Et pour conclure, Dawco a eu le mandat pour l'installation des équipements pour l'alimentation électrique du banc d'essai.

MOBILISATION DES CENTRES DE RECHERCHE ET UNIVERSITÉS

En complément à ces développements technologiques, le projet AILE a permis d'améliorer des outils d'ingénierie, notamment en ce qui a trait à la simulation aérodynamique, au travers de collaborations avec les universités McGill, Concordia, et Polytechnique Montréal.

- L'équipe de l'Université McGill a développé des modèles numériques de la transition entre les écoulements laminaires et turbulents.
- Polytechnique Montréal a développé une méthodologie plus robuste et efficace pour prédire la géométrie du givrage sur les bords d'attaque des ailes.



Deuxième prototype du moteur électrique de l'actionneur électromécanique.



CONTRIBUTION À LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GES ET AU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Le projet AILE a mené des études comparatives sur l'optimisation de la configuration de futurs avions d'affaires intégrant la technologie de l'aile à commandes de vol multifonctionnelles. Une meilleure efficacité aérodynamique et la réduction de la masse structurale de l'aile, et donc de l'avion, grâce à cette technologie mènent à une réduction importante de la consommation de carburant et donc des émissions en phase d'opération. En outre, la réduction de la masse structurale de l'avion permet des gains importants en utilisation des matières premières, en consommation d'eau et des émissions des GES dans la phase de fabrication. Deux études de cycle de vie ont été effectuées pour deux types d'avions différents. Pour l'ensemble du cycle de vie d'une flotte d'avions qui serait issue d'un nouveau développement qui inclut la technologie du projet AILE, la réduction potentielle totale sur dix années suivant l'implémentation est chiffrée à l'équivalent de 174 000 tonnes CO₂ ou 191 000 tonnes CO_{2e}, selon le type d'avion produit.

EN CONCLUSION

Le projet AILE a permis de développer la technologie de l'aile à commandes de vol multifonctionnelles qui pourra être choisie pour de prochains développements de produit de Bombardier, en alignement avec la stratégie de Bombardier et de l'industrie de poursuivre la transition vers une aviation carboneutre en 2050. Il a établi la fondation pour les prochains grands développements technologiques qui nécessiteront des bancs d'essai de plus en plus complexes. Ainsi, en 2022, Bombardier s'est engagé à développer l'ÉcoJet et à consacrer plus de 50 % de sa R-D d'ici 2025 sur des avions plus respectueux de l'environnement.

Il a également permis de créer et de renforcer plusieurs collaborations clés pour Bombardier, nécessaires aux développements technologiques qui seront déployés dans les prochaines générations d'avions d'affaires et permettront d'atteindre les cibles de l'aviation en matière d'environnement.

La majorité des activités collaboratives du projet AILE se poursuivent dans de nouveaux projets de collaborations. Cette évolution naturelle résulte de la qualité des partenariats et des réalisations du projet.



EXONETIK

PME québécoise établie à Sherbrooke, Exonetik conçoit et fabrique des actionneurs à fluide magnétorhéologique, ainsi que des turbines de céramique en compression. Dans le cadre de SA²GE-3, Exonetik collabore avec Bombardier sur le développement d'un prototype de manche à contrôle actif.



FUSIA IMPRESSION 3D MÉTAL

Fusia est une PME située à Saint-Eustache spécialisée dans la fabrication additive (impression 3D) de pièces métalliques. Elle collabore avec Bombardier sur des pièces de volets qui contribueront à une réduction du poids de l'aile.



THALES

Bien connue de l'écosystème de SA²GE pour avoir été partenaire industriel dans les phases 1 et 2, Thales est aussi un collaborateur de Bombardier dans SA²GE-3. Faisant partie d'un groupe multinational d'origine française œuvrant dans de nombreux secteurs industriels, Thales Canada conçoit des systèmes de contrôle pour les avions et travaillera avec Bombardier à définir une nouvelle architecture du système de contrôle de vol pour permettre d'optimiser l'aérodynamique de l'aile.



EATON

Multinationale spécialisée dans la gestion de l'énergie, c'est sa division aéronautique et plus particulièrement, carburant et systèmes de contrôle, qui investit au Québec dans le sous-projet AILE de Bombardier. Eaton collaborera au développement du système d'actionnement de l'aile innovante.

« SA²GE-3 a été déterminant pour le financement du développement de la nouvelle génération de système de gestion de vol, projet caractérisé par un haut niveau de complexité et de risque. Il a accentué la portée concurrentielle de CMC pour diminuer l'équipement physique à installer dans les avions, économisant ainsi de l'espace et diminuant le poids de l'appareil. »

Ce sous-projet de SA²GE-3 a été réalisé en continuité du sous-projet mené par CMC dans la phase 2 de SA2GE. Avec le sous-projet AMI ÉcoNav-3, la recherche de nouvelles solutions de navigation qui réduiront l'empreinte écologique de l'aviation s'est poursuivie. Le sous-projet visait à diminuer les incidences nuisibles telles que la consommation de carburant d'un avion en intervenant sur :

- L'amélioration de son système de gestion de vol visant à mieux exploiter le marché des avions d'entraînements et drones;
- La maturation de commandes tactiles;
- Le développement d'une procédure de vol à faible bruit permettant d'optimiser les trajectoires des hélicoptères afin de réduire leur impact sonore.

Par ailleurs, le développement de certaines applications a été ralenti par la rareté des ressources humaines spécialisées et la conjoncture mondiale. Ces applications visaient :

- La maturation de la fonction de gestion de vol parfait, principalement pour les avions commerciaux;
- Le développement par Marinvent du système ROPA (*Route Optimization and Planning Algorithm*), qui consiste en une optimisation en temps réel de la trajectoire d'un aéronef soumis à différentes contraintes (météo, obstacles, trafic...);
- L'introduction d'une application de maintenance intégrée de CMC pour la transmission en temps réel de données avioniques.

FAITS SAILLANTS

En cours de projet, CMC a profité de la contiguïté des besoins des drones et du développement d'une interface usager tactile graphique pour réaligner le projet et mettre l'emphase vers une refonte complète de son système de gestion de vol afin d'éliminer les calculateurs dédiés à bord de l'aéronef. Ce système de gestion est maintenant devenu une application logicielle pouvant être hébergée sur un calculateur multifonction, soit de CMC ou d'une tierce partie. L'élimination d'un calculateur dédié permet une réduction des GES en réduisant le poids de l'aéronef et aussi l'élimination des ressources nécessaires en amont du cycle de vie pour la fabrication du calculateur devenu obsolète. Le nouveau système de gestion de vol présente un changement générationnel de l'interface usager en l'intégrant avec un écran à commande tactile.

Dans le cadre du projet ROPA de Marinvent, qui consiste en une optimisation en temps réel de la trajectoire d'un aéronef soumis à différentes contraintes (météo, obstacles, trafic...), des travaux ont été effectués par des étudiants afin d'évaluer les sources de données que l'algorithme pourrait prendre en compte. D'autres travaux ont porté sur l'algorithme de prise de décision et l'utilisation de systèmes experts. Ces travaux seront notamment utiles pour déployer des solutions pour aéronefs sans pilote.

Une grande fierté pour ce projet a été d'accompagner 3 étudiants de l'université de Concordia et un étudiant du Collège militaire royal du Canada durant leur maîtrise ou leur doctorat, de développer des connaissances utiles pour l'avenir de l'optimisation des routes ainsi que de former deux employés qui travaillent chez la compagnie sœur de Marinvent, Cert Center Canada et qui continuent d'évoluer avec l'expertise acquise.

GAINS TECHNOLOGIQUES CLÉS

CMC est maintenant doté d'une fonction de gestion de vol portable vers les écrans tactiles (SW FMS). C'est une refonte majeure de l'avionique modulaire issue des précédentes phases. Celui-ci inclut les fonctions de positionnement (utilisant de multiples types de capteurs à bord de l'avion), planification de vol, navigation latérale, navigation verticale, interface avec la mappe électronique pour afficher le plan de vol et de nombreuses fonctions de référence pour aider le pilote.

Les nouveaux éléments graphiques ont été appliqués à la majorité des fonctions FMS. La mise à jour des menus, des pages de base, des boîtes de dialogues, etc. a permis de régler les problèmes d'utilisabilité identifiés durant le développement initial.

CMC est toujours en cours de convertir à la nouvelle interface usagée certaines fonctions plus spécialisées pour le marché des hélicoptères. Les fonctions de vol parfait (3D et même 4D), développées sur un produit de génération précédente, et plus adaptées au marché des avions de ligne, ont pour le moment été interrompues, et seront réactivées dans le SW-FMS selon les perspectives de marché pour CMC.



<https://cmcelectronics.ca/fr/nos-produits/navigation/systeme-de-gestion-des-logiciels-de-vols-sw-fms/>

Les principes de base de l'interaction tactile ont été révisés à la suite des essais sur banc vibrant. La taille des cibles et les types de gestes possibles — notamment avec l'utilisation de gants — et dans un environnement de turbulence et de vibration ont été validés.

Dans le processus de refonte de l'interface usager, CMC a développé un vocabulaire de messages de communications entre l'interface usager et les fonctions centrales du système de gestion de vol (FMS), notamment la fonction de planification de vol (*Flight Planning*). La ségrégation entre l'interface usager et le « cœur » du FMS permet notamment dans le cas d'applications de drones de réhéberger l'interface usager dans une station de contrôle au sol, et de communiquer avec le « cœur » du FMS qui lui est hébergé sur un calculateur à bord d'un drone.

Ce même vocabulaire de messages a aussi été utilisé sur les avions d'entraînements militaires afin d'interfacer le FMS avec un Planificateur de missions de tierce partie. Cette dernière unité permet à un usager de préparer des plans de vol à l'avance et de les retransmettre plus tard au FMS selon la syntaxe établie.

Pour le marché des avions d'entraînements, CMC a fait évoluer les interfaces du FMS pour supporter de nouveaux modèles de centrales inertielles, qui intègrent également le positionnement par satellite (GPS). Les algorithmes de positionnement du FMS ont été mis à jour pour tenir compte de ce mode hybride (inertiel/GPS).

Le nouveau FMS a été développé au standard TSO-C115d (RTCA DO-283C), qui est conjointement reconnu par la FAA (États-Unis), EASA (Europe) et Transports Canada. Cette norme de navigation appuie les initiatives de navigation fondée sur la performance (RNP), à la fois aux États-Unis (NextGen, FAA AC 20-138D Change 2) et en Europe (SESAR, EASA CS-ACNS).

LES INTERFACES TACTILES ET LA CHARGE DE TRAVAIL

Les systèmes de gestion de vol FMS traditionnels imposent une charge de travail relativement élevée pour le pilote et demandent un entraînement substantiel afin de développer l'expertise nécessaire pour opérer les fonctions de navigation. Le pilote contrôle le FMS à l'aide d'un clavier et des boutons multifonctions; l'affichage est sur un écran dédié adjacent aux contrôles.

Les nouvelles technologies avioniques, comme les écrans larges avec interaction tactile, permettent d'utiliser des interfaces graphiques plus intuitives, similaires aux interfaces utilisées dans les produits grand public comme les téléphones intelligents et les tablettes. Le pilote est moins dépendant d'un langage et d'une séquence d'entrées de données complexes, ce qui permet de réduire le temps d'apprentissage.

Le piège des interfaces tactiles demeure la perte d'attention. L'utilisateur doit porter une plus grande attention pour sélectionner un élément à l'écran, déplacer la main, contrer les mouvements involontaires, etc. Durant l'intervalle où le pilote se concentre sur la sélection à l'écran, il ne regarde pas à l'extérieur et risque de dévier de sa trajectoire, particulièrement si l'avion n'est pas équipé d'un système de pilote automatique.

Les plus grands défis pour l'attention, la charge mentale de travail et l'erreur humaine sont bien visibles dans des avions à un seul pilote. Des équipes multidisciplinaires qui combinent une expertise de la tâche, de l'interaction personne-machine et du graphisme permettent de développer des solutions sécuritaires, qui pourront être homologuées dans un cadre de réglementation de Transports Canada pour tous types d'appareils.

Pour notre collaborateur Marinvent, un système de collection et de traitement de données a été établi, supportant éventuellement les algorithmes de prises de décisions et d'optimisation de route. De plus, un algorithme de prise de décisions a été implémenté à l'aide d'un système expert. Ce système pourra ensuite être utilisé dans le contexte de ROPA et de ses contraintes particulières. Un algorithme d'optimisation de trajectoire a été développé s'inspirant de travaux de recherche sur le sujet. Marinvent aura la possibilité d'intégrer tous les acquis des travaux de recherche avec l'algorithme de prise de décision.

Ces quatre domaines de recherche ont chacun produit une thèse évaluée et acceptée par des pairs au niveau maîtrise et le dernier domaine de recherche est présentement approfondi dans un doctorat effectué au Collège militaire royal du Canada. Ces thèses sont disponibles au public¹.



MARINVENT

Marinvent est une PME québécoise offrant des services de conseils, de formation, d'outils et de propriété intellectuelle aux entreprises du secteur aérospatial dans le but de faciliter leur capacité d'innovation. Dans le cadre de SA²GE-3, Marinvent collabore avec CMC Électronique sur deux de ses activités de développement, en connectant l'application ROPA (*Route Optimization and Planning Algorithms*).

GAINS TECHNOLOGIQUES, AVANCÉES MAJEURES POUR LES PME MOBILISÉES ET AUTRES ENTREPRISES PARTICIPANTES

Plusieurs PME québécoises ont acquis de nouvelles connaissances et approfondi des connaissances existantes. Par exemple, Marinvent a approfondi ses connaissances dans les stratégies et logiciels d'évitement et le Groupe Cognitif a étendu ses connaissances en aviation en travaillant pour la première fois sur des applications d'interface-usager pour postes de pilotage.

TRL DÉBUT ET FIN

La phase 3 a donné lieu à une nouvelle génération de l'avionique modulaire AMI qui permet d'éliminer des équipements dédiés et d'instaurer une interface tactile, le tout à une maturité TRL 6.

Tous ces domaines de recherche sont accompagnés de démonstration laboratoire, amenant au niveau de maturité TRL 4. De ces recherches, un système ROPA a été créé, mais il a été testé et opéré dans un environnement contrôlé.

Ces travaux permettront dans des étapes subséquentes une intégration avec un système de gestion de vol (FMS) afin de lui transmettre la nouvelle trajectoire optimisée. En plus d'une trajectoire 3D, l'algorithme pourra transmettre au FMS une contrainte de temps (*Required Time of Arrival*) de sorte que le FMS puisse gérer sa vitesse afin d'atteindre le point désiré précisément à l'heure requise. Alternativement, le FMS pourrait recevoir directement une commande de vitesse venant de l'algorithme d'optimisation de trajectoire.

CMC a déjà des systèmes de gestion de vol en service supportant les capacités FANS-1/A, qui permettent l'échange de plans de vols (complets ou partiels) et de commandes de vitesse et d'altitude entre l'avion et le centre de contrôle aérien. Ces protocoles, de même que ceux mentionnés plus haut visent à interfacier le FMS avec un planificateur de missions de tierce partie, dans une phase subséquente pour supporter l'intégration avec ROPA.

La nouvelle fonction de gestion de vol (développé au standard TSO-C115d ci-haut mentionné), a été intégrée dans un calculateur non CMC par un fabricant de drones. De plus, la même fonction a été intégrée sur un calculateur de CMC (MFD-3068) et le système intégré a été testé en vol parmi un fabricant européen d'avions d'entraînement, atteignant ainsi le niveau TRL-6.

La maturation de TRL5 à TRL6 de la fonction vol parfait a dû être interrompue pour cause de pandémie et de réalignement de marché pour CMC.

Un système ROPA a été créé, mais il a été testé et opéré dans un environnement contrôlé, amenant au niveau de maturité TRL 4. Les TRL 5 et 6 n'ont pu être atteints faute d'accès à un environnement pertinent, et du retard pris dans la maturation des fonctions FMS à la suite de la pandémie.

¹A. *Collecte et traitement des données :*

A methodology for the design and development of an aerospace-specific data repository to support data-driven research (Angelina Cui).

B. *Prise de décision autonome en matière de navigation dans les systèmes d'aéronefs :*

An Ontological Approach to Autonomous Decision Making in Aircraft Navigation Systems (Paul Vajda).

C. *Planification optimale des trajectoires basées sur l'échantillonnage :*

Optimal Sampling-Based Trajectory Planning for Autonomous Systems in Urban Environments (Mitch Lichocki).

D. *Évaluation des risques liés à l'optimisation de la trajectoire :*

A data-driven risk assessment study of the effects of increased levels of autonomy in a next gen shared airspace (Nicolas Vincent-Boulay, Angelina Cui).

MOBILISATION

CMC a poursuivi le modèle de collaboration débuté lors des phases 1 et 2 de SA²GE, qui a grandement contribué au succès de ce projet d'envergure. Ce modèle mise sur des relations stratégiques à long terme, créant ainsi petit à petit, une grappe spécialisée en navigation aéronautique. Dans SA²GE-3, CMC a travaillé avec plusieurs PME québécoises dont Mannarino, Scalian, Marinvent, IODS et Groupe Cognitif. Le modèle de collaboration qui a été principalement mis en place dans le cadre de SA²GE pour l'éconavigation est centré sur l'acquisition de connaissances et l'établissement de relations entre entreprises et organismes de recherche publics. La conséquence à moyen et à long termes de ce modèle est le potentiel pour une participation accrue des partenaires dans les évolutions subséquentes de technologies et de produits.

CMC a demandé l'aide du Groupe Cognitif pour le développement de l'interface usager du FMS prochaine génération. La collaboration avec Groupe Cognitif a permis un enrichissement de part et d'autre et le développement de la prochaine génération de FMS.

PROCÉDURE DE VOL À FAIBLE BRUIT

D'autre part, CMC a développé une capacité nouvelle dans un système de gestion de vol existant, aidant l'optimisation de la trajectoire des aéronefs afin de réduire leur impact sonore. L'outil que CMC a fourni permet de préparer les plans de vol dans un environnement de laboratoire et ensuite les tester en vol afin de mesurer l'empreinte acoustique des aéronefs volant ces trajectoires adaptées. Les recherches acoustiques seront menées par un fabricant d'hélicoptères européen dont la réduction cible est de 20 %. Le retard pris par ce fabricant quant au développement de leur prototype d'aéronef a retardé les essais en vol et l'évaluation acoustique jusqu'à la fin 2023.

CONTRIBUTION À LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GES ET AU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Découlant des divers projets SA²GE, de nombreux processeurs séparés et d'« éléments remplaçables sur place (LRU) » sont éliminés et substitués par des unités moins nombreuses et plus centralisés, promettant une première réduction de poids significative et des économies de maintenance dans les nouvelles générations d'aéronefs. Une deuxième réduction issue du vol parfait n'a toutefois pas été jugée pertinente en raison du marché ciblé de l'aviation commerciale qui a migré en cours de projet vers celui des avions d'entraînement.

CMC a sollicité les services de l'Université Concordia (Dr Luis Rodriguez et Steven Li, étudiant au doctorat) afin d'évaluer les économies d'essence sur les aéronefs où un système de gestion de vol hébergé sur une plateforme de calcul dédiée (LRU), tel le CMA-9000 de CMC, est remplacée par une application logicielle

hébergée partageant une plateforme de calcul existante. Un modèle de consommation générique des avions d'entraînement a été dérivé par la firme Tetra Tech de Boucherville pour calculer les réductions de gaz à effet de serre. Les hypothèses invoquent qu'un avion d'entraînement effectue 500 vols dans une année et que la flotte croît progressivement sur une période de 10 ans de zéro à 276 avions. Ce scénario représenterait une réduction totale des gaz à effets de serre de 1 092 tonnes de CO₂.

La conversion du FMS en une application logicielle a non seulement l'effet d'éliminer le calculateur dédié dans laquelle la génération précédente était installée, mais aussi de permettre les mises à jour sans impact environnemental durant la durée de vie du produit.

EN CONCLUSION

SA²GE-3 a été déterminant pour le financement du développement de la nouvelle génération de système de gestion de vol, projet caractérisé par un haut niveau de complexité et de risque. Ce système de gestion, maintenant devenu une application logicielle pouvant être hébergée sur un ordinateur multifonction, a accentué la portée concurrentielle de CMC pour diminuer l'équipement physique à installer dans les avions, économisant ainsi de l'espace et diminuant le poids de l'appareil. Grâce aux normes telles l'ARINC 653 et les guides telles RTCA DO-297 adoptées par l'industrie pour favoriser et standardiser la portabilité d'applications logicielles d'avionique, CMC peut déjà transplanter cette application d'une plateforme à une autre comme démontré avec un fabricant de drones.

L'application logicielle du système de gestion de vol intégrée sur l'une ou plusieurs plateformes AMI développées par CMC, pourra à terme être homologuée par l'entremise d'une approbation CAN-TSO-C115b de Transports Canada. De plus, le nouveau système de gestion de vol présente un changement générationnel de l'interface usager en l'intégrant avec un écran à commande tactile.

Par ailleurs, les défis solutionnés avec certains partenariats contribuent à l'amélioration continue de CMC en ce qui a trait au travail collaboratif.

CMC peut dorénavant fournir une solution plus complète de composants avioniques clés qui composent ces postes de pilotage.

En améliorant sa position concurrentielle grâce à SA²GE-3, CMC demeure un employeur de choix et continue de maintenir et de créer de nombreux emplois au Québec. CMC cible comme marché principal le secteur des avions d'entraînement et de reconnaissance ainsi que les avions légers d'attaque. Ces activités de ventes vont représenter près de 400 années-personnes de travail pour du personnel hautement qualifié, en plus des activités de production.

Des investissements importants sont prévus pour la suite, afin de continuer le développement du volet FMS et atteindre la certification. Plusieurs nouvelles fonctionnalités innovantes et inédites seront rajoutées au-delà de SA²GE-3.

« Le soutien du projet SA²GE-3 s'est avéré essentiel pour une PME comme TeraXion, qui a ainsi pu acquérir plus rapidement et efficacement les connaissances, le savoir-faire et les outils nécessaires à la poursuite de ses activités de développement en photonique intégrée. TeraXion est maintenant reconnu comme un chef de file en développement de solutions innovatrices basées sur la photonique intégrée. »

Le sous-projet dirigé par TeraXion vise à franchir une étape supplémentaire dans le développement de modules photoniques pour deux applications aérospatiales, soit les communications radiofréquence (RF) photoniques et les gyroscopes à fibre optique. Ces applications requièrent des modules compacts, légers et à faible consommation de puissance, qui doivent fonctionner dans des conditions environnementales exigeantes.

Au cours du sous-projet, TeraXion a progressé vers l'atteinte du niveau de maturité TRL-6 pour deux modules basés sur la photonique sur silicium. Le premier module développé par TeraXion est un module photonique radiofréquence (RF) haute fiabilité destiné aux liens de communications analogiques à haut débit qui peut transmettre, recevoir des signaux RF par voie optique et les convertir à une fréquence différente. Le projet repousse les limites de bande passante des systèmes RF jusqu'à 40 GHz. Par ailleurs, le signal en fréquence converti à l'optique permettra de remplacer les câbles coaxiaux en cuivre dans les avions par des fibres optiques beaucoup plus légères.

Le second module développé par TeraXion est une source laser multifréquence haute fiabilité, qui sera utilisée dans un gyroscope de nouvelle génération et permettra de réduire le poids du système de navigation, tout en améliorant sa performance.

FAITS SAILLANTS

MODULE RF HAUTE FIABILITÉ SUR SILICIUM POUVANT ATTEINDRE UNE BANDE PASSANTE DE 40 GHz

Traditionnellement, les signaux radiofréquence analogiques nécessaires au fonctionnement d'un aéronef circulent à travers des câbles coaxiaux lourds, encombrants et présentant beaucoup de pertes par mètre parcouru. Ceci limite souvent la bande passante des signaux à seulement quelques GHz. L'émergence d'applications nécessitant des bandes passantes très larges, telles que l'imagerie radar ou les communications analogiques à très haut débit rend nécessaire l'extension de la technologie à des bandes passantes de 40 GHz et plus. Ces fréquences élevées peuvent être efficacement transmises sous forme de signaux lumineux circulant à travers des câbles de fibre optique. Ces câbles légers et économiques peuvent être déployés sur de longues distances, car ils présentent très peu

de pertes, et les signaux qui y circulent ne sont pas affectés par les interférences électromagnétiques.

Le module RF développé par TeraXion joue un rôle de convertisseur photonique au sein du système de communications analogique : il peut convertir un signal électrique en signal optique afin qu'il puisse circuler dans la fibre optique, jouant ainsi un rôle de transmetteur. À l'inverse, le module peut être utilisé en configuration récepteur, convertissant les signaux optiques ayant circulé dans la fibre en signaux électriques utilisables par un équipement.

TeraXion a opté pour un design flexible pour le module RF. Ainsi, un même module de base peut être facilement configuré en module récepteur ou en module transmetteur, selon les besoins, principalement en inversant le rôle des entrées et sorties. Le développement d'un circuit intégré photonique a permis de concevoir un module récepteur Rx recevant un signal RF à une fréquence allant jusqu'à 40 GHz, qui sera ensuite transformé en signal à 1 GHz. Ce signal à basse fréquence, qui est appelé fréquence intermédiaire, devient alors compatible avec les convertisseurs analogiques numériques électroniques et pourra finalement être numérisé afin d'en extraire l'information. Le module transmetteur Tx est conçu pour recevoir un signal RF à basse fréquence (de 0 à 1 GHz), qui sera transformé par un processus similaire en signal à 40 GHz pouvant ensuite être transmis, par exemple, à une antenne. L'utilisation de l'optique permet d'effectuer ces conversions très efficacement et de manière extrêmement linéaire, sans altérer l'information contenue dans le signal. TeraXion a apporté un soin particulier au choix des composants du module et aux matériaux qui le composent, afin de maintenir la consommation énergétique du module sous 5 watts et que son poids demeure sous 450 grammes.

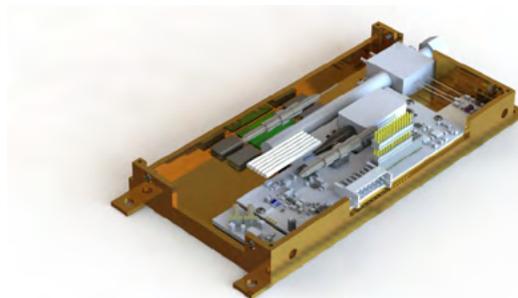


Figure 1 : Représentation de l'intérieur du module RF incluant les photodétecteurs en configuration Rx et Tx, le laser DFB, et le circuit optique sur puce de silicium avec modulateurs de phase

Le cœur du module RF est constitué d'un interféromètre de type Mach-Zehnder composé de deux modulateurs de phase. Une bande passante de 40 GHz est recherchée pour ces modulateurs, ce qui représente un défi important pour des modulateurs en photonique sur silicium, qui sont habituellement limités à des bandes passantes aux alentours de 15-20 GHz. TeraXion a donc fait appel au groupe de recherche du Dr David Plant de l'Université McGill pour concevoir un modulateur de phase en photonique sur silicium atteignant une bande passante de 40 GHz. Plusieurs designs de modulateurs ont ainsi été fabriqués et certains d'entre eux ont atteint des bandes passantes de plus de 35 GHz à -6 dB, comme le montrent les mesures présentées à la figure 2. À la tension de biais de 6 volts, les modulateurs de phase développés par l'université McGill ont donc atteint la performance attendue et sont adéquats pour l'application.

L'atteinte du niveau de maturité TRL-6 impose des contraintes importantes au niveau de la conception du module RF et du choix de ses composantes. Afin de conserver les performances optiques les plus stables possibles, TeraXion a développé un système de stabilisation de la longueur d'onde du laser. Le laser en boîtier hermétique « butterfly » est contrôlé en température par un élément thermoélectrique interne. Cet élément maintient la température de la puce laser dans sa gamme admissible de moins 20 °C à 55 °C, conservant ainsi sa performance optique et sa fiabilité. Afin de pouvoir opérer le module sur la plage de moins 40 °C à 70 °C requise pour le module RF, TeraXion a installé le laser « butterfly » sur un second élément thermoélectrique spécialement conçu pour maintenir le laser à l'intérieur de sa gamme de température acceptable, chauffant ou refroidissant tout le boîtier « butterfly » selon les conditions externes. La longueur d'onde du laser est alors mesurée sur la plage complète d'opération de moins 40 °C à 70 °C et une matrice de compensation est établie. Cette matrice permet d'appliquer une correction dynamique à la température interne de la puce laser selon la température ambiante, ce qui réajuste sa longueur d'onde pour qu'elle demeure stable sur toute la plage. Ce système limite la dérive en longueur d'onde du laser à moins de 0,015 picomètre/°C sur une plage de température de moins 40 °C à 70 °C, ce qui est 40 fois meilleur que la dérive habituelle d'un laser à rétroaction distribuée (*Distributed FeedBack ou DFB*), qui est d'environ 0,6 picomètre/°C.

De plus, afin d'identifier et de corriger les éléments potentiellement problématiques, TeraXion a fabriqué un prototype alpha qui a été soumis à une série de tests environnementaux, dont un cyclage thermique de 100 cycles de moins 40 °C à plus de 85 °C, avec une rampe de 3 °C par minute et sans condensation. Le prototype alpha s'est avéré très robuste : aucune défaillance n'est survenue à la suite de ces tests et la performance optique du module est demeurée inchangée.

Bien que TeraXion ait dû interrompre le volet RF de son sous-projet avant la fabrication du module final, les excellents résultats intermédiaires obtenus pour les différentes sections du module, de même que les performances environnementales du prototype alpha, indiquent que les objectifs de performance et les gains environnementaux du projet pourront être atteints par un futur module représentatif de la version finale.

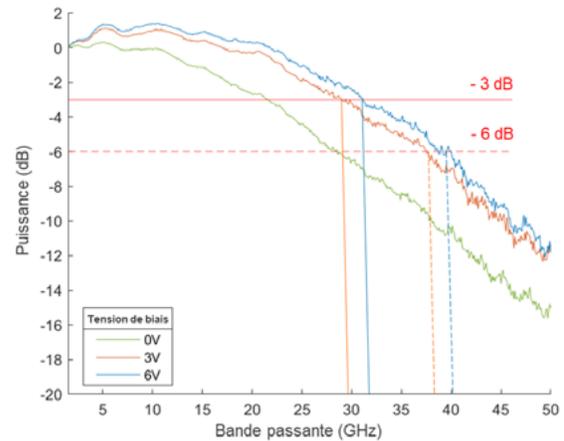
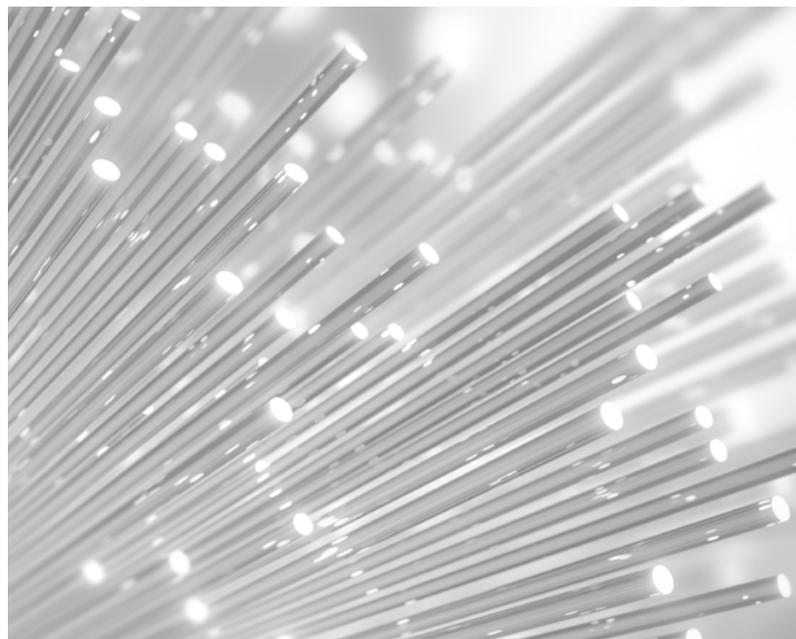


Figure 2 : Mesure de la bande passante d'un modulateur photonique sur silicium conçu par l'Université McGill (courtoisie de l'Université McGill). Le modulateur atteint la bande passante ciblée de > 40 GHz pour une tension de biais de 6 V.

SOURCE LASER MULTIFRÉQUENCE HAUTE FIABILITÉ

La source laser multifréquence réalisée durant le sous-projet génère des ondes lumineuses dont la fréquence et la phase sont contrôlées de façon très précise. Utilisée dans un gyroscope à fibre optique résonant, cette source laser permet d'améliorer significativement la mesure du parcours angulaire aléatoire et du biais de stabilité. Les puces laser à rétroaction distribuée à spectre étroit et le circuit optique en photonique sur silicium qui ont été développés permettent d'atteindre des performances optiques et une robustesse inégalée dans le format très compact requis par les applications aéroportées.



QU'EST-CE QU'UN GYROSCOPE À FIBRE OPTIQUE RÉSONANT ?

Un gyroscope à fibre optique mesure l'orientation et les changements d'orientation d'un objet. Il contient une fibre optique enroulée autour d'un axe et dans laquelle deux faisceaux lumineux sont injectés, l'un dans le sens horaire et l'autre dans le sens antihoraire. Ces deux faisceaux se déplaçant dans des directions opposées se combinent et interagissent pour former un motif d'interférence. Lorsque l'objet contenant le gyroscope tourne autour de son axe, l'effet Sagnac se produit : cet effet est causé par la différence de parcours optique entre les faisceaux lumineux se déplaçant dans des directions opposées à l'intérieur de la boucle de fibre en rotation. La mesure de cette différence indique les changements d'orientation de l'objet.

Dans un gyroscope à fibre optique résonant, la boucle de fibre est placée dans une cavité résonante, qui est constituée de coupleurs optiques disposés de manière à former une structure optique fermée. Lorsque la lumière d'un laser cohérent est injectée dans la cavité résonante, elle interfère avec la lumière déjà présente dans la cavité, créant ainsi une rétroaction optique constructive qui permet à la lumière de circuler à l'intérieur de la cavité pendant une période prolongée. La cavité résonante est utilisée pour améliorer la sensibilité du système en augmentant la longueur du parcours optique effectif de la fibre. Ceci permet donc au gyroscope à fibre optique résonant de détecter de très faibles changements d'orientation de façon précise, avec une grande sensibilité.

Durant la phase 3 de SA²GE, TeraXion a complété deux phases de prototypage sur les trois phases initialement prévues au sous-projet. Un prototype, appelé unité de qualification, a permis de valider le fonctionnement et le maintien de la performance de la source laser multifréquence sur une plage de 100 °C. TeraXion a conçu et fabriqué ce prototype pour que ses composants demeurent les plus stables possibles sur toute la gamme de température, soit intrinsèquement ou par contrôle actif de la température, tout en minimisant la consommation électrique de la source et en dissipant efficacement sa chaleur. De plus, puisque les résonances du gyroscope sur lequel la source est asservie varient avec la température, TeraXion

a implanté une stratégie de saut de résonance dynamique qui permet à la source de demeurer verrouillée en toutes conditions. Si jamais la résonance sur laquelle la source est asservie s'éloigne trop de la zone optimale, la source « saute » alors à une résonance plus rapprochée et se verrouille automatiquement sur cette nouvelle résonance. Ce processus ne prend que quelques millisecondes et s'effectue sans perturber l'opération du gyroscope. Cette unité de qualification est en opération pratiquement continue chez le client industriel de TeraXion depuis 2020, démontrant ainsi la très grande robustesse du design de TeraXion.



Figure 3 : Unités de qualification de la source laser multifréquence haute fiabilité en préparation pour être installées dans l'enceinte de cyclage en température.

La seconde phase de prototypage visait à améliorer la performance optique de la source et plus particulièrement à réduire son bruit de fréquence. Le niveau de ce bruit est directement lié à la performance du gyroscope : plus le bruit de fréquence de la source est bas, meilleure est la qualité du signal laser injecté dans le gyroscope et plus les mesures du gyroscope sont précises. L'atteinte d'un niveau de bruit de fréquence extrêmement bas pour la source a demandé des efforts soutenus, car plusieurs éléments peuvent influencer ce niveau : la qualité initiale du laser, la qualité du conditionnement du signal dans la puce photonique sur silicium (pertes, diaphonie, etc.), la qualité de l'électronique de contrôle (niveau de bruit électronique, diaphonie, etc.), etc. TeraXion a donc conçu et fabriqué tous les éléments de base de la source afin de minimiser leur contribution au bruit de fréquence et a également déployé certaines stratégies avancées pour abaisser ce bruit.

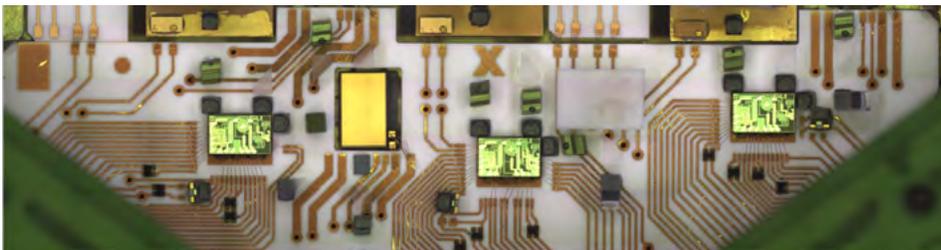


Figure 4 : Vue rapprochée du module optique de la source laser multifréquence montrant les trois puces photoniques sur silicium comportant les circuits optiques (les lasers ne sont pas visibles sur l'image). Dimension des puces : 2,4 mm x 3,9 mm.

5 mm

La figure 5(a) montre la représentation mécanique du troisième prototype de la source laser multifréquence haute fiabilité qui sera fabriqué au cours des prochains mois. Il est à noter que les circuits se retrouvant sur les trois cartes électroniques de plus petit diamètre seront ultimement transférés aux circuits intégrés spécialisés de type ASIC du gyroscope. Ainsi, la source laser multifréquence haute fidélité finale devrait être très semblable au concept présenté à la figure 5(b). Cette version finale regroupera toutes les innovations des prototypes précédents, ce qui permettra à la source d'atteindre les objectifs de performance initialement prévus pour le sous-projet.

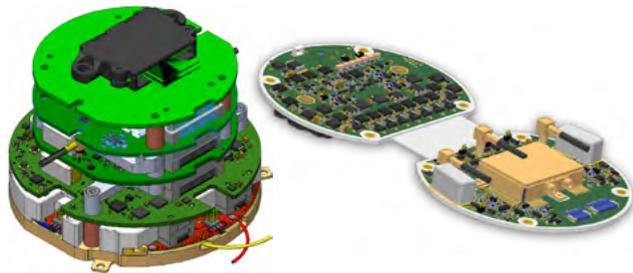


Figure 5 : (a) Représentation mécanique du troisième prototype de la source laser multifréquence haute fiabilité. Hauteur totale : 56 mm, diamètre de la base : 75 mm, diamètre de la partie supérieure : 61 mm (b) Concept de la source laser multifréquence haute fiabilité finale. Hauteur 12,5 mm, diamètre 60 mm.

GAINS TECHNOLOGIQUES CLÉS

Durant le projet, TeraXion a augmenté son expertise en conception de puces laser et de puces photoniques sur silicium, de même qu'en caractérisation, encapsulation et intégration de ces puces. Les circuits optiques sur silicium développés au cours du sous-projet regroupent sur la même puce un très grand nombre de fonctions optiques actives et passives : photodétecteurs, modulateurs de phase, atténuateurs optiques variables, résonateurs en anneau, coupleurs, guides d'onde, etc. sont combinés pour former des circuits optiques complexes, mais extrêmement compacts. L'équipe de TeraXion a concentré ses efforts sur le développement d'une banque de composants et de circuits spécialement conçus pour les besoins des applications de détection optique, ce qui est unique dans l'industrie et constitue un avantage compétitif important.

Afin de soutenir ses avancées dans le domaine de la photonique intégrée, TeraXion a également poursuivi le développement d'outils de simulation, de conception, d'équipements et de processus de caractérisation et d'assemblage compatibles avec l'intégration photonique. TeraXion a ainsi acquis des connaissances de pointe en fixation des puces sur substrat, en alignement et fixation d'éléments de micro-optique, en caractérisation optique et environnementale des modules finaux, etc. Ces outils ont permis à TeraXion de perfectionner sa compréhension globale des systèmes, d'affiner ses designs et de mieux les adapter à la réalité de l'industrie, de même que d'atteindre une plus grande efficacité dans l'assemblage et la caractérisation des modules photoniques.

COUP DE CŒUR!



Le projet SA²GE-3 a permis à TeraXion de développer une expertise unique en systèmes laser de haute précision basés sur la photonique sur silicium. Durant toute la période du sous-projet, TeraXion a obtenu des contrats substantiels reliés aux technologies développées avec le soutien de SA2GE, augmentant ainsi la compétitivité du Québec en photonique intégrée, un domaine innovant et en plein essor, et procurant des emplois de qualité à plus de 50 chercheurs, ingénieurs et technologues. D'autres ententes commerciales importantes liées à ces technologies devraient également être établies au cours des prochains mois.

AVANCÉES TECHNOLOGIQUES

TeraXion considère que l'atteinte d'un niveau de maturité technologique donné est liée à la fois à des facteurs de performance optique, donc aux résultats obtenus lors d'essais chez TeraXion et dans les instruments de ses clients, ainsi qu'à des facteurs de performance environnementaux, liés au comportement des modules sous certaines conditions d'opération. Au début du sous-projet de TeraXion, le module photonique RF et la source laser multifréquence existaient sous la forme de prototypes intermédiaires, dont la fonctionnalité avait été démontrée sous certaines conditions, mais qui n'avaient jamais été validés dans des conditions opérationnelles réelles. L'atteinte d'un niveau de maturité technologique TRL-6, soit une validation en environnement opérationnel significatif, était donc visée pour chacun des modules.

Les tests environnementaux effectués sur le prototype alpha du module RF 40 GHz haute fiabilité ont donc fait passer le module d'un niveau de maturité technologique TRL-4, soit celui d'une preuve de concept validée en laboratoire, à un niveau TRL-6 de base, soit une démonstration dans un environnement significatif.

La performance de la source laser multifréquence avait déjà été validée dans un instrument modèle du client de TeraXion lors de la phase 2 de SA²GE, ce qui constituait une démonstration de niveau TRL-5. Durant la phase 3, une démonstration du prototype de la source a été effectuée sous des conditions environnementales très près des conditions réelles d'utilisation, à des températures de moins 40 °C à plus 60 °C. La source a donc franchi avec succès un premier jalon essentiel à l'atteinte du niveau TRL-6 de base.

Bien que les configurations finales n'aient pu être validées durant le projet, les progrès démontrés à l'aide des différents prototypes indiquent que les versions finales du module photonique RF et de la source laser multifréquence devraient atteindre le niveau de maturité technologique TRL-6 visé par le projet.

MOBILISATION

TeraXion a pu compter sur la participation de plusieurs centres de recherche et PME durant la phase 3 de SA²GE, profitant ainsi de l'expertise de ses collaborateurs pour relever des défis souvent très complexes, durant une période particulièrement perturbée par la pandémie mondiale. Entre autres collaborations, le groupe du Dr David Plant de l'Université McGill a fourni un soutien important à TeraXion durant le développement du module RF haute fiabilité. En plus de concevoir le modulateur de phase à bande passante de 40 GHz qui est un élément clé du module, le groupe du Dr Plant s'est chargé de la caractérisation complète du prototype alpha avant et après les tests environnementaux, fournissant ainsi des intrants importants à TeraXion pour la conception du module RF et l'atteinte des objectifs de performance et de gains environnementaux du projet.

TeraXion tient à souligner les contributions essentielles de deux de ses collaborateurs mobilisés qui ont contribué à réduire significativement le niveau de bruit de fréquence de la source : celle de l'INO, qui a réalisé un système de filtrage optique du bruit, ainsi que celle de la PME Six Métriques, qui a développé un système de suppression de modulation qui élimine efficacement certains bruits résiduels affectant la performance de la source.

TeraXion a récemment créé un nouveau groupe de recherche et développement appelé Lasers et photonique intégrée dédié à la conception, au prototypage et à la fabrication en petite série de produits basés sur la photonique intégrée. La mission de ce groupe, composé de 23 chercheurs, ingénieurs et technologues hautement qualifiés, est de développer les blocs technologiques nécessaires aux produits de photonique intégrée futurs de TeraXion. Si on y ajoute les ressources provenant d'autres équipes de l'entreprise, c'est environ 50 personnes qui, de près ou de loin, ont été impliquées dans la réalisation du sous-projet de TeraXion, de même que dans des projets reliés aux technologies développées durant la phase 3 de SA²GE. De plus, TeraXion accueille chaque année de nombreux stagiaires provenant d'institutions d'enseignement québécoises : en 2022, 20 stagiaires provenant du niveau secondaire jusqu'au niveau doctoral universitaire ont été accueillis chez TeraXion et ont pu profiter d'un accès privilégié aux technologies d'avant-garde développées par l'entreprise.

CONTRIBUTION À LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GES ET AU DÉVELOPPEMENT DURABLE

L'objectif environnemental principal de TeraXion était de réduire le poids de deux systèmes aéroportés en remplaçant les technologies existantes par des modules compacts et légers basés sur la micro-optique et la photonique intégrée. Bien que les modules photoniques haute fiabilité finaux prévus au projet n'aient pas pu être fabriqués à cause des délais et problèmes d'approvisionnement occasionnés par la pandémie, TeraXion a pu démontrer des progrès significatifs vers l'atteinte de ses objectifs de réduction des émissions de GES. Le remplacement des technologies actuelles par les modules

photoniques de TeraXion dans un avion commercial de type CRJ900 réduira son poids d'environ 70 kg, tout en consommant moins de ressources. À lui seul, le remplacement des câbles de cuivre par des fibres optiques lors de l'utilisation du module photonique RF générera une réduction de poids de plus de 30 kg. Une estimation de la réduction des impacts environnementaux basée sur l'utilisation des modules photoniques finaux, réalisée sur 10 ans en considérant que 400 avions seront équipés de ces technologies, montre une réduction potentielle de 16 489 tonnes de CO₂ équivalent sur l'ensemble du cycle de vie. L'utilisation des modules photoniques de TeraXion aura donc un impact réel sur la réduction des émissions de GES en aéronautique et contribuera ainsi à une économie plus durable.

EN CONCLUSION

Grâce à l'émergence des circuits intégrés photoniques, TeraXion met à profit ses connaissances acquises durant le projet mobilisateur SA²GE pour développer de nouveaux produits visant le marché de la détection optique, entre autres pour les véhicules autonomes et pour les systèmes de sécurité de périmètre. Deux nouveaux produits laser basés sur les technologies développées durant le projet sont présentement en voie d'être commercialisés par TeraXion : un module laser à longueur d'onde ultra-stable sur une plage de température de moins 40 °C à 70 °C, qui découle directement des travaux effectués pour le module RF haute fiabilité, ainsi qu'un module laser à spectre étroit basé sur la puce laser développée pour la source laser multifréquence. Ces deux produits suscitent déjà un très grand intérêt de la part de plusieurs clients majeurs ouvrant dans les domaines des communications et de la détection optique.

De plus, un projet de TeraXion a récemment été sélectionné dans le cadre du volet 3 du programme Projets collaboratifs et mobilisateurs sur le développement des technologies des transports de demain. Ce projet, réalisé en collaboration avec Bell Textron Canada Limitée, consiste à démontrer les capacités technologiques de détection d'un prototype de LiDAR FMCW adapté pour les besoins des vols de véhicules à décollage vertical, notamment pour la détection et l'évitement de fils électriques et haubans que rencontrent les hélicoptères lors des vols à basse altitude. Le prototype de lidar fabriqué par TeraXion sera entièrement basé sur la photonique intégrée.

La société américaine indie Semiconductor a fait l'acquisition de TeraXion à l'automne 2021. indie Semiconductor est un fournisseur de solutions innovantes dans le domaine des systèmes d'aide à la conduite et des véhicules autonomes. Les technologies avancées de laser et photonique intégrée de TeraXion, développées grâce au soutien de SA²GE, sont présentement adaptées et intégrées aux futures plateformes automobiles de indie Semiconductor. L'implication de TeraXion dans des domaines autres que l'automobile est fortement encouragée par indie Semiconductor : TeraXion continuera donc à développer et offrir ces technologies dans des secteurs de pointe comme la détection optique, les communications quantiques et l'aérospatiale.

BILAN

ENVIRONNEMENTAL

RAPPEL DU CONTEXTE

L'un des principaux objectifs de SA²GE est de développer des technologies ayant une faible empreinte environnementale. Ainsi, les sous-projets de SA²GE-3 visent tous des objectifs de réduction d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et cette réduction doit être validée par un organisme tiers accrédité, conforme aux principes de la norme ISO 14064-2.

NORME ISO 14064-2

Cette norme internationale précise les spécifications et les lignes directrices d'un projet pour la quantification, la surveillance et la rédaction de rapports sur les activités de ce projet visant à réduire les émissions de GES ou à accroître leur suppression.

Lors de la troisième phase des projets SA²GE, quatre indicateurs supplémentaires ont été ajoutés à l'analyse, soit :

- l'indice de potentiel de stress hydrique, qui montre comment la rareté de l'eau varie selon les régions du monde;
- le potentiel d'acidification, qui montre le potentiel des composés à provoquer des pluies acides;
- le potentiel d'eutrophisation, qui montre les effets de l'accès aux nutriments dans les masses d'eau;
- le potentiel de création d'ozone photochimique, qui montre le potentiel des composés à réagir et à produire de l'ozone au niveau du sol.

Ces indicateurs permettent de mieux comprendre comment les projets peuvent affecter l'environnement et la santé humaine, deux aspects importants du développement durable.

PRINCIPAUX GAINS ENVIRONNEMENTAUX VISÉS PAR LES TECHNOLOGIES DÉVELOPPÉES

Bell Textron Canada souhaite démontrer les avantages environnementaux en comparant un drone cargo hybride à un hélicoptère avec un moteur à combustion conventionnel. Le drone cargo hybride offre une réduction partielle de la consommation de carburant grâce à l'utilisation d'une batterie pendant l'étape d'opération. Le système de propulsion pour le drone cargo hybride remplace un moteur à combustion conventionnel par un moteur plus petit ainsi qu'une batterie, des moteurs électriques et un générateur, ces éléments permettant de réduire la consommation de carburant et donc des émissions de gaz à effet de serre (GES). L'analyse a également porté sur l'extraction de matières premières et la fabrication des composants de propulsion des deux aéronefs.

L'aile avec des commandes de vol multifonctionnelles, développée par Bombardier, introduit une synchronisation automatique des mouvements des volets et des déporteurs. L'intégration

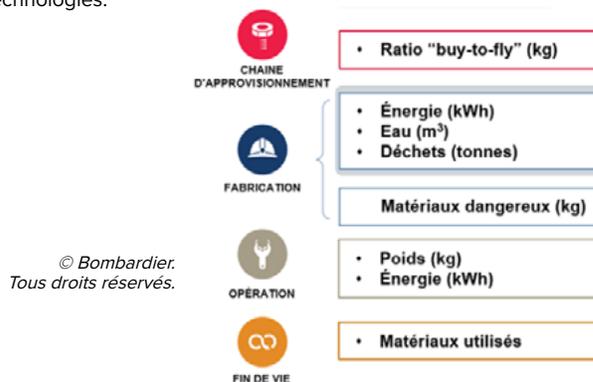
fonctionnelle de ces deux systèmes de commandes de vol conduit à une configuration plus efficace et plus légère de l'aile et permet l'introduction de nouvelles fonctions, entre autres pour alléger les charges aérodynamiques sur l'aile, en ayant des commandes différentielles entre les volets intérieurs et extérieurs. Il en résulte une réduction significative du poids total de l'aéronef et de la consommation de carburant et donc des émissions de gaz à effet de serre (GES).

Quant à CMC, dans le cadre de son programme d'éconavigation, l'entreprise remplace un système de gestion de vol hébergé sur une plateforme informatique spécialisée (unité remplaçable en ligne) par une application logicielle (fonction de gestion de vol) hébergée sur une plateforme de calcul de type avionique modulaire intégrée, dotée de plusieurs fonctions. Cela permet de réduire le poids en éliminant les unités remplaçables en ligne dédiées au système de gestion de vol et le câblage associé à cette unité remplaçable en ligne. Cette réduction de poids entraîne une réduction de la consommation de carburant et donc des émissions de gaz à effet de serre (GES).

Pour ce qui est de TeraXion, la PME a développé deux technologies qui pourraient apporter des avantages considérables au niveau des impacts environnementaux des aéronefs tout au long de leur cycle de vie. L'implémentation d'un module photonique radiofréquence pour les systèmes de communications aéroportés et d'une source laser multifréquence intégrée pour un système de navigation, permettrait principalement des gains de poids qui se traduiraient directement en réduction de consommation de carburant des aéronefs.

GRANDES LIGNES DE LA MÉTHODOLOGIE UTILISÉE

L'équipe d'écoconception de Bombardier Aviation a été mandatée par le comité des gains environnementaux de SA²GE pour établir une méthodologie adaptée au projet et définir des indicateurs clés d'ingénierie permettant d'évaluer l'impact environnemental des technologies. Cette méthodologie, fondée sur l'analyse environnementale du cycle de vie (LCA), permet d'évaluer les gains à chacune des étapes du cycle de vie des technologies, comme l'extraction de matières premières, la fabrication, l'exploitation, et la fin de vie. Des indicateurs de performance applicables à chacune de ces étapes ont été définis. L'objectif final de l'analyse environnementale étant de présenter les gains environnementaux cumulatives attendus à la dixième année d'implémentation des technologies.



COMITÉ DES GAINS ENVIRONNEMENTAUX

Le comité, dont chaque partenaire industriel est membre, a été créé pour démontrer les gains environnementaux du projet mobilisateur SA²GE.

Il a comme mandat de :

- Établir une base de référence selon la norme ISO 14064;
- Partager au sein de ses membres les méthodes d'analyse employées et contribuer à leur évolution;
- Soutenir les travaux individuels des partenaires dirigeant un sous-projet et contribuer à la qualité des livrables;
- Soutenir l'organisme dans la production de ses propres livrables;
- Contribuer à l'émergence d'une vision environnementale pour le secteur aéronautique;
- Contribuer au rayonnement du projet SA²GE.

Dans la dernière année, le comité s'est réuni trois fois pour discuter de l'avancement des sous-projets.

DES GAINS TANGIBLES

L'analyse qui a été effectuée est plus poussée que celle menée dans le cadre de la phase deux de SA²GE. En effet, le comité a mandaté l'équipe d'écoconception chez Bombardier afin qu'elle développe une méthodologie adaptée ayant comme but de mettre en évidence les gains environnementaux apportés par les nouvelles technologies des partenaires industriels.

Le concept de cycle de vie permet de faire de meilleurs choix de conception puisqu'il dévoile le portrait global des incidences environnementales, tout au long du cycle de vie. Une analyse comparative a été faite entre la somme des gains environnementaux des sous-projets des partenaires et différents indicateurs.

L'ensemble des projets de la troisième phase de SA²GE ont démontré l'importance de tenir compte des aspects environnementaux dès la conception des produits, des technologies ou des services.

Économie d'énergie

En matière d'énergie, **la réduction potentielle totale de la consommation d'énergie attribuable aux projets s'élève à 8 269 TJ d'énergie, soit l'équivalent de la consommation d'énergie de 75 172 maisons individuelles par année au Canada.**

Les données statistiques d'une maison unifamiliale au Canada ont été utilisées pour faire la comparaison. Cette consommation a été de 110 GJ/maison individuelle en 2019¹.

Consommation d'eau

La réduction potentielle totale de la consommation d'eau attribuable aux quatre sous-projets de SA²GE-3 s'élève à 44 736 KT d'eau, soit l'équivalent de la consommation en eau de 570 071 Canadiens par an.

Les données statistiques de consommation moyenne d'eau d'un Canadien à la maison ont été utilisées pour faire la comparaison. Cette consommation a été de 215 litres par habitant par jour², ce qui équivaut à 78 mètres cubes par habitant par année en 2019, avec une population de 37,6 millions d'habitants.

Stress hydrique

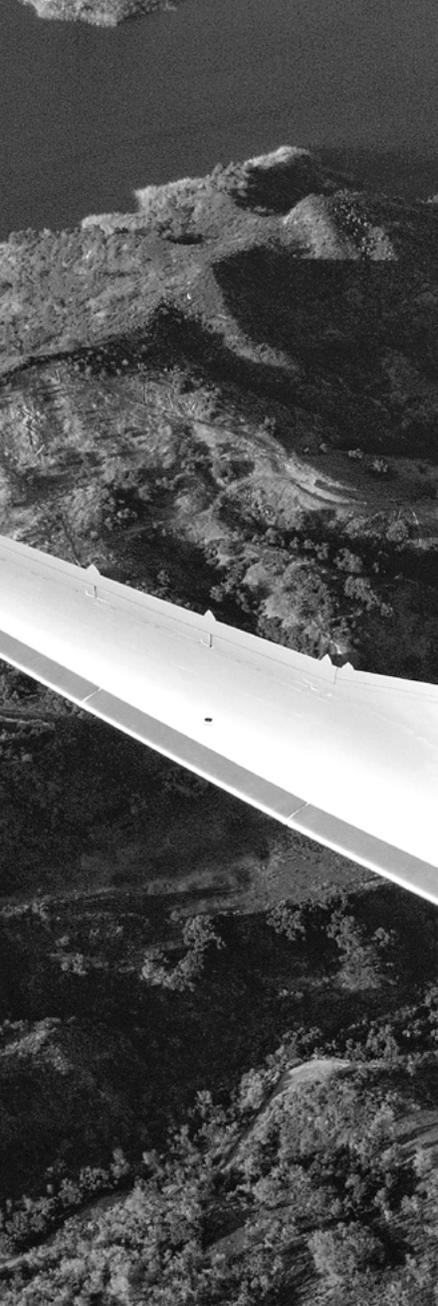
Le potentiel de stress hydrique est différent de la consommation globale d'eau, car cet indicateur prend en compte la disponibilité des ressources en eau dans une région précise.

La réduction potentielle totale de stress hydrique attribuable aux des projets de SA²GE-3 s'élèvent à 33 161 KT d'eau, soit l'équivalent de la consommation en eau de 422 565 Canadiens par an.

¹ Statistique Canada. Tableau 25-10-0061-01 Consommation d'énergie des ménages, par type de logement, Canada et les provinces

² Statistique Canada. Utilisation de l'eau potable au Canada, Litres par personne par jour





Réduction du CO₂

L'impact CO₂ équivalent alloué depuis l'extraction du pétrole jusqu'aux émissions en vol du combustible d'aviation consommé par un aéronef régional monocouloir pour une mission type a été utilisée comme référence. Cette consommation est de 4 826 kg de carburant pour une mission type de 1 852 km (1 000 nm) et 125 passagers³. Le facteur d'émission utilisé est 3,8092 kg équivalents CO₂ par kilogramme de carburant. Ce facteur couvre l'ensemble du cycle de vie, c'est-à-dire les émissions reliées à l'extraction et la consommation de carburant.

La réduction potentielle totale des émissions CO₂ équivalent attribuable à SA²GE-3 s'élève à 532 KtCO₂-eq, soit l'équivalent de 28 929 vols évités.

Pluies acides

Le potentiel d'acidification est la capacité d'une substance à contribuer à l'acidification de l'environnement. Lorsque des composés acides sont libérés dans l'air, ils peuvent réagir pour former des pluies acides qui peuvent avoir des effets négatifs sur la vie aquatique, la biodiversité et la santé humaine. Le potentiel d'acidification est mesuré en dioxyde de soufre (SO₂). Les activités minières, les centrales électriques et les usines de pâtes et papiers sont les principaux responsables des émissions de dioxyde de soufre au Canada. 87 664 tonnes de SO₂ ont été rejetées par le Québec en 2019⁴, ce qui équivaut à 0,010 33 tonne de SO₂ par personne.

La réduction potentielle totale attribuable aux projets s'élève à 411 tonnes SO₂ équivalent, soit l'équivalent de la quantité allouée de SO₂ pour environ 39 800 personnes par année au Québec.

Prolifération des algues : désoxygénation des écosystèmes aquatiques

Le potentiel d'eutrophisation est la capacité d'une substance à contribuer à la désoxygénation des écosystèmes aquatiques lorsque des nutriments excessifs pénètrent dans les masses d'eau et stimulent la croissance des algues. Cette croissance excessive peut entraîner une prolifération d'algues qui peut provoquer un appauvrissement en oxygène dans les masses d'eau et nuire à la vie aquatique. Le potentiel d'eutrophisation est mesuré en équivalent phosphate.

La charge annuelle estimée de phosphore dans le lac Érié en 2020 était de 9 336 tonnes⁵, ce qui équivaut à 28 008 tonnes de phosphate. Environ 11 millions de personnes vivent dans le bassin versant du lac Érié⁶, ce qui représente une charge de 0,0025 tonne de phosphate par habitant.

La réduction potentielle totale attribuable aux projets s'élève à 50 tonnes d'équivalent phosphate, soit l'équivalent de la charge de phosphate de 19 829 habitants du bassin versant du lac Érié.

Ozone photochimique

Le potentiel de création d'ozone photochimique est la mesure de la contribution des composés organiques volatils et d'autres polluants à la formation d'ozone troposphérique en présence de lumière solaire. Cet indicateur est mesuré en équivalent éthène (éthylène), qui peut être produit par la combustion de composés organiques dans le cadre de processus naturels et d'activités humaines relatives. L'ozone troposphérique peut causer divers problèmes de santé et d'environnement, tels que des problèmes respiratoires et des dommages à la végétation.

On estime que **1 700 tonnes d'éthylène** par an sont émises dans l'atmosphère par les incendies de forêt en Alberta [11], ⁷ ce qui équivaut à **4,66 tonnes d'éthylène par jour.**

La réduction potentielle totale attribuable aux projets s'élève à 52 tonnes d'éthylène équivalent, soit l'équivalent de l'éthylène libéré par 11 jours d'incendies de forêt en Alberta.

³ Modèle d'avion utilisé pour l'analyse - Airbus A220-100

⁴ Environnement Changement Climatique Canada.

<https://www.canada.ca/fr/environnement-changementclimatique/services/inventaire-national-rejets-polluants/outils-ressources-donnees/dioxyde-de-soufre.html>

⁵ Environnement Changement Climatique Canada.

<https://www.canada.ca/fr/environnement-changementclimatique/services/indicateurs-environnementaux/charge-phosphore-lac-erie.html>

⁶ Environnement Changement Climatique Canada.

<https://www.canada.ca/en/environnement-climatechange/services/great-lakes-protection/maps/lake-erie-drainage-basin.html>

⁷ Assessment Report on Ethylene for Developing Ambient Air Quality Objectives, 2003.

<https://open.alberta.ca/dataset/5eed2f22-0afd-4c78-a88b-b68f31a9101e/resource/f3d556c7-150d-4ee8-9d19-089aa4e801bd/download/2003-assessmentreport-ethylene-feb2003.pdf>

CONCLUSION

Les résultats des activités menées dans le cadre de la phase 3 de SA²GE représentent une contribution considérable et pertinente pour l'industrie aéronautique québécoise. Les objectifs du projet ont été globalement atteints malgré la pandémie — qui s'est avérée très difficile pour le secteur aéronautique — à laquelle se sont greffés d'autres défis, telles les perturbations des chaînes d'approvisionnement et la pénurie de personnel qualifié. Ces éléments ont eu un impact important sur le déroulement des travaux qui ont débuté en 2018 et qui devaient se terminer en mars 2021. Un avenant a été conclu avec le MEIE afin de prolonger les travaux jusqu'en 2023 et permettre aux partenaires de revoir leur planification.

SA²GE-3 visait à accélérer l'innovation et son intégration dans des solutions conférant un avantage concurrentiel aux entreprises québécoises tout en suscitant un maximum de retombées économiques pour le Québec, et ce, grâce au développement de nouvelles technologies favorisant la réduction de l'empreinte environnementale. Ce volet constitue un point de passage obligé pour favoriser la pérennité de l'industrie aéronautique québécoise sur l'échiquier mondial.

Les partenaires du projet devaient également consacrer 5 % de leurs dépenses admissibles à mobiliser des PME, et des centres de recherche et des universités. Ceci a permis de créer un environnement collaboratif dans lequel il a été possible de conduire de nombreuses activités de recherche et de maturation technologique impliquant des acteurs industriels et universitaires. De ce fait, ces efforts ont permis à plusieurs PME québécoises de développer des technologies qui leur permettront de détenir un avantage concurrentiel dans leur marché et de mieux se positionner dans leur domaine respectif.

Bell Textron a acquis un bagage de connaissances pour guider sa stratégie d'électrification, malgré le défi que cela représente toujours pour l'industrie. Dans le cadre de son projet POUSSÉE, Bell a étudié et développé des technologies visant l'électrification des aéronefs à décollage vertical. L'entreprise a analysé plusieurs configurations de véhicules dans l'optique de réduire la quantité de GES émis, que ce soit par une électrification complète ou par une hybridation.

De plus, les données et apprentissages générés dans le cadre de SA²GE-3 ont permis à Bell de bien comprendre les avantages et les limites des soufflantes carénées. Bien qu'elles aient un avantage pour des phases de décollage et de vol en mode hélicoptère, plusieurs phénomènes aérodynamiques rendent la technologie inefficace énergétiquement pour des vols de croisière à grande vitesse.

Chez Bombardier, le projet AILE a permis de développer la technologie de l'aile à commandes de vol multifonctionnelles qui pourra être choisie pour de prochains développements de produits de l'entreprise. Le projet a également permis de poursuivre la transition vers une aviation carboneutre en 2050. Il a établi la fondation pour les prochains grands développements technologiques qui nécessiteront des bancs d'essai de plus en plus complexes. Ainsi, en 2022, Bombardier s'est engagé à développer l'ÉcoJet et à consacrer plus de 50 % de sa R-D d'ici 2025 sur des avions plus respectueux de l'environnement.

SA²GE-3 a également permis de créer et de renforcer plusieurs collaborations clés pour Bombardier. Ces collaborations sont nécessaires aux développements technologiques qui seront déployés dans les prochaines générations d'avions d'affaires et qui favoriseront l'atteinte des cibles de l'aviation en matière d'environnement.

Du côté de CMC, SA²GE-3 a été déterminant pour le développement de la nouvelle génération de système de gestion de vol, projet caractérisé par un haut niveau de complexité et de risque. Ce système de gestion, maintenant devenu une application logicielle pouvant être hébergée sur un ordinateur multifonction, a accentué la portée concurrentielle de CMC pour diminuer l'équipement physique à installer dans les avions, économisant ainsi de l'espace et diminuant le poids de l'appareil. Grâce à des normes adoptées par l'industrie pour favoriser et standardiser la portabilité d'applications logicielles d'avionique, CMC peut déjà transposer cette application d'une plateforme à une autre.

Quant à TeraXion, SA²GE-3 a permis au partenaire de développer une expertise unique en systèmes laser et en circuits optiques, de haute précision, basés sur la photonique sur silicium. Durant le projet, TeraXion a obtenu des contrats substantiels liés aux technologies développées avec le soutien de SA²GE, augmentant ainsi la compétitivité du Québec en photonique intégrée, un domaine innovant et en plein essor. Cette expertise unique a procuré des emplois de qualité à plus de 50 chercheurs, ingénieurs et technologues. D'autres ententes commerciales importantes liées à ces technologies devraient également être établies au cours des prochains mois.

Le projet mobilisateur SA²GE-3 a favorisé l'innovation, stimulé l'économie du Québec et appuyé une industrie aéronautique plus verte, davantage en mesure de contribuer à réduire l'empreinte environnementale de l'aviation.



673, rue Saint-Germain
Saint-Laurent (Québec) H4L 3R6
Tél. : 514 418-0123
info@sa2ge.org
www.sa2ge.org

Avec la participation financière de

Québec 