

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

IMPACT DES DONNÉES D'AVIONS AMDAR DANS LE NORD CANADIEN
SUR LA QUALITÉ DE L'ANALYSE ET DES PRÉVISIONS

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ATMOSPHÈRE

PAR

PRISCILLA BUSSEAU

AVRIL 2022

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.04-2020). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier sincèrement mon directeur de maîtrise, Pierre Gauthier, d'avoir accepté de superviser ce projet en partenariat avec Environnement et Changement climatique Canada (ECCC), et le rendant possible. Merci pour votre encadrement, votre disponibilité et vos judicieux conseils au cours des deux dernières années.

Merci à Ping Du au Centre Météorologique du Canada (CMC) pour son aide et sa disponibilité lors de la conception des expériences d'assimilation. Merci également à Judy St-James (CMC) et Yulia Zaitseva (CMC) pour leur aide et leur temps. Toutes ces rencontres à distance m'ont été d'une grande aide et ont rendu le travail à distance plus agréable.

Je tiens également à remercier Philippe Carphin (CMC) et Katja Winger (UQAM) pour leur aide précieuse dans le domaine informatique, spécialement en ces temps de travail à distance.

Merci à toutes celles et ceux qui m'ont aidée de près ou de loin dans la réalisation de ce projet.

Enfin, merci à ma famille, mes amis et spécialement à mon amoureux, Olivier. Merci pour ta présence, ton écoute et tes encouragements qui m'ont permis de persévérer et d'atteindre mes objectifs.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	V
RÉSUMÉ.....	X
CHAPITRE I	
INTRODUCTION	11
CHAPITRE II	
MÉTHODOLOGIE	
2.1 Assimilation de données	16
2.2 Couverture des données	18
2.3 Type de données	19
2.4 Contrôle de qualité.....	21
2.5 Régimes météorologiques	23
2.6 Moyenne et écart-type des incréments d'analyse	27
CHAPITRE III	
IMPACT DES DONNÉES D'AVIONS SUR LA QUALITÉ DE L'ANALYSE ET DES PRÉVISIONS	
3.1 Objectif et cadre expérimental	33
3.3 Présentation du cas #1 : 13 février 2020.....	38
3.3.1 Expérience en isolation	39
3.3.2 Cycle FLYHT et retrait des données FLYHT	42
3.3.3 Cycle contrôle et ajout des données FLYHT	45
3.3.4 Impact des données d'avions sur les prévisions.....	49
3.4 Présentation du cas #2 : 5 mars 2020.....	51
3.4.1 Impact des données d'avions sur les prévisions.....	52
3.5 Présentation du cas #3 : 14 mars 2020.....	54
3.5.1 Impact des données d'avions sur les prévisions.....	55

CONCLUSION 58
RÉFÉRENCES 62

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
Figure 2.1 - Schéma représentant un cycle d'assimilation de données.	18
Figure 2.2 - Carte de couverture des données d'avions FLYHT en bleu pour le mois de février (panneau gauche) et pour le mois de mars 2020 (panneau de droite). Données récoltées de la surface jusqu'à 100 hPa, totalisant 51960 rapports de données pour le mois de février et 54598 rapports de données pour le mois de mars. Cartes extraites du site interne d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). Les points rouges correspondent aux aéroports où les compagnies canadiennes y atterrissent ou y décollent.	19
Figure 2.3 - Schéma représentant le transfert des données partant du système de communication AFIRS (Automated Flight Information Reporting System) pour se rendre au sol, à l'aide du réseau satellite Iridium.	20
Figure 2.4 - Contrôle de qualité de données de température des données AMDAR du 12 octobre 2020 au 6 novembre 2020 pour les niveaux atmosphériques de 100 à 300 hPa. Les courbes rouges correspondent aux écarts à l'ébauche (innovations) et celles en bleu aux écarts entre les observations et l'analyse ($y - H(xa)$). Dans les cas, les courbes avec un marqueur • correspondent au biais alors que les traits pleins correspondent à l'écart-type.	22
Figure 2.5 - Diagramme Hovmöller pour le mois de février 2020 pour la variable VV (vents nord-sud) à 250 hPa, moyennés entre 40 et 60 degrés nord de latitude, et à l'ensemble du globe en longitude.	24
Figure 2.6 - Carte de l'hémisphère Nord où sont présentées les hauteurs de 500 hPa en dam (échelle de couleurs), ainsi que la pression moyenne au niveau de la mer en hPa (lignes pleines noires). Analyse valide le 4 février 2020 à 00Z du modèle SGPD. Données fournies par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) – http://meteocentre.com/	25
Figure 2.7 - Diagramme Hovmöller pour le mois de mars 2020 pour la variable VV (vents nord-sud) à 250 hPa, moyennés entre 40 et 60 degrés nord de latitude, et à l'ensemble du globe en longitude.	26

- Figure 2.8 - Moyenne des incréments d'analyse pour le système opérationnel SRPD (panneau gauche). Moyenne des incréments d'analyse pour l'expérience comprenant les données des onze avions qui ont couvert le Nord canadien (panneau de droite). Moyenne pour tout le mois de février 2020 avec des données aux 6h pour la variable UU (vents est-ouest en noeuds) à 250 hPa. 28
- Figure 2.9 – Différence des moyennes (Expérience - Opérationnel) des incréments d'analyse du système opérationnel et de l'expérience (comprenant les données des onze avions qui ont couvert le Nord canadien). Moyennes pour tout le mois de février 2020 avec des données aux 6h pour la variable UU (vents est-ouest en noeuds) à 250 hPa. 29
- Figure 2.10 – Différence des écart-types (Expérience - Opérationnel) des incréments d'analyse du système opérationnel et de l'expérience (comprenant les données des onze avions qui ont couvert le Nord canadien). Moyennes pour tout le mois de février 2020 avec des données aux 6h pour la variable UU (vents est-ouest en noeuds) à 250 hPa. 30
- Figure 2.11 - Carte des hauteurs de 500 hPa (échelle de couleurs) et d'épaisseur de 1000-500 hPa en dam (lignes pointillées blanches), ainsi que la pression moyenne au niveau de la mer en hPa (lignes pleines noires). Analyse valide le 13 février 2020 à 00Z du modèle SGPD. Données fournies par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) – <http://meteocentre.com/> 31
- Figure 2.12 - Carte de couverture des données d'avions FLYHT en bleu pour le 13 février 2020, données récoltées de la surface jusqu'à 100 hPa. Données extraites du site interne d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). Les points rouges correspondent aux aéroports où les compagnies canadiennes y atterrissent ou y décollent. 32
- Figure 3.1 - Changement relatif de l'erreur RMS (*Root Mean Square*). Ici, on s'intéresse au changement relatif de l'erreur RMS des prévisions en altitude, calculée en fonction des vents pour la période à l'étude, soit du 1^{er} février au 31 mars 2020. Les observations utilisées pour calculer l'erreur RMS sont celles du système opérationnel *RDPS*, en plus des observations FLYHT. On compare le contrôle (bleu) et l'expérience avec les données des 11 avions FLYHT (rouge) pour la

composante zonale du vent. Les résultats sont présentés de l'analyse (0h) jusqu'à la prévision 48h (toutes les 6h) entre la surface et 100 hPa pour 120 cas. La charte des couleurs indique le score de l'erreur RMS, alors que la signification statistique est indiquée lorsqu'elle est supérieure à 90%. Les nuances de rouge (bleu) montrent que l'erreur RMS de l'expérience incluant les 11 avions FLYHT (contrôle) est inférieure à celui de l'expérience contrôle. (source : Zaitseva et al., 2020)..... 36

Figure 3.2 - Comme présenté pour la figure 3.1, mais pour les vents méridionaux..... 37

Figure 3.3 - Panneau gauche : Carte de couverture des données d'avions FLYHT en bleu pour le 13 février 2020, données récoltées de la surface jusqu'à 100 hPa. Données extraites du site interne d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). Les points rouges correspondent aux aéroports où les compagnies canadiennes y atterrissent ou y décollent. Panneau de droite : Carte des hauteurs de 500 hPa (échelle de couleurs) et d'épaisseur de 1000-500 hPa en dam (lignes pointillées blanches), ainsi que la pression moyenne au niveau de la mer en hPa (lignes pleines noires). Analyse valide le 13 février 2020 à 12Z du modèle SGPD. Données fournies par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) – <http://meteocentre.com/> 38

Figure 3.4 - Carte de couverture des données d'avions FLYHT en bleu pour le 13 février 2020 à 12 UTC. Toutes les données FLYHT disponibles entre 9 UTC et 15 UTC pour le 13 février 2020, de la surface jusqu'à 100 hPa. Les points rouges correspondent aux aéroports où les compagnies canadiennes y atterrissent ou y décollent. 39

Figure 3.5 – Carte des incréments d'analyse de l'expérience d'assimilation en isolation au niveau 0.249151 en coordonnées hybrides, équivalent à environ 250 hPa, pour la variable de température (TT), pour le 13 février 2020 à 12Z. 40

Figure 3.6 – Coupe verticale pour la région s'étalant de l'Alberta au territoire du Yukon, carte de la région présentée dans le coin supérieur droit de la figure. Incréments d'analyse de l'expérience d'assimilation en isolation en coordonnées hybrides, faire $\times 10^3$ pour trouver l'équivalence en hPa, pour la variable de température (TT), avec un facteur de 10^2 sur les données présentées en °C, pour le 13 février 2020 à 12Z. Les niveaux verticaux sont présentés à gauche alors que la charte des couleurs des données est présentée à droite. 41

- Figure 3.7 – Carte de la différence des incréments d’analyse entre le cycle FLYHT (incluant toutes les données d’observation supplémentaires) et une expérience où les nouvelles données d’avions ont été retirée (FLYHT – FLYHTMinus), pour la variable température en °C à 0,249151 en coordonnées hybrides, équivalent à environ 250 hPa. . 43
- Figure 3.8 – Soustraction des incréments d’analyse de température entre le cycle FLYHT et FLYHTMinus (FLYHT – FLYHTMinus), correspondant géographiquement à l’aéroport de Fort McMurray. Variable de température (°C), en coordonnées hybrides (axe des ordonnées), pour le 13 février 2020 à 12Z. 44
- Figure 3.9 – Ligne bleue : Soustraction des incréments d’analyse entre le cycle contrôle (incluant toutes les données d’observation sauf les données d’avions FLYHT) et une expérience où les nouvelles données d’avions ont été ajoutées (CTLPlus – CTL), correspondant géographiquement à l’aéroport de Fort McMurray. Variable de température (°C) en coordonnées hybrides (axe des ordonnées), pour le 13 février 2020 à 12Z. Ligne noire : Soustraction des incréments d’analyse de température entre le cycle FLYHT (incluant toutes les données d’observation supplémentaires) et une expérience où les nouvelles données d’avions ont été retirée (FLYHT – FLYHTMinus), correspondant géographiquement à l’aéroport de Fort McMurray. Variable de température (°C), en coordonnées hybrides (axe des ordonnées), pour le 13 février 2020 à 12Z. 46
- Figure 3.10 – Impact cumulatif net calculé par la différence des incréments d’analyse du cycle FLYHT et du cycle contrôle (FLYHT - CTL) pour les niveaux hybrides énoncés et la variable de température (°C). 48
- Figure 3.11 – Impact des données d’avions FLYHT dans le Nord canadien sur les prévisions à partir de l’heure de validité 18Z du 13 février 2020 jusqu’au 14 février 9Z pour la variable des vents est-ouest (nœuds). Soustraction entre l’expérience de référence FLYHT et cette même expérience où les données d’avions FLYHT ont été retirées pour en faire ressortir les différences. 50
- Figure 3.12 - Panneau gauche : Carte de couverture des données d’avions FLYHT en bleu pour le 5 mars 2020, données récoltées de la surface jusqu’à 100 hPa. Données extraites du site interne d’Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). Les points rouges correspondent aux aéroports où les compagnies canadiennes y atterrissent ou y décollent. Panneau de droite : Carte des hauteurs de 500 hPa (échelle de couleurs) et d’épaisseur de 1000-500 hPa en

dam (lignes pointillées blanches), ainsi que la pression moyenne au niveau de la mer en hPa (lignes pleines noires). Analyse valide le 5 mars 2020 à 12Z du modèle SGPD. Données fournies par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) – <http://meteocentre.com/> 51

Figure 3.13 - Impact des données d'avions FLYHT dans le Nord canadien sur les prévisions à partir de l'heure de validité 18Z du 5 mars 2020 jusqu'au 6 mars 9Z pour la variable des vents est-ouest (nœuds). Soustraction entre l'expérience de référence FLYHT et cette même expérience où les données d'avions FLYHT ont été retirées pour en faire ressortir les différences. 53

Figure 3.14 - Panneau gauche : Carte de couverture des données d'avions FLYHT en bleu pour le 14 mars 2020, données récoltées de la surface jusqu'à 100 hPa. Données extraites du site interne d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). Les points rouges correspondent aux aéroports où les compagnies canadiennes y atterrissent ou y décollent. Panneau de droite : Carte des hauteurs de 500 hPa (échelle de couleurs) et d'épaisseur de 1000-500 hPa en dam (lignes pointillées blanches), ainsi que la pression moyenne au niveau de la mer en hPa (lignes pleines noires). Analyse valide le 14 mars 2020 à 12Z du modèle SGPD. Données fournies par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) – <http://meteocentre.com/> 54

Figure 3.15 - Impact des données d'avions FLYHT dans le Nord canadien sur les prévisions à partir de l'heure de validité 18Z du 14 mars 2020 jusqu'au 16 mars 6Z pour la variable des vents est-ouest (nœuds). Soustraction entre l'expérience de référence FLYHT et cette même expérience où les données d'avions FLYHT ont été retirées pour en faire ressortir les différences. 56

Figure 3.16 - Carte des hauteurs de 500 hPa (échelle de couleurs) et d'épaisseur de 1000-500 hPa en dam (lignes pointillées blanches), ainsi que la pression moyenne au niveau de la mer en hPa (lignes pleines noires). Analyse valide le 16 mars 2020 à 0Z du modèle SGPD. Données fournies par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) – <http://meteocentre.com/> 57

RÉSUMÉ

Le Nord canadien est peu couvert en données d'observations *in situ* permettant de produire des profils atmosphériques. Les stations météorologiques qui récoltent les données de radiosondages se trouvent en grande partie plus au sud du Canada. Une alternative est d'assimiler des données AMDAR prises par des avions de onze vols commerciaux (FLYHT) dans cette région. Comme les radiosondages, les avions enregistrent des données couvrant un profil atmosphérique au décollage et à l'atterrissage. Durant le vol, les données sont récoltées à l'altitude du vol. Le but de cette étude était d'évaluer l'impact de l'ajout de données d'avions AMDAR dans le Nord canadien sur la qualité de l'analyse et sur les prévisions qui en résultent. En examinant la position des données d'avions, trois situations ont été choisies durant la période février-mars 2020. Celles-ci montrent une circulation atmosphérique propice à propager l'information des observations dans les régions avoisinantes. En utilisant les résultats du cycle d'assimilation de référence, le contrôle, et ceux du cycle FLYHT dans lequel on a ajouté les données d'avion à celles utilisées dans le contrôle, plusieurs expériences ont été produites. Pour chaque cas, l'incrément d'analyse obtenu en n'assimilant que ces données est d'amplitude nettement plus grande que l'incrément obtenu en les assimilant avec toutes les données assimilées opérationnellement. La valeur ajoutée des données d'avion est donc nettement moindre à cause de la redondance avec les données déjà assimilées.

En considérant des conditions initiales définies par le cycle FLYHT d'une part, et d'autre part en utilisant ce même cycle en retirant les données d'avions, on soustrait les deux prévisions résultantes pour observer l'évolution de l'incrément d'analyse. On constate alors que les observations exercent une influence qui se propage selon la dynamique particulière au cas considéré. Au-delà d'une réduction de l'erreur de prévision moyennée sur cette période, cette approche permet de montrer comment l'ajout de nouvelles observations influence un cas météorologique particulier.

CHAPITRE I

INTRODUCTION

La connaissance de l'état de l'atmosphère, ainsi que des prévisions à court et à moyen terme sont d'une importance cruciale dans plusieurs sphères de notre société. Notamment, celles-ci permettent de prévenir les dommages en cas d'inondations, de sécheresse ou de gel. D'ailleurs, dans un domaine comme l'agriculture, il est important pour les agriculteurs de connaître les prévisions météorologiques, puisque ces informations sont nécessaires à la prise de décisions stratégiques, ainsi qu'à la réussite en terme, par exemple, d'abondance des récoltes, et en diminution des pertes (Biswas, 1990). Par conséquent, pour parvenir à fournir à la population les données les plus précises en matière de météorologie, il est nécessaire d'avancer les recherches pour y parvenir. Les prévisions météorologiques se basent sur un des principes fondamentaux de la physique classique qui consiste à prévoir les états subséquents d'un système à l'aide de son état initial et des lois qui régissent son évolution. L'un des facteurs permettant d'avoir des prévisions plus précises, sans augmenter le temps de calcul des modèles, est de connaître plus spécifiquement l'état de l'atmosphère au temps initial. En effet, les prévisions numériques sont tributaires des conditions initiales puisqu'elles sont soumises à des limites de prévisibilité absolue en raison du comportement chaotique de l'atmosphère.

Pour déterminer les conditions initiales, les observations n'offrent qu'une couverture partielle et doivent être complétées par un estimé *a priori* qui peut être une climatologie ou une prévision obtenue d'un modèle de prévision

numérique du temps (PNT). L'estimation statistique cherche à combiner les observations à cette prévision *a priori*, qu'on appellera *ébauche*, en tenant compte de leurs erreurs respectives pour produire une analyse qui représente le meilleur estimé de l'état de l'atmosphère. Les incertitudes des prévisions liées au modèle proviennent de diverses sources, comme la résolution spatiale et temporelle des équations discrétisées limitée par la puissance de calcul disponible. De plus, des approximations sont introduites pour représenter les phénomènes non résolus par le modèle numérique. Par exemple, la paramétrisation sous maille approxime des processus de la petite échelle, comme la turbulence, et ne permet pas d'avoir un portrait exact de la situation aux fines échelles. D'autre part, la précision des conditions initiales correspond à l'erreur d'analyse elle-même reliée à l'erreur des observations assimilées et à celle de la prévision utilisée comme ébauche par l'assimilation. D'ailleurs, les méthodes actuelles d'assimilation de données ont permis d'étendre la validité des prévisions. De nos jours, une prévision à 3 jours a la même précision qu'une prévision à deux jours il y a dix ans : on dit alors qu'on gagne une journée de prédictabilité par décennie due aux améliorations de la PNT (Bauer *et al.*, 2015).

Le programme mondial AMDAR (Aircraft Meteorological DATA Relay) a permis de compléter le réseau canadien de radiosondages et répondre aux recommandations concernant la couverture spatiale et temporelle par les stations terrestres fournissant des données en altitude (Fournier, 2005). Dans ce mémoire, on s'intéresse à l'assimilation des données additionnelles obtenues d'avions effectuant des vols commerciaux au Canada durant la période de février à mars 2020 et leurs impacts sur la qualité de l'analyse. L'utilisation des données de transporteurs aériens régionaux comporte plusieurs avantages, car ils desservent beaucoup de communautés dans le nord du Canada avec beaucoup de décollages et atterrissages sur des trajets

plus courts et fréquents que les compagnies aériennes nationales. Enfin, elles (...) *opèrent dans la basse atmosphère, là où la météo se présente, et en grande partie sur des zones où les données sont rares* (...) (Fournier, 2005).

Plus spécifiquement, le Nord canadien est peu couvert en données de radiosondages. Le coût d'exploitation d'une station de radiosondage y est considérablement plus élevé que dans le Sud du pays. D'autre part, les données satellitaires représentent 90% des données assimilées dans le Système Global de Prévision Déterministe (SGPD) d'ECCC. Ce pourcentage s'élève à 95% en Arctique et les observations conventionnelles (*i.e. données d'avions, radiosondes, stations de surface*) y sont plus éparses. Les satellites revisitent les régions polaires plus souvent (Laroche et Poan, 2021). Par contre, Lupu et al. (2011) ont montré que les radiosondages ont un impact encore plus important que les données satellitaires. Des observations de profils atmosphériques par sondage ou, comme ici, par des mesures d'avions au décollage et à l'atterrissage, permettent d'obtenir une bonne résolution verticale et complètent les observations satellitaires qui offrent une meilleure couverture horizontale et temporelle. De plus, l'ajout de données d'avions dans le Nord canadien, peu couvert en termes de ce type de données, offre un potentiel d'impact sur la qualité de l'analyse et conséquemment, sur les prévisions qui en résultent.

L'objectif de ce projet est d'évaluer l'impact de l'ajout de données d'avions dans le Nord canadien sur la qualité de l'analyse et des prévisions qui en résultent. Plus spécifiquement, on s'intéresse généralement à l'impact moyen échantillonnant une période d'un mois qui peut comprendre différentes situations météorologiques. Cependant, l'impact peut varier selon la situation météorologique. Il est bien connu que dans certaines situations, de légers changements aux conditions initiales peuvent avoir un impact majeur sur la prévision qui en résulte (Laroche et al., 2002).

Pour identifier des situations météorologiques intéressantes, on peut utiliser le diagramme de Hovmöller (1949) qui donne une vue d'ensemble de l'évolution temporelle des systèmes météorologiques. Ernest Hovmöller a développé ce diagramme en 1949, et lui donne alors comme nom « The Trough-and-Ridge diagram ». La construction de ce diagramme est initialement utilisée pour l'interprétation et la visualisation de l'intensité des creux et des crêtes au niveau de 500 hPa aux latitudes moyennes en fonction du temps et selon une plage de longitude. Généralement, on représente la latitude ou la longitude en abscisse alors que l'évolution temporelle est illustrée selon l'ordonnée. Ce diagramme est alors repris pour plusieurs buts différents. Il permet d'analyser la situation météorologique générale pour une période. Il permet aussi d'identifier des situations telles que des blocages atmosphériques ou encore examiner la propagation de trains d'ondes atmosphériques de grande échelle associés aux ondes de Rossby. Analyser des situations passées permet de mieux comprendre certains phénomènes et ainsi anticiper certains événements qui pourraient se produire.

Connaître plus précisément l'état initial de l'atmosphère permet d'améliorer la prévision d'un modèle de prévision numérique du temps (PNT). Les observations jouent un rôle fondamental dans les prévisions météorologiques. D'ailleurs, chaque type d'observation n'a pas le même poids statistique dans la représentation de l'analyse qui définit les conditions initiales d'une prévision. Lorsqu'on ajoute de nouvelles données d'observation dans le but d'augmenter la précision de l'analyse, il faut étudier l'impact de ces nouvelles observations sur la qualité de l'analyse ou encore sur les prévisions qui en résultent. D'ailleurs, une méthode permettant d'évaluer l'impact de différentes observations, sur l'analyse mais aussi sur les prévisions, consiste à faire une Expérience sur les systèmes d'observation (ESO). Une ESO consiste à faire deux expériences, dont l'une est le contrôle. La seconde expérience est

complémentaire à l'expérience contrôle. L'expérience contrôle peut assimiler qu'une partie des observations, ou encore, la totalité des observations. Si l'expérience contrôle comprend la totalité des observations, la seconde expérience exclut le type de données d'observation d'intérêt. Dans ce cas, les différences entre les deux expériences mesurent l'impact de retirer des d'observations. Par contre, si l'expérience contrôle comprend toutes les données d'observation sauf les données à l'étude, la seconde expérience inclura toutes les données d'observation, y compris les données à l'étude. Dans ce cas, les différences entre les deux expériences mesurent l'impact d'ajouter des observations. Ces méthodes sont introduites et discutées dans la section traitant de la méthodologie.

Ce mémoire s'intéresse donc à étudier l'impact des données d'avions dans le Nord canadien sur l'analyse et les prévisions pour différentes situations météorologiques durant la période de février et mars 2020. Durant cette période, de nouvelles données d'avions ont été introduites et l'impact moyen sur l'analyse a montré un impact positif sur l'analyse et les prévisions, en calculant la réduction de l'erreur d'analyse et de prévision. Différentes situations météorologiques ont été identifiées durant cette période et des expériences d'assimilation ont été faites pour certains cas dans lesquels, l'analyse avec toutes les données a été comparée à une autre dans laquelle ces données d'avions ont été retirées. La différence entre ces deux analyses montre alors l'impact de ces observations sur l'analyse pour chacun de ces cas. Finalement, des prévisions basées sur ces deux analyses ont été faites et la différence entre ces deux prévisions permet de visualiser l'évolution de l'influence de ces données sur la prévision.

CHAPITRE II

MÉTHODOLOGIE

Une analyse est bâtie en combinant les observations à un estimé *a priori* de l'état de l'atmosphère obtenue d'une prévision faite par un modèle de *prévision numérique du temps* (PNT). Pour ce faire, on se base sur l'estimation statistique qui prend en compte la précision des observations et de l'*a priori* pour obtenir une *analyse* qui constitue le meilleur estimé de l'état de l'atmosphère. Dans ce chapitre, on présente les éléments principaux de cette approche, l'*assimilation de données*, qui nous permettra d'évaluer l'impact des observations d'avions autant sur l'*analyse* que sur les prévisions utilisant cette analyse comme conditions initiales.

2.1 Assimilation de données

L'assimilation de données a pour but d'estimer l'état de l'atmosphère au temps initial, qui s'approche au mieux de la réalité, en utilisant les prévisions de courte échéance et les observations. Des erreurs sont associées aux instruments, ainsi qu'aux prévisions. Le but est alors d'utiliser une combinaison des deux pour produire une analyse. L'analyse x_a est donnée par

$$x_a = x_b + K(y - H(x_b)) \quad (2.1)$$

où \mathbf{x}_b est l'estimé *a priori* de l'état de l'atmosphère, l'*ébauche*, obtenue d'une prévision de courte échéance (Gauthier *et al.*, 1999). L'opérateur d'observation H convertit l'ébauche en équivalent des observations \mathbf{y} (e.g. conversion des profils de température en radiances) et permet de comparer directement une prévision météorologique aux différents types d'observations. La matrice de gain \mathbf{K} permet de corriger l'ébauche en fonction des écarts entre les observations et l'ébauche, $(\mathbf{y} - H(\mathbf{x}_b))$, en une correction à l'ébauche

$$\Delta \mathbf{x}_a = \mathbf{K}(\mathbf{y} - H(\mathbf{x}_b)) \quad (2.2)$$

où $\Delta \mathbf{x}_a$ est l'*incrément d'analyse*. L'estimation statistique permet de déterminer la matrice de gain \mathbf{K} en fonction des erreurs d'observation et de prévision caractérisées par leurs covariances d'erreur \mathbf{R} et \mathbf{B} , respectivement (Gauthier *et al.*, 1999). Le meilleur estimé linéaire non biaisé est obtenu en choisissant

$$\mathbf{K} = \mathbf{B}\mathbf{H}^T(\mathbf{R} + \mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T)^{-1} \quad (2.3)$$

L'analyse ainsi obtenue minimise la variance de l'erreur d'analyse. On dit alors que l'analyse est le meilleur estimé linéaire non biaisé.

La figure 2.1 schématise l'utilisation des prévisions et des observations pour obtenir une analyse à un temps t . Plus spécifiquement, les prévisions initiées 6h auparavant, valides au temps t , combinées aux observations du temps t , donnent une analyse. Ensuite, cette dernière analyse est utilisée comme condition initiale pour débiter la prochaine prévision et ainsi de suite. Ici, c'est un exemple simplifié pour faciliter la compréhension, mais dans les faits on a, dans un contexte global, $\sim 10^6$ observations par cycle d'assimilation.

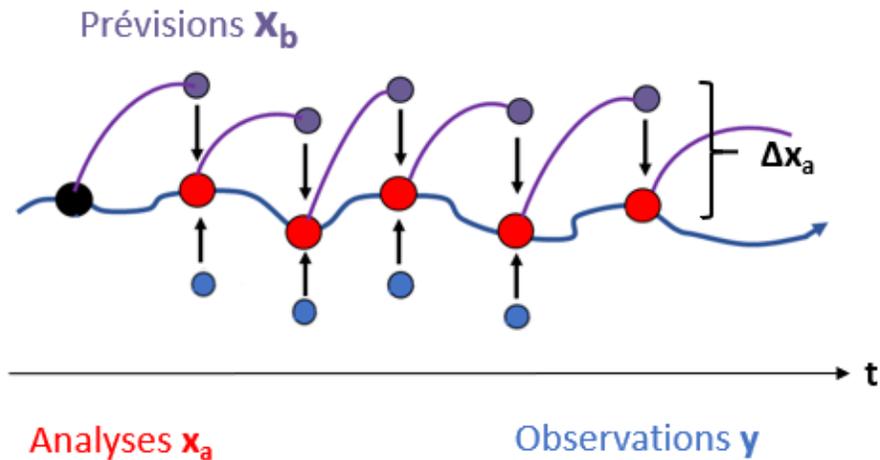


Figure 2.1 - Schéma représentant un cycle d'assimilation de données.

2.2 Couverture des données

Le domaine d'étude est le Canada. En bleu (fig. 2.2) sont les données des onze avions AMDAR (*Aircraft Meteorological DATA Relay*) provenant de onze avions commerciaux récoltées par la compagnie FLYHT.

Pour le mois de février 2020 (fig. 2.2 – *panneau gauche*), la couverture des données s'étend principalement en Alberta, dans les Territoires du Nord-Ouest et au Nunavut. Quelques données sont récoltées en Colombie-Britannique, alors qu'une grande quantité de données est enregistrée dans un axe nord-sud au Québec de même qu'en Alberta.

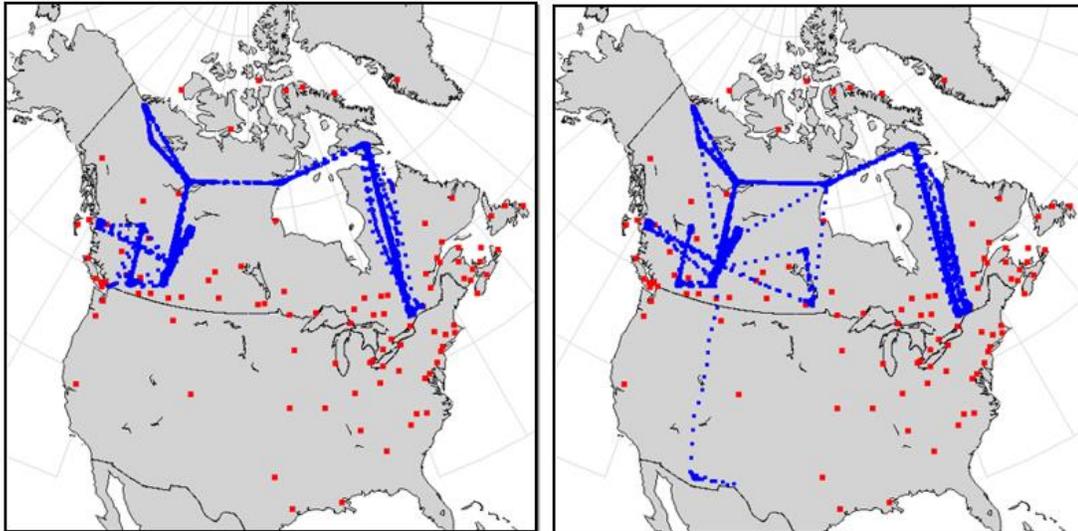


Figure 2.2 - Carte de couverture des données d'avions FLYHT en bleu pour le mois de février (panneau gauche) et pour le mois de mars 2020 (panneau de droite). Données récoltées de la surface jusqu'à 100 hPa, totalisant **51960** rapports de données pour le mois de février et **54598** rapports de données pour le mois de mars. Cartes extraites du site interne d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). Les points rouges correspondent aux aéroports où les compagnies canadiennes y atterrissent ou y décollent.

Pour le mois de mars 2020 (fig. 2.2 – *panneau de droite*), la couverture des données est très similaire à celle du mois de février 2020, mais avec quelques ajouts. Quelques vols ont été effectués en Saskatchewan et au Manitoba. De plus, on peut remarquer une plus grande quantité de données pour le mois de mars 2020, ce qui confirme que les vols internes n'ont pas cessé de s'effectuer suite à la pandémie déclarée à la mi-mars 2020. En effet, on dénombre 51960 rapports de données pour le mois de février 2020 alors que ce nombre s'élève à 54598 rapports pour le mois de mars de la même année.

2.3 Type de données

Le programme de collecte de données AMDAR permet d'enregistrer les données météorologiques telles que la température, la pression, l'humidité spécifique, ainsi que la direction et la vitesse des vents. Des données non

météorologiques comme la date et l'heure (UTC), la longitude et la latitude sont aussi enregistrées. La phase de vol est également une donnée enregistrée, donc si c'est lors de la montée ou de la descente. Un identifiant unique FLYHT est associé à chaque avion et la vitesse de vol, ainsi que l'angle d'inclinaison latérale sont aussi des données enregistrées.

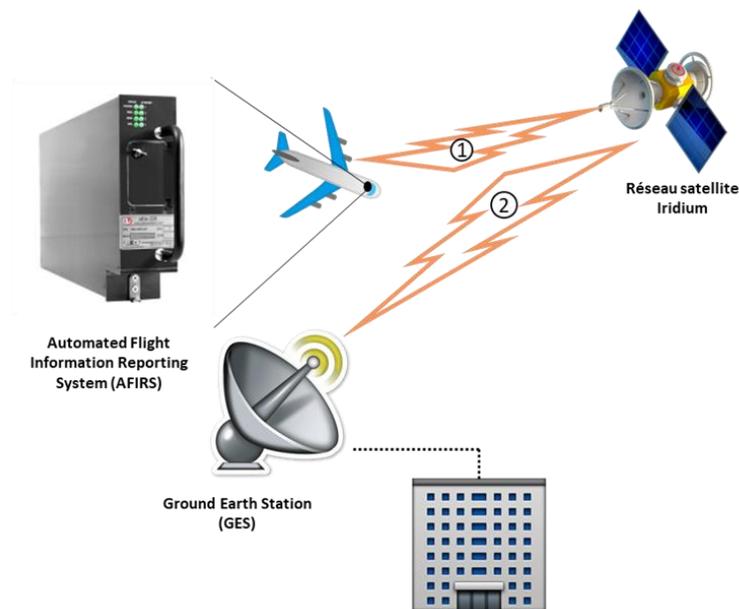


Figure 2.3 - Schéma représentant le transfert des données partant du système de communication AFIRS (Automated Flight Information Reporting System) pour se rendre au sol, à l'aide du réseau satellite Iridium.

Le système *Automated Flight Information Reporting System* (AFIRS) installé dans les avions transmet les données en temps réel, mesurées par l'instrument AMDAR. Il génère des rapports de données et relaie ensuite les données par le biais du réseau satellite Iridium vers le sol (fig. 2.3). Toutefois, avant de pouvoir être utilisées, ces données doivent être soumises à un contrôle de qualité et une correction de biais doit parfois être appliquée. Par exemple, si on note un biais chaud de la température mesurée par les avions, on abaisse

donc la valeur de la température. La correction de biais statique basée sur le niveau de pression observé est appliquée à toutes les observations de température transmises par les avions. La raison de ce biais chaud est basé sur la méthodologie de mesure de la température avec un capteur mobile. Deux processus peuvent mener à des erreurs de mesure. Le premier processus dépend de la phase de vol. Lorsque l'avion monte ou descend, cela mène à un léger biais de température en raison de la présence de la variation de la température. Le second processus est lié aux corrections internes appliquées aux mesures de pression, sans toutefois appliquer ces corrections à la mesure de l'observation de température (de Haan *et al.*, 2021). En fonction de ces biais, on corrige alors la valeur de la température en la réduisant de 0,1 K entre 700 et 500 hPa, de 0,2 K entre 500 et 400 hPa, de 0,3 K entre 400 et 300 hPa, et de 0,5 K entre 300 et 100 hPa. Cette correction de biais est appliquée lors du prétraitement des observations. Ces données sont d'abord présentées à un deuxième contrôle de qualité en les comparant à l'ébauche avant d'être finalement assimilées.

2.4 Contrôle de qualité

Pour toutes les observations, incluant celles où une correction de biais a été appliquée, on calcule alors l'écart entre chacune des observations et l'ébauche pour obtenir les innovations ($\mathbf{y} - H(\mathbf{x}_b)$) (notées par O-P). En moyennant sur des observations du même type, la moyenne des innovations devrait être à peu près nulle, pour les observations non biaisées. Si la valeur de l'innovation est anormalement élevée par rapport à l'écart-type attendu pour l'innovation, l'observation est rejetée : c'est ce qu'on désigne comme étant le *background-check*, soit la vérification par rapport à l'ébauche.

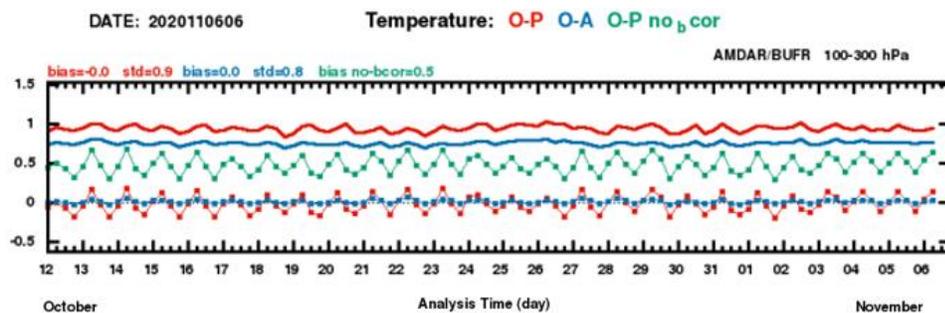


Figure 2.4 - Contrôle de qualité de données de température **des données AMDAR** du 12 octobre 2020 au 6 novembre 2020 pour les niveaux atmosphériques de 100 à 300 hPa. Les courbes rouges correspondent aux écarts à l'ébauche (innovations) et celles en bleu aux écarts entre les observations et l'analyse ($y - H(x_a)$). Dans les cas, les courbes avec un marqueur * correspondent au biais alors que les traits pleins correspondent à l'écart-type.

La figure 2.4 représente la moyenne de O-P et leur écart-type pour les données AMDAR. La courbe verte montre la présence d'une erreur systématique dans les observations qui est éliminée lorsqu'une correction de biais est appliquée (courbe rouge tiretée). Cette correction de 0,5 K correspond bien avec ce qui a été énoncé à la section 3 (*Type de données*) en ce qui concerne la correction de biais statique basée sur le niveau de pression. La ligne rouge avec marqueur montre que la correction de biais a éliminé le biais des observations. L'écart-type est aussi utilisé pour mesurer la variabilité de l'erreur d'analyse et de prévision. La figure 2.4 montre que l'erreur d'analyse (courbe bleue) est moindre que l'erreur de prévision (courbe rouge) comme le prévoit la théorie de l'estimation statistique.

Dans le cadre de ce projet, on se concentre sur le post-traitement des résultats de cycles d'assimilation dans lequel le contrôle de qualité a été fait sur toutes les données assimilées. Cette courte section avait pour but de bien

comprendre d'où viennent les données et quels sont les procédés effectués avant de pouvoir les utiliser.

2.5 Régimes météorologiques

Avant même de regarder les données des aéronefs, la première étape du projet était de regarder la situation météorologique prévalant durant la période étudiée, soit les mois de février et mars 2020. En effet, cela permettra de mieux analyser les résultats de l'étude puisque ceux-ci peuvent être influencés par un événement météorologique qui persiste dans la région durant cette période. Une manière d'évaluer rapidement la situation météorologique pour une période donnée, sur l'ensemble du globe, est de produire un diagramme de Hovmöller à l'aide des données, dans ce cas-ci, des analyses provenant du Système Global de Prévision Déterministe (SGPD) d'ECCC. Ce diagramme (fig. 2.5) est produit en effectuant la moyenne de la composante méridienne du vent VV à 250 hPa dans la bande de latitudes comprise entre 40 °N et 60 °N et ce pour chaque longitude. La carte située au-dessus de la figure permet de mieux se situer géographiquement pour l'analyse du diagramme. Ces diagrammes permettent de représenter la météorologie générale qui est survenue durant la période.

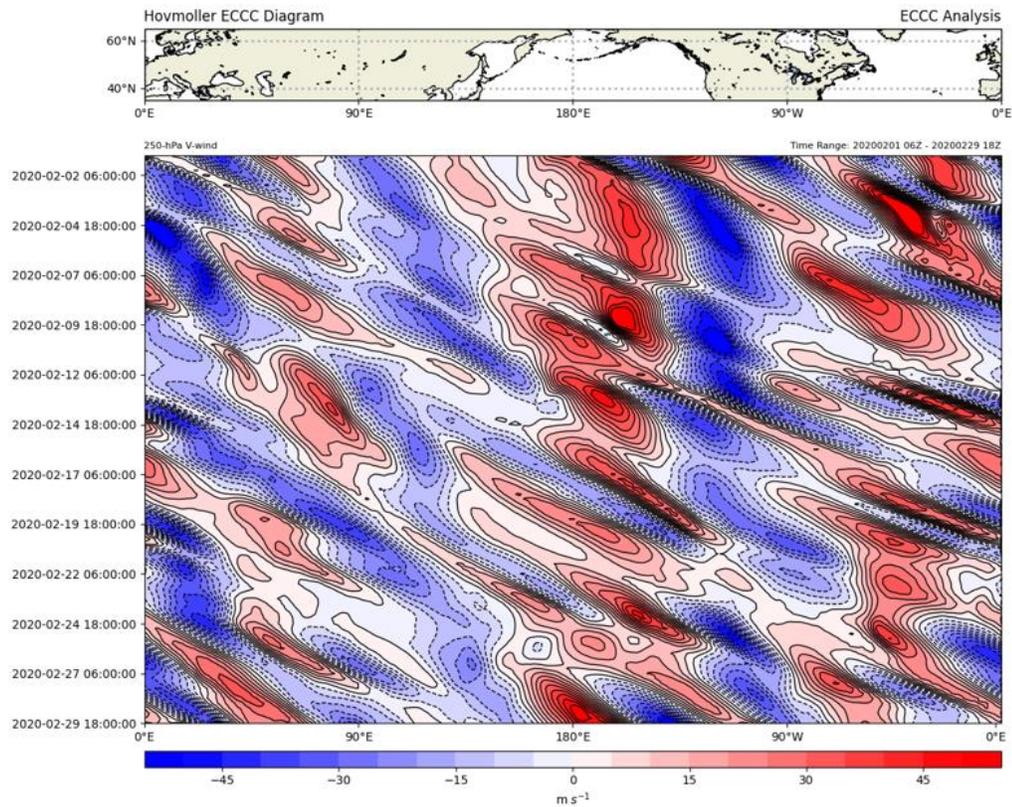


Figure 2.5 - Diagramme Hovmöller pour le mois de février 2020 pour la variable VV (vents nord-sud) à 250 hPa, moyennés entre 40 et 60 degrés nord de latitude, et à l'ensemble du globe en longitude.

On remarque (fig. 2.5) que sur l'Amérique du Nord il n'y a pas présence de grandes situations météorologiques extrêmes, bien que les vents VV varient passablement au cours du mois au-dessus de cette région. Par contre, on peut remarquer, par la direction des vents, une haute pression à l'ouest de la côte-ouest de l'Amérique. Elle s'y installe une bonne partie du mois, on peut qualifier cette situation comme étant un blocage atmosphérique. En rouge sont présentés les vents se déplaçant du sud vers le nord ($VV > 0$) alors qu'en bleu sont des vents du nord vers le sud ($VV < 0$). La circulation est bel et bien celle d'une haute pression pour les situations météorologiques s'établissant à l'ouest de la côte-ouest du 4 février 2020 au 17 février 2020.

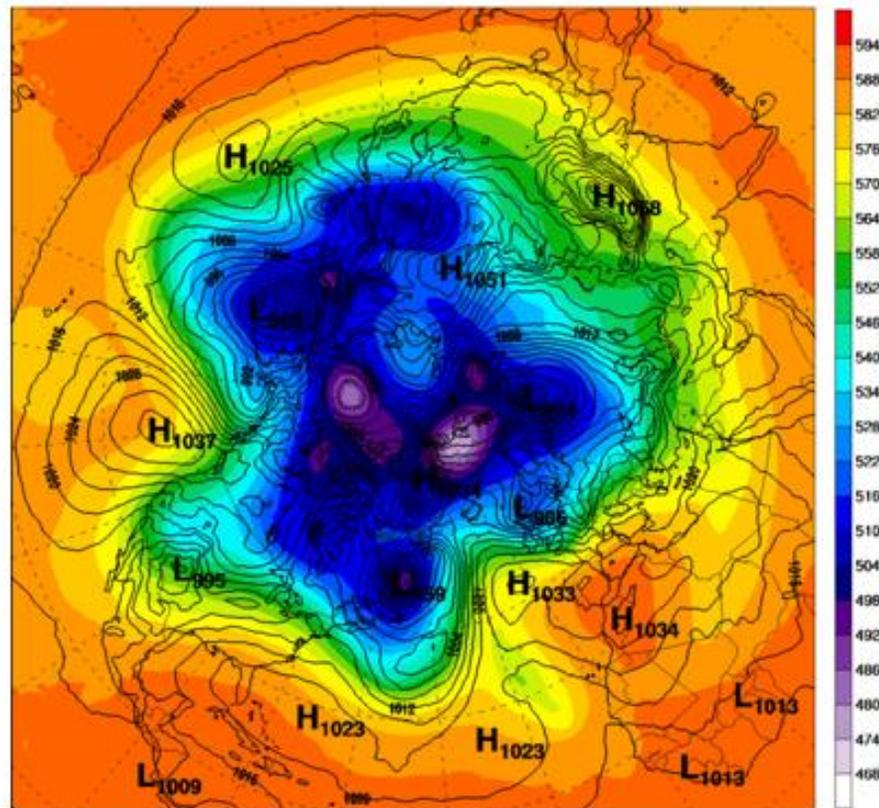


Figure 2.6 - Carte de l'hémisphère Nord où sont présentées les hauteurs de 500 hPa en dam (échelle de couleurs), ainsi que la pression moyenne au niveau de la mer en hPa (lignes pleines noires). Analyse valide le 4 février 2020 à 00Z du modèle SGPD. Données fournies par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) – <http://meteocentre.com/>

Visuellement on peut le voir sur la carte du géopotential à 500 hPa (fig. 2.6). Elle présente bel et bien la haute pression, de 1037 hPa, à l'ouest de la côte-ouest de l'Amérique. Elle finira par se dissiper près du pôle nord à la mi-février. On remarque aussi que ce qui est observé sur cette carte correspond à ce qu'on peut observer sur le diagramme de Hovmöller (fig. 2.5) pour la journée du 4 février 2020.

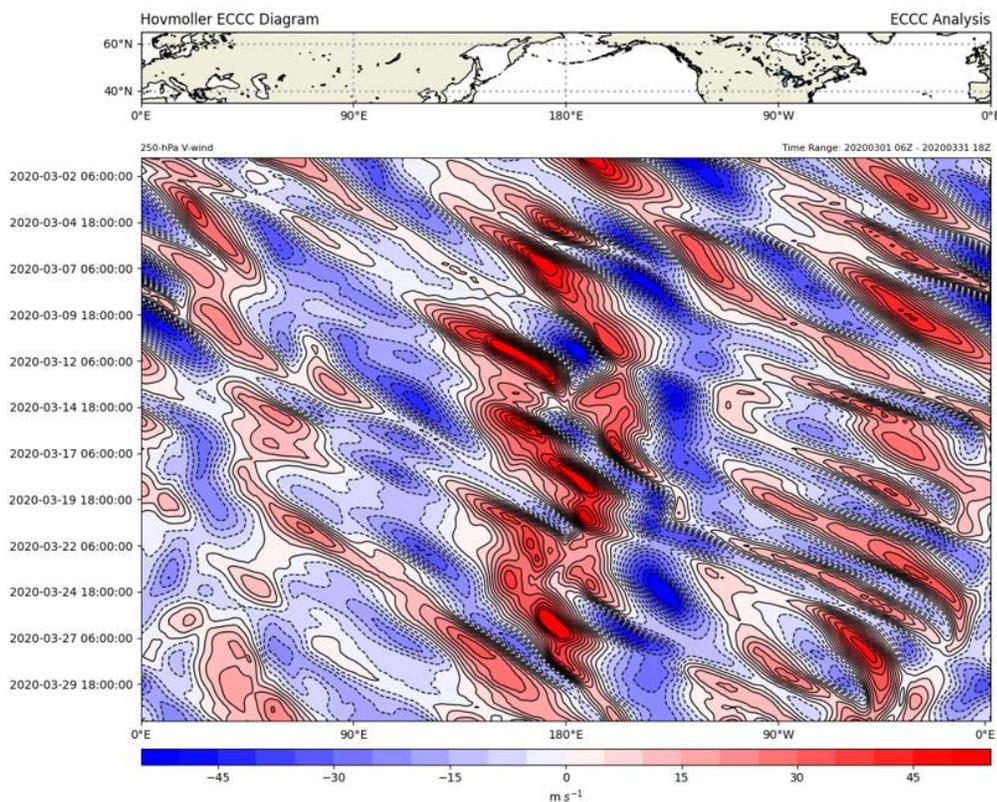


Figure 2.7 - Diagramme Hovmöller pour le mois de mars 2020 pour la variable VV (vents nord-sud) à 250 hPa, moyennés entre 40 et 60 degrés nord de latitude, et à l'ensemble du globe en longitude.

Pour le mois de mars 2020 (fig. 2.7), pour la même configuration que le mois de février 2020, on remarque que la situation est légèrement plus intense que pour le mois de février 2020. Comparativement au mois de février, l'intensité des vents méridionaux est un peu plus élevée pour les hautes pressions à l'ouest de la côte-ouest de l'Amérique. On note la présence de deux hautes pressions additionnelles à cet endroit pour tout le mois de mars. Toutefois, la situation demeure assez stationnaire encore une fois sur l'Amérique du Nord.

2.6 Moyenne et écart-type des incréments d'analyse

L'assimilation repose sur l'hypothèse que ni les observations ni les ébauches n'ont de biais. Auquel cas, la moyenne des incréments d'analyse sur une période donnée devrait être approximativement nulle. Si tel n'est pas le cas, un examen de la moyenne des incréments peut aider à diagnostiquer la source de ce biais (Rodwell et Palmer, 2005). La moyenne des incréments d'analyse est donnée par la relation

$$\overline{\Delta x_a} = (\overline{x_a} - \overline{x_b}) = \overline{K(y - H(x_b))} \quad (2.4)$$

où la barre indique une moyenne sur les analyses de toute la période. Ces cartes de moyennes d'incréments d'analyse ont été produites, d'une part pour le système opérationnel SRPD (*Système régional de prévision déterministe*) ne comprenant pas les données des onze avions FLYHT (fig. 2.8), et d'autre part, pour l'expérience comprenant ces données d'avions provenant du Nord canadien (fig. 2.9). Les cartes des moyennes des incréments d'analyse pour l'expérience incluent aussi les données du système opérationnel. Le but ici est donc de voir si l'ajout des données d'avions peut faire diminuer, en termes de valeur absolue, la moyenne des incréments d'analyse.

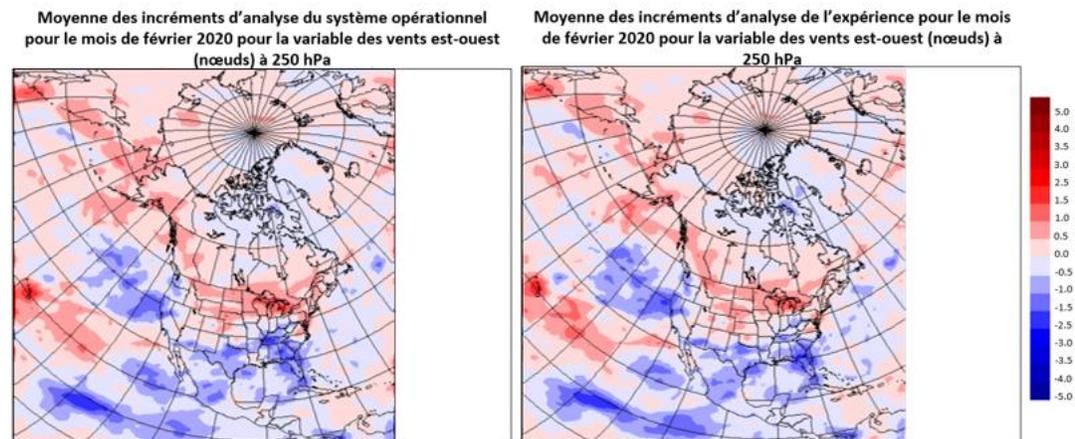


Figure 2.8 - Moyenne des incréments d'analyse pour le système opérationnel SRPD (panneau gauche). Moyenne des incréments d'analyse pour l'expérience comprenant les données des onze avions qui ont couvert le Nord canadien (panneau de droite). Moyenne pour tout le mois de février 2020 avec des données aux 6h pour la variable UU (vents est-ouest en noeuds) à 250 hPa.

On remarque que la moyenne des incréments pour la variable UU se situe entre 0 et plus ou moins 1 ms^{-1} pour la moyenne du système opérationnel. Ces cartes ont été produites pour les variables de vents UU (est-ouest), VV (nord-sud), de température et d'humidité, ainsi qu'à différents niveaux atmosphériques pour le mois de février et mars 2020. Pour la variable UU à 250 hPa moyennée sur tout le mois de février, les résultats du système opérationnel (fig. 2.8 – *panneau gauche*) ont été comparés à ce qui a été obtenu pour l'expérience avec les données des onze avions FLYHT (fig. 2.8 – *panneau de droite*).

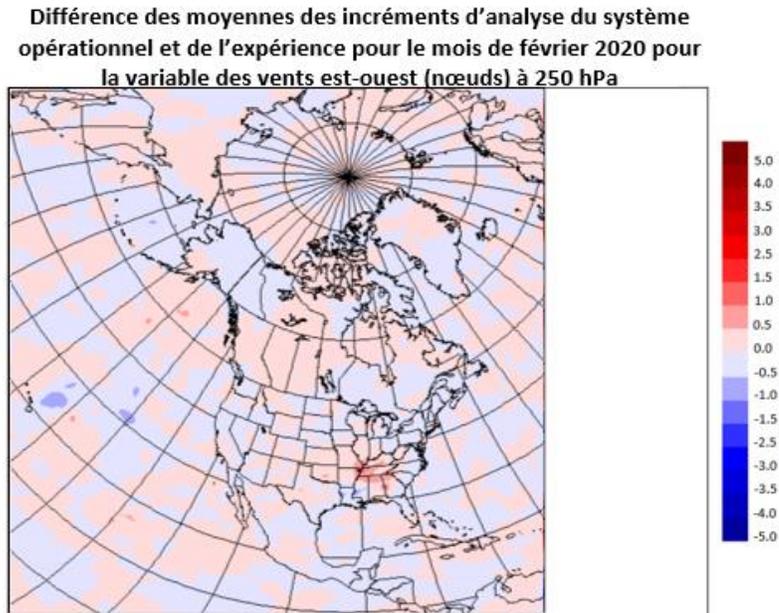


Figure 2.9 – Différence des moyennes (Expérience - Opérationnel) des incréments d'analyse du système opérationnel et de l'expérience (comprenant les données des onze avions qui ont couvert le Nord canadien). Moyennes pour tout le mois de février 2020 avec des données aux 6h pour la variable UU (vents est-ouest en nœuds) à 250 hPa.

La figure 2.9 montre la différence entre ces deux incréments qui ne montre pas un signal significatif qui permettrait d'établir que l'ajout des données d'avions AMDAR ait une influence perceptible sur la moyenne des incréments d'analyse.

L'écart-type, quant à lui, est donné par la relation

$$\sigma_{\Delta x_a} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta x_{a_i} - \overline{\Delta x_a})^2} \quad (2.5)$$

La figure suivante présente l'écart-type des incréments d'analyse.

Différence des écarts-types des incréments d'analyse du système opérationnel et de l'expérience pour le mois de février 2020 pour la variable des vents est-ouest (nœuds) à 250 hPa

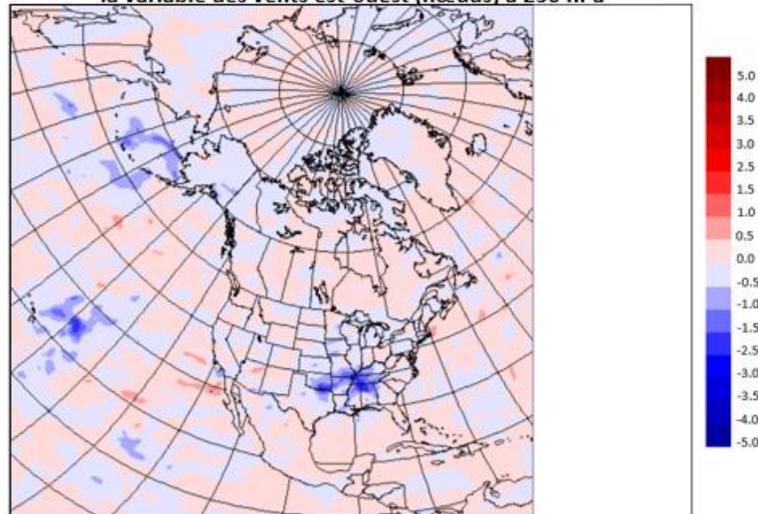


Figure 2.10 – Différence des écart-types (Expérience - Opérationnel) des incréments d'analyse du système opérationnel et de l'expérience (comprenant les données des onze avions qui ont couvert le Nord canadien). Moyennes pour tout le mois de février 2020 avec des données aux 6h pour la variable UU (vents est-ouest en nœuds) à 250 hPa.

Même si, *en moyenne* et selon l'écart-type, les données d'avion n'ont pas d'influence perceptible sur l'analyse, on peut se demander si leur influence peut se manifester dans des situations météorologiques particulières. On s'intéressera à identifier des situations pour lesquelles ces données pourraient influencer l'analyse localement de manière significative. On s'intéressera à étudier comment la circulation atmosphérique influence la propagation de ce changement dans une prévision. Dans le cadre de ce projet, on s'intéresse à la qualité de l'analyse, mais aussi aux prévisions qui en résultent. La première étape de cette section est de regarder conjointement les diagrammes de Hovmöller (section 2.5) et les cartes de géopotential pour trouver les situations météorologiques marquantes survenues durant la période de février et mars

2020. Par la suite, on vérifie si des données AMDAR ont été récoltées aux moments et aux endroits où sont survenues ces situations. Celles-ci pourraient avoir un plus grand impact sur l'analyse et sur les prévisions. Par conséquent, on veut savoir si ces données AMDAR récoltées à ces moments permettent d'influencer localement de manière significative l'analyse et les prévisions.

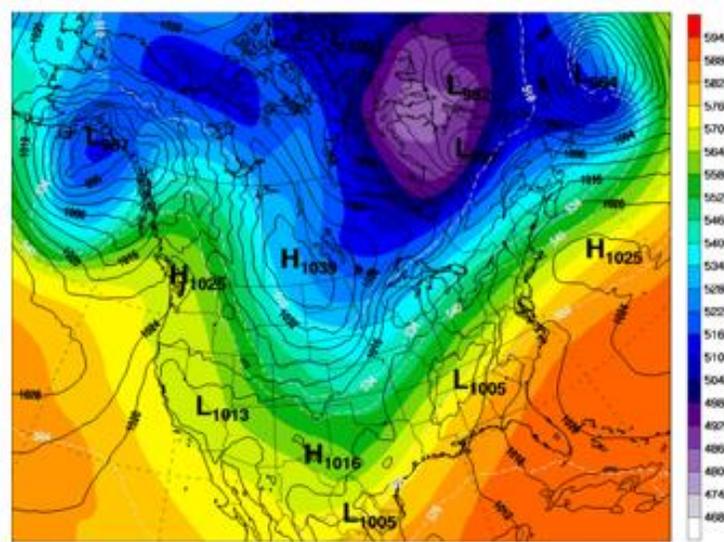


Figure 2.11 - Carte des hauteurs de 500 hPa (échelle de couleurs) et d'épaisseur de 1000-500 hPa en dam (lignes pointillées blanches), ainsi que la pression moyenne au niveau de la mer en hPa (lignes pleines noires). Analyse valide le 13 février 2020 à 00Z du modèle SGPD. Données fournies par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) – <http://meteocentre.com/>

La figure 2.11 montre la situation météorologique du 13 février 2020 à 00UTC. À l'est des Rocheuses, le géopotential stationnaire amène un vent du nord-ouest alors que dans l'est, cette carte montre une advection vers l'est.

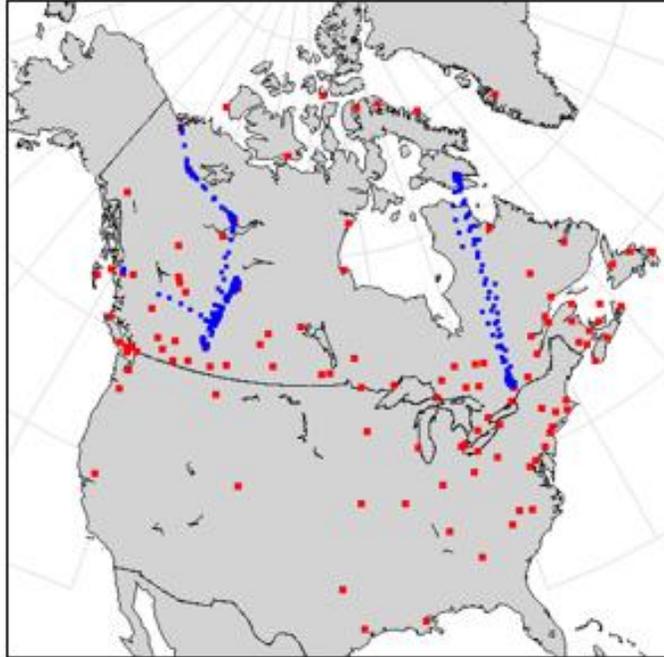


Figure 2.12 - Carte de couverture des données d'avions FLYHT en bleu pour le 13 février 2020, données récoltées de la surface jusqu'à 100 hPa. Données extraites du site interne d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). Les points rouges correspondent aux aéroports où les compagnies canadiennes y atterrissent ou y décollent.

La couverture des données FLYHT (fig. 2.12) du 13 février 2020 s'étend principalement sur l'Alberta et sur une partie des Territoires du Nord-Ouest. Il y a peu de données en Colombie-Britannique à cette date et les avions ont couvert le Québec de manière transversale du Nord au Sud. Le but ici était de regarder si la situation météorologique générale (fig. 2.11) coïncide avec une prise de données d'avions au moment et à l'endroit de cette situation (fig. 2.12). On travaille en amont pour identifier des situations météorologiques marquantes aux endroits où des données d'avions ont été enregistrées. Une fois que les analyses sont produites, il sera possible de les utiliser comme conditions initiales au modèle de prévision et voir comment l'incrément d'analyse évolue dans le temps.

CHAPITRE III

IMPACT DES DONNÉES D'AVIONS SUR LA QUALITÉ DE L'ANALYSE ET DES PRÉVISIONS

3.1 Objectif et cadre expérimental

Plusieurs expériences ont été effectuées pour examiner l'impact des données d'avions autant sur la qualité de l'analyse que sur les prévisions qui en résultent.

L'objectif est de voir l'influence, ainsi que l'étalement de l'information obtenue d'observations récoltées par la compagnie FLYHT de onze avions commerciaux qui ont survolé le Nord canadien, durant la période de février et mars 2020. FLYHT n'opère pas d'avions mais collecte et distribue simplement les données d'avions commerciaux. Le but de cette étude vise à observer l'étalement spatial et temporel associé aux covariances d'erreur de prévision utilisées par l'assimilation. Cette expérience permettra de voir également comment cette information se propage dans le temps dans des prévisions de courte échéance.

Dans le cadre d'un cycle d'assimilation, les observations de ces avions sont assimilées régulièrement et il en résulte un effet cumulatif. Ceci correspond à la valeur ajoutée d'un réseau d'observation qu'on mesure en réalisant des expériences sur les systèmes d'observation (ESO). Dans une première ESO, l'expérience contrôle est celle dans laquelle toutes les observations sont

assimilées incluant celles des avions FLYHT durant toute la période. Par la suite, on retire les données des onze (11) avions FLYHT couvrant le Nord canadien dans une seconde expérience. La dégradation de l'erreur d'analyse et des prévisions mesure alors l'information ajoutée par les observations exclues. Cette approche est souvent utilisée pour évaluer l'impact des différents types de données utilisées dans un système d'assimilation-prévision opérationnel (English *et al.*, 2013).

3.2 Description du cadre expérimental

a. Le modèle et l'assimilation 4D-EnVar

Le système d'assimilation et prévision utilisé dans ce travail est le RDPS (*Regional Deterministic Prediction System*) du Service météorologique du Canada (Caron *et al.*, 2015). La résolution spatiale du modèle RDPS est de 10 km et sa couverture géographique inclut les États-Unis et le Canada. Les champs de température, direction et vitesse des vents, et d'humidité sont définis pour 80 niveaux verticaux avec une pression au toit de 0,1 hPa. Le modèle utilise une coordonnée verticale dite hybride. Les cinq expériences réalisées dans ce projet ont été produites avec la même configuration du modèle. Les différences qui distinguent une expérience d'une autre sont reliées à l'assimilation.

Le système d'assimilation est un système d'ensemble variationnel 4D, le 4D-EnVar (Buehner *et al.*, 2015; Caron *et al.*, 2015). Dans cette approche, l'incrément d'analyse est en fait composé de contributions à intervalles d'une heure sur la fenêtre de 6h de l'assimilation. Ceci a pour effet de refléter la distribution temporelle des observations sur cette période. Tout comme dans

la procédure de *Incremental Analysis Update* (IAU), l'étalement de l'incrément contribue à maintenir l'équilibre dynamique dans la prévision (Buehner *et al.*, 2015).

b. Évaluation globale de l'impact des données d'avions FLYHT

La période à l'étude couvre les mois de février et mars 2020 dans leur entièreté. Une évaluation globale de cette période a été faite en comparant les analyses et prévisions de deux cycles d'assimilation complets (Zaitseva *et al.*, 2020). Ici, l'expérience de référence, ou contrôle, correspond au système opérationnel qui n'utilise pas ces données d'avions. Dans une deuxième expérience, les observations d'avions de FLYHT ont été ajoutées au contrôle dans un cycle d'assimilation couvrant cette même période. Étant donné le faible volume de données ajouté à un système qui en assimile déjà des millions, on s'attend à un impact modeste. Néanmoins, Zaitseva *et al.* (2020) ont noté, en moyenne, un impact légèrement positif et significatif particulièrement dans le Nord et le sud-ouest du Canada, là où on retrouve la plus grande présence de ces données.

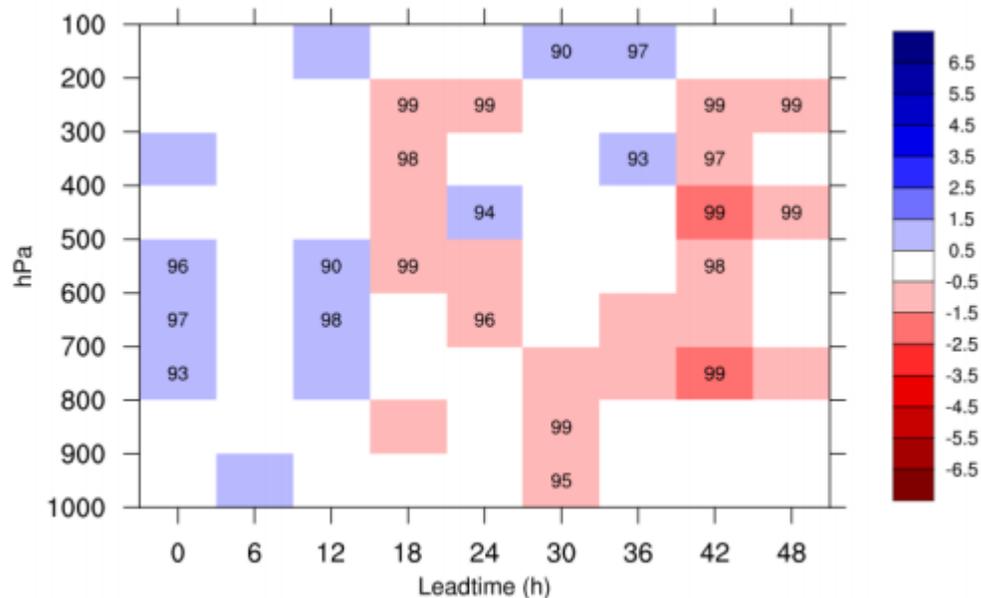


Figure 3.1 - Changement relatif de l'erreur RMS (*Root Mean Square*). Ici, on s'intéresse au changement relatif de l'erreur RMS des prévisions en altitude, calculée en fonction des vents pour la période à l'étude, soit du 1^{er} février au 31 mars 2020. Les observations utilisées pour calculer l'erreur RMS sont celles du système opérationnel *RDPS*, en plus des observations *FLYHT*. On compare le contrôle (bleu) et l'expérience avec les données des 11 avions *FLYHT* (rouge) pour la composante zonale du vent. Les résultats sont présentés de l'analyse (0h) jusqu'à la prévision 48h (toutes les 6h) entre la surface et 100 hPa pour 120 cas. La charte des couleurs indique le score de l'erreur RMS, alors que la signification statistique est indiquée lorsqu'elle est supérieure à 90%. Les nuances de rouge (bleu) montrent que l'erreur RMS de l'expérience incluant les 11 avions *FLYHT* (contrôle) est inférieure à celui de l'expérience contrôle. (source : Zaitseva et al., 2020)

La figure 3.1 montre les changements relatifs dans les prévisions en altitude, de l'analyse jusqu'à la prévision 48h entre la surface et 100 hPa pour 120 cas. Le contrôle et la simulation avec ajout des données d'avions sont comparés pour les vents zonaux (fig. 3.1) et pour les vents méridionaux (fig. 3.2). Pour les deux figures, on remarque que les changements les plus importants et les plus significatifs sont dans les prévisions à plus long terme, c'est-à-dire à partir de la 42^e heure de prévision, pour les niveaux de 800 hPa à 200 hPa.

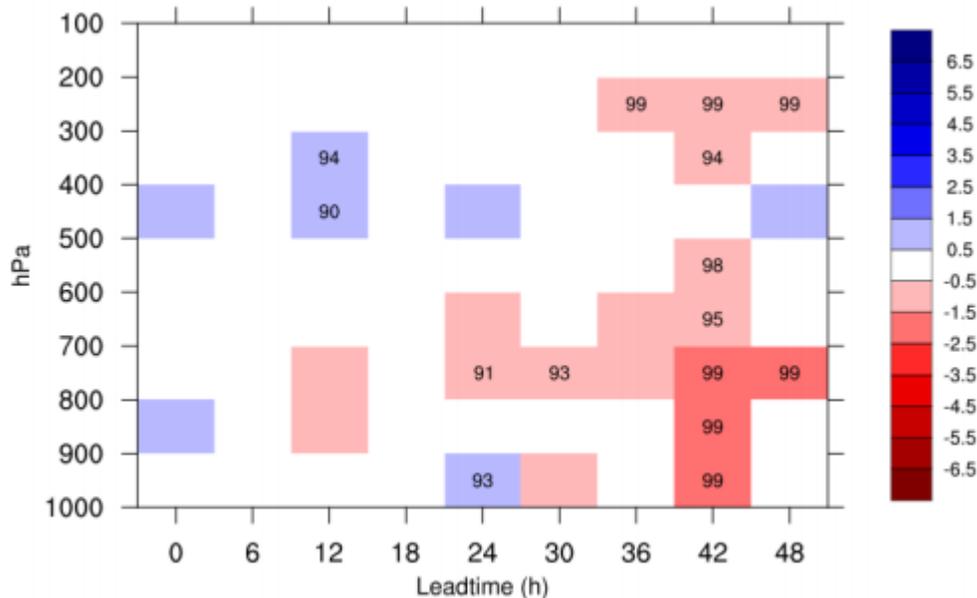


Figure 3.2 - Comme présenté pour la figure 3.1, mais pour les vents méridionaux.

Notre étude a pour but d'examiner des cas spécifiques pour évaluer l'impact d'ajouter ces données à des moments précis caractérisés par la présence d'observations d'avions FLYHT et d'une circulation atmosphérique susceptible de montrer un impact perceptible sur l'analyse et la prévision. On se référera aux résultats obtenus de deux cycles d'assimilation:

- **Cycle contrôle** : cycle d'assimilation complet assimilant toutes les données du système opérationnel mais pas les données d'avions FLYHT couvrant la période Février-Mars 2020.
- **Cycle FLYHT** : cycle d'assimilation complet assimilant toutes les données du système opérationnel EN AJOUTANT les données d'avions FLYHT couvrant la période Février-Mars 2020.

Pour évaluer l'impact pour différents cas spécifiques, on procèdera soit en ajoutant les données au cycle contrôle ou en excluant les données FLYHT du cycle FLYHT.

3.3 Présentation du cas #1 : 13 février 2020

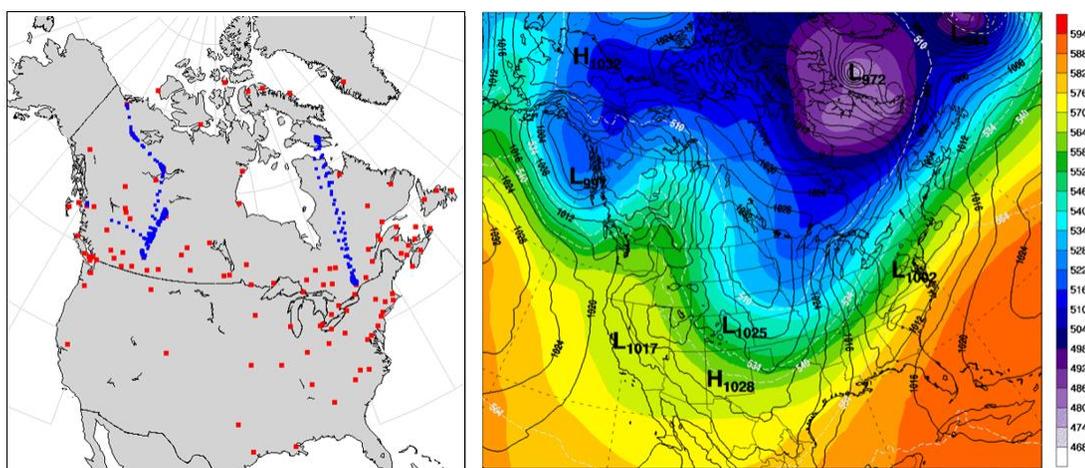


Figure 3.3 - **Panneau gauche** : Carte de couverture des données d'avions FLYHT en bleu pour le 13 février 2020, données récoltées de la surface jusqu'à 100 hPa. Données extraites du site interne d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). Les points rouges correspondent aux aéroports où les compagnies canadiennes y atterrissent ou y décollent. **Panneau de droite** : Carte des hauteurs de 500 hPa (échelle de couleurs) et d'épaisseur de 1000-500 hPa en dam (lignes pointillées blanches), ainsi que la pression moyenne au niveau de la mer en hPa (lignes pleines noires). Analyse valide le 13 février 2020 à 12Z du modèle SGPD. Données fournies par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) – <http://meteocentre.com/>

Le panneau de gauche de la figure 3.3 ci-dessus, montre la couverture des données qui s'étend majoritairement au-dessus de l'Alberta et du Québec. Le panneau de droite montre la situation météorologique à un instant donné, c'est-à-dire pour le 13 février 2020 à 12Z. On remarque les creux et crêtes au-dessus de l'Amérique du Nord qui signalent une circulation, en altitude, provenant du nord-ouest (sud-ouest) en Alberta (au Québec). Cette situation a été choisie puisque les données récoltées à ce moment, avec la situation présente, pourraient permettre de voir comment la circulation atmosphérique influence le

transport de l'information. L'analyse pourrait aussi être influencée par la situation météorologique présente.

3.3.1 Expérience en isolation

Dans cette expérience, seulement les données des avions additionnels en opération à ce moment ont été assimilées pour voir leur influence en l'absence de tout autre type d'observation. La configuration de cette expérience est la même que pour celle du cycle FLYHT, l'ébauche est donc influencée par les données des 11 avions FLYHT. Une nouvelle analyse a été produite en n'assimilant que ces données d'avions. Le but est de voir, en premier lieu, l'impact des données d'avions sans l'influence de tous les autres types d'observations.

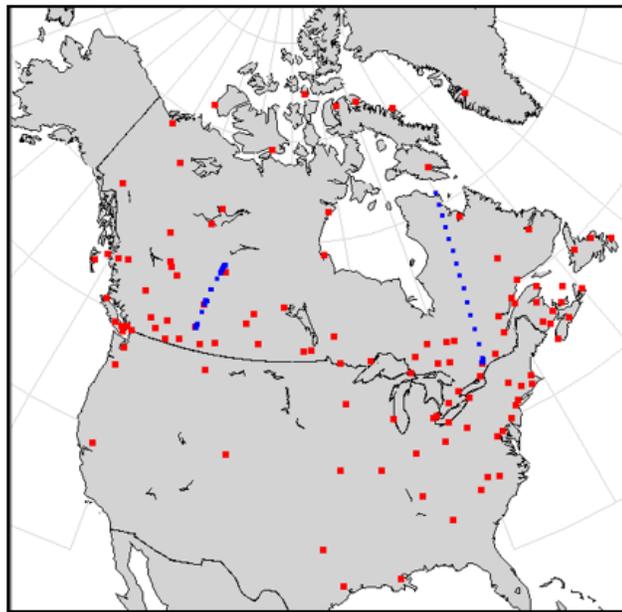


Figure 3.4 - Carte de couverture des données d'avions FLYHT en bleu pour le 13 février 2020 à 12 UTC. Toutes les données FLYHT disponibles entre 9 UTC et 15 UTC pour le 13 février 2020, de la surface jusqu'à 100 hPa. Les points rouges correspondent aux aéroports où les compagnies canadiennes y atterrissent ou y décollent.

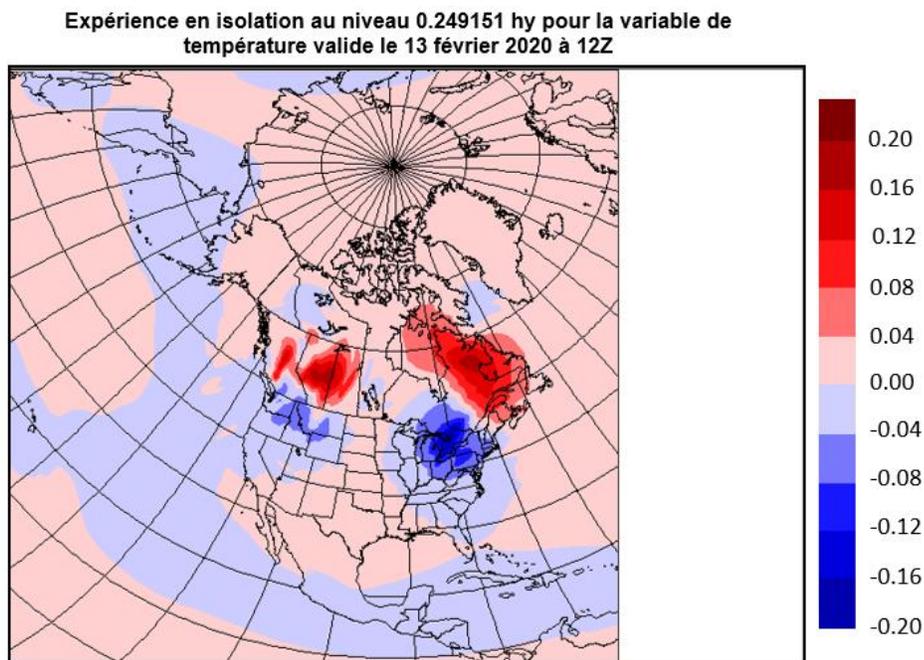


Figure 3.5 – Carte des incréments d’analyse de l’expérience d’assimilation en isolation au niveau 0.249151 en coordonnées hybrides, équivalent à environ 250 hPa, pour la variable de température (TT), pour le 13 février 2020 à 12Z.

La figure 3.5 montre un effet d’étalement de l’information lorsqu’on compare cette figure à la couverture des données présentée précédemment (fig. 3.4). Les données ont essentiellement de l’influence autour de la région où elles ont été enregistrées. Dans ce cas-ci (fig. 3.5), en rouge sont présentées les observations qui étaient plus chaudes que l’ébauche alors qu’en bleu les observations de température étaient plus froides que l’ébauche. Aussi, les zones plus foncées, comme au centre de l’Alberta, au sud et au nord du Québec, correspondent aux aéroports où on a des données dans la colonne atmosphérique lors des atterrissages et décollages des avions. Ceci se traduit en un signal plus fort à ces endroits. On remarque aussi un étalement qui est associé aux covariances d’erreur de prévisions.

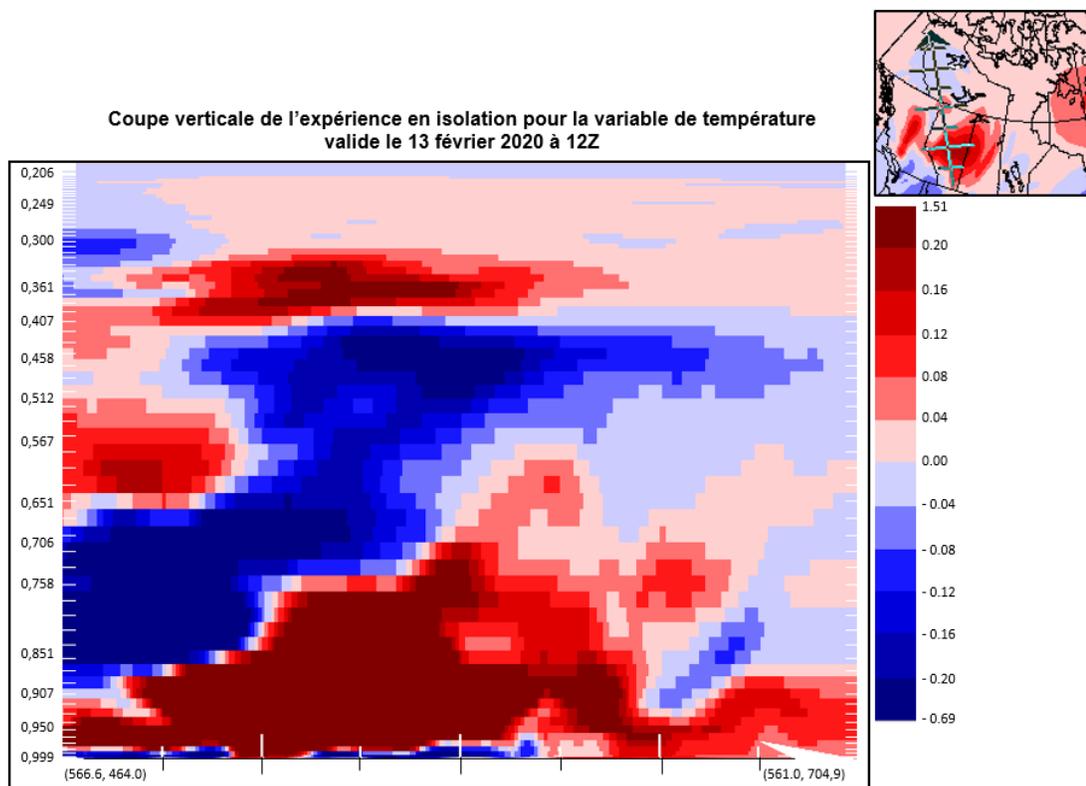


Figure 3.6 – Coupe verticale pour la région s'étalant de l'Alberta au territoire du Yukon, carte de la région présentée dans le coin supérieur droit de la figure. Incréments d'analyse de l'expérience d'assimilation en isolation en coordonnées hybrides, faire $\times 10^3$ pour trouver l'équivalence en hPa, pour la variable de température (TT), avec un facteur de 10^2 sur les données présentées en $^{\circ}\text{C}$, pour le 13 février 2020 à 12Z. Les niveaux verticaux sont présentés à gauche alors que la charte des couleurs des données est présentée à droite.

La figure ci-dessus (fig. 3.6) montre que les zones plus foncées, menant à des corrections plus élevées, sont localisées environ à la hauteur des vols. Près de l'aéroport de Fort McMurray, là où les atterrissages et les décollages permettent d'enregistrer un nombre plus élevé de données dans la colonne atmosphérique. Ceci permet alors aux corrections d'être plus grandes près de cette zone. D'autre part, plus au nord, on remarque que les régions plus foncées sont encore une fois là où les données sont enregistrées, c'est-à-dire au niveau du vol. Cette expérience en isolation permet de constater que les

incréments sont en accord avec l'endroit où les observations sont enregistrées. Par conséquent, les corrections sont plus élevées près des aéroports puisqu'un nombre accru de données y est enregistré.

3.3.2 Cycle FLYHT et retrait des données FLYHT

L'expérience en isolation a permis d'observer un signal clair dans les données et ainsi d'observer son influence. Par contre, il est nécessaire de calculer l'impact de nouvelles données d'observations en présence des autres types d'observations puisque c'est ainsi qu'il est possible de déterminer leur valeur ajoutée et leur importance dans l'analyse.

L'ébauche de cette expérience-ci inclut l'influence desdites données d'avions FLYHT. Pour en évaluer l'impact, on procède en excluant seulement les données d'observation FLYHT du cycle FLYHT à un instant donné (FLYHTMinus), permettant de produire une nouvelle analyse pour ce cas.

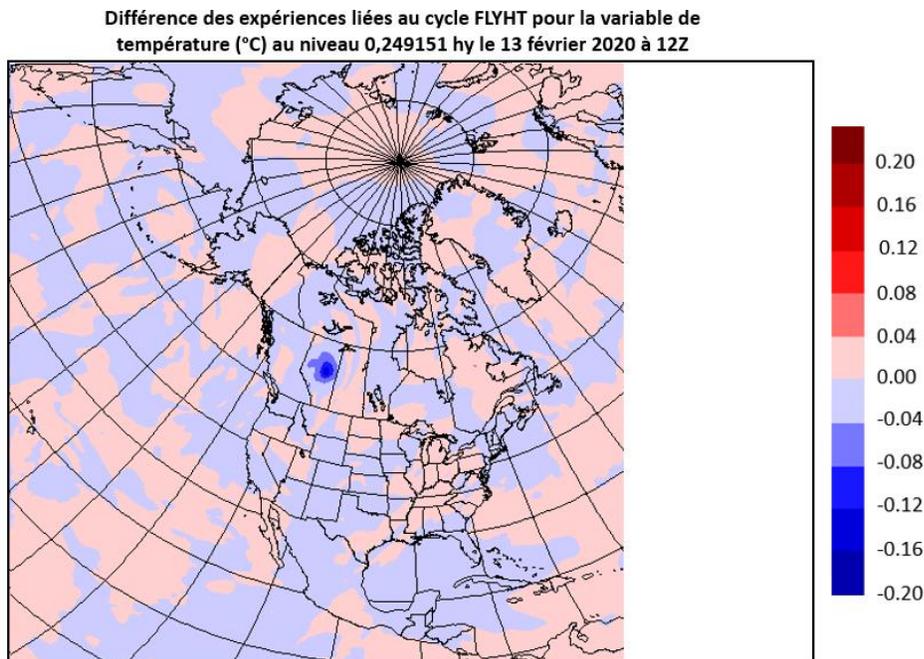


Figure 3.7 – Carte de la différence des incréments d’analyse entre le cycle FLYHT (incluant toutes les données d’observation supplémentaires) et une expérience où les nouvelles données d’avions ont été retirée (FLYHT – FLYHTMinus), pour la variable température en °C à 0,249151 en coordonnées hybrides, équivalent à environ 250 hPa.

La figure 3.7 présente la différence des incréments d’analyse des deux expériences associées au cycle FLYHT, soit l’expérience de référence incluant toutes les données d’observation (FLYHT), ainsi que l’expérience connexe où il y a eu retrait des données d’avions (FLYHTMinus) pour la journée du 13 février 2020. L’incrément d’analyse est beaucoup plus faible dans le cas de cette ESO (FLYHT - FLYHTMinus) que vu précédemment pour l’expérience en isolation (fig. 3.5). Ceci montre que les données existantes, qui sont normalement assimilées, expliquent une bonne partie de l’incrément de l’expérience en isolation. En ce qui concerne les nouvelles données d’avions, leur valeur ajoutée est moindre lorsqu’on les assimile en présence des autres

observations, puisque le système tant à prendre en compte la redondance d'information entre les données d'avion et les données existantes.

La région en bleu foncé qui se trouve en Alberta correspond à l'aéroport de Fort McMurray. Comme la quantité de données enregistrées est plus importante dans ce secteur (fig. 3.3 – *panneau gauche*) et que les avions enregistrent des données dans toute la colonne atmosphérique, ceci donne un signal plus fort à cet endroit. Il est aussi possible de regarder le comportement des incréments d'analyse dans la colonne atmosphérique à l'aéroport de Fort McMurray. Cette figure (fig. 3.8) montre un profil de la différence des incréments en cet endroit. On constate qu'il y a beaucoup de corrections dans toute la colonne atmosphérique dû aux nouvelles données. Les petits cercles présents sur le profil correspondent aux niveaux verticaux du modèle.

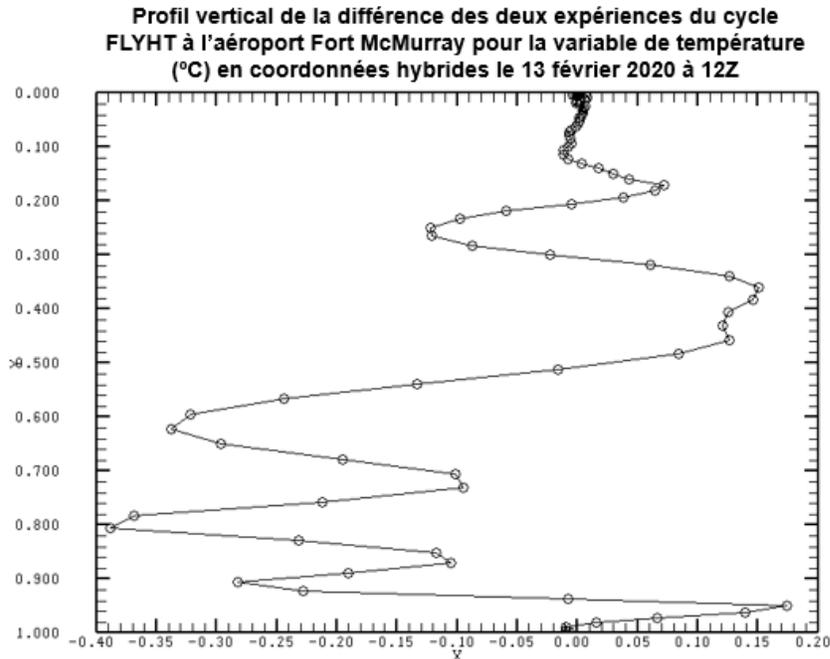


Figure 3.8 – Soustraction des incréments d'analyse de température entre le cycle FLYHT et FLYHTMinus (FLYHT – FLYHTMinus), correspondant géographiquement à l'aéroport de Fort McMurray. Variable de température (°C), en coordonnées hybrides (axe des ordonnées), pour le 13 février 2020 à 12Z.

On remarque que la correction la plus importante en ce point se situe à environ 0.8 hy, équivalent à 800 hPa, pour une correction de -0,4 °C, donc les avions ont enregistré des températures plus fraîches que l'ébauche prévoyait. Il est normal d'observer des différences moins importantes en présence d'autres types observations puisque l'assimilation de données tend à prendre en compte la redondance et ne garde que la valeur ajoutée des observations. Par contre, il est possible d'observer un impact perceptible, dû au fait qu'il y a moins d'observations dans le Nord canadien.

3.3.3 Cycle contrôle et ajout des données FLYHT

Le cycle FLYHT, contrairement au cycle contrôle, a déjà vu et assimilé les nouvelles données d'avions. Ceci implique que l'ébauche a été influencée par ces nouvelles données et que l'analyse a donc été corrigée au fil du temps par les données de ces avions qui ont survolé le Nord canadien. En considérant une ébauche provenant d'un cycle d'assimilation n'ayant assimilé aucune donnée FLYHT, deux incréments d'analyse ont été calculés, l'un ayant assimilé seulement les données opérationnelles (désigné par CTL) et l'autre ayant assimilé les données FLYHT en plus des données opérationnelles (désigné CTLPlus). La différence de ces deux incréments reflète l'impact des données FLYHT lorsqu'ajoutées à l'assimilation des données existantes. Ceci a été réalisé pour le cas du 13 février 2020 à 12 UTC.

Une expérience similaire a ensuite été faite en utilisant l'ébauche du cycle FLYHT ayant assimilé les données FLYHT. L'incrément d'analyse de cette expérience (désigné par FLYHT) a ensuite été comparé à l'incrément obtenu en répétant l'assimilation en retirant les données FLYHT des données

assimilées (FLYHTMinus). La figure 3.9 représente ces résultats au même endroit que pour le profil de la figure 3.8.

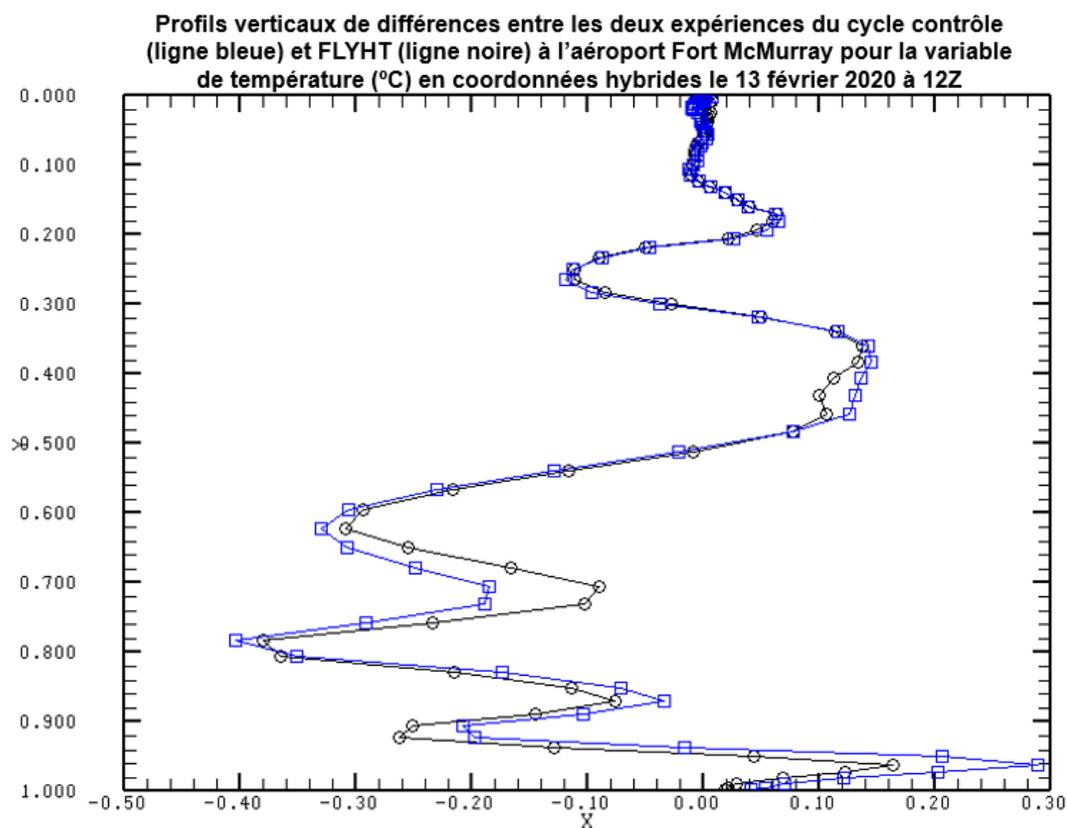


Figure 3.9 – **Ligne bleue** : Soustraction des incréments d'analyse entre le cycle contrôle (incluant toutes les données d'observation sauf les données d'avions FLYHT) et une expérience où les nouvelles données d'avions ont été ajoutées (CTLPlus – CTL), correspondant géographiquement à l'aéroport de Fort McMurray. Variable de température (°C) en coordonnées hybrides (axe des ordonnées), pour le 13 février 2020 à 12Z. **Ligne noire** : Soustraction des incréments d'analyse de température entre le cycle FLYHT (incluant toutes les données d'observation supplémentaires) et une expérience où les nouvelles données d'avions ont été retirée (FLYHT – FLYHTMinus), correspondant géographiquement à l'aéroport de Fort McMurray. Variable de température (°C), en coordonnées hybrides (axe des ordonnées), pour le 13 février 2020 à 12Z.

La ligne bleue réfère aux expériences avec l'ébauche du cycle contrôle n'ayant pas assimilé les données d'avion (CTLPlus - CTL) alors que la ligne noire est

le résultat du cycle FLYHT dont l'ébauche a été influencée par les données d'avion assimilées précédemment (FLYHT – FLYHTMinus). Les différences illustrent qu'en ayant une ébauche qui a été influencé par lesdites données, cela influence les ébauches mais aussi la valeur ajoutée de certaines observations. En comparant les deux ESO, on observe que la différence la plus grande se voit près de la surface où l'écart entre les expériences est de 0,18 °C pour la première ESO et près de 0.30 °C pour la seconde. Les différences demeurent très petites et considérées peu significatives étant donné l'incertitude associée à une analyse telle qu'estimée par un filtre de Kalman d'ensemble par exemple (Caron *et al.*, 2015).

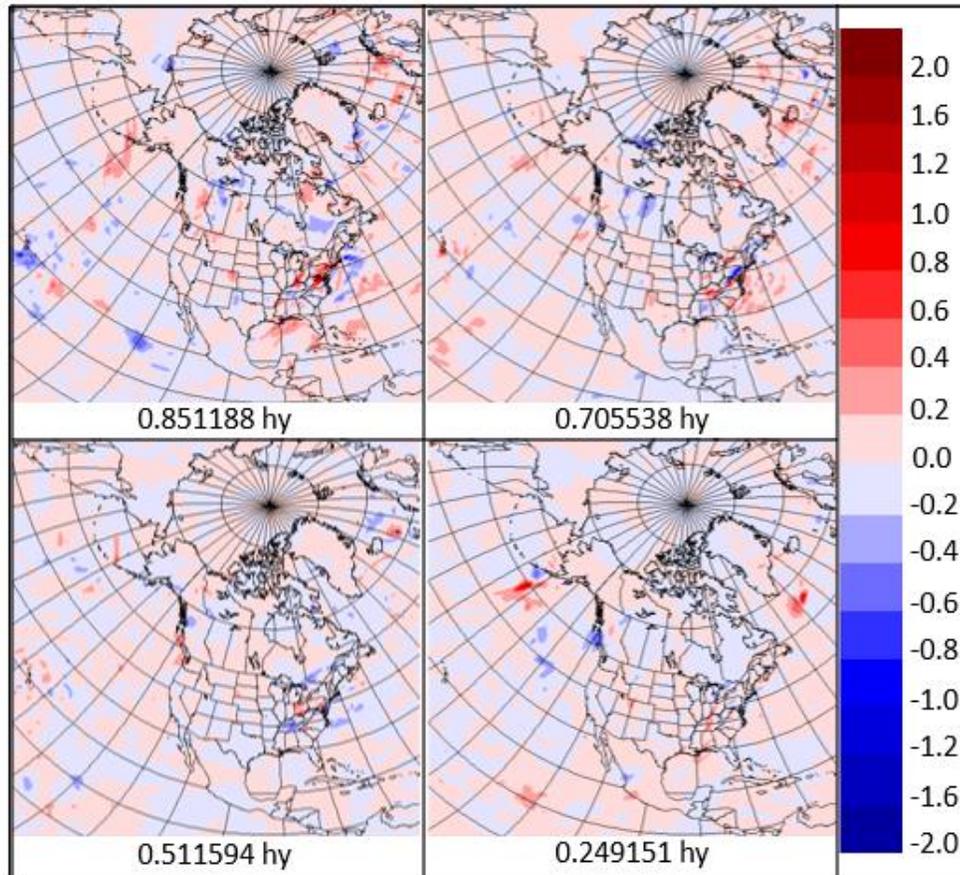


Figure 3.10 – Impact cumulatif net calculé par la différence des incréments d'analyse du cycle FLYHT et du cycle contrôle (FLYHT - CTL) pour les niveaux hybrides énoncés et la variable de température (°C).

La figure 3.10 représente la différence entre l'incrément de l'expérience FLYHT et celui de l'expérience (CTL). On conclut que les différences sont faibles entre les deux cycles d'assimilation.

Si l'impact cumulatif avait présenté des différences significatives, les deux cycles auraient été analysés pour déterminer leur impact respectif sur les prévisions. Toutefois, dans la suite de notre étude, on ne considèrera que les

résultats du cycle FLYHT et négligeant l'impact de la différence entre les ébauches.

3.3.4 Impact des données d'avions sur les prévisions

Ci-dessous est présenté l'impact des données d'avions et comment le signal se propage au cours du temps. Ces prévisions ont été produites en comparant les prévisions du cycle FLYHT aux prévisions du cycle FLYHTMinus pour l'analyse du 13 février 2020 à 12Z. Une prévision a ensuite été produite de cette analyse. On remarque qu'il y a effectivement propagation vers l'est, si on compare à la situation météorologique présente à ce moment (fig. 3.3 – *panneau de droite*).

Prévision de l'analyse des vents est-ouest (nœuds) à partir du 13 février 2020 18Z
 au niveau hybride 0,861601 pour les expériences du cycle FLYHT

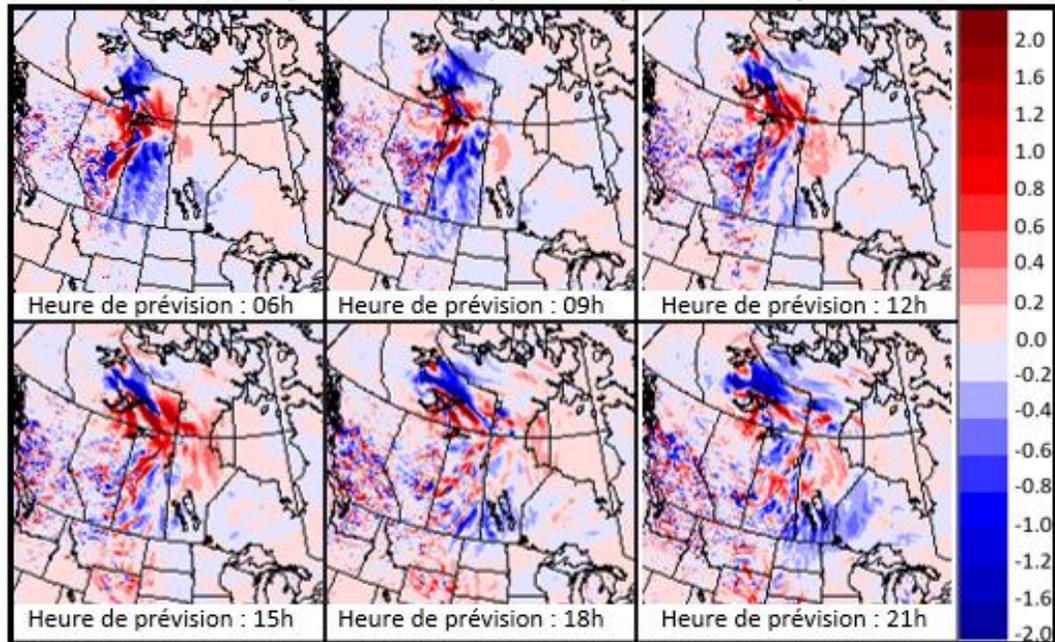


Figure 3.11 – Impact des données d'avions FLYHT dans le Nord canadien sur les prévisions à partir de l'heure de validité 18Z du 13 février 2020 jusqu'au 14 février 9Z pour la variable des vents est-ouest (nœuds). Soustraction entre l'expérience de référence FLYHT et cette même expérience où les données d'avions FLYHT ont été retirées pour en faire ressortir les différences.

Il est intéressant de voir comment cela se propage dans le temps et l'espace. On voit (fig. 3.11) qu'il y a effectivement propagation vers l'est, puisque la correction se déplace jusqu'à la Baie d'Hudson à partir de la prévision 15 heures. Pour les heures précédentes, il n'y a pas de corrections dans ce secteur de la carte. L'influence des observations n'est pas seulement là où on enregistre les observations et il est intéressant de voir comment cela se traduit sur une carte. Cela permet de mettre en relief ce qui a été montré un peu plus tôt concernant les scores RMS (fig. 3.1 et 3.2).

3.4 Présentation du cas #2 : 5 mars 2020

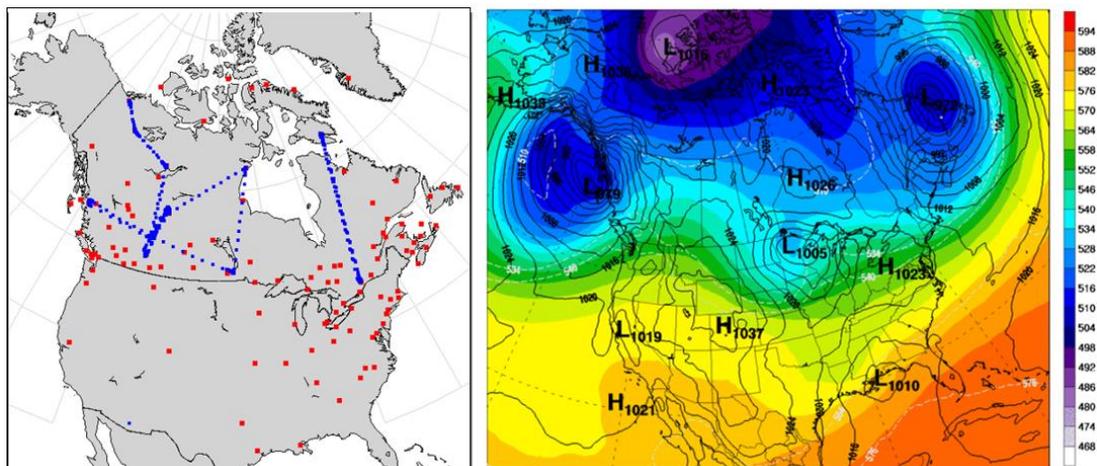


Figure 3.12 - **Panneau gauche** : Carte de couverture des données d'avions FLYHT en bleu pour le 5 mars 2020, données récoltées de la surface jusqu'à 100 hPa. Données extraites du site interne d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). Les points rouges correspondent aux aéroports où les compagnies canadiennes y atterrissent ou y décollent. **Panneau de droite** : Carte des hauteurs de 500 hPa (échelle de couleurs) et d'épaisseur de 1000-500 hPa en dam (lignes pointillées blanches), ainsi que la pression moyenne au niveau de la mer en hPa (lignes pleines noires). Analyse valide le 5 mars 2020 à 12Z du modèle SGPD. Données fournies par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) – <http://meteocentre.com/>

Le panneau de gauche de la figure ci-dessus (fig. 3.12) montre la couverture des données qui s'étend sur toutes les provinces de l'ouest, ainsi que sur le Québec dans la direction nord-sud. On remarque que les données sont plus éparées que pour la journée du 13 février 2020, couvrant une plus grande partie du Canada. En ce qui concerne la situation météorologique (panneau de droite), on remarque une basse pression près de l'aéroport de *Prince Rupert*, situé un peu au nord de Vancouver sur la côte-ouest du Canada. La basse pression se dissipe rapidement en touchant la côte et la situation météorologique devient rapidement calme à l'échelle du Canada. Cette situation a été choisie pour déterminer si les données d'avions avaient un plus grand impact dans la colonne atmosphérique lorsque le passage d'une

dépression est synchronisé à la collecte des données. En regardant l'amplitude de l'incrément d'analyse, combiné au fait que la quantité de données récoltées était faible en ce point, il n'a pas été possible d'établir que ces données avaient un plus grand impact dans cette situation.

3.4.1 Impact des données d'avions sur les prévisions

Ce cas a été choisi en premier lieu pour voir comment les données influenceraient l'analyse dans la colonne atmosphérique en présence d'une basse pression. Par contre, le nombre de données enregistrées était insuffisant et les résultats non concluants. Conséquemment, on utilisera cette situation pour voir comment l'incrément d'analyse se propage au cours du temps dans le cas d'une situation météorologique calme, contrairement à ce qui a été étudié pour le cas #1.

Prévision de l'analyse des vents est-ouest (nœuds) à partir du 5 mars 2020 18Z au niveau hybride 0,861601 pour les expériences du cycle FLYHT

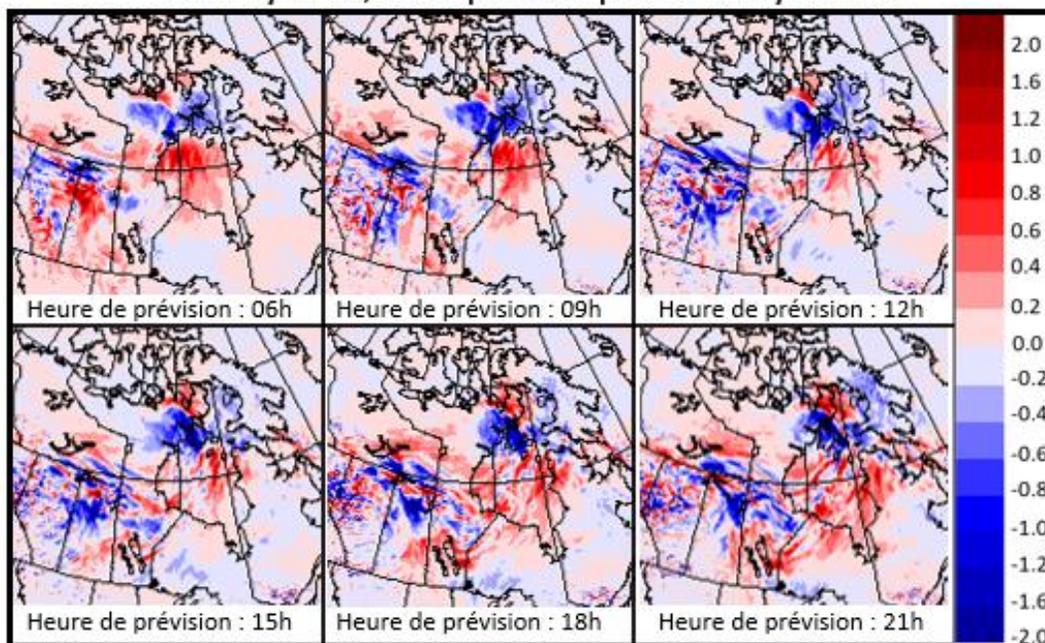


Figure 3.13 - Impact des données d'avions FLYHT dans le Nord canadien sur les prévisions à partir de l'heure de validité 18Z du 5 mars 2020 jusqu'au 6 mars 9Z pour la variable des vents est-ouest (nœuds). Soustraction entre l'expérience de référence FLYHT et cette même expérience où les données d'avions FLYHT ont été retirées pour en faire ressortir les différences.

On remarque ici que l'incrément semble s'étendre au cours du temps, contrairement au cas #1 où on observait une propagation vers l'est dû à la situation météorologique présente à ce moment. L'incrément est donc beaucoup plus étalé sur la carte et ne semble pas avoir de direction particulière. Ceci concorde bien avec la situation météorologique observée pour ce cas.

3.5 Présentation du cas #3 : 14 mars 2020

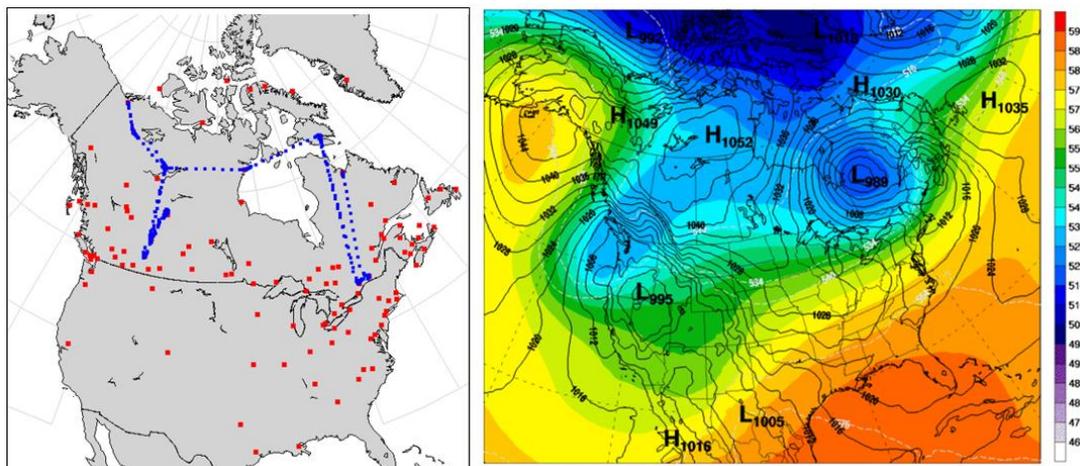


Figure 3.14 - **Panneau gauche** : Carte de couverture des données d'avions FLYHT en bleu pour le 14 mars 2020, données récoltées de la surface jusqu'à 100 hPa. Données extraites du site interne d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). Les points rouges correspondent aux aéroports où les compagnies canadiennes y atterrissent ou y décollent. **Panneau de droite** : Carte des hauteurs de 500 hPa (échelle de couleurs) et d'épaisseur de 1000-500 hPa en dam (lignes pointillées blanches), ainsi que la pression moyenne au niveau de la mer en hPa (lignes pleines noires). Analyse valide le 14 mars 2020 à 12Z du modèle SGPD. Données fournies par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) – <http://meteocentre.com/>

La couverture des données présentée ci-haut (fig. 3.14) est similaire à celle de la journée du 13 février 2020. Par contre, ici, des données ont aussi été enregistrées au Nunavut ainsi qu'au-dessus de la Baie d'Hudson. Cette journée a été choisie puisque, comme il est possible de le remarquer sur le panneau de droite (fig. 3.14), une basse pression de 989 hPa traverse la province du Québec de l'ouest vers l'est. La haute pression de 1052 hPa poursuit aussi son parcours contournant la Baie d'Hudson par le sud et en traversant le Québec de l'ouest vers le nord-est. Ces situations météorologiques passent dans la ligne de collecte des données d'avion traversant le Québec Nord-Sud. Cette situation a été choisie pour voir l'impact des données d'avions lorsque des données étaient enregistrées au moment

du passage transversal d'un système météorologique. Toutefois, il est possible que la quantité de données enregistrées soient insuffisantes pour établir un lien. On remarque que la densité des données est faible au-dessus du Québec comparativement à la densité des points en Alberta ou dans les Territoires du Nord-Ouest.

3.5.1 Impact des données d'avions sur les prévisions

Une prévision 42h a pu être produite pour évaluer l'impact des données d'avions pour le cas #3. Ici, le signal est bien perceptible au-delà d'une prévision 21h. Dans les deux premiers cas, beaucoup de bruit est observé sur les cartes ce qui ne permet pas de bien voir la propagation de l'incrément d'analyse après 21h de prévision. Tout comme pour les prévisions produites dans le cadre des deux premiers cas, une prévision pour chacune des expériences du cycle FLYHT a été produite à partir de l'analyse de départ, ici à partir du 14 mars 2020 à 12Z. L'évolution de l'incrément d'analyse présenté ci-dessous provient de la comparaison entre les deux prévisions associées au cycle FLYHT (FLYHT - FLYHTMinus). La première expérience de ce cycle comprenant tous les types d'observations (FLYHT) et la seconde expérience où les données d'avions FLYHT sont retirées (FLYHTMinus). La soustraction de ces deux expériences, aux heures correspondantes, permet d'observer ci-dessous l'évolution de l'incrément d'analyse pour une prévision 42h.

Prévision de l'analyse des vents est-ouest (nœuds) à partir du 14 mars 2020 18Z
au niveau hybride 0,861601 pour les expériences du cycle FLYHT

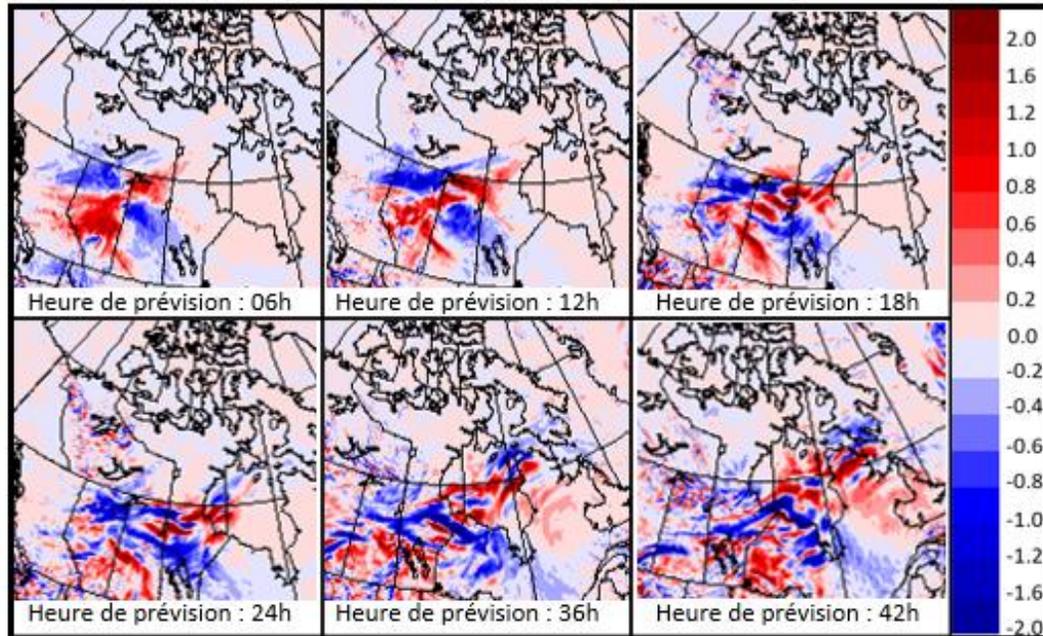


Figure 3.15 - Impact des données d'avions FLYHT dans le Nord canadien sur les prévisions à partir de l'heure de validité 18Z du 14 mars 2020 jusqu'au 16 mars 6Z pour la variable des vents est-ouest (nœuds). Soustraction entre l'expérience de référence FLYHT et cette même expérience où les données d'avions FLYHT ont été retirées pour en faire ressortir les différences.

On remarque qu'il y a propagation vers l'est. Dès la 6^e heure de prévision, on constate qu'une section négative de l'incrément semble se déplacer vers le sud-est alors qu'une section positive de l'incrément semble plutôt se diriger vers le nord-est. Plus les heures se succèdent, plus l'incrément semble contourner un obstacle non visible sur la carte de prévision. Ci-dessous est présentée une carte montrant la situation météorologique du 16 mars 2020 à 0Z, ce qui équivaut à la 36^e heure de prévision.

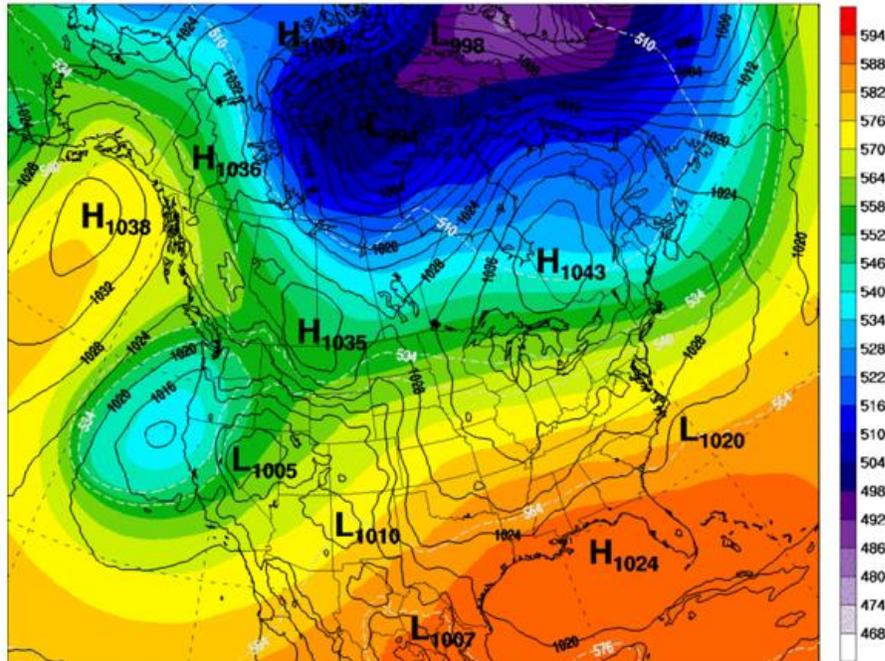


Figure 3.16 - Carte des hauteurs de 500 hPa (échelle de couleurs) et d'épaisseur de 1000-500 hPa en dam (lignes pointillées blanches), ainsi que la pression moyenne au niveau de la mer en hPa (lignes pleines noires). Analyse valide le 16 mars 2020 à 0Z du modèle SGPD. Données fournies par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) – <http://meteocentre.com/>

En comparant les prévisions illustrées sur la figure 3.15 et en observant la haute pression située au sud-est de la Baie d'Hudson sur la figure 3.16, il est possible de voir pourquoi on semble voir un effet de contournement sur la carte des prévisions. Cet effet se fait voir sur toutes les prévisions de ce cas et particulièrement à la 24^e et 36^e heure de prévision. On observe alors que l'amélioration des prévisions peut effectivement dépendre de la situation météorologique présente pour une période donnée. Les prévisions affectent des régions différentes sur la carte comparativement aux prévisions sans l'influence de ces nouvelles données d'avions.

CONCLUSION

Le Nord canadien est peu couvert en données d'observations *in situ* dans la colonne atmosphérique. Les stations météorologiques qui récoltent les données de radiosondages se trouvent en grande partie plus au sud du Canada, près des grands centres urbains. Une alternative est d'assimiler des données d'avions. Comme les radiosondages, les avions enregistrent des données couvrant un profil atmosphérique au décollage et à l'atterrissage. Durant le vol, les données sont récoltées à l'altitude du vol.

Le but de cette étude était d'évaluer l'impact de l'ajout de données d'avions AMDAR dans le Nord canadien sur la qualité de l'analyse et sur les prévisions qui en résultent. Dans Zaitseva *et al.* (2020), les résultats de deux cycles d'assimilation montraient que celui qui assimilait des données d'avions commerciaux provenant de onze (11) vols en plus des données opérationnelles conduisait, en moyenne, à une légère réduction de l'erreur d'analyse par rapport au cycle qui n'assimilait que les données opérationnelles. Leurs résultats notaient également une légère amélioration des prévisions. Cette réduction de l'erreur est une moyenne de l'erreur quadratique moyenne sur la période de février et mars 2020.

Dans cette étude, l'impact des nouvelles données sur les prévisions a été évalué pour des conditions météorologiques particulières durant cette période. Le but était de voir comment l'ajout des données d'avions peuvent influencer une prévision en fonction des conditions météorologiques présentes à ce moment. Au préalable, on a examiné la moyenne des incréments d'analyse sur toute la période ce qui pourrait révéler la présence d'un biais causé par les observations ou le modèle (Rodwell et Palmer, 2007; Chikhar et Gauthier,

2017). Il n'a pas été possible d'observer un signal suffisant pour établir que l'ajout des données d'observations AMDAR avait une influence perceptible sur la moyenne des incréments d'analyse.

Les diagrammes de Hovmöller ont montré que la situation météorologique était relativement calme pour les mois de février et mars 2020. En examinant la position des données d'avions, trois situations ont été choisies montrant une circulation atmosphérique propice à propager l'information des observations dans les régions avoisinantes. En utilisant les résultats du cycle d'assimilation de référence, le *contrôle* (CTL), et ceux du cycle *FLYHT* dans lequel on a ajouté les données d'avion à celles utilisées dans le contrôle, plusieurs expériences ont été produites. Dans une expérience dite en isolation, seules les données d'avions FLYHT ont été assimilées en utilisant l'ébauche du cycle FLYHT pour mesurer l'impact de ces données en absence de toute autre donnée. L'incrément obtenu est donc localisé au voisinage de ces observations. D'autre part, en soustrayant l'incrément obtenu du cycle FLYHT de celui obtenu en répétant l'analyse mais en retirant les données d'avions (FLYHTMinus), on peut mesurer l'impact de ces données lorsqu'assimilées avec toutes les autres. On en mesure ainsi l'impact instantané qui correspond à la valeur ajoutée des données d'avion lorsqu'assimilées avec les données existantes. On a alors observé un impact moindre que dans l'expérience précédente qui donnait l'impact des données en absence de toute autre observations. Ceci est observé pour les trois cas retenus pour notre étude.

Le volume de données additionnelles FLYHT est très faible comparativement aux millions de données déjà assimilées opérationnellement. Toutefois, dans le cycle FLYHT, l'ébauche était influencée par les données d'avion assimilées avant la date où étaient produits nos incréments d'analyse. En comparant l'ébauche du cycle contrôle et celle du cycle FLYHT, on a constaté des

différences minimales relativement aux incréments d'analyse. En répétant les calculs avec les ébauches du cycle contrôle, les incréments obtenus ne montraient pas de différences significatives. En ce qui concerne cette étude et ces nouvelles données, le choix de l'ébauche ne donnait pas de différences perceptibles. Cependant, les données d'avions jouent un rôle dans l'amélioration de la qualité de l'analyse à différents niveaux atmosphériques. Cet impact est plus notable dans les régions près des aéroports où au décollage et à l'atterrissage, un profil de l'atmosphère est mesuré.

La dernière étape du projet était d'examiner les prévisions de chaque cas issu du cycle FLYHT. En soustrayant une prévision du cycle FLYHT d'une prévision utilisant ce même cycle sans les données d'avions (FLYHTMinus), l'évolution de l'incrément dans la prévision montre comment l'impact de ces données se déplace avec la circulation qui est différente dans les trois cas considérés. On peut conclure, en regardant les cartes des prévisions des différents cas présentés dans cette étude, que l'impact de données dépend de la situation atmosphérique. Que ce soit d'une propagation vers l'est, une situation relativement calme, ou encore, la présence d'une haute pression, les situations météorologiques ont un rôle à jouer en ce qui concerne l'amélioration des prévisions pour les régions avoisinantes. Ici, les prévisions ont été examinées à un niveau équivalent à environ 850 hPa puisque la quantité des données y était plus élevée et le signal en ressortait plus fort. Il serait intéressant dans une autre étude dans le contexte où plus de données en altitude étaient récoltées, de regarder les prévisions à 250 hPa. On pourrait ainsi voir comment le courant-jet influence les prévisions en altitude.

L'approche utilisée dans ce projet propose une méthode qui permet de visualiser l'impact d'observations sur la prévision pour des situations météorologiques particulières. Dans le cadre d'expériences sur les systèmes

d'observation, les erreurs d'analyse et de prévision sont évaluées statistiquement pour s'assurer qu'en moyenne, les prévisions et les analyses soient améliorées. Des études de sensibilité (Laroche *et al.*, 2002) ont montré que dans certaines situations, des changements minimes aux conditions initiales peuvent conduire à des changements importants dans les prévisions et que de tels changements peuvent être reliés à des situations météorologiques particulières. L'étude présentée ici a examiné comment les changements apportés par des données d'avion ont une influence qui varie avec la situation météorologique. Une exploration plus élaborée pourrait mettre en évidence des situations pour lesquelles, de temps à autre, ces données pourraient avoir un effet déterminant sur la prévision.

RÉFÉRENCES

- Bauer, P., Thorpe, A., & Brunet, G. (2015). *The quiet revolution of numerical weather prediction*. *Nature*, 525(7567), 47-55.
- Bédard, J., Laroche, S., & Gauthier, P. (2017). *Near-surface wind observation impact on forecasts: Temporal propagation of the analysis increment*. *Monthly Weather Review*, 145(4), 1549-1564.
- Benjamin, S. G., Schwartz, B. E., & Cole, R. E. (1999). *Accuracy of ACARS wind and temperature observations determined by collocation*. *Weather and Forecasting*, 14(6), 1032-1038.
- Biswas, B. C. (1990). *Forecasting for agricultural application*. *Mausam*, 41(2), 329-334.
- Buehner, M., McTaggart-Cowan, R., Beaulne, A., Charette, C., Garand, L., Heilliette, S., Lapalme, E., Laroche, S., R. Macpherson, S., Morneau, J. & Zadra, A. (2015). *Implementation of deterministic weather forecasting systems based on ensemble-variational data assimilation at environment canada. Part I: The global system*. *Monthly Weather Review*, 143(7), 2532-2559.
- Caron, J., Milewski, T., Buehner, M., Fillion, L., Reszka, M., Macpherson, S., & St-James, J. (2015). *Implementation of Deterministic Weather Forecasting Systems Based on Ensemble-Variational Data Assimilation at Environment Canada. Part II: The Regional System*. *Monthly Weather Review*, 143(7), 2560-2580.
- Chikhar, K. et P. Gauthier. (2017). *Impact of lateral boundary conditions on regional analyses*. *Mon. Wea. Rev.*, 145, 1361-1379.
- Daley, R. (1993). *Atmospheric data analysis (No. 2)*. Cambridge university press.
- de Haan, S., de Jong, P., & van der Meulen, J. (2021). *Characterizing and correcting the warm bias observed in AMDAR temperature observations*. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 1-12.
- English, S.J., A. McNally, N. Bormann, K. Salonen, M. Matricardi, A. Horányi, M. Rennie, M. Janiskova, S. di Michele, A.J. Geer, E. di Tomaso, C. Cardinali, P. de Rosnay, J.M. Sabater, M. Bonavita, C. Albergel, R. Engelen & J.-N. Thépaut. (2013). *Impact of satellite data*.

ECMWF Tech. Memo, 711, 46 pages, DOI : <http://dx.doi.org/10.21957/b6596ot1s>.

Fournier, G. (2006). *Development of the Canadian aircraft meteorological data relay (AMDAR) programs and plans for the future*. In Proceedings of the 10th Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface, Atlanta, GA, Amer. Meteor. Soc.

Gauthier, P., Charette, C., Fillion, L., Koclas, P., & Laroche, S. (1999). *Implementation of a 3D variational data assimilation system at the Canadian Meteorological Centre. Part I: The global analysis*. *Atmosphere-Ocean*, 37(2), 103-156.

Hovmöller, E. (1949). *The trough-and-ridge diagram*. *Tellus*, 1(2), 62-66

Ingleby, B., Candy, B., Eyre, J., Haiden, T., Hill, C., Isaksen, L., ... & Tingwell, C. (2021). *The impact of COVID-19 on weather forecasts: A balanced view*. *Geophysical research letters*, 48(4), e2020GL090699.

Laroche, S., M. Tanguay, A. Zadra et J. Morneau. (2002). *Use of adjoint sensitivity analysis to diagnose the CMC global analysis performance: A case study*, *Atmosphere-Ocean*. 40:4, 423-443, DOI: 10.3137/ao.400404.

Laroche, S., & Poan, E. D. (2021). *Impact of the Arctic observing systems on the ECCO global weather forecasts*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.

Lorenc, A. C. (1988). *Optimal nonlinear objective analysis*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 114(479), 205-240.

Lupu, C., P. Gauthier et S. Laroche. (2011). *Evaluation of the Impact of Observations on Analyses in 3D- and 4D-Var based on Information Content*. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 726-737.

Rodwell, M. J., et T. N. Palmer. (2007). *Using numerical weather prediction to assess climate models*. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 133, 129–146.

Section informatique (RPN). (2019). *XREC (version 5.11.0) [Programme de visualisation]*. Dorval : Division de Recherche en Prévision Numérique, Environnement Canada.

Zaitseva Y., S. Laroche et J. St-James. (2020). *Upper air renewal project II : Monitoring, assessment and impact study of FLYHT SBO st*

ECCC. Technical report from the Canadian Centre for Meteorological and Environmental Prediction (CCMEP). Environment and Climate Change Canada, 17 pages.