

Diagnostic de turbulence en EDR pour l'aéronautique pour ARPEGE cy43t2_op3

Table des matières

1. Contexte du développement.....	2
2. Méthodologie.....	2
a. <i>Sélection et combinaison d'indices</i>	2
b. <i>Calibration finale</i>	4
i. Calibration pour la région d'altitude > FL200.....	4
ii. Calibration pour les régions d'altitude < FL200.....	4
iii. Interpolation finale.....	4
3. Résultats et scores.....	5
a. <i>Sélection et combinaison d'indices</i>	5
b. <i>Scores</i>	5
c. <i>Comparaison par rapport aux diagnostics actuels</i>	5
4. Études de cas.....	7
a. <i>Turbulence dans les niveaux élevés</i>	7
i. Situation du 13 février 2019 au FL380 - Adriatique – Turbulence sévère par ondes orographiques.....	7
ii. Situation du 17 avril 2019 au FL340 - France – Turbulence modérée.....	9
iii. Situation du 14 avril 2019 au FL340 - France – Turbulence modérée à sévère (non détection).....	9
iv. Situation du 5 avril 2019 au FL370-390 - France – Turbulence modérée à sévère.....	10
v. Situation du 28 juillet 2019 au FL380 - Autriche – Turbulence sévère.....	11
vi. Situation du 23 mai 2018. Nouvelle-Zélande – FL200 et FL350 – Turbulence sévère par ondes orographiques.....	11
b. <i>Cas de turbulence aux niveaux intermédiaires et inférieurs</i>	11
i. Situation du 24 septembre 2019 au FL160 - France – Turbulence modérée à sévère dans une zone frontale.....	11
ii. Situation du 28 juillet 2019 au FL075 – France – Turbulence sévère par ondes orographiques.....	12
c. <i>Un exemple de turbulence liée à la convection</i>	13
i. Situation de CIT du 18 octobre 2018.....	13
d. <i>Comparaison globale – Diagnostic actuel / diagnostic EDR</i>	13
5. Conclusion.....	14
6. Perspectives.....	15
II. Annexes.....	16
A. Liste des indices.....	16
B. Scores des indices de CAT individuels.....	17

1. Contexte du développement

L'objectif de ce développement est de mettre au point un diagnostic pour prévoir le paramètre météorologique $EDR^{1/3}$ (« Cube root of Eddy Dissipation Rate / Racine cubique du taux de dissipation des tourbillons ») à destination des usagers aéronautiques. Ce paramètre est un paramètre météorologique décrivant le caractère turbulent de l'atmosphère indépendamment des caractéristiques de l'appareil. Dans le contexte aéronautique, il est pris sous sa racine cubique pour des raisons d'échelle de valeurs (~ entre 0 et 1), et est généralement référencé simplement sous le nom d' « EDR ». Dans ce projet, la construction de ce diagnostic est réalisée dans le but de décrire au mieux la turbulence aéronautique dans une gamme impactant l'aviation commerciale (avions de ligne).

Un grand nombre de diagnostics de turbulence aéronautique existent dans la littérature et nombre d'entre eux ne sont pas exprimés en EDR. Parmi ceux-ci, certains sont actuellement utilisés de manière opérationnelle à Météo-France pour des besoins internes (CNP) afin d'élaborer des prévisions expertisées (indices Ellrod1, Ellrod2, Dutton). Ces champs sont aussi fournis directement à des usagers extérieurs dans le cadre commercial (Extranets, flux de données grib/xml).

Les éléments actuels de la littérature montrent que les meilleurs résultats sont obtenus par **combinaison de plusieurs diagnostics**, l'idée étant d'identifier **plusieurs sources de turbulence**. L'exemple le plus abouti de cette approche est conduit par le NCAR sous la forme de leur produit GTG (Graphical Turbulence Guidance - Sharman et al. 2006, Sharman et al. 2017). Cet algorithme calcule une moyenne de plusieurs diagnostics préalablement convertis en *EDR* par une fonction de transfert climatologique (OACI, annexe 3, Sharman et al. 2014). La sélection des indices pertinents est réalisée grâce à un jeu d'observation in-situ de reports de turbulence. À l'heure actuelle, ces reports automatiques sont effectués par des compagnies aériennes américaines et sont donc majoritairement situés dans l'espace aérien américain.

2. Méthodologie

a. Sélection et combinaison d'indices

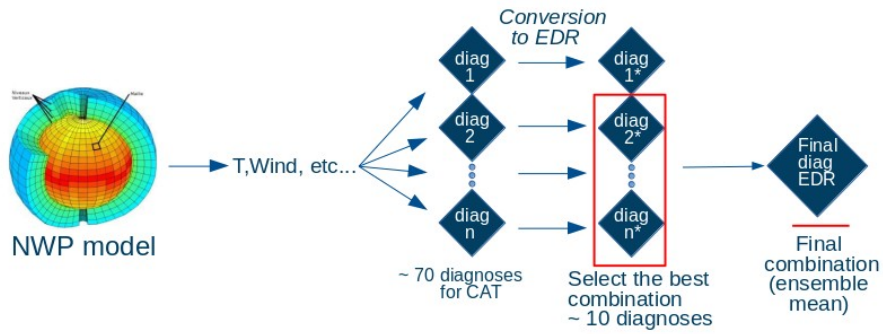
Nous utilisons la méthode de combinaison définie dans (Sharman et al. 2017). Cette méthode consiste à sélectionner et combiner un ensemble de diagnostics de turbulence. Elle est divisée en deux étapes (figure 1).

La **première étape** de l'algorithme consiste à **convertir chaque diagnostic en métrique EDR**. Ceci est réalisé en utilisant une climatologie de 5 ans d'EDR in-situ avion réalisée au-dessus des USA par Sharman et al. 2014. L'hypothèse de départ est que les diagnostics et les observations in-situ EDR suivent tous deux des distributions log-normales (voir figure 2). Cette étape de transformation consiste à calculer les paramètres de la fonction de transfert $\log(D_{diag \Rightarrow edr}) = a + b \cdot \log(D_{diag})$ permettant de reprojeter les valeurs du diagnostic vers des valeurs d'EDR.

La **deuxième étape** consiste à rechercher une combinaison de diagnostics parmi ceux précédemment convertis en EDR. Le critère de sélection et d'agrégation des diagnostics est la **maximisation de l'aire sous la courbe ROC¹ (AUC)** pour les événements de turbulence « modéré ou sévère ». La sélection est effectuée selon une **méthode itérative dite « forward »** qui arrête d'agréger les diagnostics lorsque le score n'augmente plus.

Le domaine vertical est divisé en trois sous-domaines : Upper-Levels (FL200-FL600), Mid-Levels (FL100-FL200), Low-Levels (<FL100). Pour chacun de ces sous-domaines, une sélection/combinaison d'indices est effectuée. Les trois combinaisons obtenues sont fusionnées pour obtenir un indice final 3D en réalisant une interpolation linéaire aux interfaces de chacune des 3 sous-domaines verticaux.

1 Fonction d'efficacité du récepteur



Use of a ~1 year observation database (PIREPs, in-situ EDR)

Figure 1 : Méthodologie. Etape 1 : Conversion de diagnostics de CAT individuels en EDR. Etape 2 : Sélection de la meilleure combinaison : le résultat final est la moyenne des diagnostics sélectionnés. En mode "production", seuls les indices entrant dans la combinaison finale sont calculés.

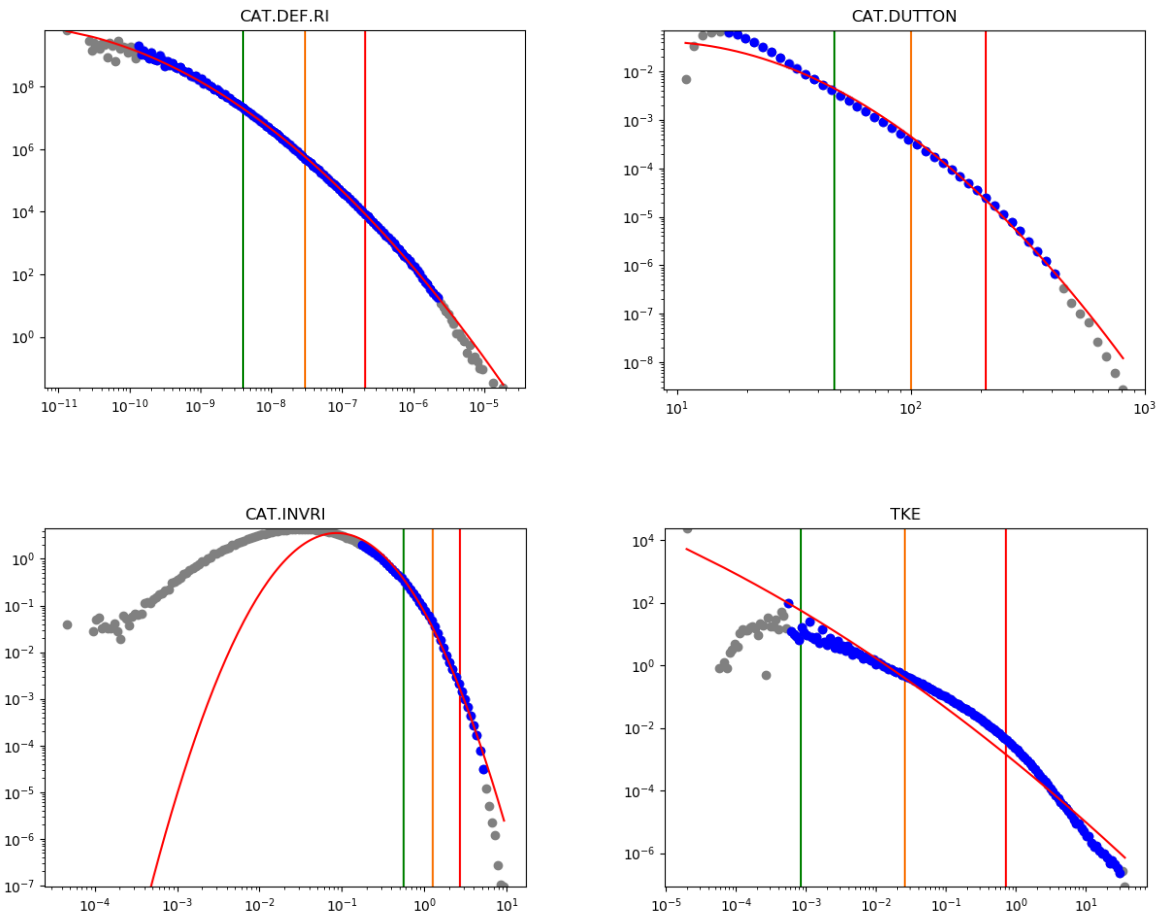


Figure 2 : Distributions de quelques indices de turbulence pour les niveaux d'altitude élevée (>FL200) - Échelles log/log. Les lignes rouges représente les lois log-normales ajustées pour chaque climatologie. Les lignes verticales vert / orange / rouge représentent la position des seuils théoriques d'EDR légère à modéré / modéré / sévère. Ces climatologies sont obtenues pour l'année 2018 avec des prévisions hebdomadaires au réseau de 00UTC - échéance 12h.

b. Calibration finale

La méthode de sélection et de combinaison permet d'obtenir, **pour chacune des trois tranches d'altitude, une sélection / combinaison d'indices** exprimées en EDR suivant les climatologies retenues. Pour autant, il existe plusieurs points à traiter avant de produire un diagnostic final unifié.

1. Les climatologies de référence retenues par Sharman et al. 2014 de ces sous-domaines verticaux sont établies par des observations d'EDR in-situ et souffrent de multiples biais :
 - évitement des zones de turbulence par les avions. Ces biais sont pris en compte de manière empirique par Sharman et al. 2014 dans l'établissement de la climatologie en sous-échantillonnant les observations de non-turbulence.
 - échantillonnage non régulier dans le temps (jour / nuit – été / hiver) et dans l'espace (fort échantillonnage des altitudes proches de la tropopause, hippodromes autour des aéroports, routes aériennes, climatologie USA uniquement).
2. La climatologie du diagnostic d'EDR final étant une moyenne de diagnostics individuels, elle est elle-même relativement sensible au nombre et à la nature des indices sélectionnés. De plus, les fortes valeurs d'EDR peuvent avoir tendance à être atténuées par la combinaison sous forme de moyenne.
3. L'application de la méthode de Sharman montre, dans notre cas, des sauts de valeurs aux interfaces entre les domaines verticaux du fait de combinaison d'indices différents.
4. Des seuils d'EDR précis pour les intensités de turbulence modérée à sévère sont définis règlementairement par l'OACI : (**turbulence modérée : $0.2 \text{ m}^{2/3} \cdot \text{s}^{-1}$ et sévère $0.45 \text{ m}^{2/3} \cdot \text{s}^{-1}$** pour les avions de catégorie intermédiaire – type A320).

Étant donné ces éléments, nous avons mis en place une **étape de calibration finale de l'indice EDR** afin d'être en conformité avec les seuils EDR de l'OACI définis au point 4. La méthodologie adoptée est la suivante :

i. Calibration pour la région d'altitude > FL200

→ Il nous faut définir empiriquement les seuils modérés / sévères de l'indice d'EDR non calibré. Pour cela on utilise l'indice de Dutton actuellement implémenté sur Soprano pour lequel ont été définis des seuils de turbulence modérée et sévère utilisés quotidiennement par les prévisionnistes. On choisit de définir les seuils EDR équivalents en **conservant les mêmes taux de fausses alarmes** que ceux calculés pour les différents seuils de l'indice de Dutton actuel. Les calculs sont menés sur des discrétisations spatiales et temporelles égales pour les deux indices afin de ne pas introduire de biais. On obtient les seuils suivants : **turbulence modérée : $0.195 \text{ m}^{2/3} \cdot \text{s}^{-1}$ et sévère : $0.3 \text{ m}^{2/3} \cdot \text{s}^{-1}$.**

→ A partir de ces seuils, on ré-échelonne le diagnostic EDR non calibré vers l'indice EDR calibré aux seuils officiels par une transformation lognormale → lognormale.

ii. Calibration pour les régions d'altitude < FL200

→ On ré-échelonne le diagnostic d'EDR pour la tranche FL100-200 en le contraignant à avoir la **même climatologie que le diagnostic d'EDR calibré pour la tranche > FL200** dans un voisinage de ± 5000 ft centré autour du niveau FL200. Le ré-échelonnement des valeurs est fait par une transformation lognormale → lognormale.

→ On répète la procédure pour calibrer l'indice dans la tranche FL000-FL100 en harmonisant les climatologies avec l'indice calibré dans la tranche supérieure. On utilise un voisinage de ± 5000 ft autour du niveau FL100.

iii. Interpolation finale

Au final, une **interpolation linéaire est implémentée aux interfaces FL100 et FL200**, pour assurer une transition régulière entre les diagnostics d'EDR recalibrés.

3. Résultats et scores

Les diagnostics de turbulence sont individuellement calculés sur la grille native du modèle ARPEGE, puis interpolés sur une grille régulière globale de 0.25° comportant 60 niveaux¹. Des prévisions quotidiennes sont calculées pour l'année 2018 (pour l'étape de sélection et de calibration, voir [ce document](#)) et le premier semestre de l'année 2019 (pour la vérification) depuis le cycle 46. On utilise uniquement le réseau 00UTC et les échéances tri-horaires de 6h à 18h. La liste des indices calculés est présentée en annexe II. A.

La base de données d'observation de turbulence est la **base MADIS**. Cette base contient des observations de pics de turbulence exprimés en EDR^{1/3} majoritairement situés au-dessus des Etats-Unis.

La correspondance modèle / observation est obtenue en utilisant un intervalle de temps de +/- 30 minutes et en sélectionnant les point de grille du modèle les plus proches au niveau vertical le plus proche. Les scores sont calculés à partir de tables de contingence binaires. L'occurrence de turbulence est déterminée en utilisant un seuil « turbulence modérée ou sévère » : $EDR_{obs} \geq 0,22 \text{ m}^{2/3} \cdot \text{s}^{-1}$ (Sharman et al. 2014).

a. Sélection et combinaison d'indices

La procédure itérative de combinaison / sélection appliquée sur l'année 2018 fournit la combinaison indiquée tableau 1.

Niveaux	Sélection des indices	N_obs / N_yes	AUC
Niveaux supérieurs (>FL200)	{Deformation/Ri, TKE, w^2 , indice de Dutton, $1/Ri_{tw}^2$ }	332324 / 1902	0.805
Niveaux intermédiaires (FL100-200)	{TKE ³ , w^{24} }	34801 / 640	0.784
Niveaux inférieurs (<FL100)	{TKE, $\ u_h\ ^5$, EDR ⁶ }	81042 / 4364	0.701

Tableau 1 : Combinaisons (construites sur l'année 2018) et scores obtenus (AUC) pour les 3 tranches d'altitudes sur le 1^{er} semestre 2019.

Les scores des indices considérés individuellement sont indiqués en annexe B

b. Scores

La vérification sur le premier semestre de l'année 2019 (tableau 1 et figure 3) montre que pour la métrique AUC, **la combinaison d'indice (courbe ROC en rouge) est plus performante que n'importe quel diagnostic individuel de turbulence**. Ceci est vrai en particulier pour les niveaux supérieurs et inférieurs.

c. Comparaison par rapport aux diagnostics actuels

La comparaison des résultats obtenus pour les diagnostics actuels (post-processing SOPRANO à partir des données en BDAP), et les diagnostics calculés dans fullpos est présentée sur la figure 4 et le tableau 2. Cette comparaison est réalisée à « résolution finale égale », c'est-à-dire qu'on sous-échantillonne les sorties fullpos à la résolution BDAP avant de réaliser la comparaison. Notons que dans cette configuration, les gains apportés par la résolution native d'ARPEGE se traduisent uniquement lors des étapes de calcul de gradients.

Si l'on considère la métrique AUC, les résultats montrent une **amélioration apportée par le calcul des diagnostics à partir des fichiers historiques d'ARPEGE pour l'indice de Dutton et dans une moindre**

1 Liste des niveaux verticaux en Pascal : 97720, 94210, 90810, 87510, 84310, 81200, 78190, 75260, 72430, 69680, 67020, 64440, 61940, 59520, 57180, 54920, 52720, 50600, 48550, 46560, 44650, 42790, 41000, 39270, 37600, 35990, 34430, 32930, 31490, 30090, 28740, 27450, 26200, 25000, 23840, 22730, 21660, 20650, 19680, 18750, 17870, 17040, 16240, 15470, 14750.

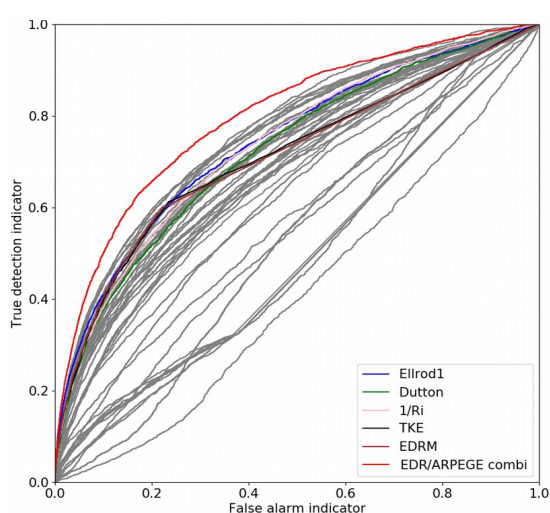
2 Ri / Ri_{tw} : nombre de Richardson / avec estimation du gradient de vent vertical par l'équation du vent thermique.

3 TKE modèle sous-maille

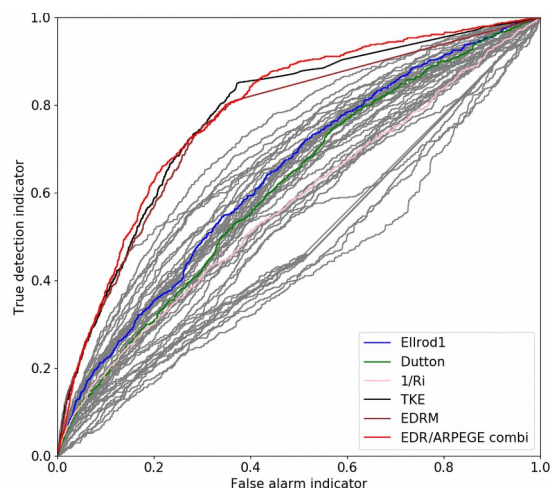
mesure pour l'indice d'Ellrod 2. En revanche pour l'indice d'Ellrod 1, on ne note pas d'amélioration pour ce score.

Si l'on considère les taux de détection à taux de fausse alarme constant (défini par le taux de fausse alarme de l'indice de Dutton opérationnel), on constate une amélioration pour tous les diagnostics excepté le diagnostic de Dutton. Notons que les valeurs absolues de ces taux de détection sont à interpréter relativement à la méthode d'appariement observations/modèle. Le fort déséquilibre entre observations de non-turbulence et observation de turbulence a pour conséquence un taux de fausse alarme très faible. Les contraintes imposées pour un appariement positif, notamment au niveau spatial (moyenne des valeurs du modèle sur une grille horizontale de 100 km de côté) et surtout vertical (niveau le plus proche à 1000 ft près) ont pour conséquence des valeurs de taux de détection assez faibles qui ne traduisent pas le ressenti du prévisionniste. Une évolution de ces métriques serait souhaitable, mais nous sommes restés à ce stade aux métriques utilisés dans la littérature.

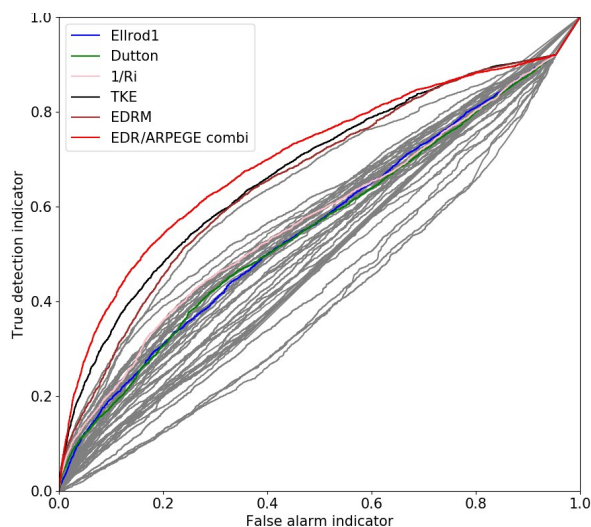
Quelle que soit la métrique utilisée, les résultats montrent une nette amélioration des scores par la procédure de combinaison des diagnostics.



Niveaux supérieurs > FL200
 {Deformation/Ri, KE, w^2 , Dutton, $1/Ri_{tw}$ }



Niveaux intermédiaires FL100-200
 {TKE, w^2 }



Niveaux inférieurs < FL100
 {TKE, FF, EDR}

4 Vitesse verticale OMEGA
 5 $||u_h||$: intensité du vent horizontal
 6 EDR modèle sous-maille

Figure 3 : Détection des événements de turbulence Modérée ou Sévère pour le premier semestre 2019 sur les lignes aériennes concernées par la base de données MADIS (données essentiellement USA). Les courbes ROC représentent les performances obtenues par les différentes combinaisons d'indices suivant le domaine vertical considéré. Rouge : Nouveau diagnostic d'EDR. Autres couleurs : diagnostics traditionnellement utilisés pour le diagnostic de la turbulence aéronautique.

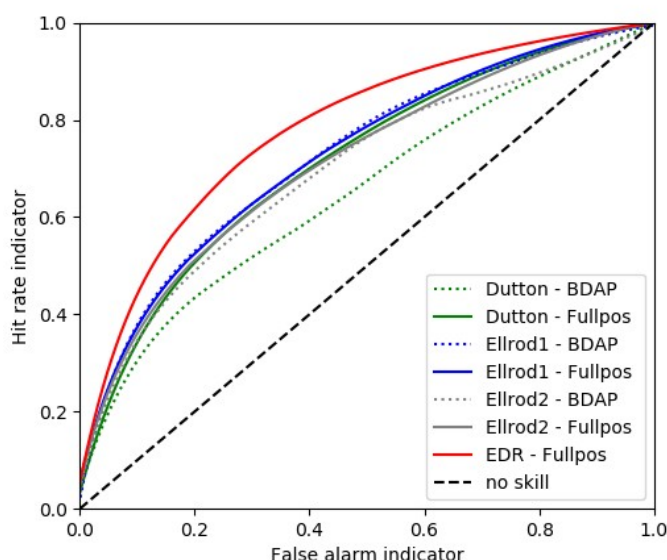


Figure 4: **Graphique** - Détection des événements de turbulence Modérée ou Sévère pour l'année 2018 sur les lignes aériennes concernées par la base de données MADIS (données essentiellement USA). Les courbes ROC représentent les performances obtenues par les différents diagnostics de turbulence pour les niveaux supérieurs au FL200. Rouge : Nouveau diagnostic d'EDR. Autres couleurs : diagnostics utilisés à Météo-France pour la turbulence aéronautique calculés à partir de la BDAP (diagnostics actuels - pointillés) (~ 50 hPa) ou dans le Fullpos (trait plein).

Taux de fausse alarme Dutton BDAP	2.17 %
Indices BDAP – taux de détection	
Dutton	15.1%
TI1 *	15.5%
TI2 **	15.9%
Indices Fullpos – taux de détection	
Dutton	13.1%
TI1	18.1 % (gain relatif comparé à * +17% of detections)
TI2	16.9 (gain relatif comparé à * +6% of detections)
EDR	20.1 % (gain relatif comparé à ** + 25% of detections)

Tableau 2 : Comparaison de taux de détection à taux de fausse alarme constant pour différents indices calculés à partir de la BDAP (diagnostics actuels) et calculés en Fullpos d'ARPEGE. Le taux de fausse alarme retenu est celui en cours pour l'indice de Dutton opérationnel actuel.

4. Études de cas

a. Turbulence dans les niveaux élevés

i. Situation du 13 février 2019 au FL380 - Adriatique – Turbulence sévère par ondes orographiques

Incident de turbulence sévère au large du Montenegro ayant entraîné un roulis important (inclinaison de 40°) et des blessés légers. Un SIGMET de turbulence a été émis dans la zone. Un AIREP SPECIAL de turbulence sévère a été émis quelques minutes avant l'incident par le centre de la navigation aérienne de Belgrade (Serbie) suite au report d'un autre avion.

La figure 5 représente la trajectoire de l'avion sur Flight Radar ainsi que l'image satellite dans le domaine du visible à l'heure du report. La figure 6 représente le TEMSI EUROCC valide à 12UTC pour la zone concernée avec une coupe verticale de la zone du report dans l'axe du jet et perpendiculaire au relief. Enfin, la figure 7 représente le champ d'EDR prévu par le nouveau diagnostic.

Un jet de Nord-Est se situe sur cette zone pendant toute la période. Le cœur du jet est estimé au FL300 à 12UTC pour s'abaisser vers le FL260 à 15UTC. Son intensité varie de 100 à 110kt sur la période. Le jet étant perpendiculaire au relief, la turbulence est certainement liée à la propagation verticale d'ondes orographiques. En effet, l'imagerie satellitaire du canal visible disponible au moment de l'incident (figure 5) met en évidence la présence de nuages d'ondes orographiques à l'étage moyen notamment en aval du relief des Dinarides (lignes de nuages parallèles aux reliefs sur l'Adriatique).

Une coupe verticale perpendiculaire au relief d'ARPEGE montre la propagation verticale des ondes et leur déferlement à la tropopause en aval du relief. La chute de la stabilité associée à la nette diminution du vent engendre une forte TKE en altitude. Il est à noter que l'observation avion est légèrement plus basse que la TKE modèle.

Sur la zone de l'incident, le TEMSI signale à 12UTC, une zone de turbulences, localement fortes entre le FL320 et le FL 400 à 12UTC et le FL160 et le FL 400 à 15UTC.

Sans surprise, le diagnostic d'EDR indique de la turbulence sévère sur la zone de l'incident. En effet, dans ce cas, on retrouve bien les différentes composantes de l'EDR diagnostic en altitude en particulier : la TKE sous-maille, la vitesse verticale et la déformation horizontale.

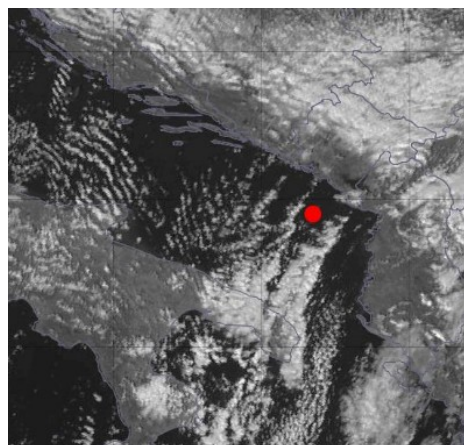
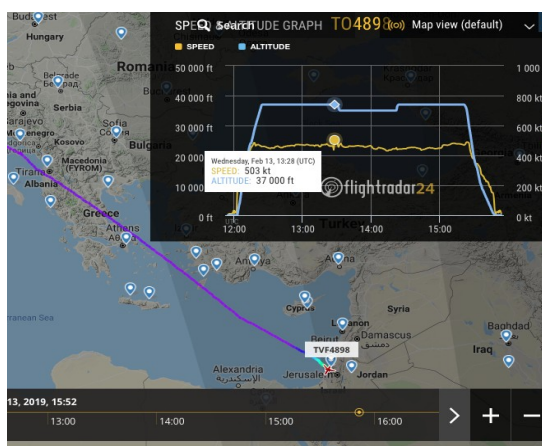


Figure 5 : **gauche** - Trajectoire avion sur Flight Radar. **droite** - Imagerie satellitaire dans le domaine du visible à 13UTC.

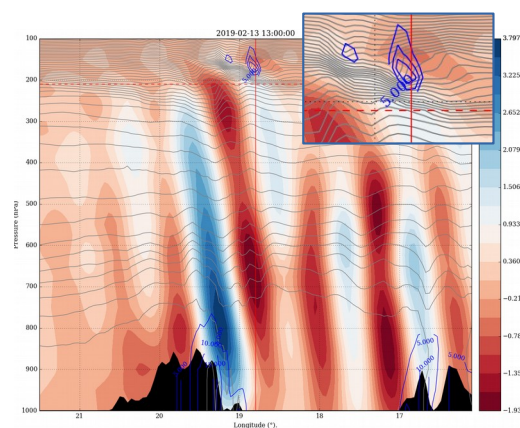


Figure 6 : **Gauche** - TEMSI EUROCC 12H. **Droite** : Modèle ARPEGE Run 00. Echéance 13h. Coupe verticale le long d'un segment trans-adriatique : TKE (contours bleus) + Iso- θ (gris) + vitesse verticale OMEGA (plages de couleur).

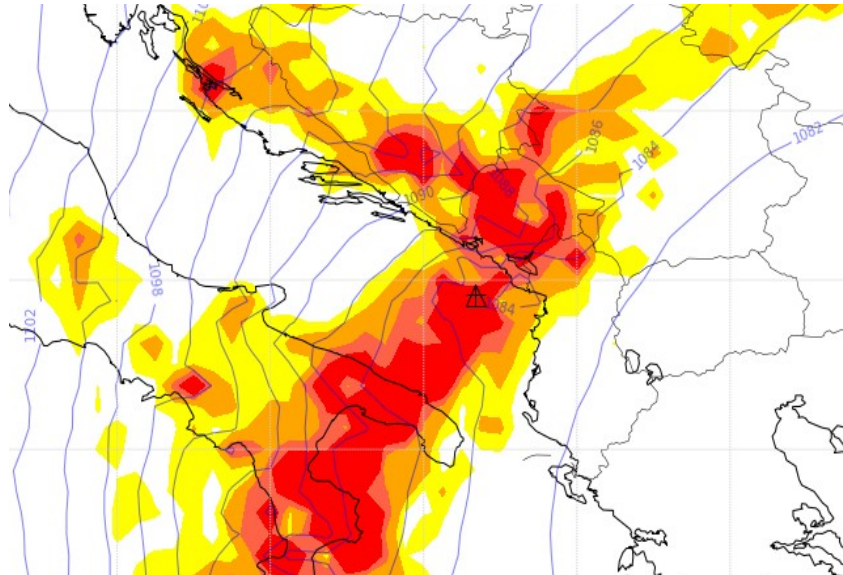


Figure 7 :Prévision du diagnostic EDR – Maximum pour la tranche d'altitude FL370/390 - Rouge : sévère, Orange : modérée, Jaune : léger à modéré). Isolignes : Géopotential.

ii. Situation du 17 avril 2019 au FL340 - France – Turbulence modérée

Incidents de turbulence modérée avec une **dorsale puissante** sur le pays. Le flux est de sud en altitude sur le golfe de Gascogne. Les pilotes sont gênés dans tout le secteur et demandent à changer de niveau bien que la turbulence reste modérée. Aucun indice de turbulence disponible en BDAP ne réagit. La figure 8 montre que le nouveau diagnostic de turbulence EDR propose bien un signal léger à modéré / modéré dans le secteur du Golfe de Gascogne en lien avec les ondes orographiques générées par les Cantabriques puis propagées par le flux de sud-ouest.

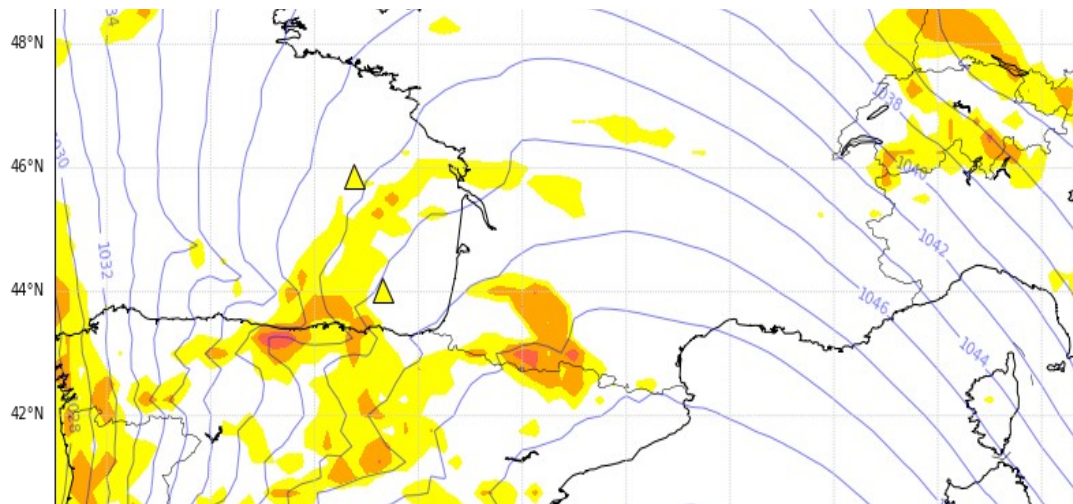


Figure 8 : Prévision du diagnostic EDR – Run 00 – échéance 12h. Maximum pour la tranche d'altitude FL330/360 - Triangle : observation Pilote. Croix : Report Navigation aérienne. Code couleur : Rouge : sévère, Orange : modérée, Jaune : léger à modéré.

iii. Situation du 14 avril 2019 au FL340 - France – Turbulence modérée à sévère (non détection)

Dans une **dorsale d'altitude** entre les niveaux FL290/350, turbulence modérée à sévère à l'ouest de Quimper Plusieurs reports modérés à sévères et pourtant très peu de réaction des indices de Dutton, Ellrod1

et Ellrod2. En revanche, forte CAT proposée par le champ CATPmax de UKMO dans l'axe de la dorsale, en lien avec les reports. **Le nouveau diagnostic d'EDR ne propose pas de signal significatif dans cette dorsale (figure 9).** La non-détection peut être liée à une mauvaise prévision synoptique d'ARPEGE, ou bien à une faiblesse du diagnostic à détecter la turbulence dans ces situations.

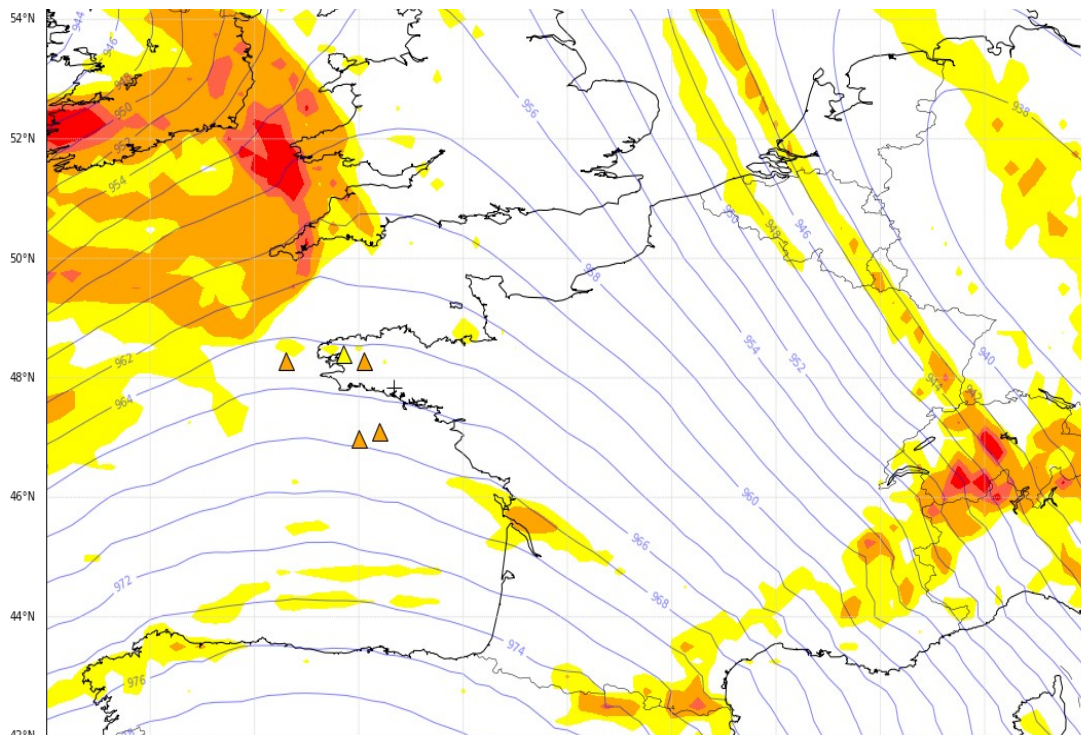


Figure 9 : DPrévision du diagnostic EDR – Run 00 – échéance 16h Maximum pour la tranche d'altitude FL290/350 - Triangle : observation Pilote. Croix : Report Navigation aérienne. Code couleur : Rouge : sévère, Orange : modérée, Jaune : léger à modéré Isolignes : Géopotential.

iv. Situation du 5 avril 2019 au FL370-390 - France – Turbulence modérée à sévère

Dans les Pyrénées en flux de Sud, plusieurs reports d'ondes orographiques modérés à sévères (un PI-REP d'intensité sévère au FL390 et un autre sans information au FL370). Un SIGMET est en cours entre la surface SFC et le FL300. Il est prolongé entre le FL360 et le FL390. Le SIGMET est limité aux alentours de la tropopause où des déferlements sont possibles. Le caractère modéré à sévère de la turbulence dans ce flux de Sud sur les Pyrénées orientales est correctement détecté par le nouvel indice d'EDR (figure 10).

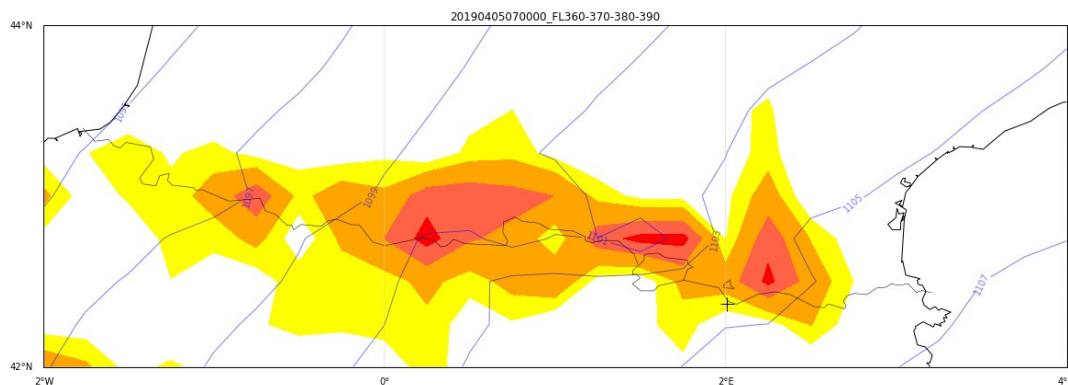


Figure 10 : Prévision du diagnostic EDR – Run 00 – échéance 7h. Maximum pour la tranche d'altitude FL360/390 - Triangle : observation pilote. Croix : Report Navigation aérienne. Code couleur : Rouge : sévère, Orange : modérée, Jaune : léger à modéré Isolignes : Géopotential.

v. Situation du 28 juillet 2019 au FL380 - Autriche – Turbulence sévère

Dans le secteur des Alpes Est-Autrichiennes, plusieurs reports de turbulence sévère liées aux ondes orographiques. Le nouveau diagnostic d'EDR identifie nettement un secteur de turbulence modérée. En revanche le caractère sévère de la turbulence n'est pas détecté dans cette situation d'ondes orographiques (figure 11).

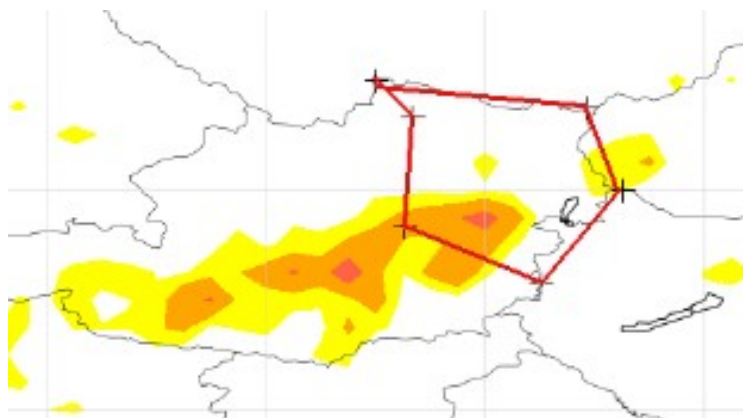


Figure 11 : Préviction du diagnostic EDR – Run 00 – échéance 12 - Maximum pour la tranche d'altitude FL360/400. - Rouge : sévère, Orange : modérée, Jaune : léger à modéré). Polygone : Secteur de report d'observations par la navigation aérienne. Code couleur : Rouge : sévère, Orange : modérée, Jaune : léger à modéré Isolignes : Géopotential.

vi. Situation du 23 mai 2018. Nouvelle-Zélande – FL200 et FL350 – Turbulence sévère par ondes orographiques

Nous nous sommes aussi intéressé à la qualité du diagnostic de turbulence aux antipodes d'ARPEGE. Ici, deux reports de MTW sévère en Nouvelle-Zélande mais à des altitudes différentes sont effectués le même jour. La présence d'ondes orographiques est correctement prévue par le modèle. L'intensité dans la tranche intermédiaire est correctement prévue mais l'intensité en altitude est sous-estimée (figure 12).

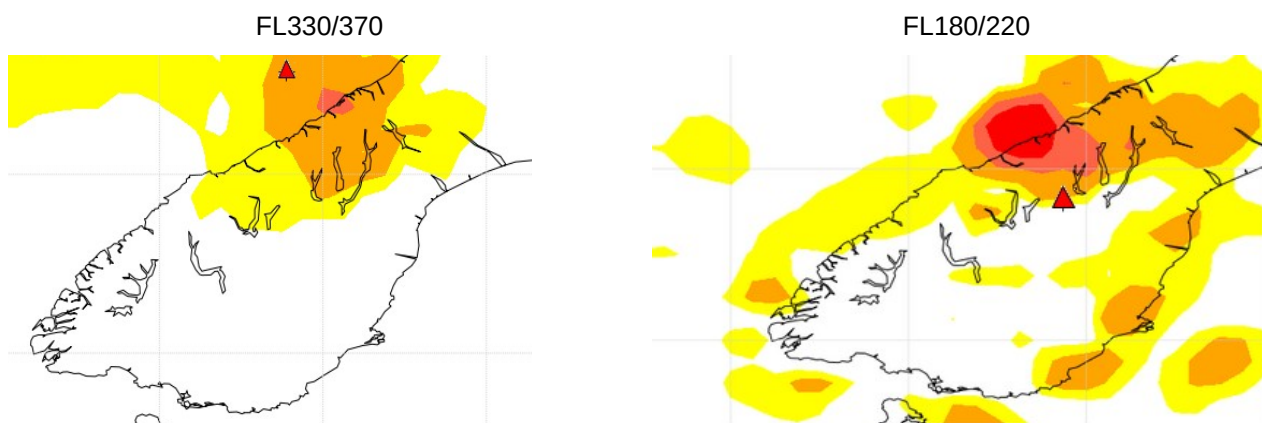


Figure 12 : **Gauche** - Diagnostic d'EDR en aval du modèle ARPEGE Run 00 – échéance 18h - Maximum pour la tranche d'altitude FL330/370. **Droite** - Diagnostic d'EDR en aval du modèle ARPEGE Run 00 – échéance 18h - Maximum pour la tranche d'altitude FL180/220. Triangle : observation Pilote. Code couleur : Rouge : sévère, Orange : modérée, Jaune : léger à modéré Isolignes : Géopotential.

b. Cas de turbulence aux niveaux intermédiaires et inférieurs

i. Situation du 24 septembre 2019 au FL160 - France – Turbulence modérée à sévère dans une zone frontale

A l'ouest d'Orly/Roissy, de nombreux reports de turbulence modérée à sévère entre les FL100-200 dans un front actif à l'ouest, niveaux ni vraiment CAT, ni vraiment basse-couche. Aucun indice de turbulence actuel

n'est proposé à ces altitudes hormis **la TKE qui réagit en altitude**. Le nouveau diagnostic (figure 13) semble bien tracer cet épisode de turbulence modérée à sévère à l'Ouest de Paris en utilisant la TKE sous-maille dans sa combinaison.

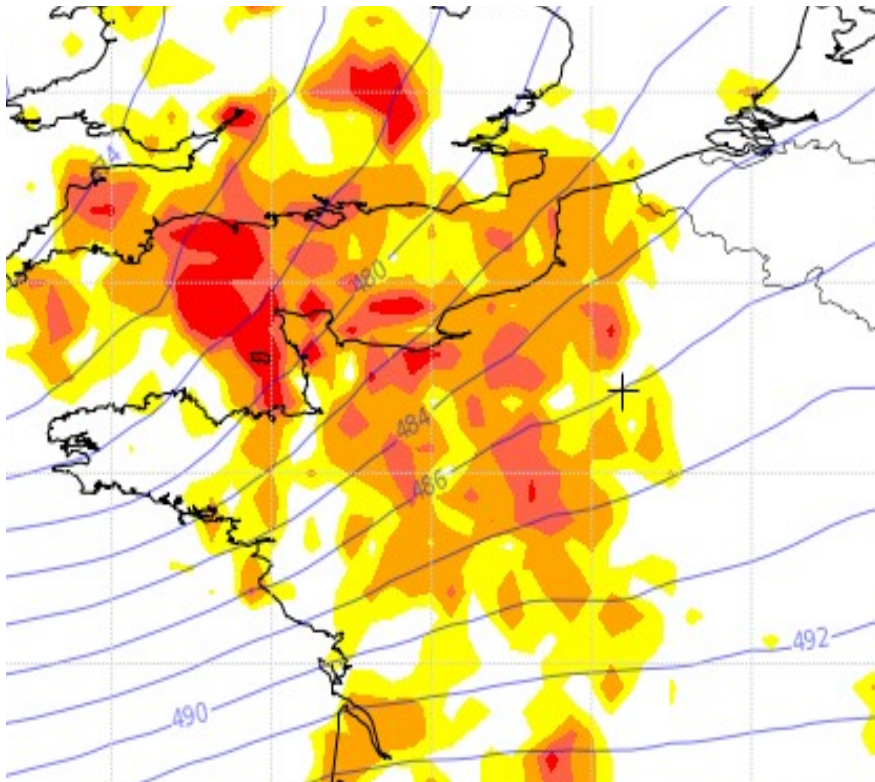


Figure 13 : Prévion du diagnostic EDR – Run 00 – échéance 6h. Maximum pour la tranche d'altitude FL140/180 - Triangle : observation Pilote. Croix : Report Navigation aérienne. Code couleur : Rouge : sévère, Orange : modérée, Jaune : léger à modéré Isolignes : Géopotential.

ii. Situation du 28 juillet 2019 au FL075 – France – Turbulence sévère par ondes orographiques

Au FL075, une observation de turbulence sévère sous le vent des Cévennes avec un flux de nord-ouest est reportée en basses couches . La TKE (4 à 6 $m^2 \cdot s^{-2}$) incite le prévisionniste à faire un sigmet SFC/FL080. Le nouveau diagnostic d'EDR semble cohérent avec cet épisode de turbulence en indiquant une zone de turbulence modérée à sévère dans le secteur (figure 14).

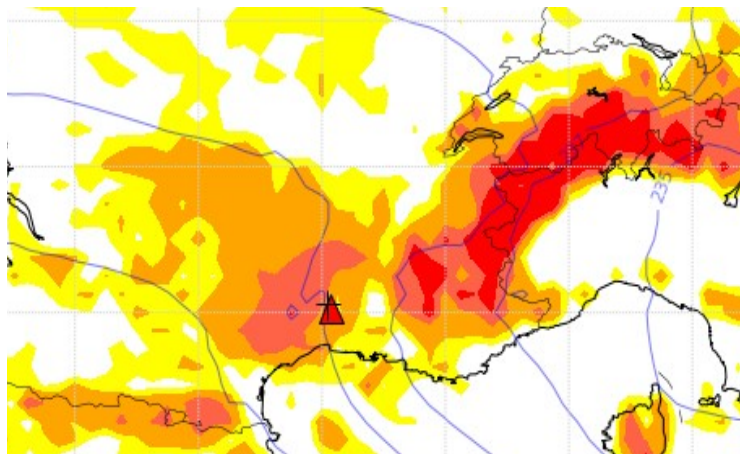


Figure 14 : Prévion du diagnostic EDR – Run 00 – échéance 11h. Maximum pour la tranche d'altitude FL060/100. Triangle : observation Pilote. Croix : Report Navigation aérienne. Code couleur : Rouge : sévère, Orange : modérée, Jaune : léger à modéré Isolignes : Géopotential.

c. Un exemple de turbulence liée à la convection

i. Situation de CIT du 18 octobre 2018

Cas présentant des reports de turbulence convective près de CBs Corse/italien. Ceci correspond à un cas de CIT avec des cirrus *billow* présents sur l'imagerie satellitaire infra-rouge. Si notre diagnostic d'EDR ne diagnostique pas la CIT en tant que telle, la situation synoptique d'un épisode orageux (divergence d'altitude, instabilité verticale,...) semble être détectée par l'indice dans ce cas avec des reports et des prévisions de turbulence légère à modérée (figure 15).

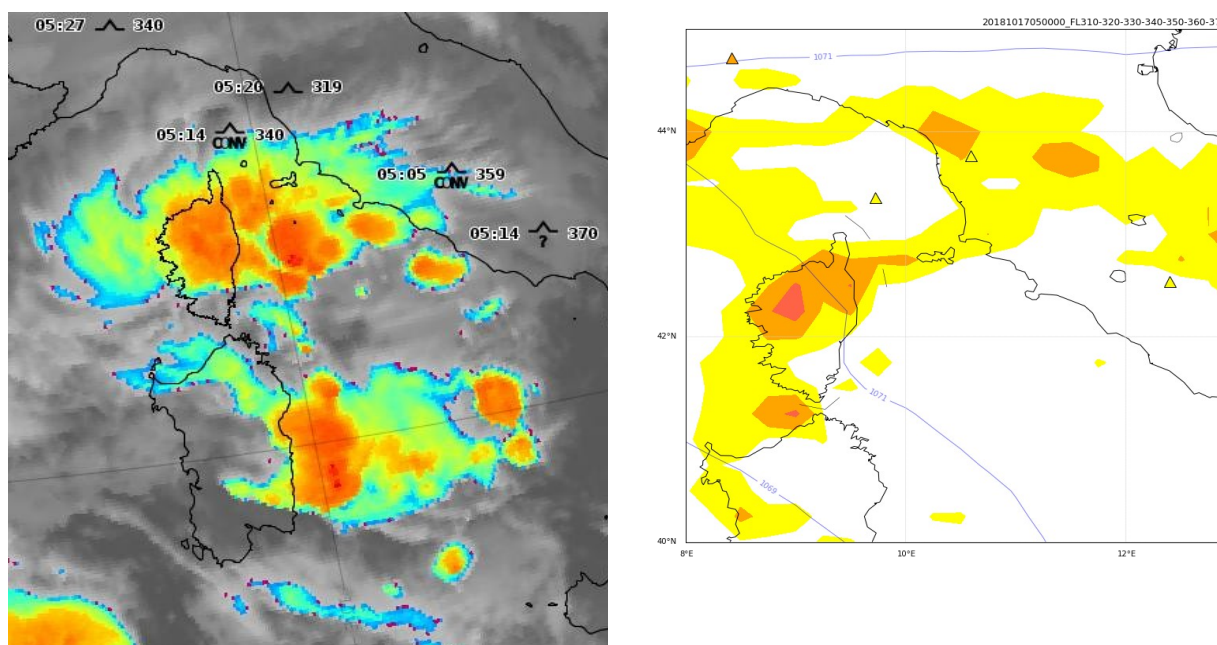


Figure 15 : Prévion du diagnostic EDR – Run 00 – échéance 7h. Maximum pour la tranche d'altitude FL360/390 - Triangle : observation Pilote. Code couleur : Rouge : sévère, Orange : modérée, Jaune : léger à modéré Isolignes : Géopotential.

d. Comparaison globale – Diagnostic actuel / diagnostic EDR

La figure ci-dessous permet de comparer de façon globale du nouveau diagnostic d'EDR au niveau FL380, par rapport à l'indice actuel de Dutton calculé sur les niveaux BDAP pour une échéance donnée (figure 16). La comparaison montre que les zones de turbulence modérée à sévère sont localisées dans les mêmes zones. Ceci est particulièrement vrai pour les zones associées aux jets d'altitude même si l'étendue générale apparaît plus restreinte avec le nouveau diagnostic d'EDR. En revanche, certaines zones pour lesquelles, aucun signal n'était visible avec l'indice de Dutton apparaissent avec le nouvel indice d'EDR, en particulier aux dessus de reliefs (ex : plateau tibétain, Atlas marocain).

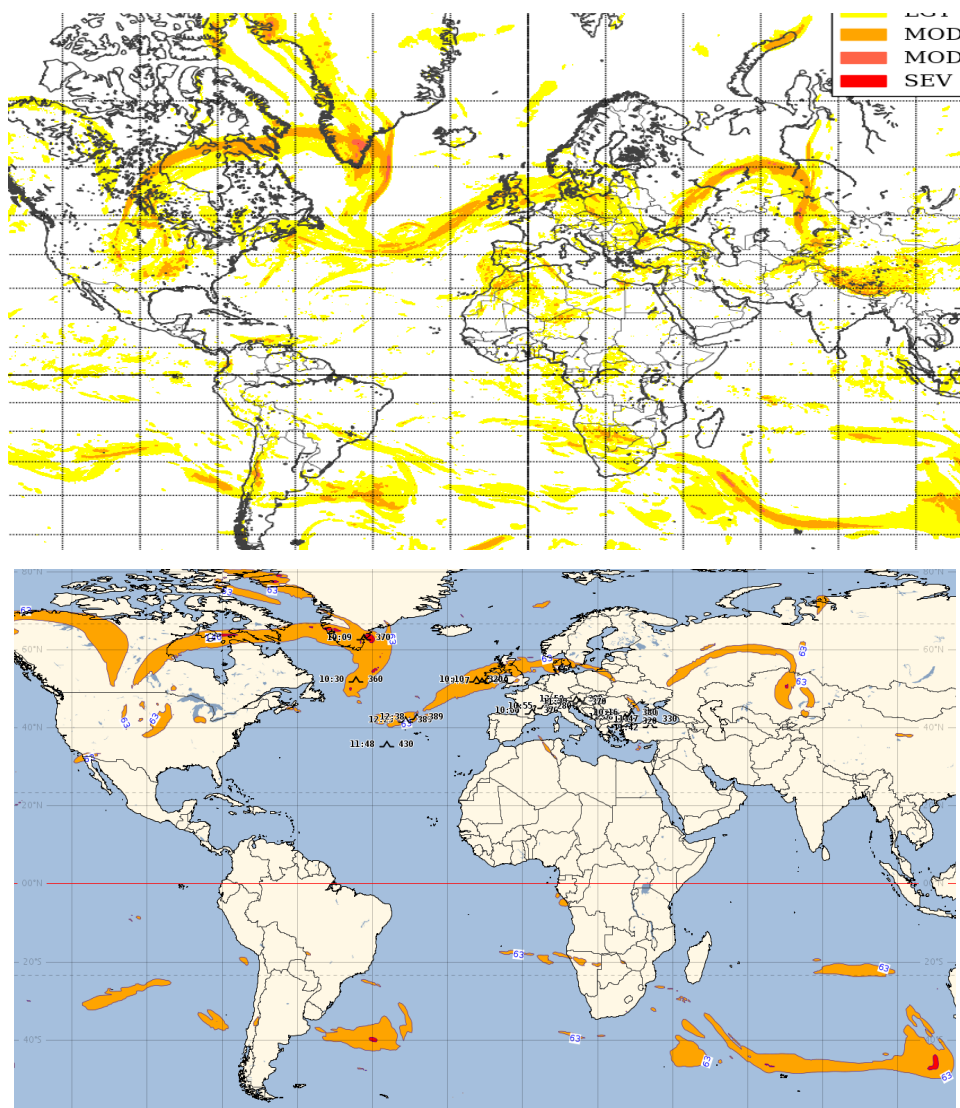


Figure 16 : Modèle ARPEGE – run de 00h. Situation globale pour l'échéance de 12h à 200hPa avec le nouveau diagnostic d'EDR (figure du haut) et le diagnostic de Dutton actuel calculé sur les niveaux BDAP (figure du bas). Rouge : sévère, Orange : modérée, Jaune : léger à modéré.

5. Conclusion

Nous avons construit un nouvel indice de turbulence calculé sur la grille native du modèle en utilisant la méthode de combinaison imaginée par Sharman et développée au NCAR.

Ce diagnostic a été construit en modifiant le code FullPos du cycle 46 d'ARPEGE et la calibration a été faite à partir de fichiers historiques ayant une résolution en TL1798C2.2. et 105 niveaux verticaux.

Les résultats de ce nouvel indice sur le premier semestre 2019 montrent qu'il est meilleur que les indices historiques calculés actuellement en BDAP et que la méthode de combinaison apporte un gain de performance significatif par rapport aux indices calculés individuellement.

Il est toutefois à noter que si l'apport de la haute résolution verticale et horizontale se répercute positivement dans les scores pour l'indice Dutton, ceci est moins vrai pour les indices Ellrod 1&2 (figure 4).

Les études de cas ont montré dans la plupart des cas une bonne capacité du diagnostic à prévoir de la turbulence significative pour l'aéronautique, notamment dans les cas de jet (non montrés) et d'ondes orographiques. Il reste néanmoins à améliorer la prévision dans le cas de dorsale marquée et de convection sévère.

6. Perspectives

Plusieurs pistes seront à explorer pour améliorer ce nouveau diagnostic (certaines sont en cours ou ont déjà fait l'objet d'une étude préliminaire).

Travail sur les diagnostics individuels :

- Amélioration du schéma de turbulence sous maille. Thèse CNRM en cours: *Représentation de la turbulence dans des couches stables en altitude* par Léo Rogel sous la direction de Didier Ricard).
- Calcul de nouveaux indices de turbulence pour enrichir la combinaison.
- Focalisation sur les cas de dorsales et de CIT.

Travail sur la méthode de sélection / combinaison :

- Utilisation de Méthodes de sélection & combinaison plus sophistiquées comme la régression logistique ou le Random Forest. Travail exploratoire : Crispel, P., Le Bot, C., Jaron, O., Drouin, A., & Sharman, R. D. (2019). *4.5 Toward an arpege-based aviation turbulence combined diagnostic*.

Ensembles :

- Apport des jeux de prévisions issues des ensembles ou d'échantillonnage de la combinaison. *Stage de Modélisation prévu en février 2020*.

Prévision immédiate :

- Fusion de données et prévision immédiate. Spatialisation des observations d'EDR par fusion avec les données du modèle. Utilisation des observations récentes pour construire un scénario de prévision immédiate.

II. Annexes

A. Liste des indices

Nom	Description	Variable FullPos
Brown1	Simplified DRi/Dt	CAT.BR1
Brown1/Ri	Simplified DRi/Dt / Ri	CAT.BR1.RI
Brown1/dist PV	Simplified DRi/Dt / Distance à la 2 PVU	CAT.BR1.PV
Brown2	$\epsilon 1/3$ from simplified DRi/Dt	CAT.BR2
Dutton	Dutton	CAT.DUTTON
La. and Alter-Z.	Laikthman and Al'ter-Zalik TKE	CAT.LAZ
Ellrod1	Ellrod 1	CAT.TI1
Ellrod1/dist PV	Ellrod 1 / Distance à la 2PVU	CAT.TI1.PV
Ellrod2	Ellrod 2	CAT.TI2
Ellrod2/dist PV	Ellrod 2 / Distance à la 2PVU	CAT.TI2.PV
Colson-Panofsky	Colson-Panofsky TKE	CAT.CP
SQ Ver velocity	Carré de la Vitesse Verticale	SQ_VIT_VERT
SQ Ver velocity/Ri	Carré de la Vitesse Verticale / Ri	SQ_VV.RI
SQ Ver velocity*MTW	Carré de la Vitesse Verticale * indice de MTW	SQ_VV.MTW
Ri Raw	Nombre de Richardson non filtré sur la verticale	CAT.RI
1/Ri	Inverse du nombre de Richardson	CAT.INVRI
1/Ri moist	Inverse du nombre de Richardson humide	CAT.INVRIM
Horiz. wind sh/Ri	Cisaillement horizontal / Ri	CAT.HS.RI
-dT/dz	Taux de croissance de la la Température sur la verticale	CAT.LRT
Deform.^2	Carré de la déformation	CAT.DEF
Deform.^2/Ri	Carré de la déformation / Ri	CAT.DEF.RI
Deform.^2*MTW	Carré de la déformation * indice de MTW	CAT.DEF.MTW
Def.^2//dist PV	Carré de la déformation / distance à la 2 PVU	CAT.DEF.PV
1/RiTW	Inverse du nombre de Richardson calculé avec le vent thermique	CAT.IRITW
DIV /Ri	Valeur absolue de la divergence / Ri	CAT.ADI.RI
DIV *MTW	DIV * indice de MTW	CAT.ADI.MTW
AGI	Anomalous Gradient instability	CAT.AGI
F2D	Fonction de frontogénèse 2D	CAT.F2D
F2D/Ri	Fonction de frontogénèse 2D / Ri	CAT.F2D.RI
F2D*MTW	F2D * Indice MTW	CAT.F2D.MTW
F2D/dist PV	Fonction de frontogénèse 2D // distance à la 2 PVU	CAT.F2D.PV
NGM1	Vitesse du vent x déformation	CAT.NGM1
NGM2	Gradient vertical de Temperture x déformation	CAT.NGM2
NGM1/Ri	Vitesse du vent x déformation / Ri	CAT.NG1.RI
NGM1*MTW	Vitesse du vent x déformation * indice de MTW	CAT.NG1.MTW
NGM2/Ri	Gradient vertical de Temperture x déformation / Ri	CAT.NG.RI
FF	Vitesse du vent	WIND_VELOCITY
FF*MTW	Vitesse du vent * Indice MTW	WIND_VELO.MTW
TKE	TKE	TKE
TKE/Ri	TKE / Ri	CAT.TKE.RI
TEMPG /Ri	Gradient horizontale de Température / Ri	CAT.TPG.RI
IAWIND	Inertial Advective wind	CAT.IAWIND
IAWIND/Ri	Inertial Advective wind / Ri	CAT.IAW.RI
IAWIND//dist PV	Inertial Advective wind / distance à la 2 PVU	CAT.IAW.PV
IAWIND*MTW	IAWIND * Indice MTW	CAT.IAW.MTW
Vert. Wind Shear	Cisaillement de vent verticale	CAT.SV
Brunt Vaissala	Fréquence de Brünt Vaissala	CAT.BV
Moist Brunt Viassala	Fréquence de Brünt Vaissala humide	CAT.BVM
VOR SQ /Ri	Carré de la vorticité / Ri	CAT.VOR.RI
Dist. fm. 2PVU	Distance à la 2 PVU	CAT.DPVU
EDR	Eddy diffusivity rate	EDR

B. Scores des indices de CAT individuels.

Upper Levels		Medium Levels		Low Levels	
N_OBS	332324		34801		81042
N_YES	1902		640		4364
CAT.RI	0.429	CAT.RI	0.445	CAT.BVM	0.401
WIND_VELO.	0.477	CAT.LRT	0.457	CAT.BV	0.408
CAT.F2D.MTW	0.479	CAT.LAZ	0.461	CAT.RI	0.415
CAT.ADI.MTW	0.482	WIND_VELO.MTW	0.479	CAT.DPVU	0.438
CAT.IAW.MTW	0.484	CAT.ADI.MTW	0.482	CAT.F2D.PV	0.473
CAT.BVM	0.485	CAT.F2D.MTW	0.485	CAT.BR1.PV	0.481
CAT.BV	0.485	CAT.NG1.MTW	0.487	CAT.F2D.MTW	0.485
CAT.NG1.MTV	0.485	CAT.IAW.MTW	0.489	CAT.IAW.MTW	0.488
CAT.DEF.MTW	0.487	CAT.DEF.MTW	0.489	CAT.ADI.MTW	0.491
SQ_VV.MTW	0.492	SQ_VV.MTW	0.499	CAT.AGI	0.491
CAT.LRT	0.516	CAT.DPVU	0.515	CAT.DEF.MTW	0.491
CAT.DPVU	0.565	CAT.BV	0.535	WIND_VELO.MTW	0.492
CAT.AGI	0.6	CAT.CP	0.541	CAT.NG1.MTW	0.493
CAT.F2D	0.627	CAT.F2D.RI	0.548	CAT.F2D	0.494
CAT.BR1.PV	0.645	CAT.BVM	0.551	CAT.DEF.PV	0.498
WIND_VELOC	0.647	CAT.INVRIM	0.565	SQ_VV.MTW	0.498
CAT.F2D.PV	0.656	CAT.SV	0.569	CAT.CP	0.501
CAT.BR1	0.669	CAT.TPG.RI	0.571	CAT.IRITW	0.518
CAT.NGM2	0.678	CAT.INVRI	0.571	CAT.DEF	0.52
CAT.LAZ	0.679	WIND_VELOCITY	0.584	CAT.BR1	0.523
SQ_VIT_VER	0.68	CAT.BR2	0.605	CAT.IAW.PV	0.525
CAT.SV	0.681	CAT.BR1.PV	0.607	CAT.TI1.PV	0.528
CAT.TI2.PV	0.683	CAT.BR1.RI	0.61	CAT.TI2.PV	0.528
CAT.IAW.PV	0.685	CAT.NG2.RI	0.61	SQ_VIT_VERT	0.544
CAT.DEF.PV	0.691	CAT.DUTTON	0.613	CAT.F2D.RI	0.544
CAT.IRITW	0.692	CAT.F2D.PV	0.614	CAT.LAZ	0.551
CAT.TI2	0.698	CAT.ADI.RI	0.615	CAT.DUTTON	0.553
CAT.BR2	0.7	CAT.VOR.RI	0.616	CAT.VOR.RI	0.553
CAT.TI1.PV	0.7	CAT.TI2.PV	0.618	CAT.TI2	0.555
CAT.DUTTON	0.705	CAT.HS.RI	0.619	CAT.TI1	0.556
CAT.CP	0.708	CAT.TI1.PV	0.62	CAT.SV	0.556
CAT.TPG.RI	0.71	CAT.F2D	0.626	CAT.BR2	0.56
CAT.DEF	0.71	CAT.NG1.RI	0.629	CAT.DEF.RI	0.56
CAT.F2D.RI	0.719	CAT.DEF.RI	0.631	CAT.LRT	0.561
CAT.VOR.RI	0.72	CAT.IAW.RI	0.633	CAT.TPG.RI	0.562
CAT.IAWIND	0.721	CAT.TI2	0.635	CAT.NGM2	0.564
CAT.INVRI	0.725	CAT.NGM2	0.635	CAT.IAWIND	0.565
CAT.INVRIM	0.725	CAT.TI1	0.639	CAT.INVRIM	0.57
CAT.TI1	0.728	CAT.AGI	0.643	CAT.INVRI	0.572
CAT.NG2.RI	0.731	CAT.IAW.PV	0.643	CAT.BR1.RI	0.573
CAT.HS.RI	0.736	CAT.DEF.PV	0.643	WIND_VELOCITY	0.574
CAT.NGM1	0.738	CAT.BR1	0.651	SQ_VV.RI	0.574
EDR	0.738	CAT.TKE.RI	0.657	CAT.ADI.RI	0.574
CAT.TKE.RI	0.742	CAT.NGM1	0.658	CAT.HS.RI	0.575
TKE	0.744	CAT.DEF	0.665	CAT.NGM1	0.575
CAT.BR1.RI	0.746	CAT.IAWIND	0.668	CAT.NG2.RI	0.587
CAT.ADI.RI	0.749	SQ_VV.RI	0.678	CAT.IAW.RI	0.59
CAT.DEF.RI	0.757	CAT.IRITW	0.703	CAT.NG1.RI	0.602
SQ_VV.RI	0.759	SQ_VIT_VERT	0.716	CAT.TKE.RI	0.643
CAT.IAW.RI	0.765	EDR	0.759	EDR	0.66
CAT.NG1.RI	0.766	TKE	0.775	TKE	0.675

Tableau 1: Score AUC (par ordre croissant) des indices de CAT individuels pour l'année 2018.