



UNIVERSITÉ
TOULOUSE III
PAUL SABATIER



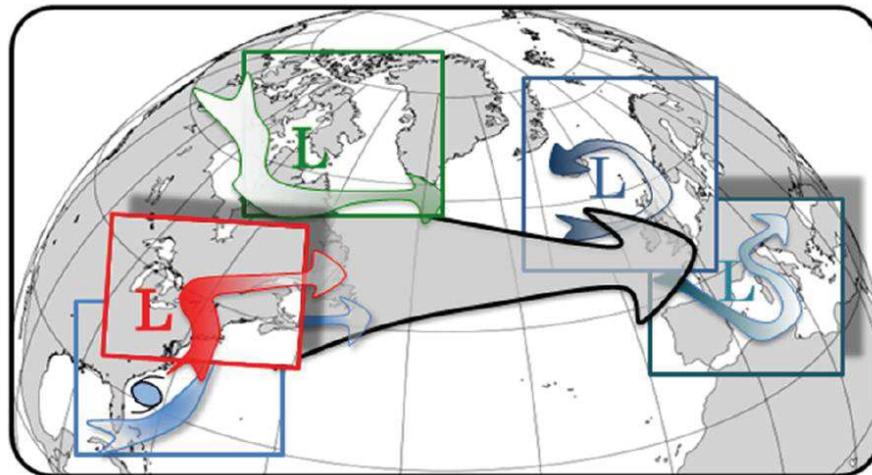
CNRM

Rapport de mi-Stage de M2 SOAC - DC

2017-2018

Première Analyse de la campagne NAWDEX

Meryl WIMMER



Centre National de Recherches Météorologiques – GMAP/RECYF

Encadrants de stage : Philippe ARBOGAST (CNRM) et Gwendal RIVIERE (LMD)

Première Analyse de la campagne NAWDEX

Meryl WIMMER
M2 SOAC - DC

1 Introduction

Les cyclones extratropicaux sont des phénomènes météorologiques associés à de basses pressions jouant un rôle essentiel dans la circulation atmosphérique générale des moyennes latitudes. Cependant, malgré de constantes améliorations des modèles numériques de prévision du temps¹, la qualité de ces prévisions, notamment des événements extrêmes est encore perfectible. Une source d'erreur concerne la représentation des processus diabatiques (microphysique des nuages, rayonnement, turbulence), notamment dans les Warm Conveyor Belt (WCB), une masse d'air chaud et humide qui s'élève dans les dépressions.

Afin de mieux comprendre l'impact de ces processus diabatiques et d'améliorer leur représentation dans les modèles numériques, le groupe Predictability and Dynamical Processes du programme THORPEX^a a développé, en 2014, le projet international NAWDEX^b. Celui-ci, soutenu par le Programme de Recherche Mondial sur le Temps de l'Organisation Météorologique Mondiale, regroupe principalement des pays d'Europe et d'Amérique tels que l'Allemagne, Royaume-Uni, Etats-Unis, France, Canada ... Il a permis de mettre en place en automne 2016, grâce au déploiement de 4 avions de recherche et d'instrumentation au sol en Islande et en Europe de l'Ouest, une campagne de mesure pour échantillonner des WCB.

Ici, une première analyse de la campagne NAWDEX est réalisée, plus précisément, sur le cas du cyclone extratropical du 02 octobre 2016. Jusqu'à présent, seul le vol F7 du Falcon 20 de l'équipe SAFIRE^c, ayant mesuré la partie ascendante d'une WCB, a été étudié. Une

a. The Observing System Research and Predictability Experiment

b. North Atlantic Waveguide Downstream Impact Experiment : <http://nawdex.ethz.ch/>

c. Service des avions français instrumentés pour la recherche en environnement

série de trajectoires lagrangiennes de 24h, initialisées le long du trajet de l'avion, ont été calculées à partir des sorties du modèle ARPEGE^{d 2}.

Dans ce présent rapport, nous allons, dans un premier temps, faire un état de l'art des WCB. Puis, nous présenterons la méthode utilisée lors de ce stage, pour le calcul des trajectoires lagrangiennes. Dans la section 4, une brève analyse des résultats obtenus sera effectuée. Enfin, nous concluons.

2 Warm Conveyor Belt

Au sein des dépressions, on identifie trois masses d'air ou bandes transporteuses d'air : l'intrusion sèche, la bande transporteuse d'air froid et la bande transporteuse d'air chaud (WCB)³. Cette dernière correspond à une masse d'air chaud et humide qui provient de la couche limite atmosphérique marine subtropicale et qui monte jusqu'à 280hPa, dans la haute troposphère, en allant vers les pôles. Ces WCB sont donc identifiées par une diminution de 600hPa en 48h⁴. Elles se produisent principalement en hiver, au dessus des océans, en particulier sur l'Atlantique Nord et le Pacifique Nord⁵.

Lors de son mouvement ascendant, l'air humide se condense entraînant ainsi la formation de nuages. Ces WCB sont donc particulièrement reconnaissables sur les images satellites car il s'agit de la principale bande nuageuse des dépressions. Les nuages étant le lieu de processus diabatiques tels que l'émission de chaleur latente par condensation, la température potentielle y augmente de 20 à 40K.

Cependant, d'autres grandeurs thermodynamiques sont amenées à être modifiées par la présence d'une WCB. La vorticité potentielle (PV) est une grandeur conservative dans les milieux adiabatiques et sans frottements.

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{1}{\rho} [(f + \xi)\nabla\theta + \nabla \wedge F \cdot \nabla\theta] \quad (1)$$

où q est la vorticité potentielle, ρ la masse volumique de l'air, f le paramètre de Coriolis,

d. Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle

ξ la vorticité relative, θ la température potentielle et F la force de frottement. Or d'après l'équation 1, le PV peut-être produit ou détruit par un gradient de chauffage $\nabla\dot{\theta}$ provenant de l'émission de chaleur sensible ou latente, rayonnement ou la turbulence (premier terme de l'équation 1). Il peut être aussi modifié par l'effet de la turbulence sur le vent (second terme de l'équation 1).

Ainsi, lorsqu'il y a un maximum de chauffage, le PV est produit en dessous de ce maximum et détruit au dessus. En outre, Chagnon⁶ a montré, en séparant les différentes sources de chauffage, que la production de PV en dessous du maximum de chauffage était due principalement aux phénomènes de couche limite (convection et turbulence) et la destruction de PV au dessus, au rayonnement.

Une fois arrivée à la tropopause, la WCB peut prendre deux directions : soit elle s'enroule autour du coeur dépressionnaire et forme la tête nuageuse de la dépression, soit elle est prise dans les flux anticycloniques d'altitude situés en aval du courant-jet.

3 Trajectoires lagrangiennes et validation de la méthode

3.1 Modèles de trajectoires lagrangiennes

En disposant du champ de vent 3D, un modèle de trajectoire peut reconstituer la trajectoire d'une particule à partir d'un point d'ensemencement. En effet, la position d'une particule d'air $x(t)$ peut être obtenue en intégrant numériquement, entre deux instants, $dx/dt = \mathbf{v}(x)$. Pour ce faire, il est nécessaire de connaître la valeur du vent au point milieu, entre ces deux instants. Or, la position finale étant indéterminée, ce point milieu l'est aussi. Il faut donc utiliser des méthodes itératives (schéma prédicteur-correcteur) adaptées pour construire la solution de proche en proche.

Il existe différents modèles de trajectoires lagrangiennes mais le logiciel LAGRANTO, développé par l'ETH^e, est particulièrement spécialisé dans la production de trajectoires ayant les caractéristiques des WCB⁷.

Par analogie au logiciel LAGRANTO, nous avons, à partir d'un programme établi par des étudiants de l'Ecole National de la Météorologie, réalisé un ensemble de rétrotrajectoires et trajectoires de 12h, ensemencés le long du trajet de l'avion. Le but, ici, est d'étudier les processus diabatiques subits par les particules d'air, avant et après le vol.

Nous avons donc utilisé les données de la prévision ARPEGE du 01 octobre à 12h, soit plus d'un jour avant le vol F7. Les données de tendances de température potentielle et de vent, permettant le calcul des tendances de PV, étant restituées selon une grille irrégulière différente de celle des données météorologiques standards, différentes méthodes ont été mises en oeuvre afin d'obtenir les valeurs de ces variables au point des trajectoires. La méthode utilisée ici réalise une première interpolation afin que toutes les variables soient sur une même grille régulière, puis, effectue une seconde interpolation pour obtenir ces variables au point de la trajectoire.

Par ailleurs, nous disposons des données de deux versions différentes d'ARPEGE (ci-après analysées) : la version opérationnelle en 2016 nommée ici Run0 et, une version incluant le schéma de convection PCMT^{f8}, dénotée Run6.

3.2 IOP 6 : 1-5 octobre 2016

Lors de ce stage, nous avons étudié la dépression du 02 octobre 2016. Celle-ci s'est formée au large de Terre-Neuve le 01 octobre et s'est intensifiée en se déplaçant vers l'Est. Elle a atteint son apogée, le 02 octobre avec une pression de surface au niveau de la mer de 960hPa à 21hUTC au large de l'Islande. L'anomalie de surface se retrouve en altitude où un très bas géopotential est observé (figure 1). La situation météorologique est un peu particulière : une dorsale s'étire de l'Espagne à l'Irlande formant un anticyclone sur la Scandinavie le 3 octobre. Cet anticyclone persistera sur l'Europe, créant ainsi une situation de blocage pendant une dizaine de jours.

C'est au cours de la journée du 2 octobre que des vols scientifiques sont réalisés au large

e. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

f. Prognostic Condensates Microphysics and Transport

de l'Islande. Le Falcon 20 du groupe SAFIRE avec un lidar LNG, un radar doppler RASTA à 95GHz (RALI) et un radiomètre infrarouge embarqués, a décollé de Keflavik à 13hUTC pour une durée de vol de 3h15. La trajectoire de l'avion est visible sur la figure 1.

A l'instant du vol, le minimum de dépression se trouvait au Sud-Ouest de l'Islande. L'avion est resté à l'est de ce minimum afin d'être dans la partie WCB du cyclone comme nous allons le voir dans la suite.

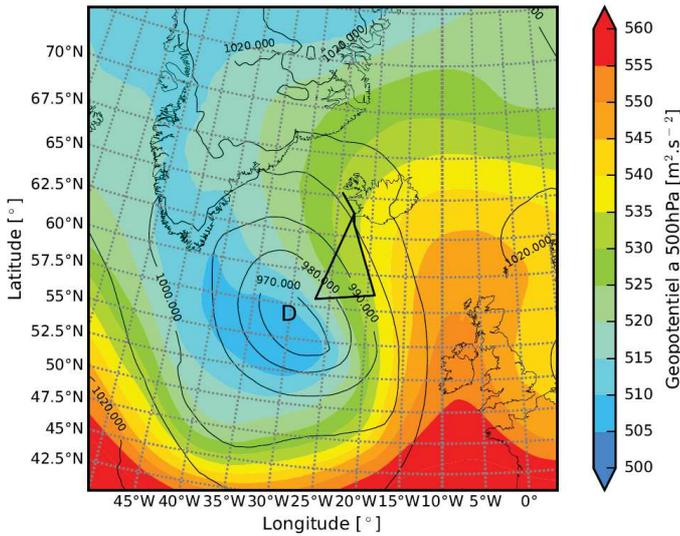


FIGURE 1 — Carte d'analyse ARPEGE de géopotentiel à 500hPa (champ coloré) et pression (en hPa) au niveau de la mer (isoligne) à 12h, le 02 octobre 2016. Le trajet du vol F7 est représenté en ligne noire au Sud-Ouest de l'Islande.

3.3 Ensemencement

L'ensemencement des trajectoires a été réalisé sur 84 points de grille le long du trajet et selon 63 niveaux différents, allant de 975hPa à 187.5hPa. Ainsi, nous avons près de 5000 points d'initialisation de trajectoires. Le vol formant un triangle, cet ensemencement a été décomposé suivant chaque côté de celui-ci. Nous avons ensuite regroupé les trajectoires calculées vers le passé et le futur afin d'obtenir des trajectoires de 24h centrées sur le temps de vol. Afin de ne garder que celles ayant les propriétés des WCB, nous avons appliqué le critère de 300hPa en 24h. Ne disposant pas de trajectoires de 48h, le critère de Joos et Wernli de 600hPa en 48h, a donc été simplement divisé par deux⁴.

Pour plus de précision et comme proposé par Sprenger et Wernli⁷, nous avons ajouté un se-

cond critère sur la température : une augmentation de 15°C en 12h. Ce critère est un peu plus restrictif que celui préconisé par Sprenger et Wernli (10°C en 48h)⁷. Ainsi, en appliquant ces deux critères, nous obtenons 485 trajectoires caractérisées WCB pour le Run 0 et 501 pour le Run 6 (figure 2).

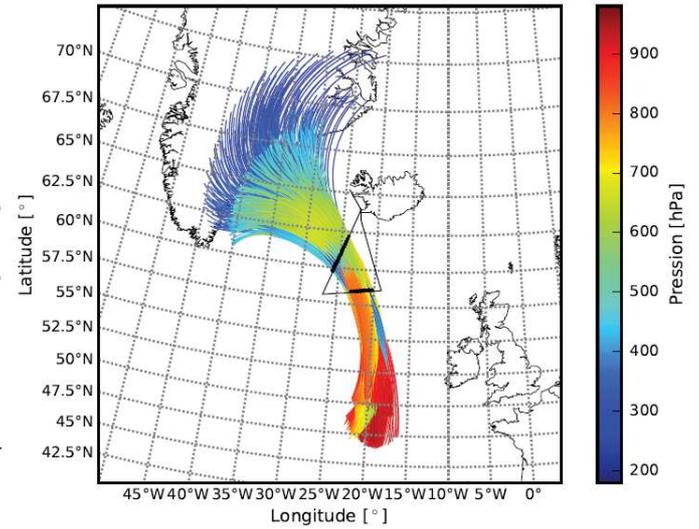


FIGURE 2 — Pression le long des trajectoires de 24h pour le Run0. Les points noirs sont les points d'ensemencement le long du vol (en ligne continue noire).

3.4 Validation des prévisions au moyen des observations de la campagne

L'avion ayant embarqué un radar Doppler, le vent a pu être mesuré le long du trajet de l'avion. Nous pouvons constater sur la figure 3, que les profils verticaux de vent moyen dans la WCB, pour les deux versions d'ARPEGE, donnent des résultats semblables et cohérents avec les observations : ces profils se trouvent parmi 68% des valeurs des observations. Cependant, le minimum de vent situé à 700hPa, zone des particules WCB, n'est pas parfaitement représenté : il est surestimé pour le Run6 et sous-estimé pour le Run0. Comme nous ne pouvons affirmer si l'une des deux prévisions est meilleure que l'autre, nous décidons de conserver les deux afin de garder une marge d'incertitude dans nos interprétations.

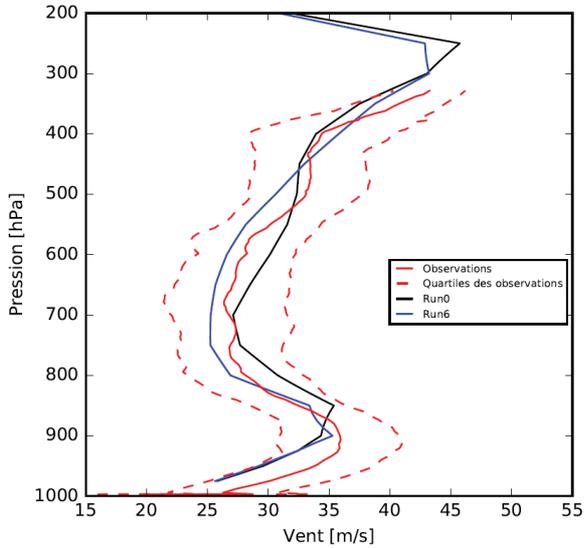


FIGURE 3 – Profils verticaux moyens de vent horizontal dans la WCB. En rouge, les mesures in-situ. En noir, le Run0. En bleu, le Run6. Écart entre la ligne continue rouge et en tireté : écart-type des observations.

4 Analyse des processus diabatiques le long des trajectoires WCB

Nous constatons sur la figure 2 que, parmi les trajectoires WCB, plusieurs classes se distinguent. Certaines trajectoires semblent avoir, sur les deux dernières heures, une courbure cyclonique, d'autres, une courbure anticyclonique. Nous avons donc séparé ces trajectoires en calculant la courbure moyenne sur les deux dernières heures. Plus de 75 % (83% pour le Run0 et 78% pour le Run6) des particules WCB sont emportées par le flux anticyclonique d'altitude. Nous avons donc porté notre attention sur celles-ci.

La figure 4 montre que la quasi-totalité des particules anticycloniques (points colorés) voit leur fin de trajectoire vers 300hPa dans une zone de faible PV. Il s'agit-là de l'anticyclone s'installant sur l'Europe. Ces particules apportent des PV faibles, dus aux processus diabatiques, à la dorsale. En effet, cet apport de PV négatif, réduisant le PV en altitude dans la zone anticyclonique, peut expliquer le renforcement du gradient de PV et l'intensification de l'anticyclone amenant à une situation de blocage pendant les jours suivants.

La figure 5 confirme une perte de PV ($\Delta PV < 0$) pour la majorité des particules (boxplot n°1). Cette conclusion se re-

trouve aussi pour la somme des intégrales de tendances de PV (PV dû aux effets de la turbulence sur le vent, à la chaleur sensible et latente, au rayonnement, aux effets de la turbulence sur la température)(boxplot n°7). Ces deux boîtes à moustaches ont des moyennes (carré rouge) très proches, autour de -0.25 PVU, ce qui confirme la robustesse de nos résultats, et ce, pour les deux versions d'ARPEGE. Cependant, la distribution de ces boîtes à moustaches est différente, en particulier pour le Run6 où la distribution atteint des valeurs très négatives de PV. Une des raisons de ces différences pourrait trouver son origine dans la non prise en compte de la diffusion horizontale, entre autres.

Cette baisse de PV, bien qu'ayant lieu dans les deux runs, n'a pas les mêmes origines. Pour le Run0, la part négative provient majoritairement des effets de la turbulence sur le vent (boxplot n°3). En revanche, pour le Run6, elle est principalement due au chauffage (boxplot n°2). Plus précisément, le chauffage dû à la chaleur sensible et latente (boxplot n°4) semble être mis en cause. Remarquons que pour le Run0, celui-ci est, au contraire positif. Les processus humides n'ont donc pas la même influence sur le PV pour les deux runs. Leur prédominance n'est pas établie, contrairement à ce que nous nous attendions.

L'origine du PV négatif est tout aussi plausible pour les deux runs, il est donc, pour l'instant, impossible de déterminer avec certitude, lequel des deux runs est le plus réaliste. Par ailleurs, pour les deux versions d'ARPEGE, le rayonnement semble avoir un faible impact sur la dynamique d'altitude, ce qui contredit les travaux réalisés par Chagnon⁶.

5 Conclusion

Grâce à un ensemble de trajectoires ensemencées le long d'un vol effectué en octobre 2016 au large de l'Islande, une étude de l'impact des processus diabatiques au sein des WCB a pu être réalisée. L'apport de PV négatifs en altitude a aidé à l'intensification de l'anticyclone se mettant en place sur la Scandinavie et créant une situation de blocage les jours suivants. Bien que les deux runs analy-

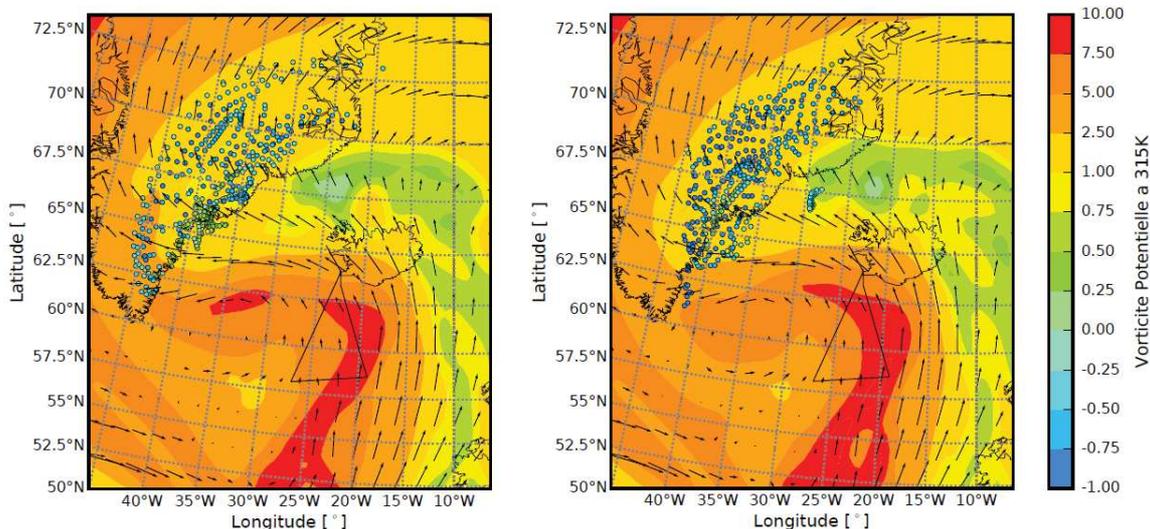


FIGURE 4 – Carte de PV et de vent horizontal à 315K pour les Run0 (à gauche) et Run6 (à droite) avec en points colorés la différence de PV entre le début et la fin de trajectoires à l'emplacement finale des trajectoires

sés montrent une destruction de PV en altitude, les processus diabatiques à l'origine sont différents. Afin de continuer notre étude sur l'impact des processus diabatiques en aval du courant-jet, nous allons étudier les données d'un vol réalisé pendant la matinée du 02 octobre et qui a échantillonné le flux sortant de la WCB. Ainsi, grâce aux données de dropsondes lancées durant ce vol, nous pouvons espérer déterminer lequel des deux runs est le plus réaliste.

Par ailleurs, nous n'avons utilisé que les données de vent pour valider nos deux runs. D'autres variables pourront être étudiées : l'humidité relative, la température, mais aussi les données de glace dont on peut avoir une estimation à partir des données du radar RASTA, lidar LNG et radiomètre infrarouge⁹.

Références

- [1] P. Bauer, A. Thorpe, and Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 525, septembre 2015.
- [2] S. Dirren, M. Didone, and H.C. Davies. Diagnoses of "forecast-analysis" differences of a weather prediction system. *Geophysical Research Letters*, 30 (20), 2003.
- [3] T.N. Carlson. Airflow through midlatitude cyclones and the comma cloud pattern. *Monthly Weather Review*, 108, 1980.
- [4] H. Joos and H. Wernli. Influence of microphysical processes on the potential vorticity development in a warm conveyor belt : a case-study with the limited-area model cosmo. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 138, January 2012.
- [5] E. Madonna et al. Warm conveyor belt in the era-interim dataset (1979-2010). part i : Climatology and potential vorticity evolution. *Journal of Climate*, 27, January 2014.
- [6] J.M. Chagnon, S. L. Gray, and J. Methven. Diabatic processes modifying potential vorticity in a north atlantic cyclone. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139, July 2013.

- [7] M. Sprenger and H. Wernli. The lagranto lagrangian analysis tool - version 2.0. *Geoscientific Model Development*, 8, 2015.
- [8] J.-M. Piriou et al. An approach for convective parametrization with memory : Separating microphysics and transport in grid-scale equations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 64, 2007.
- [9] J. Delanoe and J. Hogan. A variational scheme for retrieving ice cloud properties from combined radar, lidar and infrared radiometer. *Journal of Geophysical Research*, 113, 2008.

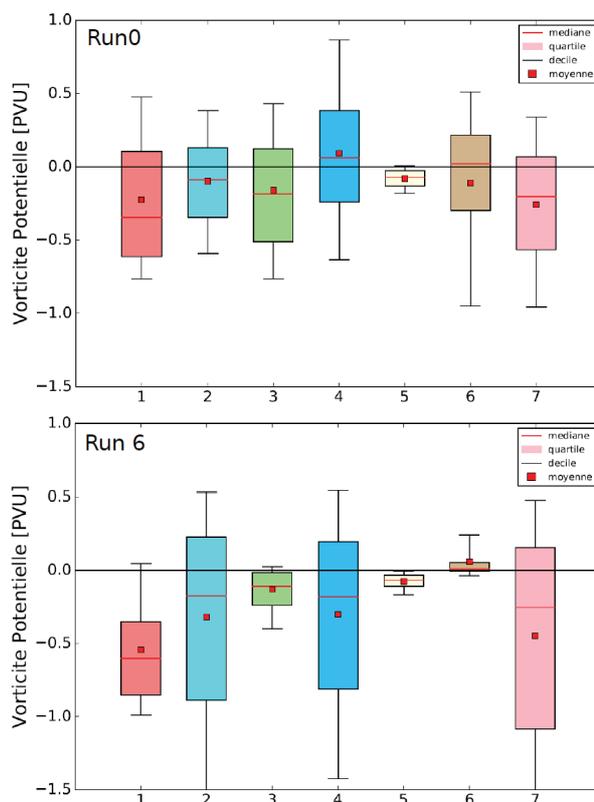


FIGURE 5 – Distribution du PV diabatique à la fin des trajectoires anticycloniques. 1 : différence de PV entre le début et la fin des trajectoires ; 2 : PV dû au chauffage (somme des boites 4, 5 et 6) ; 3 : PV dû aux effets de la turbulence sur le vent ; 4 : PV dû à la chaleur sensible et latente ; 5 : PV dû au rayonnement ; 6 : PV dû aux effets de la turbulence sur la température ; 7 : somme des boites 2 et 3.