

Utilisation de ré-analyses météorologiques pour le dimensionnement et le calcul de performances d'aéronefs.

Bénédicte BAQUÉ^{1*}, Laurent CAZENAVE¹, Thierry MAROT¹

¹DGA Maîtrise de l'Information
BP 7 - 35998 RENNES CEDEX 9

* (auteur correspondant : benedicte.baque@intra.def.gouv.fr)

Résumé - Dans le but de montrer le gain obtenu par l'utilisation de données de ré-analyses météorologiques pour l'évaluation de la disponibilité et des performances de systèmes tels que les aéronefs, cet article présente deux exemples de comparaison de statistiques issues de ces ré-analyses avec des données normatives : d'une part, en ce qui concerne les températures les plus sévères susceptibles d'être rencontrées au sol, d'autre part, pour les températures atmosphériques susceptibles d'être rencontrées par un aéronef au cours de son vol, pour une zone et une période données.

1. Introduction

L'environnement climatique a un impact sur la disponibilité et les performances des systèmes tels que les aéronefs. A ce titre, la DGA met à disposition des programmes un ensemble d'informations climatologiques destinées à la spécification des conditions atmosphériques (caractéristiques spatio-temporelles des paramètres d'environnement) susceptibles d'être rencontrées pendant leurs vols.

Une démarche ayant recours à des sévérités normatives pour ces études conduit aujourd'hui trop souvent à une mauvaise évaluation des performances, les normes utilisées jusqu'à présent étant principalement destinées à un dimensionnement structurel des systèmes. Ces normes n'ont pas vocation à être représentatives de la réalité mais plutôt des niveaux les plus sévères sur l'ensemble du domaine d'emploi.

Ainsi, les ré-analyses offrent des capacités nouvelles pour la spécification, les études de disponibilité et de performances des systèmes et pour la préparation des opérations.

2. Informations fournies par les ré-analyses météorologiques

2.1. Définition des ré-analyses météorologiques [1]

Une « analyse » est une représentation instantanée de l'état de l'atmosphère, établie par un modèle de prévision météorologique, en optimisant l'utilisation des observations disponibles, tout en tenant compte des lois physiques régissant les équilibres entre les variables atmosphériques.

Les données d'observation, provenant de sources et d'instruments variés et distribuées de manière inhomogène dans l'espace et dans le temps, sont intégrées par « assimilation » dans le modèle de prévision. La méthode variationnelle 4D par exemple, dont le principe de fonctionnement est schématisé en Figure 1, consiste à minimiser la distance entre la trajectoire du modèle et l'information disponible (ébauche et observations) dans une fenêtre d'assimilation, d'une extension typique de 6 heures, centrée sur l'heure de référence choisie. A partir de l'ébauche, constituée par une trajectoire récente du modèle de prévision, et des observations réparties à l'intérieur de la fenêtre, une fonction coût caractérise, d'une part,

l'écart entre le vecteur d'état du modèle et l'ébauche à l'instant initial et, d'autre part, la somme des écarts entre les pseudo-observations déduites du vecteur d'état et les observations à tous les instants de la fenêtre d'assimilation. Un calcul de gradient détermine la réduction de cette fonction coût, dont les nouvelles valeurs permettent de calculer une nouvelle trajectoire. Le processus est itéré jusqu'à ce que le minimum de la fonction coût soit atteint.

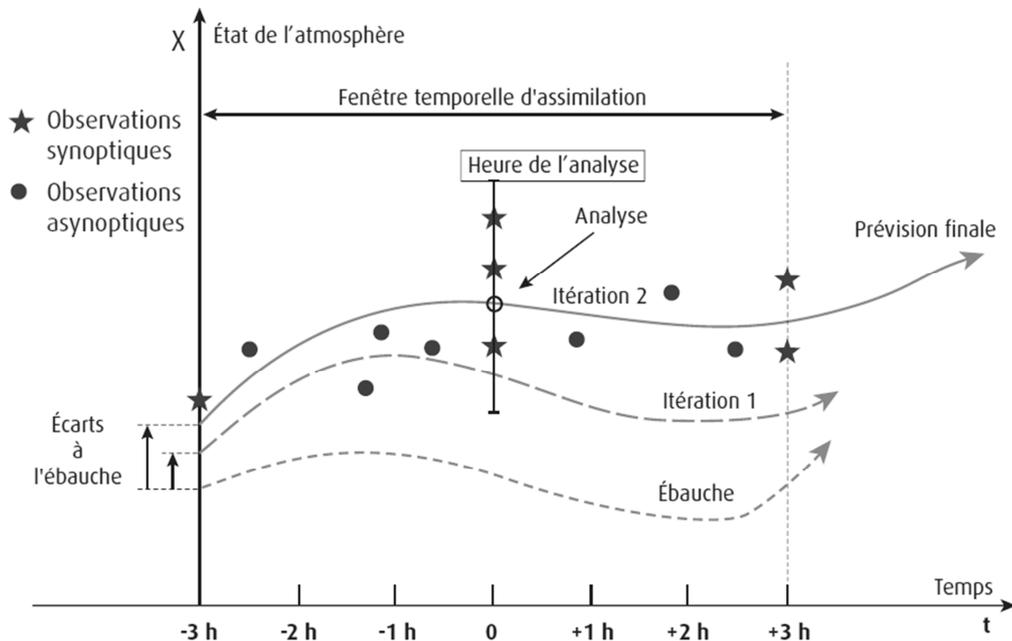


Figure 1 : Schématisation du principe de l'assimilation variationnelle 4D [2].

Les analyses ainsi produites sont conservées par les centres de prévisions météorologiques. Cependant, les modèles météorologiques étant en constante évolution, ces archives d'analyses présentent des ruptures d'homogénéité et de qualité. Pour pallier ce problème, certains centres de prévisions ont choisi de produire des « ré-analyses ». Ces dernières consistent à assimiler a posteriori une série chronologique de données d'observation, la plus longue et la plus complète possible, par une version unique d'un modèle météorologique, la plus performante et évoluée possible. L'homogénéité des ré-analyses est ainsi assurée, à l'exception des effets dus à l'introduction de données issues de nouveaux systèmes d'observation (en particulier satellitaires), comme l'illustre la Figure 2.

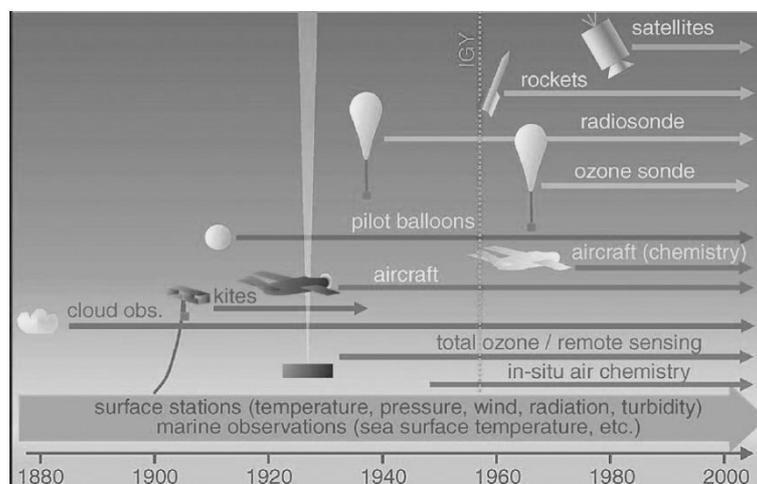


Figure 2 : Evolution du type de données d'observation exploitées pour une prévision [3].

Les ré-analyses météorologiques constituent ainsi des séries chronologiques de tous les paramètres atmosphériques du modèle sur la période totale des données assimilées, en général échantillonnées toutes les 6 heures et maillées sur le globe. Elles servent de données de base pour la réalisation de climatologies.

2.2. Etat des lieux des bases de données de ré-analyses météorologiques [4, 5, 6, 7, 8]

Le Tableau 1 détaille les caractéristiques spatio-temporelles de quelques familles de bases de données de ré-analyses globales, fournissant des informations toutes les 6 heures, en particulier pour le paramètre température :

- « CFS » : *Climate Forecast System* ; « R » : *Reanalysis*, « v2 » : *Version 2*,
- « ERA » : *ECMWF Re-Analysis* ; « 15 » : 15 ans, « 40 » : 40 ans,
- « MERRA » : *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications*,
- « NNRP » : *NCEP-NCAR Reanalysis Project*.

Ces bases de données ont été constituées par les organismes suivants :

- Aux Etats-Unis :
 - « DOE » : *Department of Energy*,
 - « NASA » : *National Aeronautics and Space Administration*,
 - « NCAR » : *National Center for Atmospheric Research*, dépendant de *University Corporation for Atmospheric Research* (« UCAR »),
 - « NCEP » : *National Centers for Environmental Prediction*, dépendant du *National Oceanic and Atmospheric Administration* (« NOAA »),
- Au Royaume-Uni, pour l'Europe :
 - « ECMWF » : *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*.

Contrairement aux bases de données ERA-15 et ERA-40, dont la période de ré-analyse est figée (respectivement à 15 et 40 ans), une base telle que ERA-Interim par exemple est dite « réactualisée » lorsqu'elle est enrichie chaque mois avec les données résultant de l'assimilation des observations sur le dernier mois écoulé par le modèle météorologique, dont la version reste quant à elle inchangée.

	<i>Source</i>	<i>Période</i>	<i>Résolution horizontale</i>	<i>Résolution verticale</i>
CFSR	NCEP	Du 01/01/1979 au 31/12/2010	Surface : 0.312° x 0.312° Atmosphère : 0.5° x 0.5°	37 niveaux pression jusqu'à 1 mbar
CFSv2	NCEP	Du 01/01/2011 à aujourd'hui	Surface : 0.205° x 0.205° Atmosphère : 0.5° x 0.5°	37 niveaux pression jusqu'à 1 mbar
ERA-15	ECMWF	Du 01/01/1979 au 31/12/1993	1.125° x 1.125°	17 niveaux pression jusqu'à 10 hPa
ERA-40	ECMWF	Du 01/09/1957 au 31/08/2002	1.125° x 1.125°	23 niveaux pression jusqu'à 1 hPa
ERA-Interim	ECMWF	Du 01/01/1979 à aujourd'hui	0.703° x 0.703°	37 niveaux pression jusqu'à 0.1 hPa
MERRA	NASA	Du 01/01/1979 à aujourd'hui	0.5° x 0.667°	42 niveaux pression jusqu'à 0.1 hPa
NNRP1	NCEP, NCAR	Du 01/01/1948 à aujourd'hui	2.5° x 2.5°	17 niveaux pression jusqu'à 10 mbar
NCEPR2	NCEP, DOE	Du 01/01/1979 à aujourd'hui	Surface : 1.875° x 1.875° Atmosphère : 2.5° x 2.5°	17 niveaux pression jusqu'à 10 mbar

Tableau 1 : Caractéristiques spatio-temporelles de quelques bases de données de ré-analyses globales, échantillonnées toutes les 6 heures.

3. Exploitation statistique de ré-analyses pour le dimensionnement

3.1. Description des zones climatiques chaudes de la norme OTAN [9]

Les différentes normes en environnement proposent des regroupements des valeurs d'agents d'environnement par zones géographiques. Dans le cadre de la rédaction des spécifications d'environnement système, la DGA fait régulièrement usage de la norme OTAN, qui différencie quatre types de zones climatiques, en fonction de la température et de l'humidité : des zones chaudes, des zones humides, des zones froides et des zones maritimes.

Plus les systèmes sont soumis à des températures élevées, plus ils sont soumis à une accélération de leur vieillissement thermo-chimique, conséquence de la modification de propriétés physiques ou chimiques, due à l'avancement d'une ou plusieurs réactions chimiques. Les zones climatiques d'intérêt pour l'estimation de températures extrêmes sont les zones chaudes A1, A2 et A3 de la norme OTAN, caractérisées par des températures minimales et maximales susceptibles d'être rencontrées respectivement pendant 1% du mois le plus froid et 1% du mois le plus chaud de l'année (soit environ 7 heures) au lieu le plus pénalisant. Les valeurs de ces températures sont rassemblées dans le Tableau 2.

		(°C)	(K)
A1	Chaud et sec extrême	32 à 49	305 à 322
A2	Chaud et sec	30 à 44	303 à 317
A3	Intermédiaire	28 à 39	301 à 312

Tableau 2 : Amplitudes de température pour les zones climatiques chaudes de la norme OTAN.

3.2. Comparaison avec des statistiques sur une zone et une période données

A partir des informations climatologiques contenues sur 15 ans (du 01/01/1999 au 31/12/2013) des ré-analyses NCEPR2 à la surface des mers et océans, il est possible d'identifier certaines zones géographiques. La démarche consiste à déterminer les zones pour lesquelles les températures atteignent ou dépassent les valeurs fournies par la norme OTAN.

Pour cela, dans un premier temps, la « composante temporelle » est éliminée en ne retenant en chaque lieu (en chaque maille) que le mois pour lequel la valeur à 99 % est la plus élevée. Les périodes pénalisantes d'un point de vue thermique sont ainsi identifiées, comme l'illustre la carte en Figure 3, centrée sur l'Australie. Sur ce continent de l'hémisphère Sud, les mois les plus chauds sont principalement ceux de l'été austral : décembre, janvier et février (respectivement d'indices 12, 1 et 2).

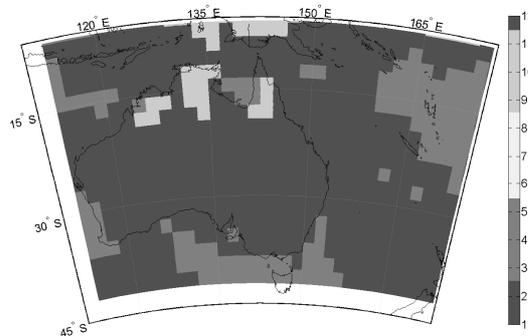


Figure 3 : Carte des indices des mois les plus chauds.

La carte des valeurs de températures à 99 % associée à ces mois est alors reconstruite. Une carte homogène à la norme est ainsi obtenue : « valeur à 99% du temps de la période la plus sévère », représentée sur la Figure 4. Les zones géographiques concernées par la spécification en température des zones A1, A2 et A3 y sont identifiées.

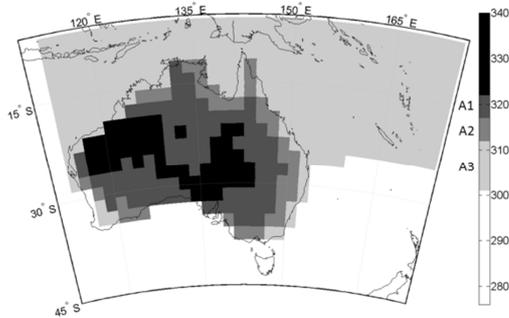


Figure 4 : Carte de température à 99 % du mois le plus chaud, associée aux zones climatiques chaudes de la norme OTAN.

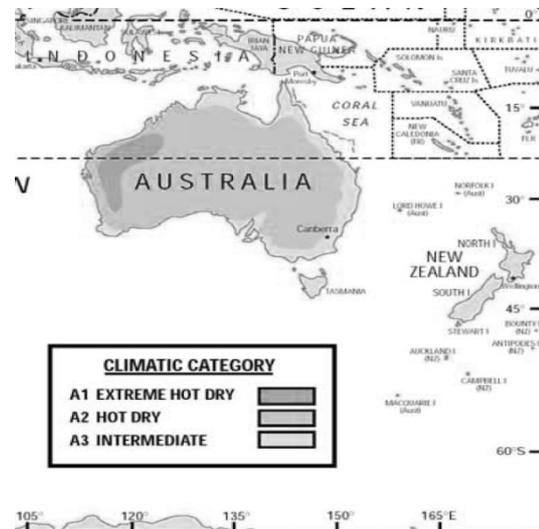


Figure 5 : Extrait de la carte des zones climatiques chaudes de la norme OTAN.

La comparaison de cette carte, obtenue par traitement statistique de données de ré-analyses, avec un extrait de la norme OTAN présenté en Figure 5, permet de remarquer que :

- 1) Les données de ré-analyses utilisées ne contenant pas de masque terre/mer, certaines mailles « maritimes », sont identifiées en Figure 4 comme appartenant à la zone climatique chaude A3 de la norme OTAN. Or, les zones maritimes sont également normalisées et une étude spécifique doit être menée pour pouvoir les délimiter. Par conséquent, cet article se limite à commenter les résultats obtenus pour les mailles « terrestres ».
- 2) Les statistiques obtenues à partir des ré-analyses permettent de retrouver de manière satisfaisante la localisation des zones climatiques chaudes A2 et A3 de la norme OTAN, en bordure de côte du continent Australien.
- 3) D'après les résultats du traitement statistique des données de ré-analyses, la zone climatique chaude A1 de la norme OTAN serait beaucoup plus étendue à l'intérieur du continent Australien. Sa délimitation se rapprocherait de la bordure côtière, de manière quasi-homogène.
- 4) Une grande partie de l'intérieur du continent Australien présente des températures à 99% du mois le plus chaud dépassant 49°C (322 K). Ces zones, indiquées en noir sur la Figure 4, sont donc en dehors de la spécification fournie par la norme OTAN.

En estimant les températures de l'air susceptibles d'être rencontrées en zones climatiques chaudes, cet exemple d'exploitation statistique de données de ré-analyses météorologiques permet d'apprécier géographiquement les zones de déploiement opérationnel potentielles ainsi que les périodes de l'année associées.

4. Exploitation statistique de ré-analyses pour le calcul de performances

4.1. L'atmosphère normalisée

L'atmosphère standard type OACI [10] est une norme internationale destinée à être utilisée dans l'aéronautique et à permettre en particulier une unification pour l'étalonnage des altimètres. Ce modèle est basé sur les hypothèses suivantes [11] :

- L'air est un gaz parfait sans changement de phase de l'eau,
- L'air est au repos par rapport à la Terre et en équilibre hydrostatique,
- Des valeurs conventionnelles au niveau moyen de la mer sont utilisées pour la température (288,15 K), la pression (1013,25 hPa) et la masse volumique ($1,225 \text{ kg.m}^{-3}$),
- La température varie sur la verticale dans la troposphère, dans la stratosphère et dans la mésosphère selon des fonctions linéaires de l'altitude géopotentielle,
- Il est élaboré pour des latitudes moyennes.

Le profil de température correspondant, applicable à l'année et sur le globe, est tracé en Figure 6 à titre de comparaison.

La norme OTAN [9] fournit quant à elle, entre autres, des valeurs de température maximale de l'air susceptibles d'être rencontrées pendant 1% du mois le plus chaud de l'année (soit environ 7 heures) par niveaux d'altitude, à l'échelle globale. Le profil correspondant est tracé en Figure 7 à titre de comparaison.

4.2. Comparaison avec des statistiques en un point et sur une période donnés

Les profils de température fournis par les normes sont comparés à ceux obtenus par traitement statistique des données des ré-analyses NCEPR2 au point le plus proche de la ville d'Alice Springs, de latitude 25° Sud et de longitude 135° Est, au centre de l'Australie.

Le profil de température moyenne au-dessus d'Alice Springs au mois le plus chaud en surface (janvier) est comparé en Figure 6 au profil de température OACI et aux profils de température moyenne aux latitudes 10° , 30° , 45° et 70° Sud pour l'été austral (décembre, janvier et février), comme préconisé dans [11].

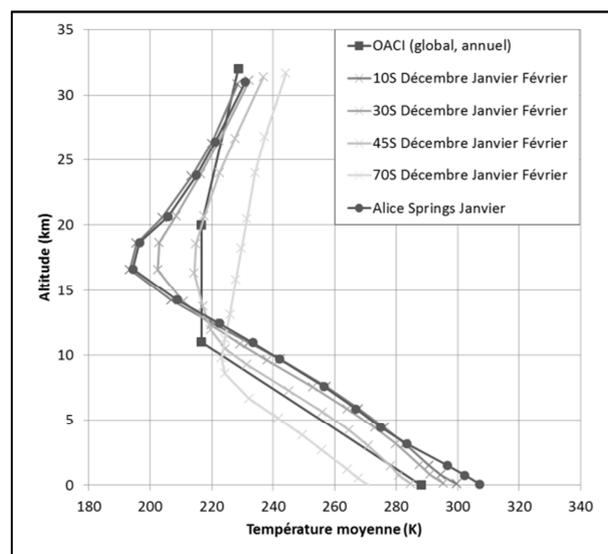


Figure 6 : Profils de température moyenne.

Même moyenné, sur une saison particulière, le comportement thermique de l'atmosphère est très différent en fonction des latitudes. Pour une altitude de vol fixée, les températures et leurs gradients susceptibles d'être rencontrés par un aéronef peuvent être très différents tout au long de sa trajectoire.

En pratique, les profils de température utilisés pour le calcul de performances ont l'allure d'un profil OACI, « translaté » en abscisse pour intégrer une température sévère au niveau du sol (par exemple au décollage d'un aéronef). Dans ce cas, le profil « normalisé » considéré est très dimensionnant tout au long du vol.

Le profil de température à 99 % du mois le plus chaud au-dessus d'Alice Springs est comparé en Figure 7 au profil de température correspondant fourni par la norme OTAN. Les mois les plus chauds, en fonction des niveaux d'altitude, sont indiqués dans le Tableau 3.

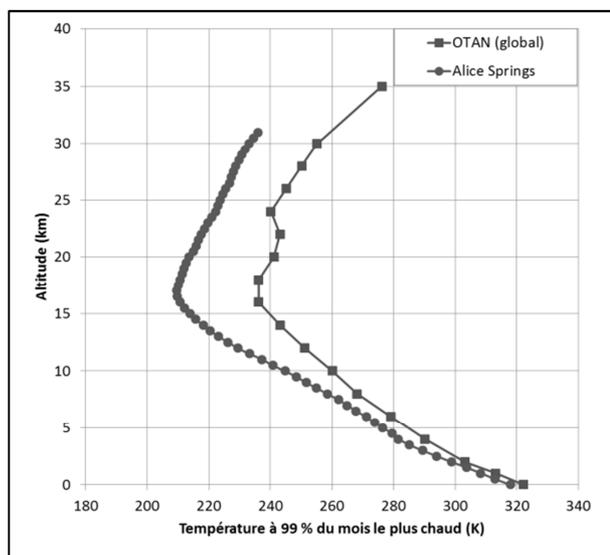


Figure 7 : Profils de température à 99 % du mois le plus chaud.

	Mois
De 30 à 31 km	Janvier
De 27 à 30 km	Mars
De 19 à 27 km	Juin Juillet Août
De 17 à 19 km	Septembre
De 14 à 17 km	Juin
De 12 à 14 km	Mai
De 0 à 12 km	Janvier Février

Tableau 3 : Mois les plus chauds, en fonction de l'altitude, au-dessus d'Alice Springs.

En fonction des saisons, deux zones de l'atmosphère se distinguent particulièrement par leur comportement thermique. En basse couche de l'atmosphère, du sol jusqu'à 12 km d'altitude, les températures sont le plus élevées pendant l'été austral (janvier et février). Pour les altitudes comprises entre 19 et 27 km, c'est pendant l'hiver austral (juin, juillet et août) que les températures sont le plus élevées. En effet, entre les deux saisons estivale et hivernale, la tropopause se déplace par translation verticale.

Cependant, pour toutes les périodes de l'année et pour la couche atmosphérique considérée, le profil fourni par la norme OTAN est très dimensionnant.

Ces deux exemples de comparaison avec des profils « normalisés » montrent le gain potentiel pour l'évaluation des performances systèmes obtenu grâce à l'utilisation de profils « personnalisés » en terme de localisation spatio-temporelle, calculés à partir de données de ré-analyses météorologiques.

La criticité de systèmes dont le domaine de fonctionnement thermique est très contraint et dont le comportement thermique possède une constante de temps très inférieure à la durée de vol est ainsi beaucoup mieux estimée. La conséquence d'un tel gain peut être par exemple l'ouverture du domaine d'emploi d'un tel système.

5. Conclusion

Grâce à des comparaisons réalisées entre des normes (telles que celles présentées dans cet article), des mesures (non présentées dans cet article) et des statistiques basées sur des ré-analyses météorologiques, la DGA a acquis un niveau de confiance adapté pour l'exploitation de ce type de résultats.

Les applications déjà réalisées ont permis :

- 1) D'identifier des zones d'emploi et des périodes dimensionnantes pour l'exploitation d'un système,
- 2) D'appréhender le bénéfice de l'exploitation de telles données dans les études de performances systèmes.

Les études en cours ont pour objectifs de tirer parti de la résolution spatiale et temporelle des données de ré-analyses afin :

- De préciser les spécifications systèmes en associant aux contraintes dimensionnantes leurs occurrences géographiques et temporelles,
- D'éviter l'usage, nécessairement pénalisant, de profils normatifs « tout temps, tout lieu » en exploitant la représentativité physique de l'information climatique,
- D'identifier ainsi les performances réalistes des systèmes et d'améliorer la connaissance de leur domaine d'emploi.

En réponse à une exigence de performances opérationnelles de plus en plus élevées, l'utilisation de ré-analyses météorologiques offre une perspective de définition accrue des conditions atmosphériques à prendre en compte dans le processus de préparation des opérations, notamment en alternative à l'indisponibilité de prévisions météorologiques.

Références

- [1] F. Chavaux, Principes des ré-analyses et mises en œuvre, *Atelier thématique DGA / Météo-France* (Toulouse, 27-28 avril 2015).
- [2] J. Coiffier, *Les bases de la prévision numérique du temps*, Cours et manuels n° 18, Météo-France (2009).
- [3] European Reanalysis of Global Climate Observations (ERA-CLIM) [en ligne]. Disponible sur : <http://www.era-clim.eu/Archive/ERA-CLIM/about/>
- [4] Centre for Environmental Data Archival, *CEDA Data Catalogue* [en ligne]. Disponible sur : <http://catalogue.ceda.ac.uk>
- [5] ECMWF, *Research – Browse reanalysis datasets* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/browse-reanalysis-datasets>
- [6] NASA – Goddard Space Flight Center – Global Modeling and Assimilation Office, *Projects – MERRA* [en ligne]. Disponible sur : <http://gmao.gsfc.nasa.gov/research/merra/>
- [7] NCAR, *Climate Data Guide*, Climate Data – Atmospheric Reanalysis : Overview & Comparison Tables [en ligne]. Disponible sur : <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/atmospheric-reanalysis-overview-comparison-tables>
- [8] NCAR, *Research Data Archive* [en ligne]. Disponible sur : <http://rda.ucar.edu/>
- [9] OTAN, *Climatic conditions*, STANAG 4370 AECTP-230, Leaflet 2311, Edition 1 (2009).
- [10] OACI, *Manuel de l'atmosphère type OACI*, 3ème édition (1993).
- [11] S. Malardel, *Fondamentaux de Météorologie – A l'école du temps*, Cépaduès Editions (2005).