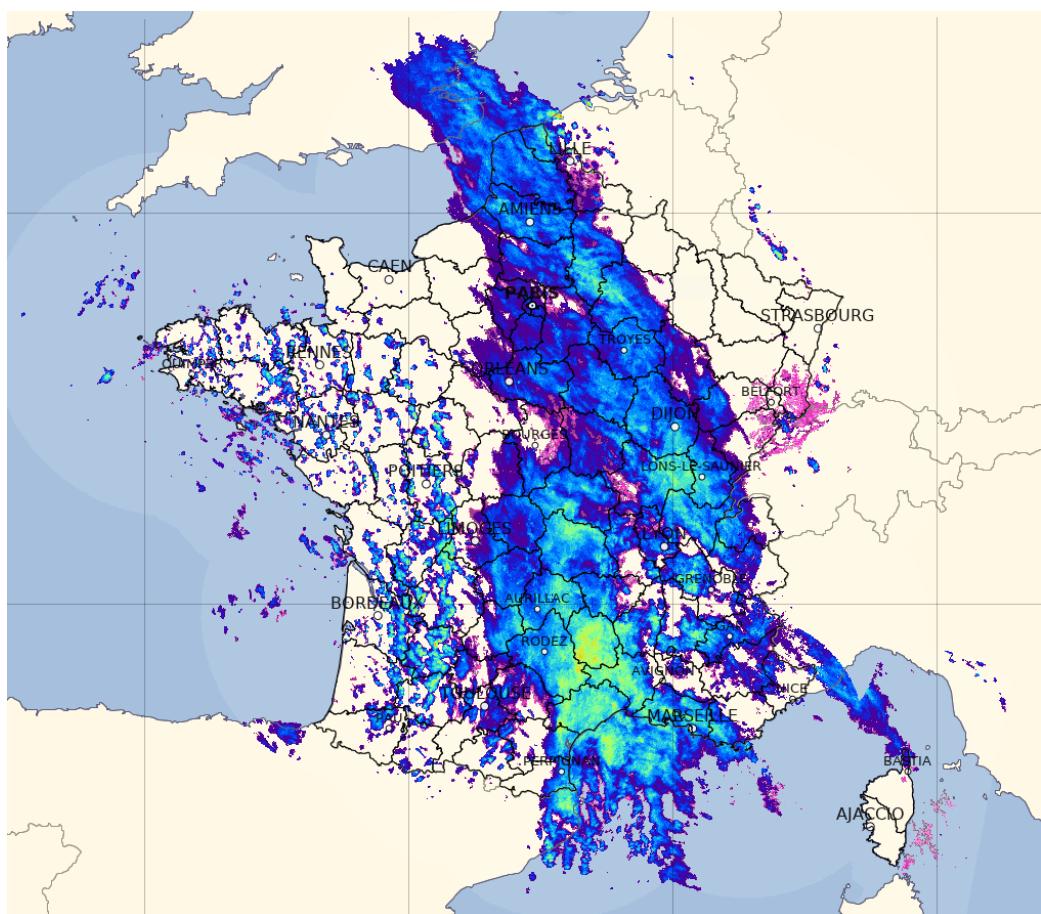


LA PRÉPA DES INP

SITE DE BORDEAUX

RAPPORT DE STAGE

Méthodes d'intercomparaison de réflectivités et de produits polarimétriques sur des radars de précipitation



VERBEKE Aurélien

Encadré par Olivier MAZE et Nan YU

Année : 2023 - 2024

LA PRÉPA DES INP

SITE DE BORDEAUX

MÉTÉO-FRANCE

RAPPORT DE STAGE

Méthodes d'intercomparaison de réflectivités et de produits polarimétriques sur des radars de précipitation

Intercomparaison de réflectivités et de produits polarimétriques radar dans le cadre de qualifications de nouveaux radars, de suivi du réseau ou de R&D

VERBEKE Aurélien

Encadré par Olivier MAZE et Nan YU

Année : 2023 - 2024

TABLE DES MATIERES

Remerciements	2
Glossaire	3
I Introduction	4
II L'entreprise	5
1 Historique	5
1.1 Premiers intérêts	5
1.2 Développement de la météorologie	6
1.3 Ere numérique	6
2 Missions	7
3 Organisation des services	7
III Réalisation de la mission	9
1 Infrastructure radar	9
1.1 Fonctionnement du radar	9
1.2 Chaîne radar	10
1.3 Données utilisées	10
2 Préparation des données	12
2.1 Désarchivage des images	13
2.2 Pour une comparaison sur tours d'antenne	14
2.3 Pour une comparaison en ZBAS/HBAS	16
2.4 Exportation des zones de comparaison	17
3 Comparaison des paramètres	17
3.1 Choix d'une journée appropriée	18
3.2 Traitements apportés aux réflectivités brutes	18
3.3 Production de graphiques	20
IV Conclusion	26
Annexes	27
A Calcul des paramètres polarimétriques	27
Références	28

Remerciements

Pendant que d'autres commençaient à transpirer face à leurs concours, nous partions en stage pour clore deux année de prépa. C'était une opportunité que je n'aurai su laisser s'échapper. Et ce fut en effet une belle expérience qui n'aurait été pas telle sans la présence de beaucoup.

D'abord, merci à Olivier MAZE, mon tuteur pour ce stage, pour sa confiance et la liberté qu'il m'a laissée dans mes travaux, pour ses éclaircissements, sa bienveillance, son enthousiasme, ses conseils sur ce rapport, et par dessus tout, ses précieuses sauvegardes.

Merci aussi à Nan YU pour ses conseils, ses avis techniques, ses interprétations des résultats et ses requêtes qui auront grandement participé à faire progresser ce projet.

Merci également à Laurent FRANCHISTEGUY pour l'organisation administrative de ce stage et la relecture de ce rapport, mais aussi pour son accueil au CMR et sa détermination sans relâche à me faire payer.

Il me tenait aussi à cœur de remercier à La Prépa des INP de Bordeaux, mes professeurs, et tout le personnel administratif qui nous ont accompagné durant deux ans. Ces deux années n'auraient pas été pareilles sans vous.

Ces trois mois n'auraient non plus pas été les mêmes sans l'ensemble du service DSO / CMR. Que vous soyez remerciés pour votre aide et vos réponses, les requêtes et orientations faites au fur et à mesure du stage, mais aussi simplement pour l'agréable atmosphère que vous apportez au café le matin, à midi à la cantine ou dans les couloirs.

Enfin, merci à ma mère, sans qui ce stage n'aurait pas été possible, pour ses multiples relectures de ce rapport et pour toutes ses réponses à mes questions et ses bonnes idées, même à des heures où le travail ne devrait pas être sujet à discussions.

Glossaire

Azimut : Angle formé entre le faisceau et une origine, généralement le nord géographique, dans le sens horaire. Par abus de langage, azimut peut aussi désigner l'indice d'une radiale dans une image. Ainsi, si une image est constituée de 720 radiales, l'azimut 122 correspondra à un angle de 61° par rapport au nord.

Echo : Signal reçu de la cible, ou plus simplement celle-ci par abus de langage. Nous parlerons en particulier d'écho de sol, écho de ciel clair, écho de mer et écho fixe.

Elévation : Angle formé entre le faisceau et l'horizontale tangente à la Terre.

Lame d'eau (R) : Image représentant une estimation de la quantité d'eau tombée au sol. Elle est uniquement calculée à l'aide des données radar, sans prise en compte des observations pluviométriques.

Modèle : Programme de prévision et simulation numérique du temps.

Mosaïque : Image incluant plusieurs radars. Il y a notamment des mosaïques pour la métropole ou l'outre-mer.

PIEUVRE : Logiciel Météo-France de suivi du réseau radar.

Pixmap : Tableau de données contenant une image.

Porte : Portion de radiale dans une image polaire. Toutes les portes sont de même taille.

Réflectivité (Z) : Mesure de la capacité de la cible à absorber ou restituer l'énergie électromagnétique. Elle dépend de sa taille, de sa forme, et de sa constitution. Elle est exprimée en décibel Z (dBZ). [1] [2]

Synopsis : Logiciel Météo-France de visualisation de données et d'images (radar, foudre, modèles) à destination des prévisionnistes.

I – Introduction

Météo-France dispose d'un réseau de 39 radars nommé ARAMIS : 31 en métropole, 4 en outre-mer (Antilles et Réunion), 2 en Nouvelle-Calédonie appartenant à la collectivité calédonienne mais gérés par Météo-France (logiciel et traitement des données), et 2 radars sur les aéroports de Paris Charles-de-Gaulle et de Nice (traitement des données uniquement, logiciel propriétaire).

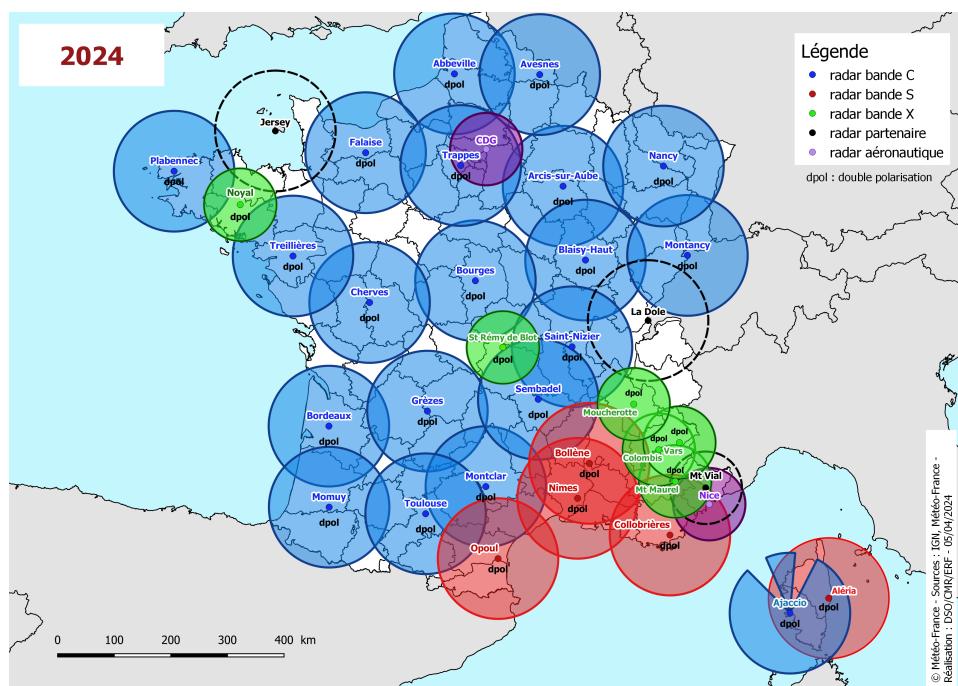


FIGURE 1 – Carte du réseau ARAMIS en 2024

Dans le cadre du projet PUMA (PUMA 3 actuellement), Météo-France opère aussi un remplacement des plus anciens radars. Quand un ancien radar est remplacé, il faut le qualifier, c'est à dire décider s'il est apte ou non à une mise en service opérationnelle pour une intégration dans les mosaïques, dans les modèles, ou dans les systèmes utilisés par les prévisionnistes notamment.

Actuellement, la comparaison de radars est uniquement faite lors des qualifications, à l'installation d'un radar neuf. Les images sont comparées de manière subjective, sur des zones déterminées par des logiciels préexistants tels que QGis ou de façon plus ponctuelle.

Il y a donc une demande de la part des opérateurs de pouvoir comparer automatiquement les radars entre eux, en réalisant des statistiques sur une plus large étendue de données, que ce soit pour une qualification à l'installation d'un radar neuf, pour un suivi régulier du réseau ARAMIS, ou dans une démarche de R&D.

Il m'est ainsi demandé de fournir un outil d'intercomparaison clé en main, utilisable sans qu'il y ait besoin de modifier le code source. Ce travail sera séparé en deux parties : la création de données nécessaires à la comparaison, puis la comparaison en elle-même.

II – L'entreprise

Météo-France est un établissement public à caractère administratif. C'est le service officiel de la météorologie et de la climatologie en France depuis 1993. Rattaché au Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, il exerce les attributions de l'Etat en matière de sécurité des personnes et des biens. Cela comprend notamment l'observation et la prévision de phénomènes météorologiques, de l'état de surface des mers et des couvertures neigeuses, mais aussi l'émission de cartes de vigilance pour la métropole et l'outre-mer. Météo-France est responsable de l'activité de conservation de la mémoire du climat et de l'analyse de ses évolutions constatées.

Météo-France forme une grande partie de ses 2500 personnels grâce à son école : l'Ecole Nationale de la Météorologie (ENM). Faisant partie de Toulouse-INP, celle-ci forme des ingénieurs et techniciens civils ou fonctionnaires, ainsi que les personnels des armées spécialisés en météorologie. Un recrutement est aussi ouvert à des personnels non fonctionnaires, issus ou non de l'ENM.

Implantation territoriale Le principal site de Météo-France se trouve à Toulouse, c'est la Métropole. A son ouverture en 1982, il ne contenait que l'ENM et le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM). Progressivement, la plupart des services y seront transférés à l'exception de la direction générale qui se trouve toujours à Saint-Mandé dans le Val-de-Marne.

Il reste toujours 7 centres régionaux, 27 pôles d'observation et des centres spécialisés (montagne, marine et satellite) répartis sur tout le territoire métropolitain et d'outre-mer.

1 Historique

1.1 Premiers intérêts

Le 14 novembre 1854, une tempête détruit une grande partie de la flotte française, anglaise et turque lors de la guerre de Crimée. Urbain Le Verrier (1811-1877), astronome et mathématicien français, directeur de l'Observatoire de Paris, convainc Napoléon III d'y créer un service météorologique destiné à avertir les marins de l'arrivée des tempêtes. Il crée un réseau de stations communiquant leurs données par télégraphe électrique.

En 1863, des cartes météorologiques quotidiennes sont publiées et des télégrammes d'avertissements sont envoyées aux ports.

En 1874, Léon Brault (1839-1885), chef du Bureau météorologique au Dépôt des cartes et plans de la Marine, introduit la publication de cartes de vents sur les océans.

L'année 1876 marque l'arrivée des prévisions pour le grand public. *L'Opinion nationale* publie chaque jour la carte météorologique établie par l'Observatoire de Paris.

En 1878, le service météorologique quitte l'Observatoire de Paris et devient le Bureau Central Météorologique (BCM), rattaché au ministère de l'Instruction publique.

En 1892, le premier ballon-sonde est envoyé par Gustave Hermite. Il embarque des instruments enregistreurs dont les données sont récupérées après retour du ballon sur terre.

1.2 Développement de la météorologie

En 1896, à Trappes, Léon Teisserenc de Bort (1855-1913) fonde l'observatoire de météorologie dynamique. Il organise l'observation de la structure verticale de l'atmosphère grâce à des mesures effectuées par cerfs-volants ou ballons-sonde : pression atmosphérique, température et humidité sont récoltées du sol à l'altitude d'éclatement du ballon. La même année, Léon Teisserenc de Bort et Hugo Hildebrand Hildebrandsson publient le premier *Atlas international des nuages*.

A partir de 1915, pour les besoins de la Première guerre mondiale, des services météorologiques aux armées sont créés, en particulier pour l'aviation, l'artillerie et les compagnies de gaz de combat.

En 1920, l'Office National Météorologique (ONM) remplace le BCM et regroupe les services aéronautiques et militaires.

En 1922, l'émetteur de la tour Eiffel diffuse le premier bulletin météo radio pour les particuliers.

Dans les années 1920-1930, le développement de l'aéronautique, en particulier l'Aéropostale, conduit à une assistance des prévisionnistes de l'ONM et permet, le 31 août 1930, une traversée aérienne de l'océan atlantique entre Paris et New York.

En 1945, la Météorologie nationale succède à l'ONM et est rattachée au ministère des Travaux publics, des Transports et de la Reconstruction.

L'année suivante, en 1946, le premier bulletin météorologique est présenté en direct à la télévision française.

1.3 Ere numérique

En 1949, le premier radar météorologique détecteur de précipitations est installé à Trappes.

En 1960, l'installation du KL 901, premier ordinateur de la Météorologie nationale, permet l'étude d'une prévision numérique du temps.

En 1963, le Centre de météorologie spatiale est ouvert à Lannion et reçoit sa première image satellite en provenance de Tirs 8.

En 1967, la Météorologie nationale acquiert le CDC 6400, qui est dorénavant utilisé quotidiennement pour la prévision numérique.

En 1975, le Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT) est créé.

En 1977, le premier satellite météorologique européen, METEOSAT, est lancé.

En 1979, Améthyste, le premier modèle hémisphérique à grille de 250km, est mis en service. Succèderont Emeraude en 1985, avec une maille de 120km, puis Péricope, avec une maille de 35km mais avec un domaine spatial plus limité.

Dans les années 1980, le réseau ARAMIS organise les différents radars météorologiques français.

En 1982, Ecole Nationale de la Météorologie (ENM) et le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) sont transférés à Toulouse. Les services de prévision, de climatologie et d'informatique les rejoindront en 1991.

En 1992, en coopération avec le CEPMMT, la Météorologie nationale met en service le modèle Arpege. C'est un modèle global (mondial) dont la maille varie de 30km sur le centre de la France à 300km aux antipodes.

En 1993, la Météorologie nationale devient finalement Météo-France, établissement public administratif.

En 1996, le projet RADOME réorganise le réseau d'observation au sol pour la surveillance du temps et la prévision immédiate.

En 2001, suite aux tempêtes dévastatrices de 1999, Météo-France développe son système de vigilance météorologique pour l'information de la population et des pouvoirs publics.

En 2009, le modèle Arome devient opérationnel. Grâce à sa maille de 2,5 km, il permet de mieux modéliser les phénomènes locaux tels que les orages ou les brouillards. La précision des prévisions est grandement améliorée.

Depuis, les modèles Arome et Arpege sont constamment améliorés, notamment grâce à la constante augmentation de la puissance de calcul apportée par les supercalculateurs. Aujourd'hui, Météo-France dispose de machines capables d'atteindre les 11 pétaflops (calculs par seconde), soit environ 1 milliard de fois plus que le CDC 6400 (200 kiloflops). A titre de comparaison, un ordinateur moderne a une puissance qui avoisine les 500 gigaflops.

2 Missions

Météo-France fournit des produits à plusieurs acteurs dont : elle-même, les armées, la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC), des entreprises de divers secteurs, des organisations sportives, ou encore des particuliers.

Ses missions sont :

- La gestion d'un réseau d'observation au sol, radar (qui nous intéressera particulièrement), en mer, par satellite et par radiosondage
- La prévision du temps et de l'état des mers grâce aux modèles numériques
- L'assistance météorologique à la navigation aérienne
- La contribution à la Défense nationale
- L'étude du climat passé et futur
- La surveillance de la qualité de l'air
- L'émission de vigilances
- La recherche scientifique
- La gestion d'un système informatique et de moyens de calcul haute-performance
- La formation des personnels civils, fonctionnaires et militaires
- La représentation de la France dans les organisations météorologiques européennes ou mondiales

Depuis le 1^{er} janvier 2024, Météo-France doit aussi, au même titre que d'autres administrations nationales (par exemple l'IGN et Géoportail), mettre à disposition de tout le monde une grande partie de ses données, et cela gratuitement. Cela concerne notamment les données d'observation, de prévision (sorties des modèles Arome et Arpege), de climatologie et de prévision du climat futur (très long terme).

3 Organisation des services

Voici une organisation (non exhaustive sur les services de 1^{er} niveau) jusqu'à l'équipe que j'ai intégrée [3] :

- **DSI** : Direction des Systèmes d'Information
- **DSO** : Direction des Systèmes d'Observation
 - **DOS** : Département de l'Observation de Surface
 - **CMM** : Centre de Météorologie Marine
 - **DOA** : Département de l'Observation en Altitude
 - **CMR** : Centre de Météorologie Radar
 - ◆ **DEP** : Développements Etudes et Prospectives
 - ◆ **ERF** : Exploitation Radar et Foudre
 - ◆ **IMI** : Installation Maintenance et Infrastructure
 - **LM** : Laboratoire de Métrologie
 - **DOT** : Département de l'Observation Territoriale
 - **MSO** : Maîtrise du Système d'Observation
- **DIROP** : Direction des Opérations pour la Prévision
- **DSM** : Direction des Services Météorologiques
- **DCSC** : Direction de la Climatologie et des Services Climatiques
- **DESR** : Direction de la l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

Pour mon stage, j'ai intégré le Centre de Météorologie Radar (CMR), situé à Toulouse à la Météropole. Son rôle est la gestion du réseau radar et l'utilisation de ces derniers pour la production de données d'observation.

Je fais partie de l'équipe DSO/CMR/ERF. Elle est constituée de 6 personnes. Son rôle est le suivi du réseau radar et foudre, de l'étude du lieu d'installation du radar à la vérification de son bon fonctionnement en temps réel.

Je suis aussi amené à travailler avec l'équipe DSO/CMR/DEP. Elle intègre 12 personnes et s'occupe des activités de recherche et développement radar.

III – Réalisation de la mission

L'objectif est de créer un outil d'intercomparaison entre deux radars. Il faudra donc créer les données nécessaires, puis produire différents graphiques et indicateurs de comparaison.

1 Infrastructure radar

1.1 Fonctionnement du radar

Un radar doit sonder l'ensemble (ou à minima le maximum) de l'espace qui l'entoure. Dans ce but, son antenne se déplace horizontalement (en « azimut », β sur la figure ci-contre) et verticalement (en « élévation » ou « site », ε sur la figure ci-contre).

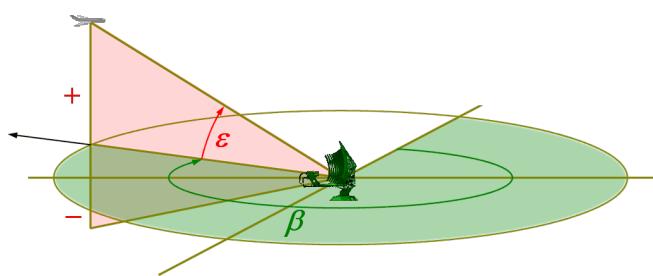


FIGURE 2 – Schéma de fonctionnement d'un radar

Source : radartutorial.eu

Les radars Météo-France fonctionnent par cycle : 1 toutes les 5 minutes. Dans chacun des 3 cycles, le radar fait plusieurs tours (généralement 6), chacun à une élévation différente. On appelle cette organisation de mode d'exploitation, ou mode d'exploration.

TABLE 1 – Mode d'exploitation du radar de Bordeaux

Cycle	1						2						3					
Tour	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
Elevation (°)	90	4	3	1,5	0,8	0,4	7	5	3	1,5	0,8	0,4	8	6	3	1,5	0,8	0,4

De plus, il faut savoir que les faisceaux ne sont pas parfaits et possèdent une ouverture (de $1,1^\circ$ à $1,65^\circ$ selon les radars).

La figure ci-dessous illustre la géométrie des faisceaux dans l'espace. On se rend bien compte que de grosses altitudes ($\geq 5\text{km}$) sont rapidement atteintes, notamment à cause de la courbure de la Terre, et que la précision loin du radar est bien moindre qu'à courte distance.

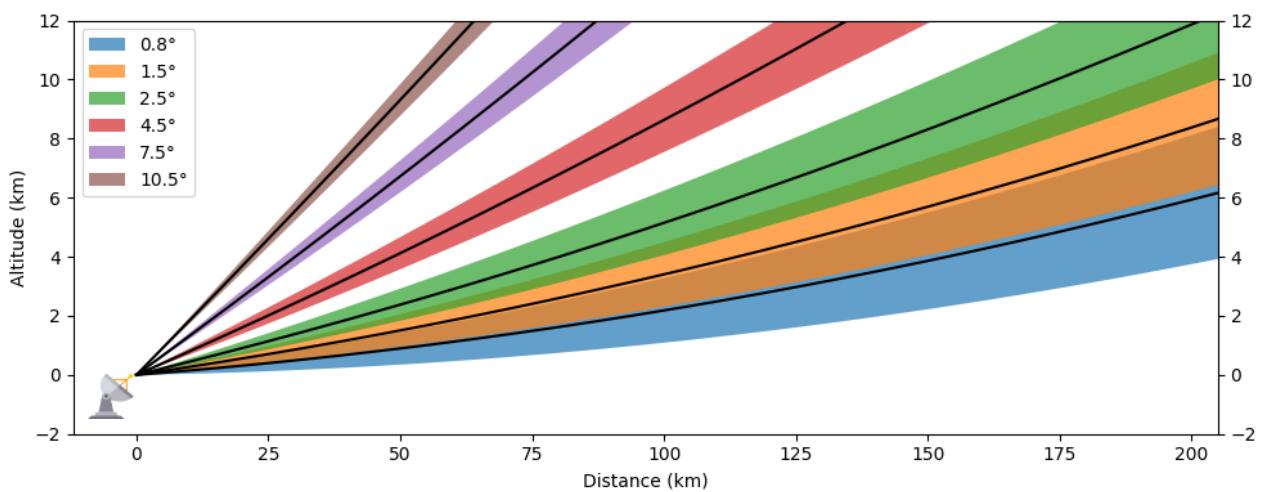


FIGURE 3 – Evolution de l’altitude en fonction de la distance au radar et de l’élévation de l’antenne — Cycle 2 du radar de Toulouse

1.2 Chaîne radar

Les radars utilisés par Météo-France sont des radars double-polarisés (DP) : ils fonctionnent en envoyant des impulsions polarisées verticalement (voie V) et horizontalement (voie H). On en distingue trois types, selon leur fréquence d’émission : bande S (≈ 3 GHz), bande C (≈ 6 GHz) et bande X (≈ 10 GHz).

Le radar est piloté par un logiciel Météo-France : CASTOR (Chaîne d’Acquisition, de Surveillance et de Traitement des Observations Radar). Ce dernier se charge du pilotage et de la programmation du radar, du traitement des données reçues, de la génération de certaines images locales, puis de leur envoi sur le réseau Météo-France notamment.

La création d’images élaborées (mosaïques, lame d’eau...) est assurée par l’outil SERVAL (Système d’Elaboration des produits Radar et de Visualisation centrALisé).

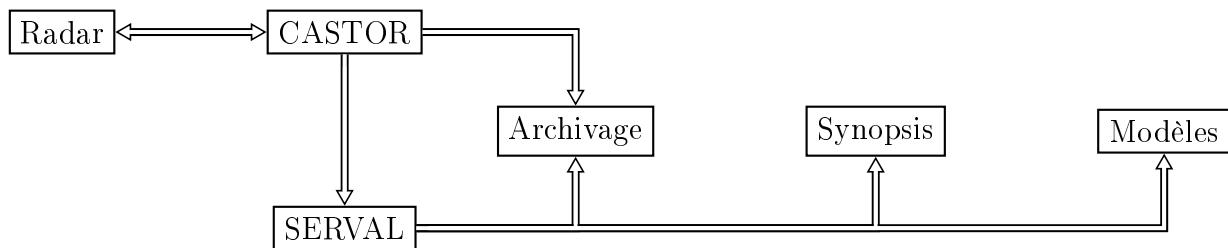


FIGURE 4 – Chaîne de traitement radar simplifiée

1.3 Données utilisées

1.3.1 Tours d’antenne PAM et PAG

Les fichiers PAM et PAG contiennent différentes images produites par le calculateur CASTOR. On pourra nommer ces images des « tours d’antenne ». Une image est une vue à la verticale du radar, centrée sur celui-ci, les points en altitude étant projetés à la surface de la Terre. On produit une image toutes les 5 minutes. Le contenu des PAM et PAG est le suivant [4] [5] [6] :

TABLE 2 – Description des types d'image présents dans un PAM

PAM			
Image (format)	Description	Résolution en distance	Résolution en azimut
Z_H (polaire)	Réflectivité brute en voie horizontale		
Z_{DR} (polaire)	Réflectivité différentielle Différence de la réflectivité en voie H et la réflectivité en voie V. Etant exprimé en dB, un Z_{DR} positif montre que la cible est plus large horizontalement que verticalement. De même, un Z_{DR} négatif montre donc que la cible est plus large verticalement qu'horizontalement. C'est un indicateur de la forme de la goutte, et par conséquent un estimateur de la taille de celle-ci. Les gouttes d'eau sont en effet d'autant plus aplaties qu'elles sont grosses.		
ρ_{HV}^1 (polaire)	Coefficient de corrélation H-V C'est la corrélation entre les signaux complexes de la voie H et de la voie V. Plus ce coefficient borné entre 0 et 1 est grand, plus les cibles observées sont homogènes. Cette corrélation est donc excellente sur la pluie et la neige sèche (0,98), bonne sur la neige mouillée (0,92-0,95) et moyenne sur la grêle (0,7-0,8).	Métropole : 1066 × 240m Outre-mer : 1666 × 240m	720 × 0,5°
Φ_{DP}^1 (polaire)	Phase différentielle Différence de phase entre les voies V et H. Elle est due à la différence de chemin optique entre les voies H et V entre l'émission et la réception. C'est un très bon estimateur de l'atténuation intégrée le long du trajet. La phase différentielle initiale sans atténuation, nommée $\Phi_{DP,0}$, est rarement nulle et dépend de chaque radar.		
Σ (cartésien)	Ecart-type de réflectivité tir-à-tir Paramètre pouvant s'apparenter à un écart type de réflectivité horizontale. Il est calculé comme suit : $\Sigma = \frac{\sum_i Z_i Z_{i+3} - Z_i }{\sum_i Z_i}$	512 × 1km	
Advection (cartésien)	Déplacement des précipitations Elle diffère d'une simple vitesse dans le fait qu'elle montre le déplacement des masses et non des particules qui les constituent. En effet, un nuage ayant tendance à se créer à l'avant et à disparaître à l'arrière, la vitesse des particules n'est pas celle des masses.	16 × 32km	

¹ Pour plus de détails sur les calculs, voir en annexe A

TABLE 3 – Description des types d'image présents dans un PAG

PAG			
Image (format)	Description	Résolution en distance	Résolution en azimut
Z_H (polaire)	Réflectivité brute en voie horizontale		$720 \times 0,5^\circ$
Σ (polaire)	Ecart-type de réflectivité tir-à-tir Paramètre pouvant s'apparenter à un écart type de réflectivité horizontale. Il est calculé comme suit : $\Sigma = \frac{\sum_i Z_i Z_{i+3} - Z_i }{\sum_i Z_i}$	Métropole : 256 × 1km Outre-mer : 400 × 1km	$360 \times 1^\circ$
Vitesse (polaire)	Vitesse radiale Vitesse de déplacement des échos le long d'une radiale		

1.3.2 Réflectivités composites

La réflectivité composite, appelée ZBAS, ne prend pas en compte les élévations. Elle est construite en utilisant, pour chaque pixel, la mesure de réflectivité et donc l'élévation la plus basse possible. Elle contient aussi l'ensemble des traitements de la chaîne SERVAL : compensation d'atténuation par les précipitations, par les gaz, masquage... C'est une image cartésienne de 512 pixels de côté et de résolution 1 km. On produit aussi une image toutes les 5 minutes.

Une autre l'image l'accompagne : le HBAS. Elle contient, pour chaque pixel, la hauteur de la mesure utilisée pour le pixel correspondant dans le ZBAS.

1.3.3 Masques

La Terre n'étant pas sans relief, la visibilité des radars est très souvent perturbée. Cela peut provenir de masques orographiques ou naturels (relief, arbres...) ou anthropiques (bâtiments, éoliennes...).

Ainsi, pour chaque élévation de chaque radar, un fichier du taux de masquage est généré. Il est sous format binaire et existe sous deux formats :

- Polaire avec 270 portes de 1km sur 720 azimuts de $0,5^\circ$, codé en flottant 32 bits
- Cartésien de côté 512 pixels de 1km, codé en entier non signé 8 bits

Chaque pixel indique le pourcentage de masquage à cet endroit.

2 Préparation des données

Le terme « paramètre » désignera par la suite un des produits radars : Z_H , Z_{DR} , ρ_{HV} , Φ_{DP} , Σ ou ZBAS.

Avant de procéder à la comparaison à proprement parler, il faut d'abord récupérer et traiter l'ensemble des données nécessaires à celle-ci. Cela consiste à créer une liste de points de comparaison et à conserver les différents paramètres issus des PAM, PAG et fichiers ZBAS/HBAS en ces points.

Après concertation, le choix est fait de procéder par étapes, en conservant les données obtenues à chaque fois sous forme de CSV pour ne pas avoir à refaire de calculs inutilement. On se rendra compte par la suite que les temps de calculs sont assez courts. Si la segmentation des tâches ne sert plus à réduire les temps de calculs, elle permet toutefois de rendre compte des résultats obtenus pour faciliter le débogage.

Les différents paramètres que l'on pourra comparer sont : Z_H , Z_{DR} , ρ_{HV} et ZBAS.

Au démarrage de l'utilitaire de comparaison, l'utilisateur fournira en particulier :

- L'identifiant de chacun des deux radars à comparer
- La période sur laquelle il souhaite comparer les radars (heures de début et de fin)
- La liste des élévations à comparer pour chacun des radars

Dans le cadre d'une comparaison sur tours d'antenne, les opérations sont les suivantes. Celles-ci seront réalisées pour le couple de radar choisi et chaque couple d'élévations possible en observant les listes fournies.

1. Récupération des tours d'antenne (*sur toute la période de comparaison*)
2. Crédit de la liste de points de comparaison (*intemporel*)
3. Filtrage de celle-ci sur des critères choisis par l'utilisateur (*intemporel*)
4. Ajout des valeurs provenant des images 5 minutes (*sur toute la période de comparaison*)
5. Génération d'un fichier GeoJSON contenant les zones de comparaison (*intemporel*)

Dans le cadre d'une comparaison en ZBAS, les opérations sont les suivantes. Celles-ci seront réalisées pour un couple de radar donné.

1. Récupération des fichiers ZBAS/HBAS (*sur toute la période de comparaison*)
2. Crédit de la liste de points de comparaison et ajout des valeurs provenant des images 5 minutes (*sur toute la période de comparaison*)
3. Génération d'un fichier GeoJSON contenant les zones de comparaison (*intemporel*)

Pour des raisons de rapidité (de gros volumes seront traités) et d'intégration aux outils existants, le code sera écrit en C++. La seule partie qui sera implémentée en Python est la génération de graphiques. Pour éviter toute recompilation non nécessaire, un script de lancement en Bash a également été ajouté. Il s'assure de la présence de l'arborescence nécessaire au programme et transmet en argument au programme C++ les paramètres fournis par l'utilisateur.

De plus, les tâches seront parallélisées. Les serveurs possédant plusieurs coeurs (16 sur `cmrrm31-sidev`), cela permet d'accélérer l'exécution d'un facteur 5 à 20.

2.1 Désarchivage des images

Fonctions associées :

```
// fichiers preparation.cpp et preparation.h
void desarchiver_pam(...);
void desarchiver_pag(...);
void desarchiver_zbas(...);
```

Les images sont archivées quotidiennement sur un serveur de stockage : `hendrix` [7]. Il y donc une archive par jour pour les PAM, une pour les PAG, et une pour les ZBAS/HBAS. On crée ainsi trois fonctions qui désarchivent des PAM, PAG ou des ZBAS/HBAS pour une période donnée, un radar donné et une liste de tours (cycles et tours dans le cycle, uniquement pour les tours d'antenne).

Les archives quotidiennes étant de gros fichiers, on ne conserve que les images dont on a besoin. Mais le désarchivage n'entraîne pas la suppression des données préexistantes dans le répertoire, qui pourront resservir ultérieurement. Le nom des fichiers désarchivés ne permettant pas d'identifier la date précisément (il manque l'année et le mois), ces fichiers sont renommés.

2.2 Pour une comparaison sur tours d'antenne

2.2.1 Détermination des points de comparaison

Fonction associée :

```
// fichiers preparation.cpp et preparation.h
void creer_csv_points_correlation_geometriques(...);
```

On commence par fixer deux contraintes : la différence d'altitude maximale entre les deux faisceaux en un point géographique (800 mètres, c'est assez large mais ce sera affiné dans l'étape suivante), ainsi que la distance maximale au radar.

Pour trouver les points de comparaison, on parcourt tous les pixels du premier radar dont la distance est inférieure à la distance maximale fixée, et on cherche à quel pixel dans le deuxième radar ce point correspond. Si ce pixel satisfait les deux contraintes énoncées précédemment, on l'ajoute à la liste des points de comparaison. Les calculs de positions géographiques se fondant sur les problèmes géodésiques direct et indirect sont effectués grâce à la librairie `GeographicLib`.

On génère donc un premier fichier CSV dont le contenu est, pour chaque point : latitude, longitude, porte correspondante pour le radar 1, azimut correspondant pour le radar 1, porte correspondante pour le radar 2, azimut correspondant pour le radar 2, différence d'altitude entre les deux faisceaux (en valeur absolue), rapport des diamètres des deux faisceaux (nécessairement ≥ 1), taux de masquage du radar 1, taux de masquage du radar 2.

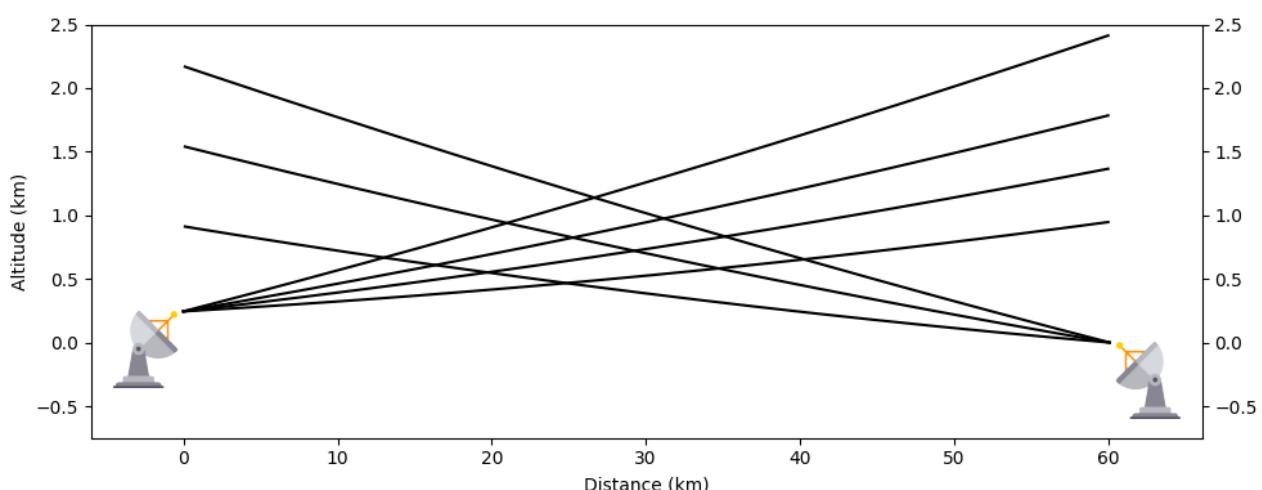


FIGURE 5 – Croisement des faisceaux sur les tours bas des radars de Bollène (gauche) et Nîmes (droite)

2.2.2 Filtrage des points

Fonction associée :

```
// fichiers preparation.cpp et preparation.h
void filtrer_csv_masquage_altitude_diametre(...);
```

Les points obtenus précédemment ne permettant pas une comparaison fine et précise, il devient nécessaire d'en sélectionner selon certains critères. On choisit de ne conserver les points que si leur taux de masquage, le rapport de diamètre entre les deux faisceaux et la différence d'altitude entre le centre des deux faisceaux est inférieure à des seuils fixés par l'utilisateur.

On génère ainsi un deuxième fichier CSV contenant les mêmes informations, mais qui ne conserve que les points respectant les conditions fixées.

2.2.3 Ajout des paramètres provenant des PAM et PAG

Fonction associée :

```
// fichiers preparation.cpp et preparation.h
void inclure_pam_sigma_dans_csv(...);
```

Une fois la liste de points affinée, il est nécessaire d'y ajouter les paramètres (valeur de chaque image) en chaque point : Z_H , Z_{DR} , ρ_{HV} , Φ_{DP} et Σ .

Les fichiers PAM et PAG sont des concaténations de fichiers BUFR [8] : un pour chaque image. Il y a donc 6 BUFRs dans un PAM et 3 dans un PAG.

Le format de fichier BUFR (Binary Universal Form for the Representation of meteorological data) est un type de fichier utilisé dans l'échange de données météorologiques et documenté par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM). C'est un format de fichier binaire : les données sont stockées sous forme binaire et non textuelle. Un fichier BUFR est auto-renseigné, c'est-à-dire qu'il contient lui-même la description des données qu'il contient. Cela permet de stocker les données en occupant peu de place, même si la lecture peut s'avérer difficile. Un fichier BUFR contient à la fois les données (images), et de nombreuses métadonnées (information sur le radar, mode de production des images...).

- **Section 0** : octets [BUFR] marquant le début du fichier, longueur totale du fichier et version BUFR
- **Section 1** : renseignements globaux sur les données présentes dans le fichier (type d'image, date, numéro de table de décodage...)
- **Section 2** : section optionnelle
- **Section 3** : section de description. Elle contient des descripteurs qui décrivent le contenu de la section 4. Un descripteur peut être :
 - Un descripteur de donnée (date de mesure, lieu, niveau de bruit, taille d'une image, pixel d'une image...). Il contient l'unité de la valeur, le nombre d'octets sur laquelle elle est codée, ainsi que l'échelle et l'offset de codage.
 - Un descripteur de répétition : nombre d'octets répétés, et combien de fois ils le sont
 - Un descripteur d'opération : changement d'échelle, de nombre d'octets utilisés, marque d'une donnée manquante...
 - Un descripteur de séquence : il représente à lui seul un enchaînement de plusieurs autres descripteurs et permet de diminuer la taille du fichier.
- **Section 4** : section de données. Elle contient les données précédemment décrites dans la section 3.
- **Section 5** : octets [7777] marquant la fin du fichier

La lecture des fichiers BUFR se fait à l'aide du décodeur provenant de PIEUVRE. Ce décodeur, presque entièrement réécrit, permet maintenant, en plus des PAM et PAG, de lire des BUFR de ZBAS/HBAS. On récupère aisément une image sous la forme d'un tableau `std::vector<std::vector<double>>`.

D'autre part, un facteur correctif est appliqué sur les réflectivités. Il est défini mensuellement à partir de la comparaison entre les lames d'eau et les pluviomètres. Ce facteur est nommé

HYDRAM. Il est donc nécessaire de décorriger les réflectivités de ce facteur pour comparer ce que « voient » réellement les radars.

Ainsi d'après la relation de Marshall-Palmer $Z_{\text{lineaire}} = aR^b$ (a et b diffèrent selon qu'on se trouve en métropole ou en outre-mer), et puisque $Z_{dBZ} = 10 \log(Z_{\text{lineaire}})$, on trouve

$$Z_{\text{decorrige},dBZ} = Z_{dBZ} - 10 \cdot b \cdot \log(HYDRAM)$$

La valeur de $10 \cdot b \cdot \log(HYDRAM)$ est récupérée dans le BUFR de Z_H .

Un autre fichier CSV est alors créé contenant pour chaque point, en plus des données précédentes : Z_H , Z_{DR} , ρ_{HV} , Φ_{DP} et Σ des deux radars.

Calcul de $\Phi_{DP,0}$

Fonction associée :

```
// fichiers calcul_stats.cpp et calcul_stats.h
void calculer_phidp0(...);
```

Cette étape étant la seule où on accède aux images entières, on effectue aussi le calcul d'un $\Phi_{DP,0}$ nécessaire par la suite (voir section 3.2.2).

Pour chaque tour d'antenne de 5 minutes dans la période demandée, on commence par enlever les échos fixes en ne conservant que les points avec $\Sigma \geq 3\text{dBZ}$ (voir section 3.2.1), puis on ne garde que les pixels correspondant à des précipitations avec le critère $\rho_{HV} \geq 0,95$ (voir Table 2). On détermine alors un angle médian en prenant la médiane des cosinus et des sinus, puis en utilisant la fonction arctan2. Si cette médiane est calculée sur moins de 100 points, on ne calcule pas de $\Phi_{DP,0}$ sur l'image.

On stocke alors dans un fichier dédié la valeur calculée du $\Phi_{DP,0}$ 5 minutes.

2.3 Pour une comparaison en ZBAS/HBAS

Fonction associée :

```
// fichiers preparation.cpp et preparation.h
void comparer_zhbas(...);
```

La comparaison en ZBAS est effectuée en une seule étape. En effet, les hauteurs de faisceau et les valeurs de réflectivité sont contenues dans le même fichier. De plus, un ZBAS étant une image élaborée provenant de SERVAL, il n'y aura aucun traitement à effectuer en aval.

On commence toujours par fixer deux contraintes : la différence d'altitude maximale entre les deux faisceaux en un point géographique, ainsi que la distance maximale au radar.

On considère aussi que les deux images sont planes et alignées. Ainsi, on détermine la position du radar 2 dans la pixmap du radar 1 en utilisant la librairie `GeographicLib`. Puisque les pixmaps sont cartésiennes, cela permettra de passer aisément du repère du radar 1 à celui du radar 2 sans faire de calculs géodésiques comme pour les tours d'antenne.

Pour trouver les points de comparaison, on parcourt tous les pixels du premier radar dont la distance est inférieure à la distance maximale fixée, et on cherche à quel pixel dans la pixmap du deuxième radar ce point correspond. Si ce pixel satisfait les deux contraintes énoncées précédemment, on l'ajoute à la liste des points de comparaison. Pour déterminer la différence

d'altitude entre les deux faisceaux, on récupère le HBAS du radar 1, le HBAS du radar 2, et on fait la différence des deux.

On génère finalement un fichier CSV dont le contenu est, pour chaque point : latitude, longitude, ligne correspondante pour le radar 1, colonne correspondant pour le radar 1, ligne correspondante pour le radar 2, colonne correspondant pour le radar 2, différence d'altitude entre les deux faisceaux (en valeur absolue), ZBAS du radar 1, ZBAS du radar 2.

2.4 Exportation des zones de comparaison

Fonction associée :

```
// fichiers preparation.cpp et preparation.h
void grouper_points(...);
```

Pour mieux comprendre la comparaison, il est nécessaire de pouvoir visualiser les zones sur lesquelles celle-ci est effectuée. En particulier, ces zones sont fournies aux prévisionnistes durant la qualification afin qu'ils puissent émettre leur propre avis. Cela doit pouvoir se faire sous QGis ou Synopsis. Pour cela, il faut générer un fichier GeoJSON [9], format universel d'échange de coordonnées géographiques.

On crée donc des groupes de pixels, qu'on transforme ensuite en polygones en reliant les points les plus à l'extérieur. Pour créer un groupe, on procède de la manière suivante : on ajoute d'abord un point. On ajoute ensuite tous ses voisins, puis les voisins de ses voisins...et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on ne puisse plus. Alors on crée un nouveau groupe. Pour une comparaison sur tours d'antenne, on considère comme voisin d'un point un pixel qui se trouve dans la couronne autour du point considéré. Pour une comparaison sur ZBAS, on considère comme voisins d'un point les pixels qui se trouvent dans les trois premières couronnes autour du point considéré. Cette marge est volontairement apportée pour avoir des groupes assez grands.

Un fichier GeoJSON est finalement généré, contenant l'ensemble des groupes créés ainsi que deux points montrant la position de chacun des radars.

Cette étape peut être effectuée sur tours d'antenne à partir des points de comparaison présents avant ou après filtrage, et sur ZBAS/HBAS à partir de l'unique liste créée. Cependant, la complexité du groupement est n^2 et on a environ 10000 points après filtrage et 150000 avant filtrage. Les temps d'exécution sont donc nettement plus élevés (on les multiplie par environ 200) et il devient « dangereux » de lancer un groupement sur des points non filtrés.

3 Comparaison des paramètres

Toutes les données nécessaires à la comparaison des paramètres mesurés ou calculés par les 2 radars (Z_H , Z_{DR} , ρ_{HV} ou ZBAS) sont donc maintenant disponibles.

La comparaison consistera en une production de différents graphiques et indicateurs. L'utilisateur choisira une liste d'élévations pour le premier radar, et une autre pour le deuxième. Ainsi, pour les tours d'antenne, on pourra comparer deux simples élévations ou en prendre en compte plusieurs pour chaque radar.

La possibilité d'une comparaison sur des réflectivités brutes (Z_H) et élaborées (ZBAS) est volontaire. La comparaison de données brutes permet de comparer ce que « voient » réellement

les radars. C'est en quelque sorte une qualification technique du matériel. La comparaison de données élaborées permet elle de qualifier les produits qui seront par la suite utilisés par les prévisionnistes.

3.1 Choix d'une journée appropriée

Pour disposer effectivement de données à comparer, il est nécessaire de choisir une journée où il pleut suffisamment, de préférence avec des échos assez forts ($\geq 20\text{dBZ}$).

Cette étape est réalisée à la main en intégrant la zone de comparaison dans Synopsis, puis en visualisant les images des jours passés. Malheureusement, on ne peut facilement visualiser que des images datant de moins de 3 mois. Une autre méthode consiste donc à récupérer les statistiques de monitoring radar. Ce dernier est lui aussi effectué en présence de pluie et intègre le nombre de données pour le calcul de monitoring. Ainsi, on choisit une journée avec un grand nombre de données pour le monitoring, ce qui assure qu'il pleuvait suffisamment. Ainsi, on choisit une journée avec un grand nombre de données exploitables. Le choix par cette seconde méthode ne permet cependant pas d'avoir la vision sur la situation étudiée sans désarchiver les images concernées et les visionner « à la main » (du moins tant que l'outil d'extraction PIEUVRE ne le permet pas).

Sur les images ci-dessous, on voit l'exemple d'une situation adaptée à l'intercomparaison :

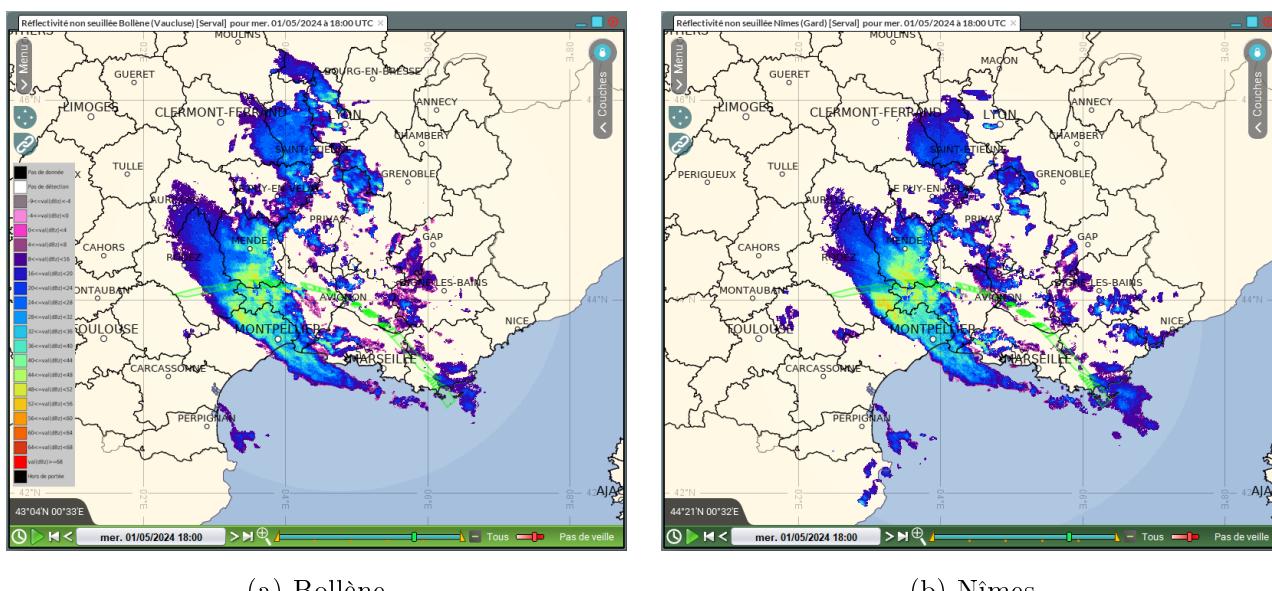


FIGURE 6 – Observation du ZBAS sur Synopsis — 1^{er} mai 2024 18h00 UTC

3.2 Traitements apportés aux réflectivités brutes

Les traitements présentés ci-dessous ont été ajoutés au fur et à mesure, après avoir observé quelques graphiques et identifié la cause de certaines différences.

3.2.1 Echos fixes

Fonctions et fichiers associés :

```
// fichiers calcul_stats.cpp et calcul_stats.h
void calculer_stats_5_min(...);

// fichiers trace_tours_antenne.py et trace_zhbas.py
```

Certaines zones d'intercomparaison comportent beaucoup d'échos fixes. Ces derniers, attestant de la présence d'un relief ou d'un bâtiment par exemple, sont d'un niveau fort ($\geq 40\text{dBZ}$, en rose et blanc sur la figure suivante) et viennent ainsi fortement perturber les statistiques.

Il convient donc de trouver un moyen d'éliminer les points concernés par ces échos fixes.

On choisit d'utiliser le paramètre Σ . Son caractère d'écart-type nous renseigne sur la variabilité des échos en chaque point. Ainsi, il est très probable qu'un point avec un Σ faible soit un écho fixe. Les précipitations auront elles $\Sigma \approx 5 \text{ dBZ}$ (en vert et bleu). On élimine donc tous les pixels avec $\Sigma \leq 3 \text{ dBZ}$ (en orange et jaune).

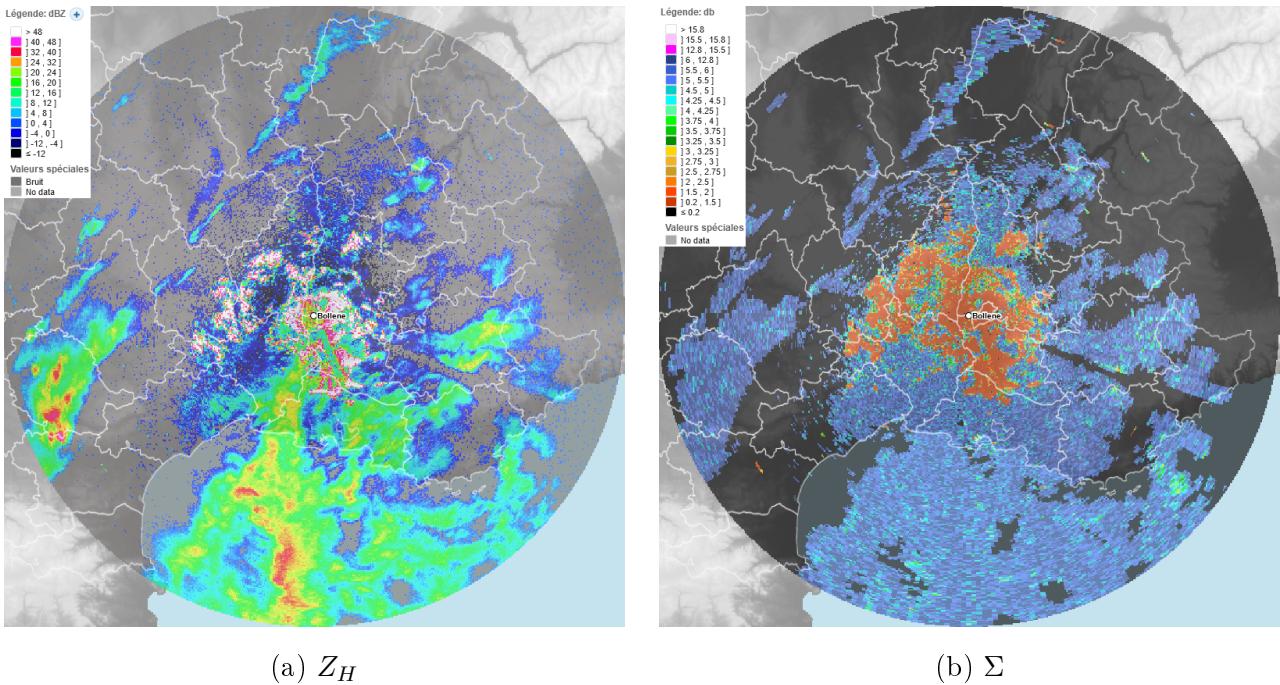


FIGURE 7 – Radar de Bollène — 19 juin 2024 20h00 UTC

On voit nettement l'amélioration si on trace l'évolution des réflectivités moyennes de deux radars (ici Bollène et Nîmes) sur la zone de comparaison :

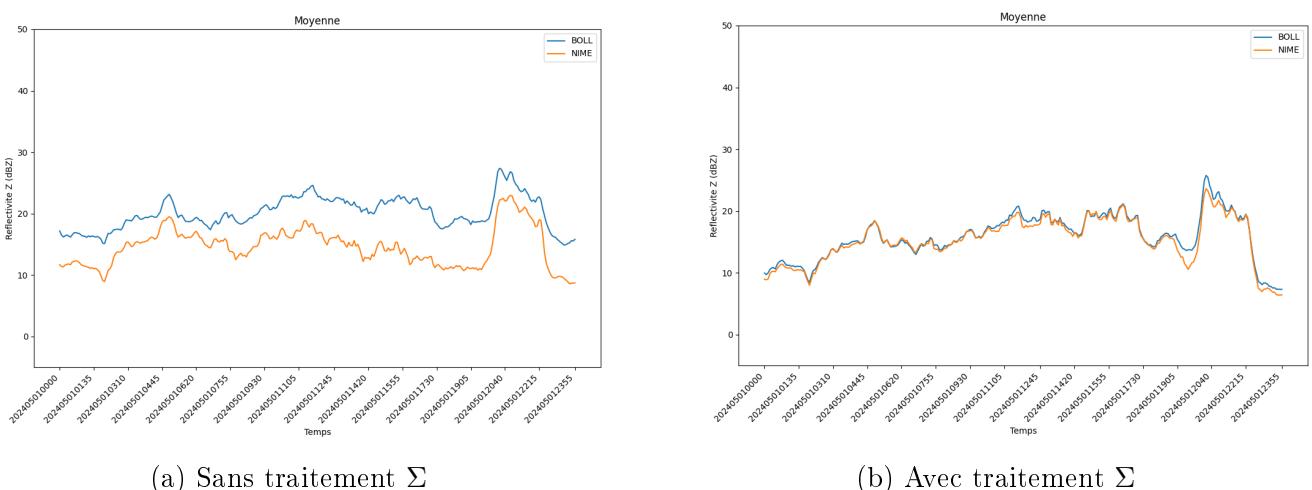


FIGURE 8 – Evolution moyenne de réflectivité entre les radars de Bollène (élévation 0,8°) et Nîmes (élévation 1,2°) — Journée du 1^{er} mai 2024

3.2.2 Atténuation

Fonctions et fichiers associés :

```
// fichiers calcul_stats.cpp et calcul_stats.h
void calculer_phidp0_periode(...);
void calculer_stats_5_min(...);

// fichiers trace_tours_antenne.py et trace_zhbas.py
```

Tout au long de son parcours, l'onde émise est atténuée. Les pixels trop atténués doivent donc être invalidés.

Nous nous servirons pour cela du Φ_{DP} (voir Table 2).

La figure suivant en est un bon exemple. Le $\Phi_{DP,0}$ est ici vers 350° (bleu foncé). Derrière les fortes réflectivités (en rouge, rose et blanc), on observe une rotation de phase pouvant atteindre les 100° (orange et jaune). Ce sont en effet des zones atténuées par les précipitations intercalées entre le radar et les cibles observées : les réflectivités y sont plus faibles (bleu et vert).

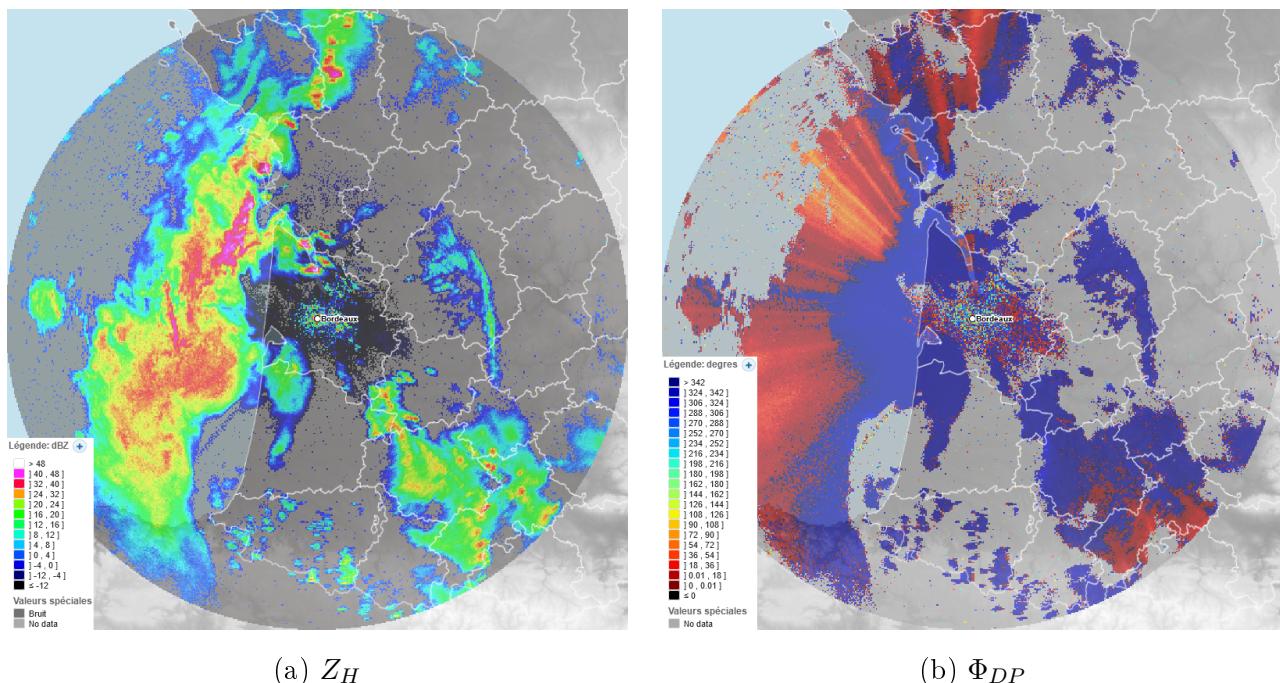


FIGURE 9 – Radar de Bordeaux — 29 juin 2024 09h40 UTC

Pour filtrer les points trop atténués, on commence par calculer un $\Phi_{DP,0}$ médian sur l'ensemble de la période étudiée à partir des $\Phi_{DP,0}$ calculés sur chacune des images 5 minutes (voir section 2.2.3). Une fois de plus, on calcule la médiane des cosinus, celle des sinus, et on utilise la fonction arctan2.

Enfin, on enlève tous les points dont le Φ_{DP} s'écarte de plus de 10° du $\Phi_{DP,0}$ médian.

3.3 Production de graphiques

3.3.1 Distributions des réflectivités

Fichiers associés :

```
// fichiers trace_tours_antenne.py et trace_zhbas.py
```

Pour commencer, on choisit de tracer sur une période commune des boîtes à moustache des distributions du paramètre pour chaque radar, ainsi que celle de la différence des deux. Cette dernière reste la plus intéressante, puisqu'elle nous donne une première comparaison des deux radars : en observant la médiane, l'écart inter-quartile et les points aberrants, on arrive assez facilement à juger du positionnement d'un radar par rapport à l'autre.

La figure suivante est un exemple de comparaison très satisfaisante : la médiane vaut 0 dBZ, et l'écart interquartile 5 dBZ. La différence de réflectivité entre les deux radars n'excède donc que rarement ± 2 dBZ.

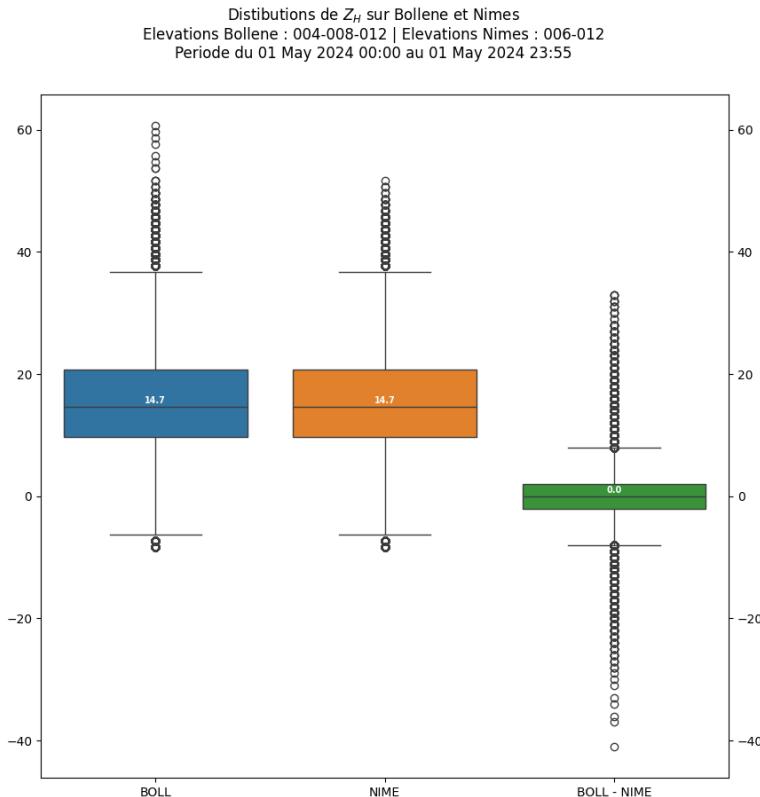


FIGURE 10 – Distributions des réflectivités brutes sur les radars de Bollène (élévations 0, 4°, 0, 8° et 1, 2°) et Nîmes (élévations 0, 6° et 1, 2°) — Journée du 1^{er} mai 2024

3.3.2 Evolutions temporelles

Fonctions et fichiers associés :

```
// fichiers calcul_stats.cpp et calcul_stats.h
void calculer_stats_5_min(...);
void calculer_stats_5_min_zhbias(...);

// fichiers trace_tours_antenne.py et trace_zhbias.py
```

On produit aussi des courbes d'évolution du paramètre sur 5 minutes sur l'ensemble de la zone de comparaison. La table ci-dessous présente les différentes statistiques disponibles en fonction du paramètre comparé :

TABLE 4 – Evolutions temporelles disponibles en fonction du paramètre comparé

Statistique	Z_H ZBAS	Z_{DR}	ρ_{HV}
Moyenne et moyenne de la différence des deux radars	✓	✓	✓
Médiane	✓	✓	✓
Quantile 70%	✓	✓	✓
Quantile 80% ¹	✓	✓	
Quantile 90% ¹	✓	✓	
Maximum du radar 1 et valeur pour le radar 2 à cet endroit ¹	✓	✓	
Maximum si un des deux radars détecte un point où $Z \geq 33\text{dBZ}$ sur au moins 6 pixels, avec droites horizontales à 33dBZ et 41dBZ ²	✓		
Mesures de $\Phi_{DP,0}$ 5 minutes et $\Phi_{DP,0}$ final sur la période	✓	✓	✓

¹ On étudie des situations pluvieuses où on aura une très grande majorité de points où ρ_{HV} est très proche de 1. Les courbes sont donc inexploitables.

² Ce tracé n'a de sens que sur des réflectivités (voir paragraphe suivant).

Le choix d'un seuil à 33dBZ provient d'un seuil déjà existant dans le logiciel MACMA (Mention de l'Activité Convective dans les Metar Auto). Ce dernier, à destination des services aéronautiques, permet d'identifier la présence de *cumulonimbus* (CB) ou de *cumulus congestus* (TCU) à proximité des aéroports. Ainsi, si $33\text{dBZ} \leq Z < 41\text{dBZ}$ sur 6 pixels voisins, MACMA signale un TCU, et si $41\text{dBZ} \leq Z$ sur 6 pixels voisins, il annonce un CB. Il est donc souhaitable que si un radar dépasse un seuil, l'autre le dépasse aussi.

Les courbes de maxima sont à analyser avec précaution : on analyse des extrêmes qui sont beaucoup moins stables. De plus, on ne sait pas où ont été effectuées les mesures. Il est possible qu'un maximum ait été mesuré très proche d'un radar, et beaucoup plus loin du deuxième. Aussi, pour les calculs de maxima type MACMA, on ne s'assure pas que celui du radar 1 et celui du radar 2 ont été mesurés au même endroit : les points concernés peuvent être aux deux extrémités de la zone de comparaison.

On affiche aussi le nombre d'échantillons utilisés pour les statistiques. Un calcul fait sur peu de points n'est pas un calcul fiable. Dans ce sens, on n'affichera pas les statistiques 5 minutes si elles ont été effectuées sur moins de 500 points.



FIGURE 11 – Evolutions de réflectivité entre les radars de Bollène (élévations 0, 4°, 0, 8° et 1, 2°) et Nîmes (élévations 0, 6° et 1, 2°) — Journée du 1^{er} mai 2024

On peut sur cet exemple faire le choix de n'analyser que les statistiques calculées sur plus de 4000 points. Les résultats mettent en évidence une corrélation très satisfaisante entre les radars de Bollène et de Nîmes : les courbes de moyenne, médiane et quantiles se suivent sans écart global. Le tracé des maxima type MACMA est aussi rassurant : les radars dépassent généralement simultanément les seuils de réflectivité fixés.

3.3.3 Corrélations

Fonctions et fichiers associés :

```
// fichiers calcul_stats.cpp et calcul_stats.h
void calculer_stats_5_min(...);
void calculer_stats_5_min_zhbasis(...);

// fichiers trace_tours_antenne.py et trace_zhbasis.py
```

Pour mieux évaluer la cohérence des valeurs des paramètres mesurés ou calculés par les deux radars, on trace un graphique de type « nuage de points » représentant la valeur observée par un radar en fonction de celle observée par l'autre. Un premier graphique utilise les points bruts et un deuxième des points moyennés sur 5 minutes. Une régression linéaire est également appliquée sur l'ensemble des points des deux graphiques.

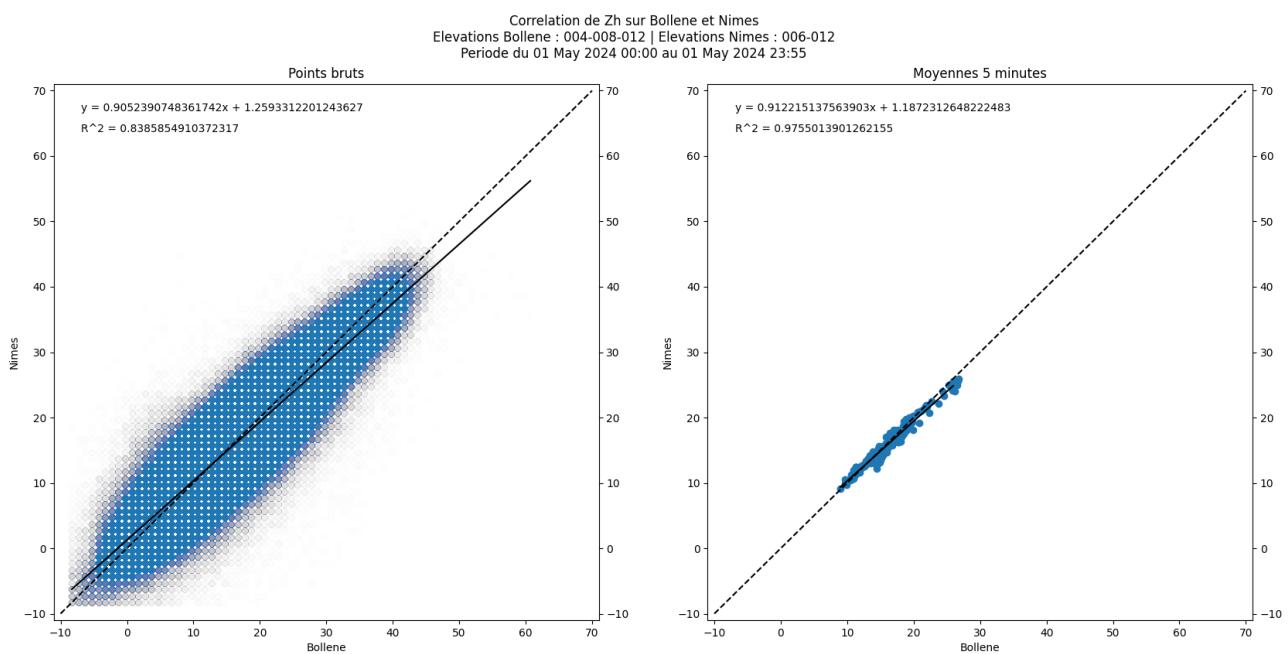


FIGURE 12 – Corrélation de réflectivités entre les radars de Bollène (élévations 0, 4°, 0, 8° et 1, 2°) et Nîmes (élévations 0, 6° et 1, 2°) — Journée du 1^{er} mai 2024

Ici, le coefficient $a = 0,91$ nous indique une très légère sous-estimation du radar de Nîmes (ou sur-estimation de Bollène) sur les hautes réflectivités (≥ 20 dBZ), et l'inverse sur des réflectivités plus basses (≤ 10 dBZ). Le coefficient de détermination $R^2 = 0,81$ met en avant une bonne corrélation entre les points expérimentaux et la droite de régression. C'est encore mieux sur les moyennes où $R^2 = 0,98$. On peut donc utiliser à celles-ci sans avoir à mettre de côté une partie des points.

3.3.4 Cartes

Fichiers associés :

```
// fichiers trace_tours_antenne.py et trace_zhbias.py
```

A des fins d'amélioration de l'intercomparaison, il est nécessaire de savoir où on observe les plus grands écarts entre les deux radars. On trace donc une carte des différences du paramètre sur la période demandée et la zone de comparaison déterminée précédemment. Celle-ci permet par la même occasion de situer la zone de comparaison plus facilement qu'avec le fichier GeoJSON.

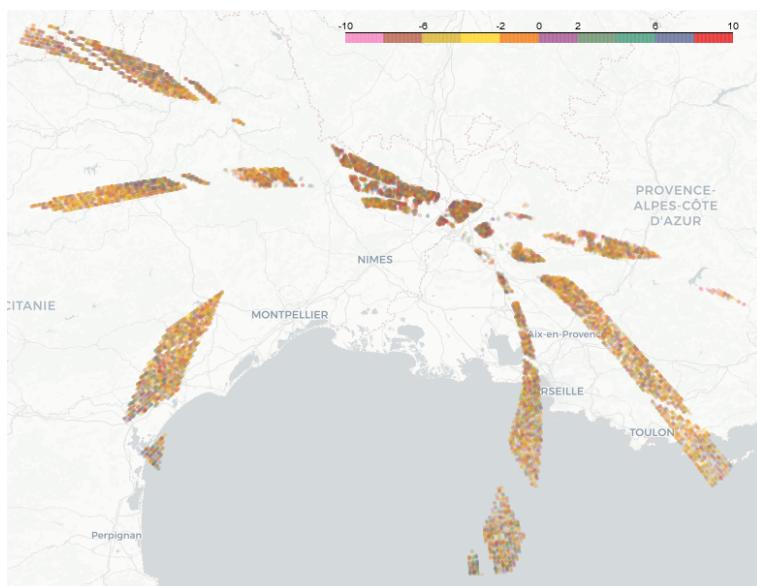


FIGURE 13 – Carte de différence de réflectivité entre les radars de Bollène (élévations 0, 4°, 0, 8° et 1, 2°) et Nîmes (élévations 0, 6° et 1, 2°) — Journée du 1^{er} mai 2024

Cette carte nous montre que les points où se trouvent les plus gros écarts (en bleu et rouge) se trouvent au nord-est de Nîmes. La visualisation des différents paramètres (notamment le Σ) pour les élévations et la date concernées a permis de mettre en évidence la présence d'échos fixes.

IV – Conclusion

Ce stage a d'abord été l'opportunité de découvrir l'organisation d'une entreprise, même si celle de Météo-France n'est pas commune puisqu'elle travaille principalement pour son propre fonctionnement. Ma participation à différentes réunions d'équipe ou de suivi du stage et la réalisation d'une présentation de mon travail au CMR ont été pleinement formatrices pour la suite de mes études et mon intégration dans le monde professionnel.

Je remercie par ailleurs l'ensemble des équipes pour leur confiance ainsi que l'autonomie et la part de liberté qui m'a été laissée dans l'écriture du programme et la proposition de modifications ou ajouts à effectuer.

Le but initial était de créer un outil d'intercomparaison entre deux radars.

Nous avons pour cela commencé par créer des métadonnées utiles à la comparaison : calcul des points adaptés, filtre sur des critères géométriques ou de taux de masquage, récupération des données fournies par les radars et génération des zones de comparaison à partir des points.

Nous avons ensuite pu procéder à la comparaison. Les données n'étaient pas toutes adaptées, il a fallu traiter les échos fixes et l'atténuation naturelle de l'onde durant son trajet. La production d'indicateurs graphiques (distributions, évolutions temporelles, cartes et corrélations radar-radar) a ensuite permis de comparer les radars entre eux.

Les résultats initiaux n'étaient pas totalement satisfaisants, mais les divers améliorations et traitements proposés par les équipes et incorporés tout au long de la conception de l'outil ont permis de grandement améliorer la qualité de la comparaison. Les résultats présentés dans ce rapport en témoignent.

A l'issue de ce stage, cet outil sera donc pleinement utilisé pour les qualifications à venir (en particulier celle du radar de Momuy) et intégré dans les tâches de suivi du réseau radar et dans les processus de R&D. C'est une vraie fierté d'avoir pu participer au développement d'un tel outil qui contribuera à la simplification des tâches des agents de Météo-France.

Annexes

A Calcul des paramètres polarimétriques

Cette explication se voulant simple, la rigueur mathématique est volontairement écartée.
[4] [10]

Une radiale de $0,5^\circ$ ou 1° est en réalité constituée de plusieurs « tirs » de résolution azimutale plus faible (la résolution en distance est la même). Le calculateur CASTOR reçoit, pour chaque tir, des données IQ (pour « *In phase* » ou « en phase » et « en Quadrature de phase ») : I_H et Q_H pour le signal en polarisation horizontale, et I_V et Q_V pour le signal polarisé verticalement. Ainsi, on peut reconstituer un signal complexe en chaque point.

Notations :

$\langle \cdot \rangle$ désigne une moyenne de l'ensemble des tirs sur le pixel

Une moyenne complexe revient à moyenner les parties imaginaires et les parties réelles.

Pour chaque pixel, on note :

$$\underline{S}_H = I_H + jQ_H = r_H e^{j\theta} \quad \underline{S}_V = I_V + jQ_V = r_V e^{j\phi}$$

$$\begin{aligned} \underline{P} &= \underline{S}_H^* \underline{S}_V \\ &= r_H \cdot r_V \cdot e^{j(\phi-\theta)} \\ &= I_H I_V + Q_H Q_V + j(I_H Q_V - I_V Q_H) \end{aligned}$$

On définit alors

$$\rho_{HV} = \frac{|\langle \underline{P} \rangle|}{\sqrt{\langle |\underline{S}_H|^2 \rangle \cdot \langle |\underline{S}_V|^2 \rangle}}$$

et

$$\Phi_{DP} = \arg(\langle \underline{P} \rangle)$$

Références

- [1] WIKIPEDIA. *Réflectivité*. URL : <https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9flectivit%C3%A9> (visité le 23/05/2024).
- [2] Christian WOLFF et Pierre VAILLANT. *Réflectivité*. URL : <https://www.radartutorial.eu/15.weather/wr50.fr.html> (visité le 23/05/2024).
- [3] SG/RH/SIEMS. *Organigramme général de Météo-France*. Diffusion interne. Météo-France, 22 avr. 2024.
- [4] Laurent PERIER. *Guide de traitement des images du calculateur radar CASTOR*. Version 4. Diffusion interne. Sept. 2011. Ref. DSO_GT_OBR-NotITS008.
- [5] Béatrice FRADON. *Description des fichiers radar multipolarisés (PAM)*. Version 2. Diffusion interne. 5 mars 2021. Ref. MF_GT_Observer_Description_PAM.
- [6] Béatrice FRADON. *Description des fichiers radar concaténés ODC (PAG)*. Version 4. Diffusion interne. 13 fév. 2023. Ref. MF_GT_Observer_Description_PAG.
- [7] Isabelle COUASNON et Olivier MAZÉ. *Catalogue des produits radar et foudre archivés*. Version 7. Diffusion interne. 22 fév. 2024. Ref. MF_GT_Observer_CatalogueArchivesProduitsRadarEtFoudre.
- [8] ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE. *Manuel des codes. Volume I.2 Codes internationaux*. Annexe II du Règlement technique de l'OMM. OMM-N°306. Genève, 2001. ISBN : 978-92-63-20306-9. URL : <http://library.wmo.int/idurl/4/31997>.
- [9] H. BUTLER et al. *The GeoJSON Format*. RFC 7946. Août 2016. DOI : 10.17487/RFC7946. URL : <https://www.rfc-editor.org/info/rfc7946>.
- [10] Béatrice FRADON. *Fabrication des produits bruts en polaires dans CASTOR*. Diffusion interne. 13 fév. 2024.
- [11] WIKIPEDIA. *Météo-France*. URL : <https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9t%C3%A9o-France> (visité le 06/06/2024).
- [12] MÉTÉO-FRANCE. *L'Observatoire de Paris et la création des réseaux de mesures (1855-1878)*. 4 oct. 2021. URL : <https://meteofrance.fr/etablissement/histoire/lobservatoire-de-paris-et-la-creation-des-reseaux-de-mesures-1855-1878> (visité le 24/05/2024).
- [13] MÉTÉO-FRANCE. *Le Bureau central météorologique de France (1878-1920)*. 4 oct. 2021. URL : <https://meteofrance.fr/etablissement/histoire/lobservatoire-de-paris-et-la-creation-des-reseaux-de-mesures-1855-1878> (visité le 24/05/2024).
- [14] MÉTÉO-FRANCE. *L'Office national météorologique (1920-1945)*. 4 oct. 2021. URL : <https://meteofrance.fr/etablissement/histoire/lobservatoire-de-paris-et-la-creation-des-reseaux-de-mesures-1855-1878> (visité le 24/05/2024).
- [15] MÉTÉO-FRANCE. *La Météorologie nationale (1945-1993)*. 4 oct. 2021. URL : <https://meteofrance.fr/etablissement/histoire/lobservatoire-de-paris-et-la-creation-des-reseaux-de-mesures-1855-1878> (visité le 24/05/2024).
- [16] MÉTÉO-FRANCE. *Météo-France (depuis 1993)*. 4 oct. 2021. URL : <https://meteofrance.fr/etablissement/histoire/lobservatoire-de-paris-et-la-creation-des-reseaux-de-mesures-1855-1878> (visité le 24/05/2024).

Météo-France dispose d'un réseau de 39 radars en métropole et en outre-mer : ARAMIS. Celui-ci nécessite un entretien et un suivi réguliers. Ainsi, chaque année, Météo-France opère un remplacement des radars les plus anciens. À leur installation et avant toute intégration dans les systèmes opérationnels, il est nécessaire d'attester de leur bon fonctionnement. Le seul moyen d'effectuer cette « qualification » est de comparer le radar concerné avec ses voisins déjà qualifiés. Les opérateurs demandent donc la création d'un outil d'inter-comparaison permettant d'automatiser les tâches aujourd'hui effectuées manuellement. Cet outil permettra par ailleurs de suivre quotidiennement l'état du réseau ARAMIS ou de faire des études dans une démarche de R&D. Une première étape consistera en la création de données de base nécessaires à la comparaison : détermination des zones adaptées et récupération des données produites par les radars. La seconde partie comprendra la production d'indicateurs et de graphiques permettant la comparaison des radars : distributions, évolutions temporelles, cartes et corrélations. Les mesures d'un radar n'étant pas parfaites, il sera préalablement nécessaire d'appliquer certains traitements afin de rendre les données exploitables.

Mots clés : radar, réflectivité, comparaison, météorologie, précipitations, statistiques