

Prévision Météo à Haute Résolution

Validation de notre modèle

Jean VERNIN

18 octobre 2025



Nous utilisons le modèle WRF pour "Weather Research and Forecasting"¹ qui a été mis au point par deux organismes américains, le National Center for Atmospheric Research (NCAR) et la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) tous deux situés à Boulder, Colorado. Nous utilisons WRF à travers un environnement simplifié "Unified Environmental Modeling System" (UEMS) soutenu par Robert A. Rozumalski (NOAA).

La particularité de ce modèle est que ses équations tiennent compte du relief (les montagnes) et donc il est non hydrostatique. Les modèles de prévision globale, à l'échelle de la planète, sont hydrostatiques car ils font une hypothèse qui simplifie énormément la solution des équations d'un fluide.

Pour rendre compte des effets locaux en présence de montagnes, il est indispensable de tenir compte des perturbations au modèle hydrostatique. Les écoulements vont s'adapter au relief et notamment les vents verticaux seront différents de zéro.

En simplifiant, le modèle est une boîte noire qui cherche la solutions des équations de Navier-Stokes de manière numérique, car on ne connaît pas de solution analytique. Cette boîte est alimenté par un modèle numérique de terrain, qui donne l'altitude en tous points de la zone analysée $h(x, y)$ et de l'état de l'atmosphère à trois dimensions $Q_i(x, y, h, t_0)$, où Q_i peut être la pression, la température, le vent ... dans

1. <https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf>

un cube au dessus du domaine à analyser, à l'instant t_0 . Mais le lecteur comprendra qu'il est impossible d'avoir des capteurs de ces paramètres atmosphériques dans tous les points du cube.

Comment faire ? On dispose d'observations parsemées autour du globe faites par de stations météorologiques dans des points x_i, y_i au sol, et des ballons-sonde qui donnent une coupe verticale de l'atmosphère au point x_0, y_0 , soit $Q_i(x_0, y_0, h)$ à toutes les altitude h telles que $0 < h < \sim 20km$, car au delà de 20 km, la pression devient très faible et la paramètres météo n'ont plus beaucoup d'influence sur l'écoulement général. Ce peu de données est réanalysé pour éliminer les erreurs de mesure et est extrapolé sur tous les points du globe et à toutes les altitudes. C'est le travail du "Global Forecast System" (GFS) qui met à disposition gratuitement ses données quatre fois par jour, et cela sur deux semaines environ. Ce sont ces données GFS qui nous permettront d'initialiser notre modèle WRF.

Une fois mis en route, notre modèle va résoudre les équations de mouvement du fluide et donner une solution toutes les demies heures sur une journée de 24 heures.

Nous avons choisi de faire une prévision autour de Nice sur une grille de 100 x 100 km, avec une résolution de 1 x 1 km, soit environ 10000 points ou "pixels". Notre choix est motivé par la nature montagneuse autour de Nice, symbolisée par notre aigle qui domine trois collines.

Prenons comme exemple la commune de "Le Broc" qui, perchée à 400 mètres d'altitude, n'aura certainement le même régime météorologique que dans la vallée du Var située 1 km à l'Est du village.

1 Vérification avec des observations locales

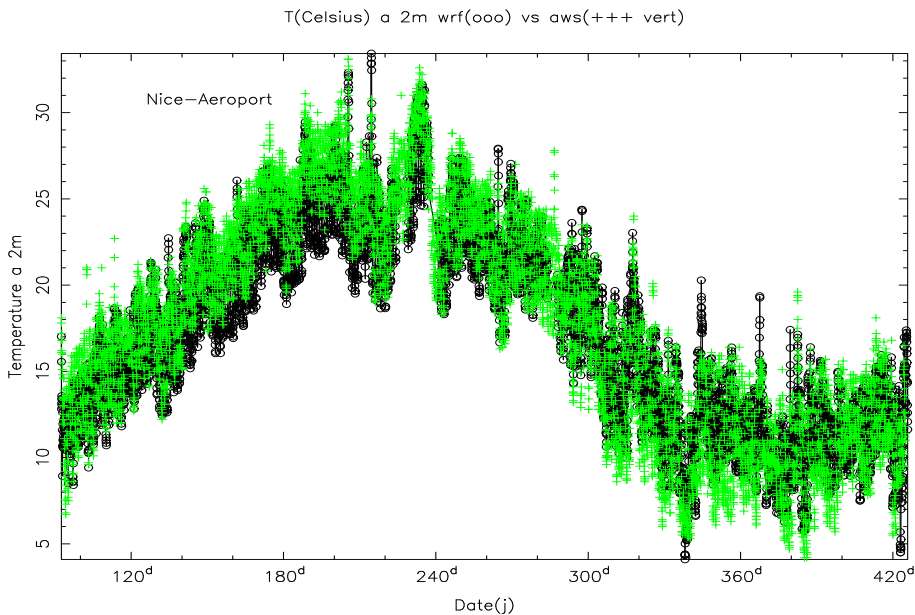
Ici on va analyser les performances de nos prévisions en comparant les valeurs des différents paramètres météorologiques (Pression, température, humidité, vent ...) prévus par notre modèle avec les "vraies" valeurs telles qu'elles sont mesurées par des stations météorologiques de Météo-France. Depuis le 1er Janvier 2024, ces dernières mesures sont en accès libre sur leur site : <https://donneespubliques.meteofrance.fr/>.

Mais il faut bien comprendre que notre modèle donne des prévisions sur chaque "pixel" du domaine analysé, soit environ $100 \times 100 = 10000$ sites différents, alors qu'il n'existe qu'un quarantaine de stations météorologiques dans le département des Alpes Maritimes. Ici, nous allons limiter notre comparaison avec la station "Nice Aéroport" et "Cannes La Bocca".

1.1 Nice Aéroport

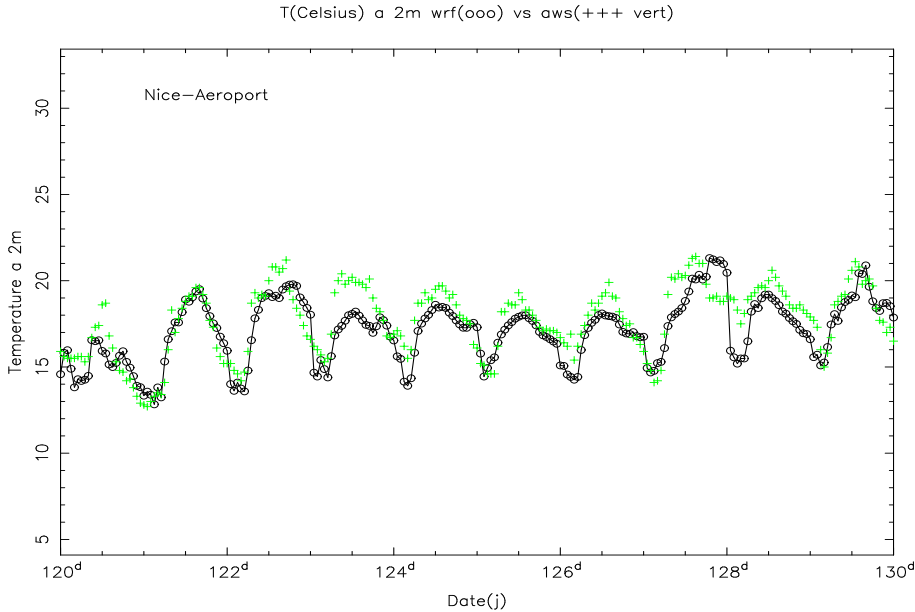
La comparaison commence vers le début du mois d'Avril 2023, data à laquelle on a commencé à faire tourner notre modèle, et se termine à la date d'aujourd'hui, soit la fin Février 2024. Cette période couvre environ 320 jours, soit encore 7680 heures. Il y a quelques "trous" qui correspondent à des arrêts de notre système.

1.1.1 Température à deux mètres



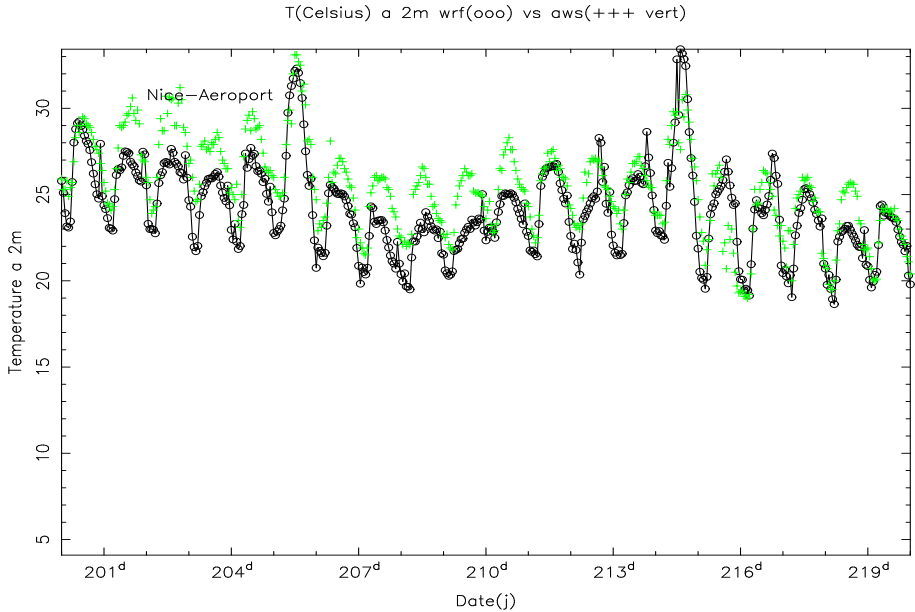
Evolution de la température à 2 mètres mesurée par la station météo de l'aéroport de Nice, en +++ verts, et nos prévisions en ooo noirs. L'accord est plus que satisfaisant dans son ensemble, montrant une montée de la température jusque vers le jour 200, mi-juillet, de fortes variations jusqu'au jour 240, fin Août. Ensuite la température décroît jusqu'au jour 340, début Décembre, où elle oscille pendant Décembre, Janvier et Février.

Mais qu'en est-il si on regarde son évolution d'heure en heure pendant quelques jours ?



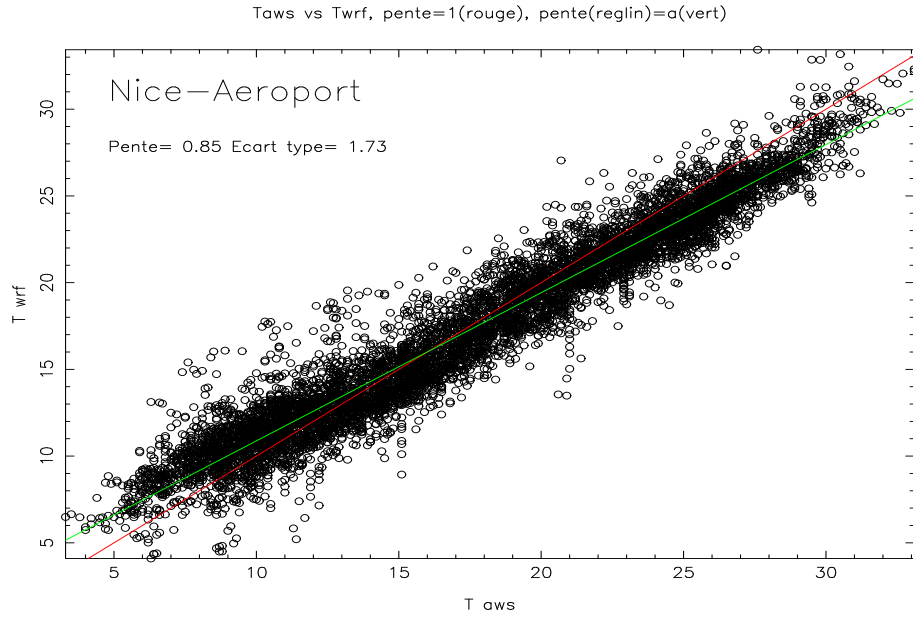
Evolution de la température sur une période de 10 jours. L'accord est exceptionnel, sauf au jour 123 où la température mesurée au plus chaud de la journée est supérieure de 2°C à notre prévision.

Puis, au plus chaud de l'été 2023, du 18 Juillet au 7 Août, voila la comparaison :



où l'accord est spectaculaire le 23 juillet, jour le plus chaud de l'année 2023.

Nous allons maintenant comparer les mesures et les prévisions de manière statistique. Chaque point de la figure suivante montre tous les couples $\{T_{aws}, T_{wrf}\}$ des 7650 mesures simultanées, sur toute la période de 332jours.



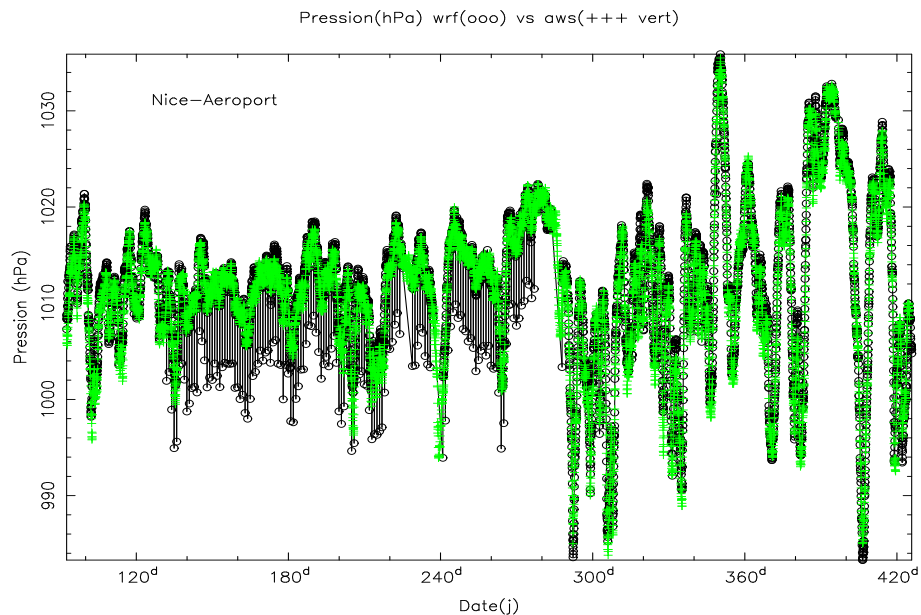
Si toutes les prévisions et les mesures étaient identiques, alors tous les points seraient alignés sur la droite rouge de pente 1 ($y = x$), c'est la prévision idéale. Dans la réalité, on voit que les points s'écartent de cette droite, pour se rapprocher d'une autre droite, en vert, appelée droite de régression d'équation $y = ax + b$, où a représente la pente de la droite de régression. Ici, $a = 0.85$, la pente est légèrement inférieure à 1. Ceci montre que notre modèle a tendance à sous-estimer les fortes températures et à sur-estimer les basses températures. On appelle écart-type la différence moyenne entre mesure et prévision :

$$\text{ecart-type} = \frac{1}{N} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{i=N} (T_{aws,i} - T_{wrf,i})^2 \right)} \quad (1)$$

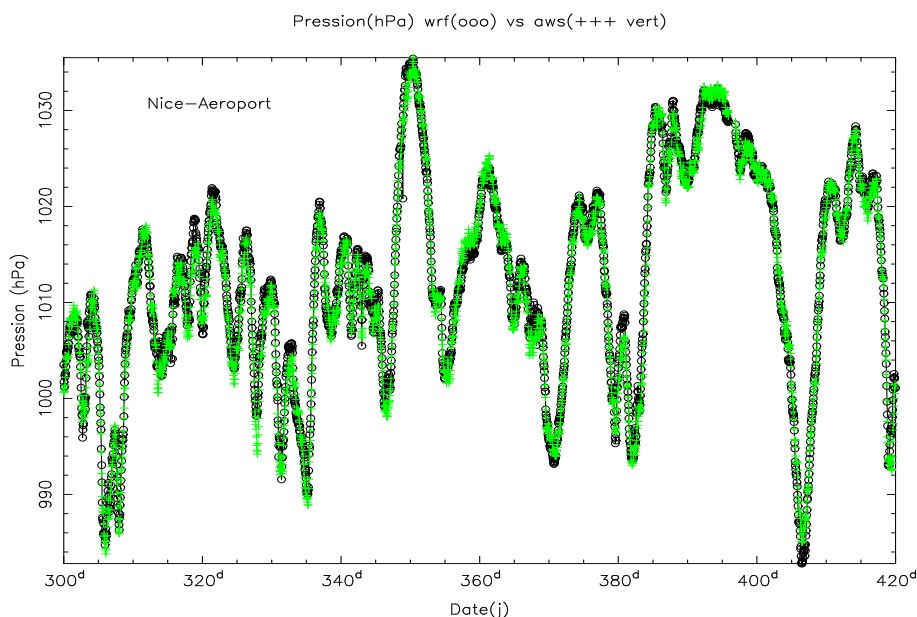
où $N = 7650$ le nombre de mesures simultanées et le signe $\sum$ indique qu'on fait la somme de tous les carrés des différences entre températures prédites et mesurées. C'est un indicateur de cette dispersion. Dans notre cas, la dispersion est de 1.7 °C.

1.1.2 Pression

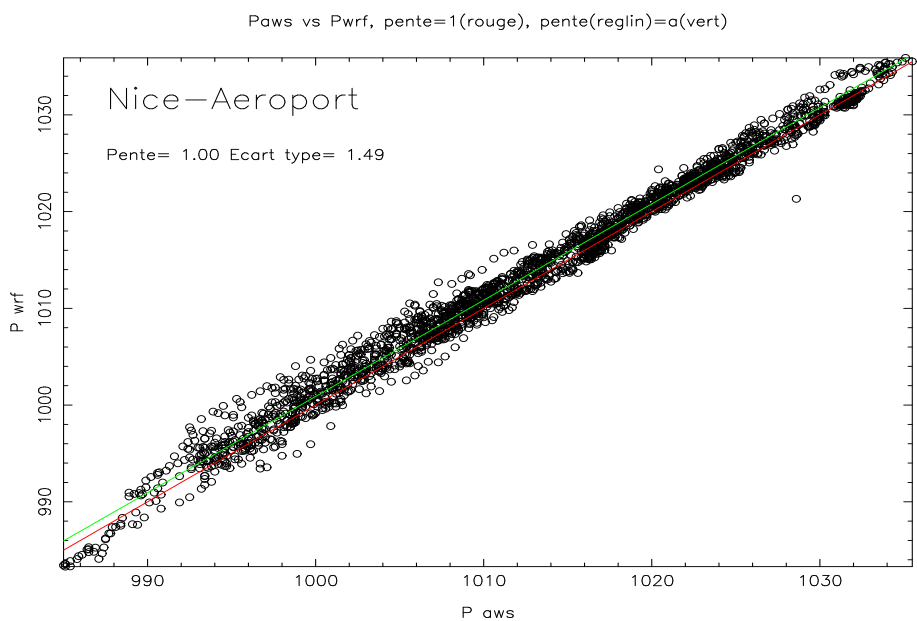
Ici on montre l'évolution comparée de la pression mesurée et prédite :



Oublions les prévisions erronées à 0 heure UTC entre les jours 140 et 280, qui sont un "bug" informatique, pour montrer les valeurs vers la fin de la période :



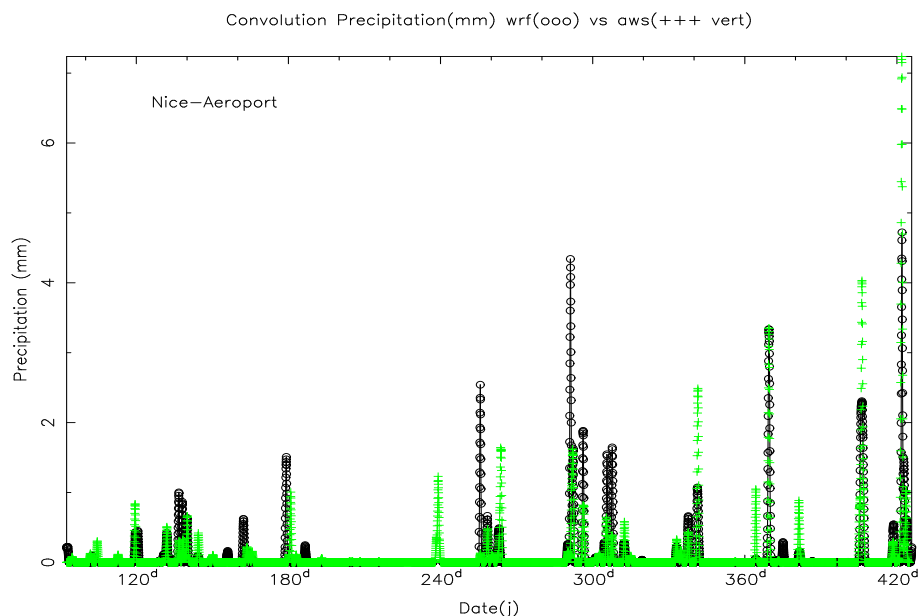
où la comparaison semble parfaite! L'analyse statistique est indiquée dans la figure suivante, où on enlevé la partie erronée :



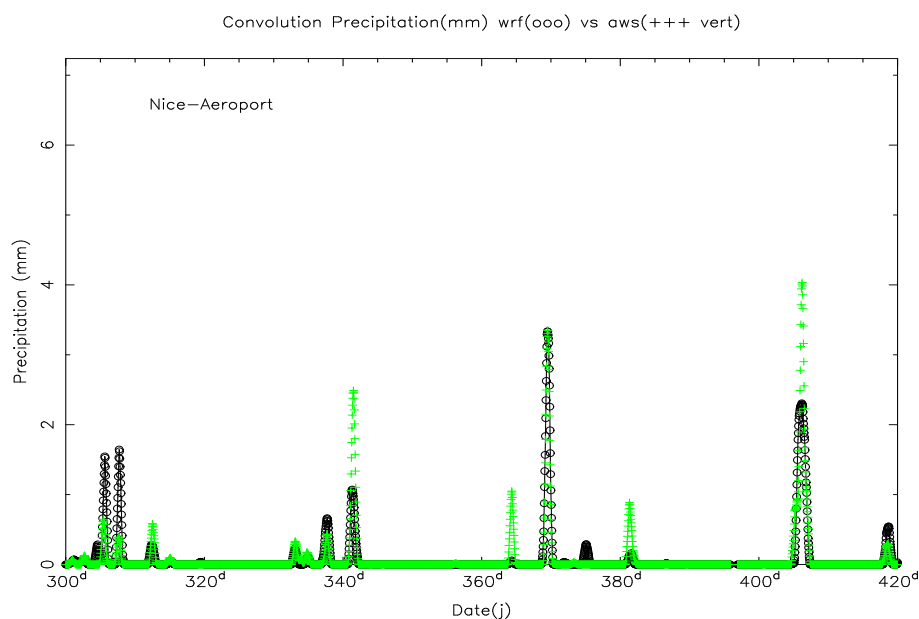
On constate une très bonne adéquation entre prévisions et mesures. En effet la pente de la droite de régression est $a = 1$, identique à la droite parfaite. L'écart-type est de 1.5 hPa.

1.1.3 Précipitation

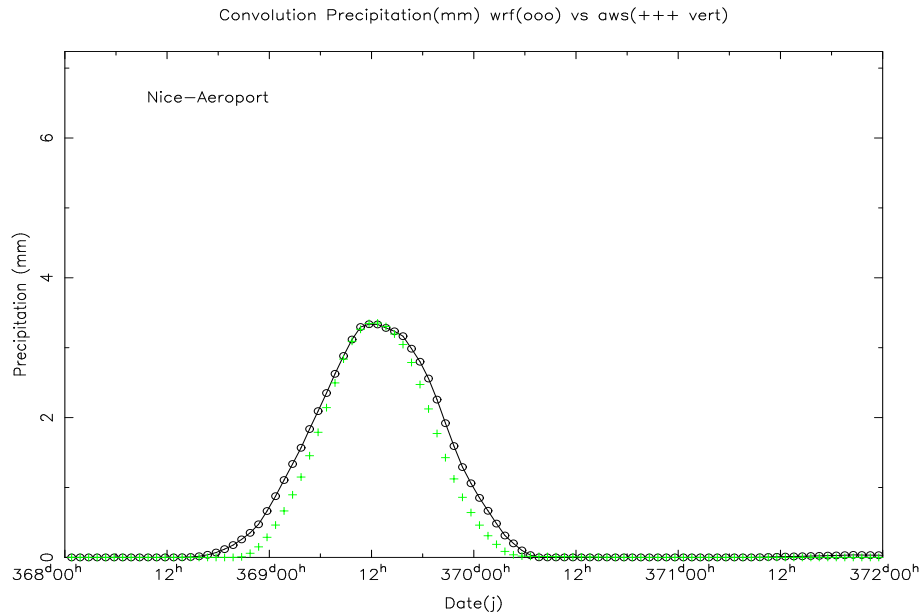
La figure suivante montre la comparaison entre les précipitations mesurées et prédites sur tout la période :



On constate que lorsqu'il ne pleut pas, modèle et mesure coïncident assez bien. Lorsqu'il pleut, il peut y avoir des décalages dans le temps et de fortes disparités sur l'amplitude de la pluie. Maintenant, regardons sur la fin de la période, entre les jours 300 et 420 :

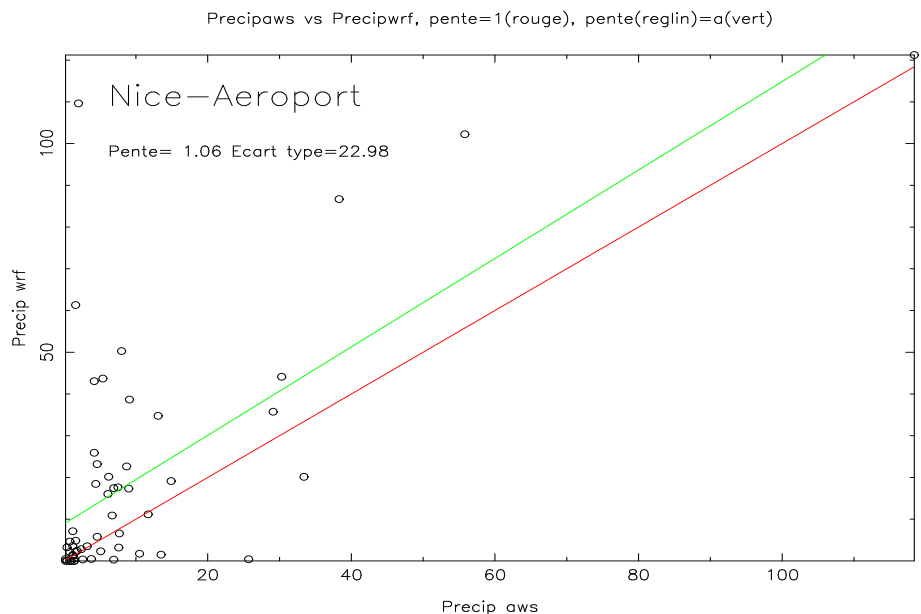


Ici, on voit les cas où mesures et prédictions sont concomitantes dans le temps, mais différentes en amplitude (jour=340 et 405), les cas où le modèle prévoit une pluie sans qu'on puisse la mesurer et un cas exceptionnel que je ne peux m'empêcher de montrer :



Pour minimiser les erreurs de concomitance, j'ai appliqué une convolution par une porte dont la largeur est de 1 jour. Je ne m'étendrais pas sur cette technique qu'on peut résumer à une sorte de "flou" qui masque les imperfections.

Je montre ici la statistique des couples $\{Precipitation_{aws}, Precipitation_{wrf}\}$ qui est difficile à interpréter, sachant que la plupart du temps il ne pleut pas, mais lorsqu'il pleut modèle et mesure sont décalés dans le temps ou d'amplitude différents :

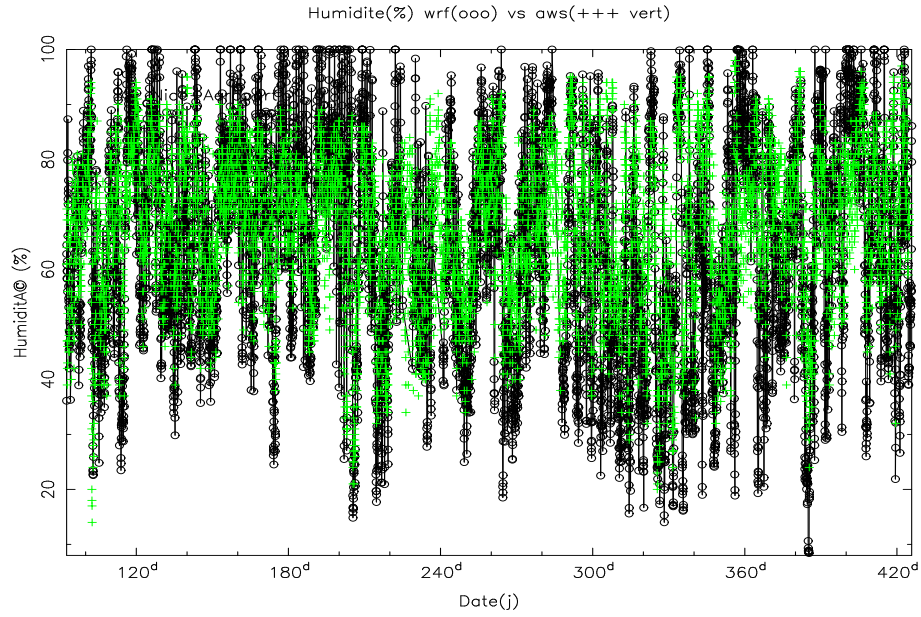


On remarque que, toutefois, la pente de la droite de régression vaut 1, ce qui indique que, même si il y a des écarts en temps et en amplitude, la quantité totale de précipitation semble identique entre modèle et mesure.

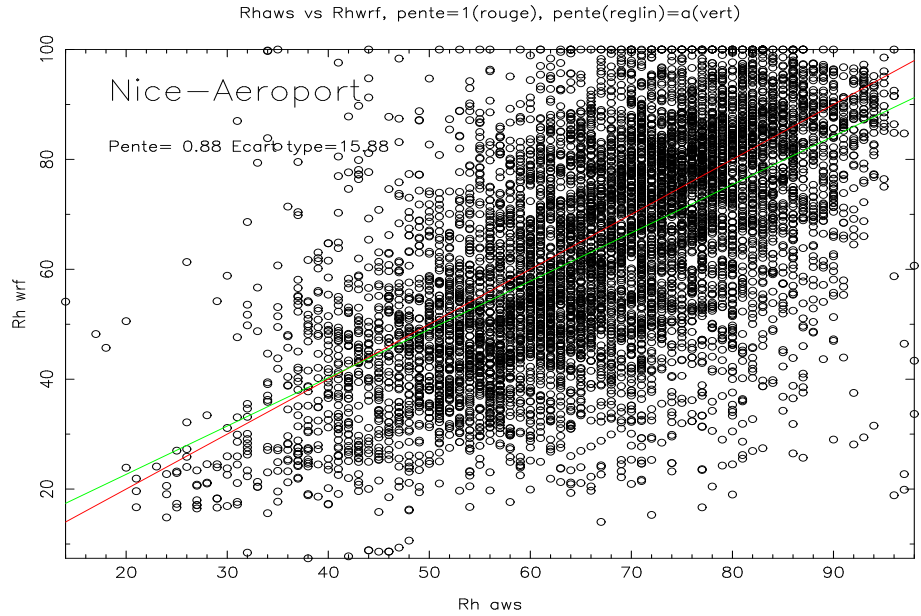
En effet sur la période de 333 jours, d'Avril 2023 à Février 2024, notre modèle a enregistré une précipitation totale de 598 mm, alors que la station météo a enregistré une précipitation totale de 618 mm, ce qui semble très satisfaisant.

1.1.4 Humidité

La figure suivant montre la comparaison entre mesures et prévisions de l'humidité :



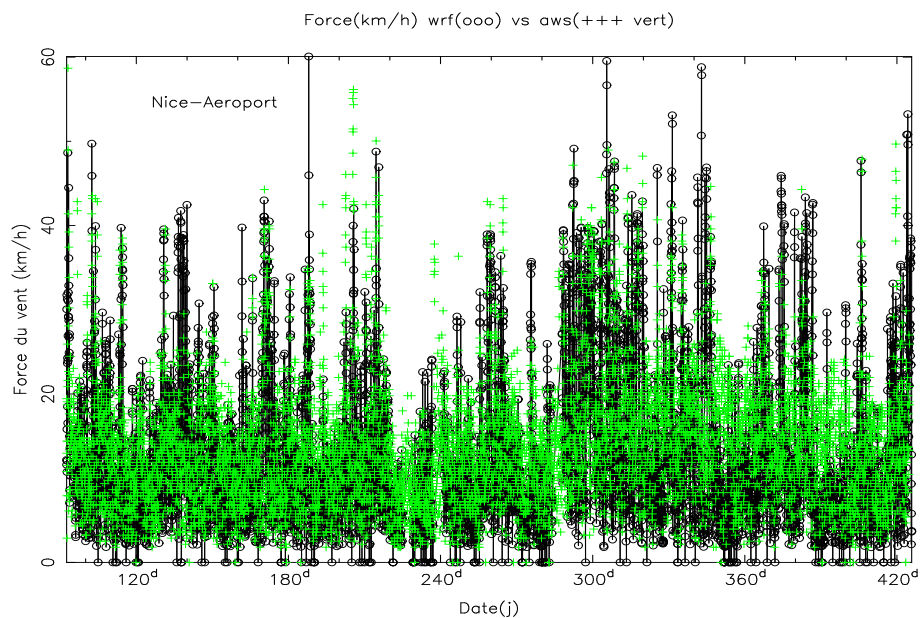
qui montre un bon accord qui se confirme dans la représentation statistique suivante :



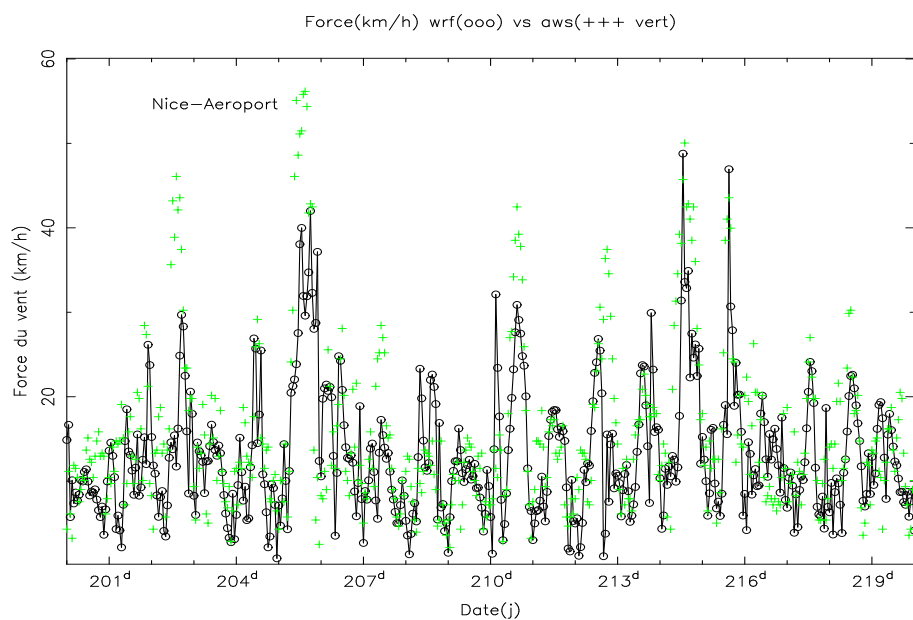
Il semble que l'analyse statistique soit légèrement biaisée par le fait le modèle prévoit des valeurs d'humidité égales à 100%, alors que les mesures restent souvent inférieures.

1.1.5 Force du vent

On analyse maintenant la force du vent sur toute la période. Mais il faut savoir que les stations météo ne peuvent pas mesurer de force du vent si $F_{aws} < 0.5ms^{-1}$ ou encore si $F_{aws} < 1.8kmh^{-1}$. Donc, par cohérence, chaque fois que $F_{aws} < 1.8kmh^{-1}$ ou $F_{aws} < 1.8kmh^{-1}$, alors je force les deux valeurs du vent à zéro.

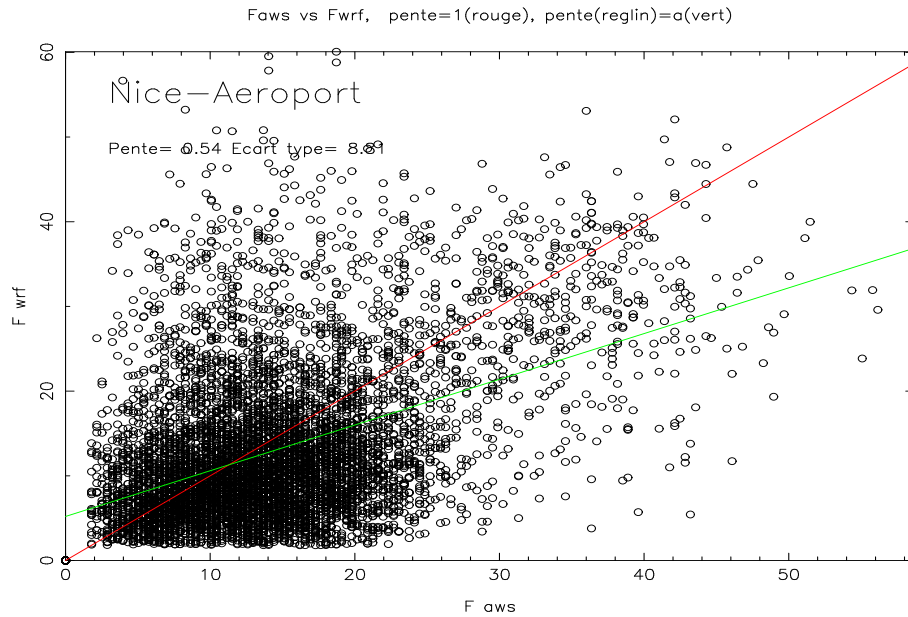


et sur une petite période du jour 200 à 220 :



L'accord est assez bon, mais on remarque que souvent la station météo mesure des forces nettement supérieures à celles du modèle, comme aux jours 202, 205 et 210.

La figure suivante montre l'analyse statistique sur toute la période :



La comparaison semble montrer que les prévisions du modèle sont inférieures d'un facteur 2 (pente=0.54) aux mesures données par la station météo.

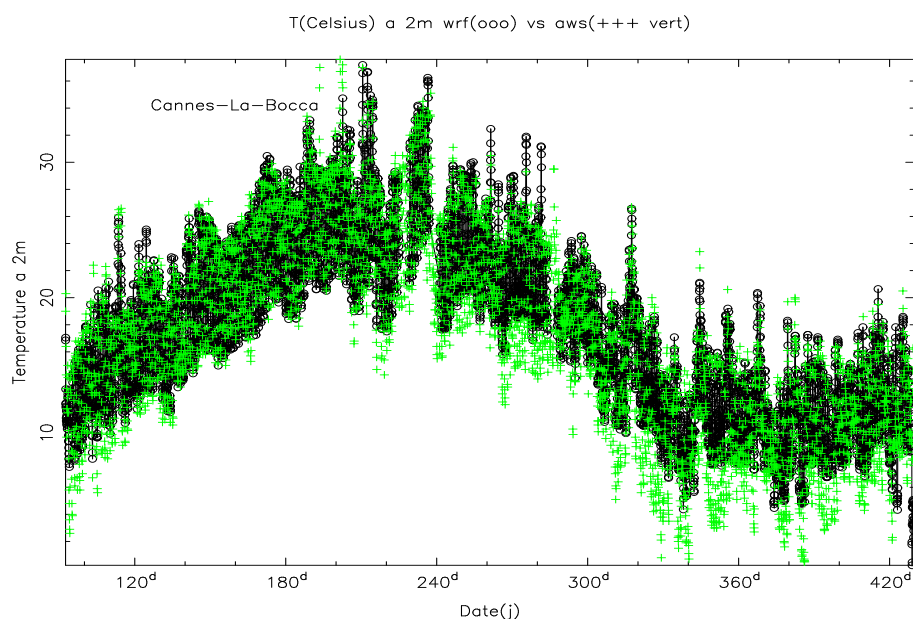
1.2 Cannes-La Bocca

J'analyse ici les prévisions faites pour la station météo de Cannes-La Bocca (il s'agit de l'aéroport de Cannes, situé à environ 5km à l'ouest de la ville), dont les coordonnées sont latitude=43.5565, longitude=6.9505, à une altitude de 2 mètres.

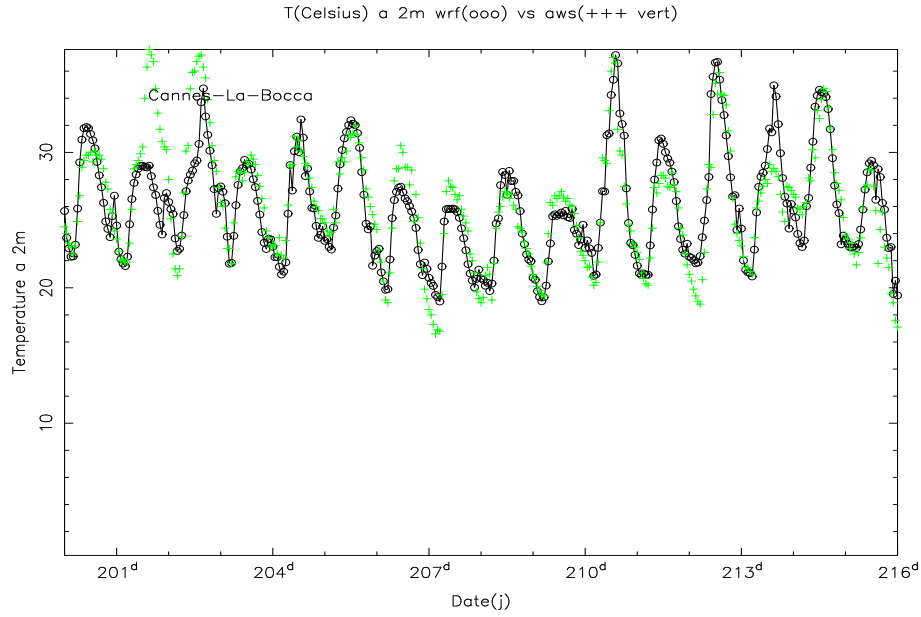
La comparaison commence vers le début du mois d'Avril 2023, data à laquelle on a commencé à faire tourner notre modèle, et se termine à la date d'aujourd'hui, soit la fin Février 2024. Cette période couvre environ 338 jours, soit encore 8112 heures. Il y a quelques "trous" qui correspondent à des arrêts de notre système.

1.2.1 Température à deux mètres

La figure suivante montre la comparaison entre les mesures de la station météo et les prévisions de notre modèle :

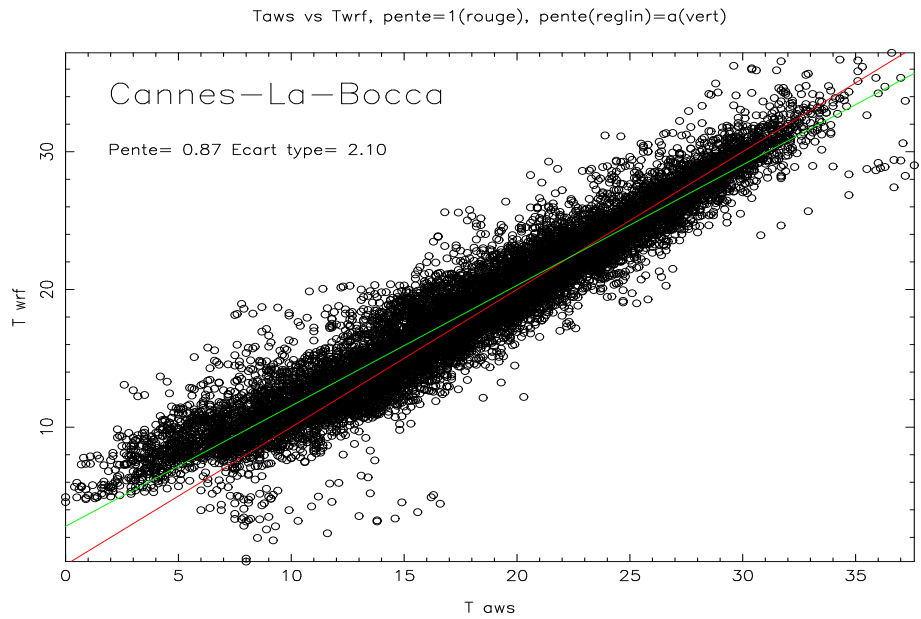


Maintenant, nous faisons un zoom sur la période la plus chaude de l'année, c'est à dire du 19 Juillet au 4 Août 2023 :



On constate que le 20 juillet, le modèle donne une température de 29°C au lieu des 37°C mesurés par la station météo. Par contre, au deuxième maximum du 29 Juillet prévisions et mesures se superposent.

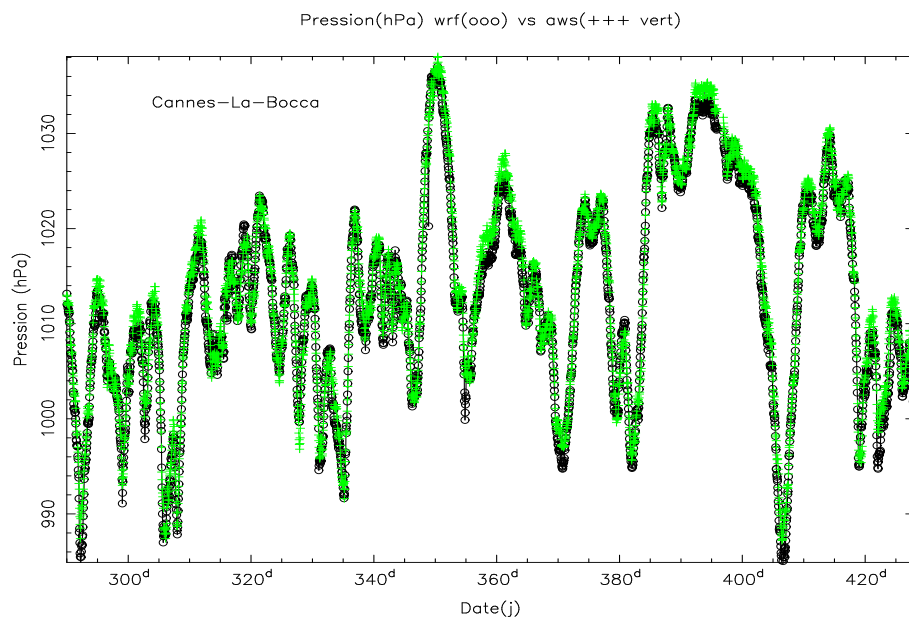
La figure suivante montre l'analyse statistique sur toute la période :



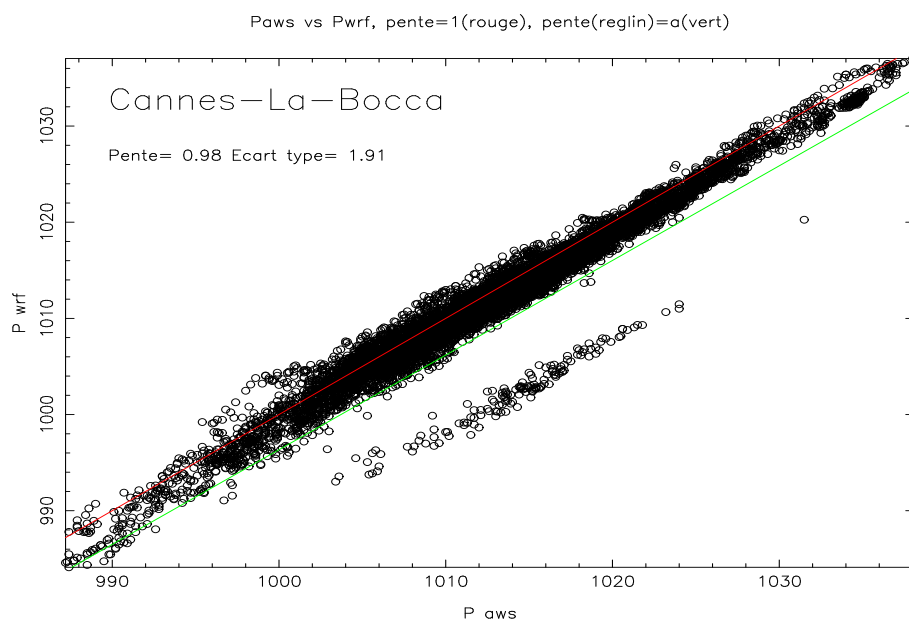
La pente de la droite de regression est 0.85, mais on voit sur la figure que lorsque les températures mesurées sont inférieures à 7°C, le modèle semble les surestimer. C'est la raison pour laquelle, si on fait abstraction de ces faibles températures, les couples $\{T_{aws}, T_{wrf}\}$ se rapprochent de la droite de pente 1.

1.2.2 Pression

La figure suivante montre la comparaison pour la pression entre les jours 290 et 428, où on met de côté les premières valeurs entachées par un bug informatique :

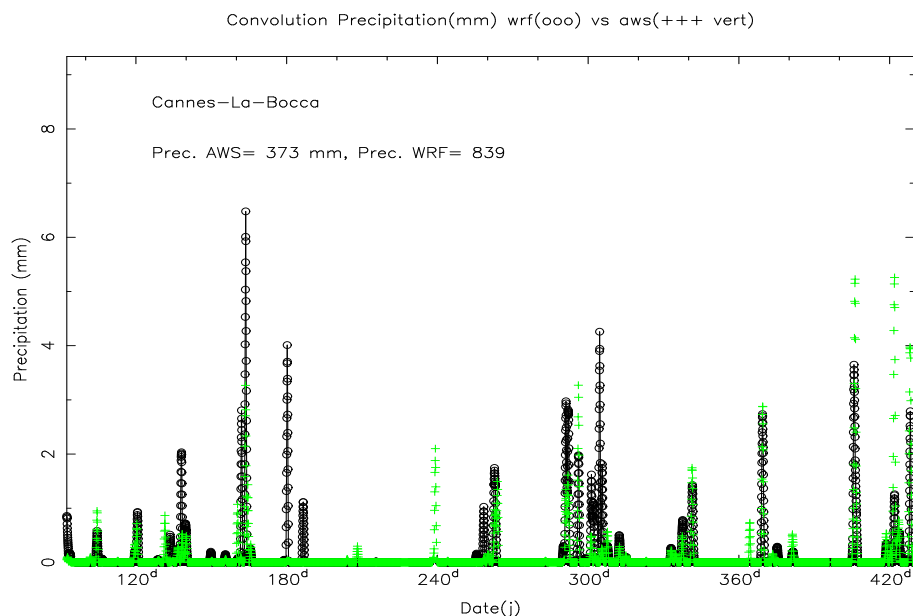


La comparaison semble "parfaite" comme le confirme l'analyse statistique :

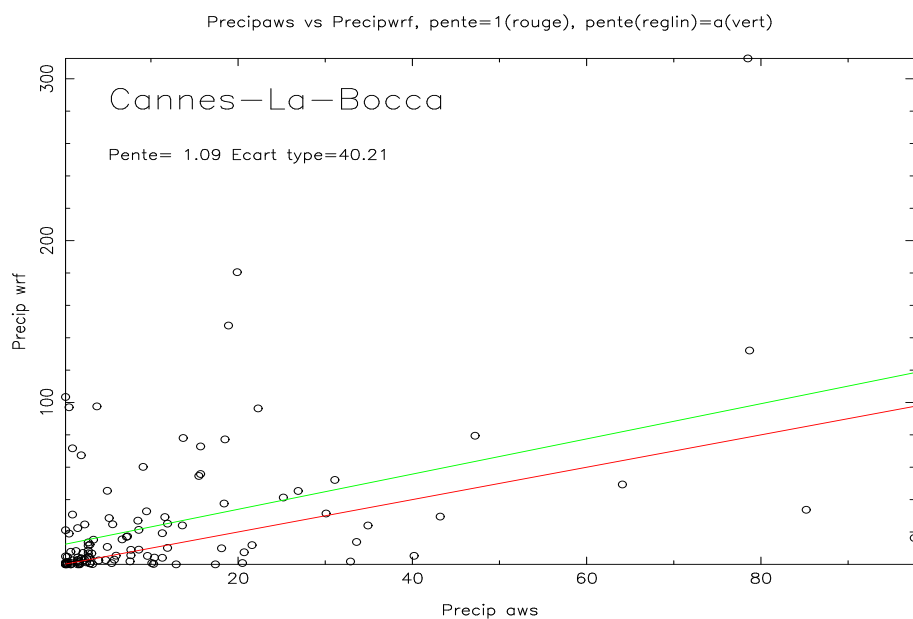


1.2.3 Précipitation

La comparaison pour les précipitations apparaît sur la figure suivante :



Comme pour Nice, à quelques exceptions près, les précipitations données par le modèle correspondent bien, avec des amplitudes variables.

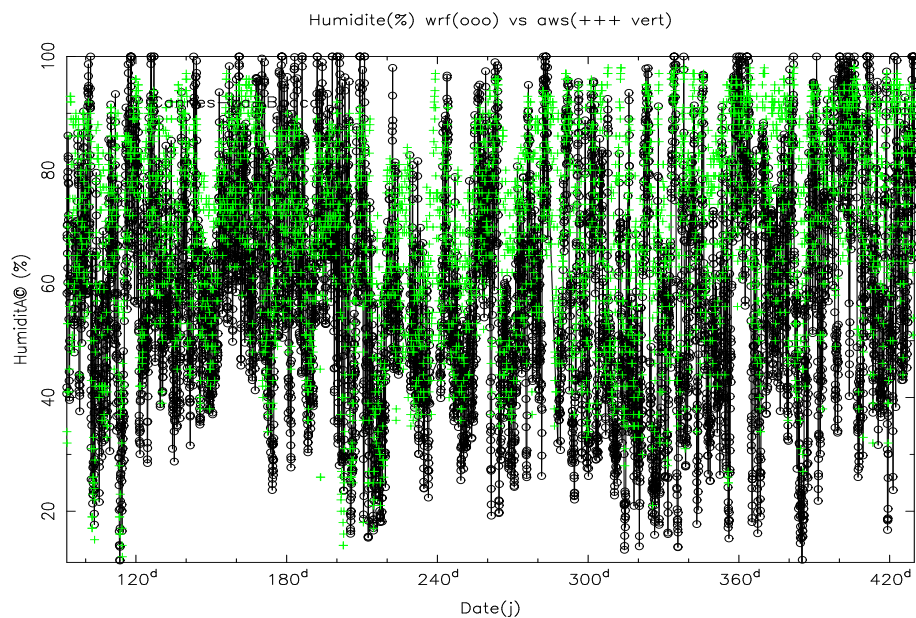


On remarque que, toutefois, la pente de la droite de régression vaut 0.87, proche de 1, ce qui indique que, même si il y a des écarts en temps et en amplitude, la quantité totale de précipitation semble identique entre modèle et mesure.

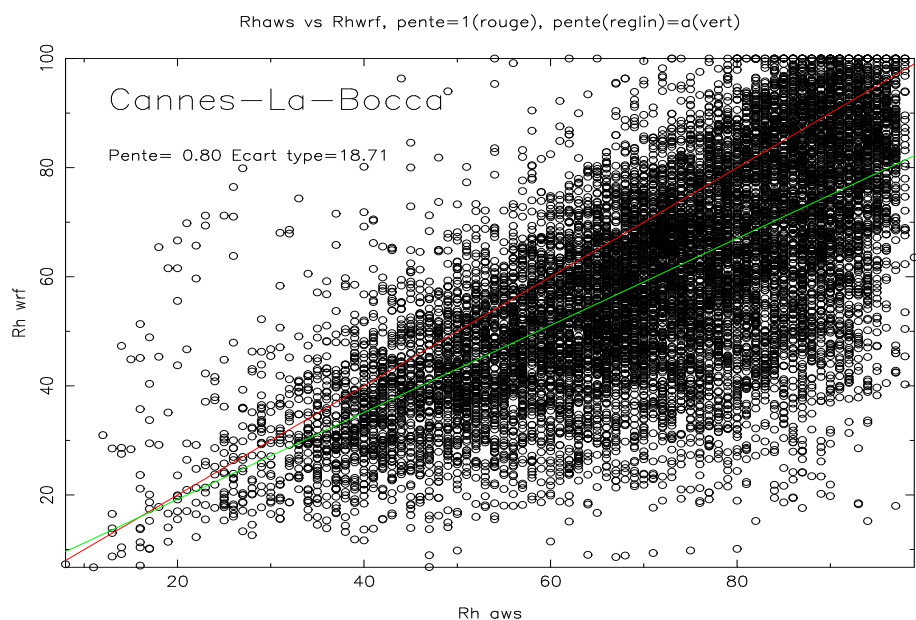
En effet sur la période de 337 jours, du 3 Avril 2023 au 3 Mars 2024, notre modèle a enregistré une précipitation totale de 840 mm, alors que la station météo a enregistré une précipitation totale de 813 mm, ce qui semble très satisfaisant.

1.2.4 Humidité relative

On a représenté la comparaison pour l'humidité relative sur la figure suivante :

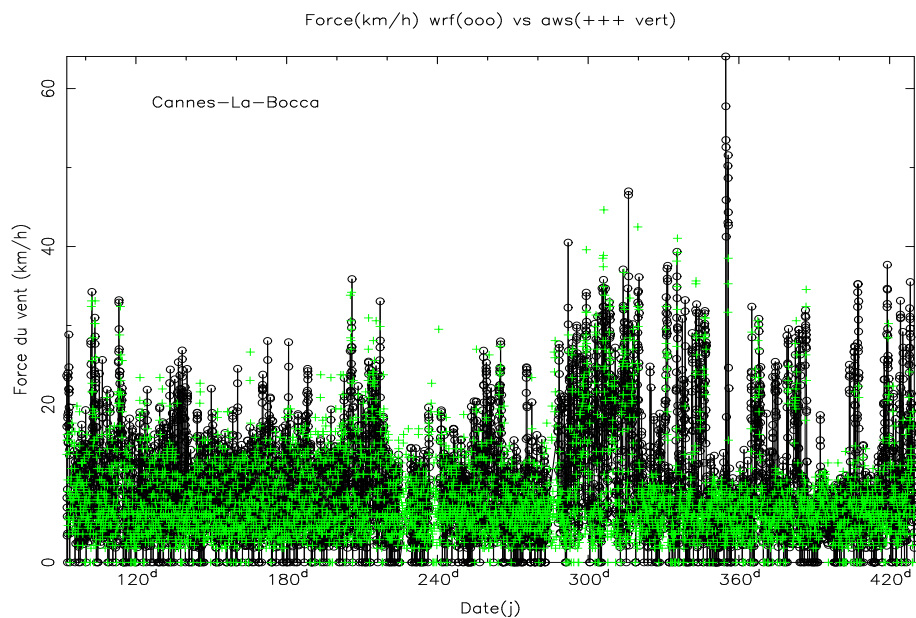


et l'analyse statistique sur la figure suivante :

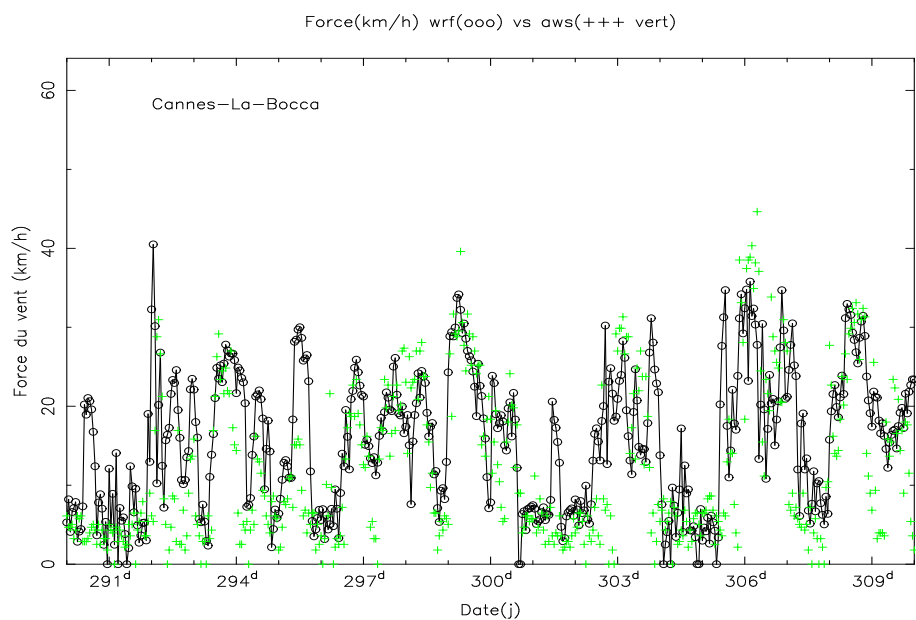


1.2.5 Force du vent

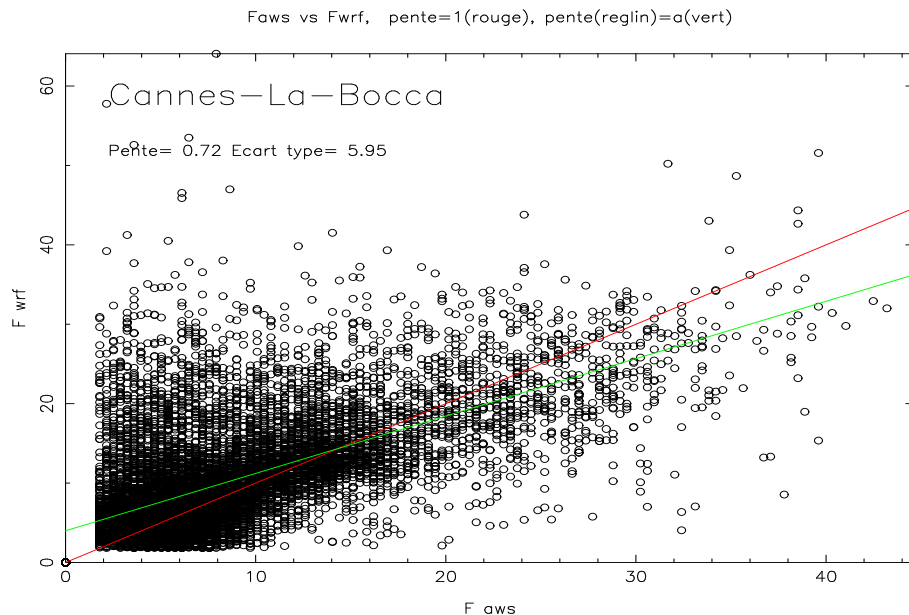
La figure suivant montre l'évolution de la force du vent telle que mesurée par la station météo et prédite par notre modèle :



On fait un zoom sur la portion entre les jours 209 et 310 :



où la comparaison semble cohérente. Du point de vue statistique, l'analyse est faite sur la figure suivante :



où la pente de la droite de régression vaut 0.7.

2 Conclusion

Au vu de ces comparaisons, on peut dire que globalement, pour chacun des paramètres météorologiques, nos prévisions suivent assez bien les mesures faites localement, et ce sur une durée de 24 heures. A ma connaissance, je n'ai pas vu une analyse aussi détaillée faite avec d'autres modèles...