

Contribution de l'imagerie satellitaire à la prévision de la formation des dépressions météorologiques (ou cyclogenèse)

Le lancement des satellites météorologiques, à partir des années soixante, permet d'obtenir, par l'intermédiaire des champs nuageux, de plus en plus d'images planétaires sur divers phénomènes météorologiques.

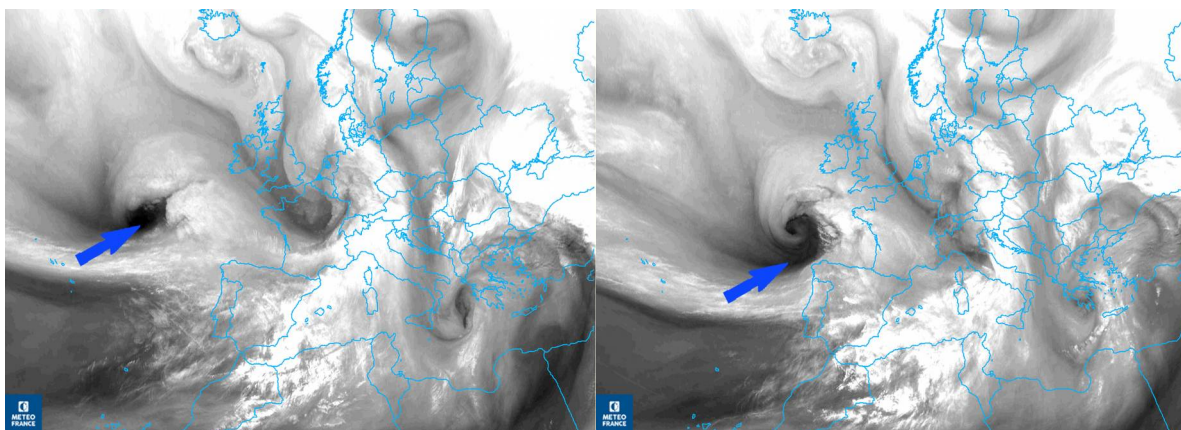
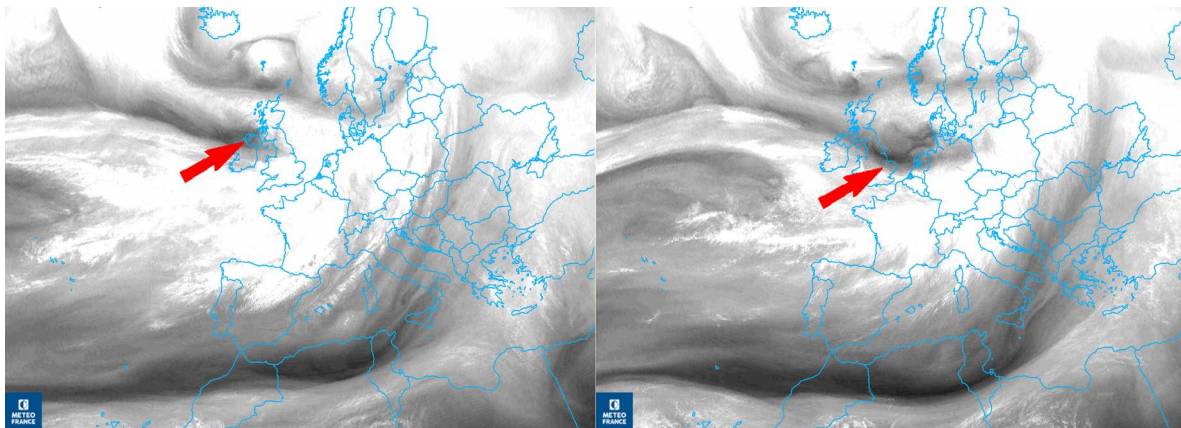
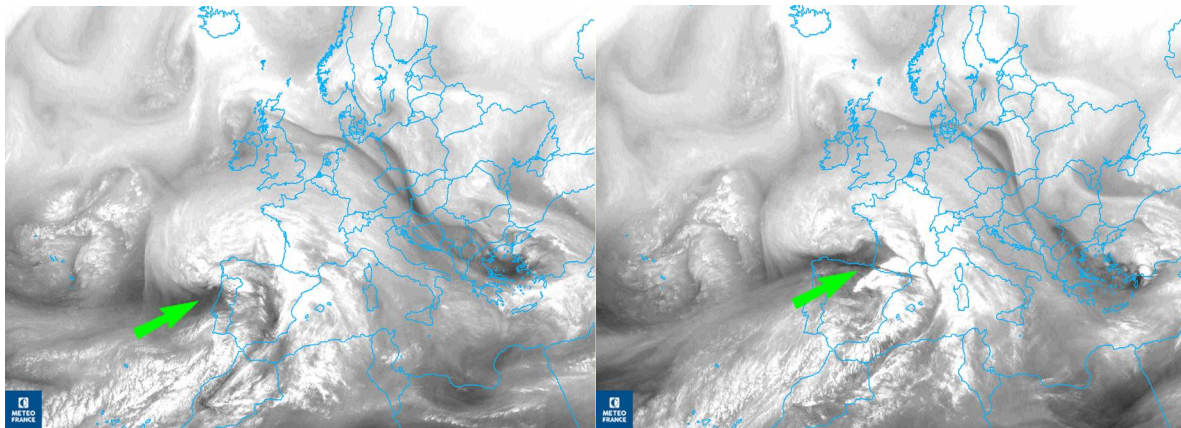
Pour fixer les idées, les satellites géostationnaires (à environ 36 000 km d'altitude) nous fournissent des images à une fréquence de 15 minutes et une résolution horizontale de 2.5 km.

C'est par une exploitation exhaustive des images satellites dans différents canaux des spectres visible et infrarouge que l'on procède à une analyse critique des principales structures nuageuses, à l'exclusion des nuages sous-jacents. À titre d'exemple, des nuages suffisamment épais peuvent être différenciés des nuages fins en raison d'une diffusion nettement plus grande de la lumière solaire tandis que les nuages élevés ou froids se distinguent des nuages bas par une émission infrarouge moindre.

1. Détection de la cyclogenèse

Dans une large mesure, les images satellites permettent de confirmer l'existence de vastes structures tourbillonnaires cycloniques à nos latitudes.

Jusqu'à récemment, l'apport des images satellites à l'égard des dépressions synoptiques et de la cyclogenèse s'était surtout limité à des aspects descriptifs, tels que la localisation des centres dépressionnaires sur les océans avec une estimation relativement grossière de leur pression en surface et l'examen des structures nuageuses typiques associées à leur développement. À nos latitudes la formation de tourbillons cycloniques est généralement accompagné d'une bande nuageuse en forme de virgule ou « comma ».



Évolution temporelle des images satellites dans le canal vapeur d'eau 6.2 μm :

- *pour la tempête Xynthia du 28 février 2010 (figures du haut) ;*
- *pour la tempête Kyrill du 18 janvier 2007 (figures du milieu) ;*
- *pour la tempête Klaus du 24 janvier 2009 (figures du bas).*

La genèse des 3 tempêtes présentées ci-dessus s'étant produite sur l'Atlantique, ce sont surtout les images fournies à partir des satellites géostationnaires, accessibles toutes les 15 minutes sur les stations de travail des prévisionnistes, qui ont permis de suivre leur progression vers nos côtes.

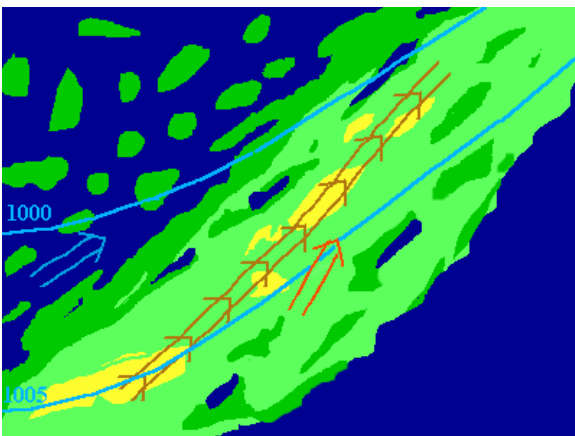
Ces figures montrent les images obtenues à partir du canal vapeur d'eau 6,2 microns embarqué sur le satellite Météosat 9. Les perturbations sont très nettement visibles au large des côtes françaises.

L'enroulement nuageux caractéristique est bien visible notamment sur le dernier cas de la tempête Klaus. Le contraste entre le "cœur noir" repéré par des flèches et les masses nuageuses qui apparaissent en blanc illustre la virulence des phénomènes. Quand le phénomène atteint le continent, il peut alors être visualisé en temps quasi-réel grâce aux mesures des stations au sol et des radars météorologiques en plus des informations fournies par les satellites.

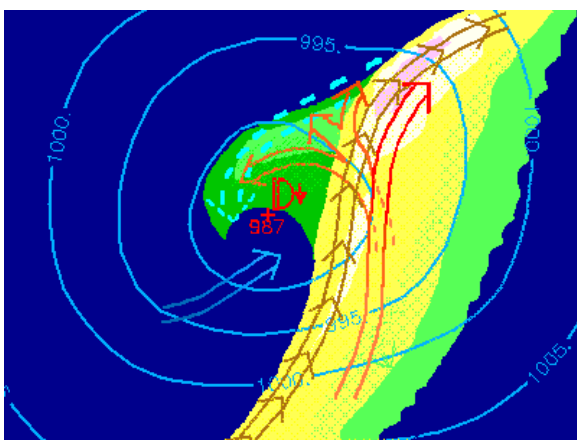
D'un point de vue opérationnel, les observations satellitaires contribuent à l'amélioration des analyses et prévisions immédiates des situations météorologiques.

2. Modèles conceptuels basés sur des observations satellitaires

Avant le début de la cyclogenèse, la dépression se creuse



- Écoulement de basse couche (flèche bleue en air froid et orange en air chaud) et écoulement d'altitude (flèches marrons) ont la même direction.
- Il n'y a pas d'organisation claire de la masse nuageuse.



- L'écoulement de basse couche s'organise dans une direction différente de celle de l'écoulement d'altitude.
- Au nord de la dépression, l'écoulement de basse couche entraîne les nuages de basse et moyenne altitude autour de la dépression dans une direction perpendiculaire à celle prise par les nuages les plus hauts.
- Un nuage de forme caractéristique en crochet apparaît alors.

3. Tourbillon Potentiel et Imagerie Satellite

Notre connaissance de la formation des dépressions météorologiques (ou cyclogenèse) a considérablement évolué au cours de ces dernières années. Arbogast (2005) a mis en évidence la sensibilité du cycle d'évolution des dépressions des latitudes tempérées à la position et à l'amplitude des anomalies de fort tourbillon potentiel de haute troposphère considérées de ce fait comme des précurseurs des cyclogenèses. L'interaction entre ces anomalies de tourbillon potentiel et leur environnement se manifeste notamment par l'apparition de mouvements verticaux au cœur du mécanisme de cyclogenèse. On observe ainsi généralement un assèchement des masses d'air au sein des branches subsidentes. Un lien peut ainsi être établi entre le tourbillon potentiel et le contenu en vapeur d'eau de la haute troposphère.

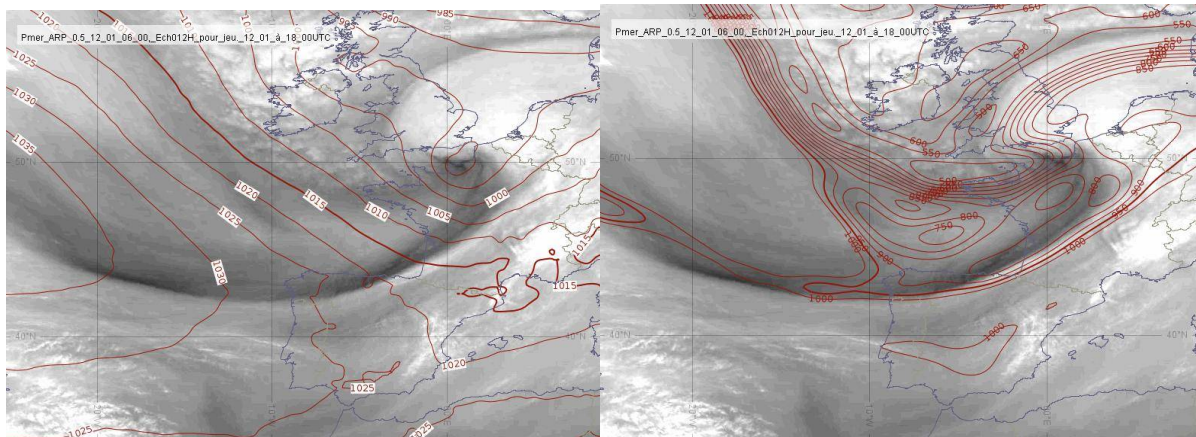
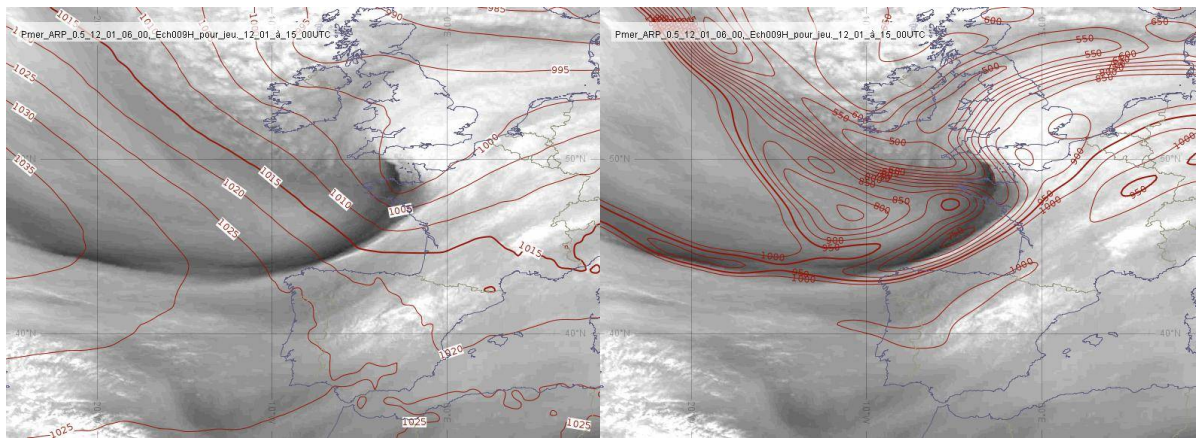
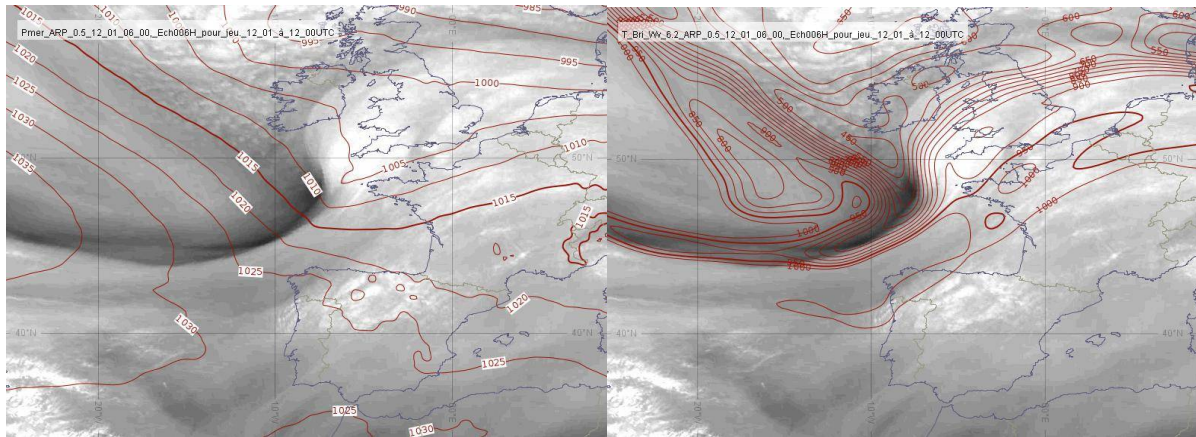
La troposphère est la partie basse de l'atmosphère d'une épaisseur de 10 à 12 km sous nos latitudes. Son sommet est appelé tropopause. La troposphère contient 90 % de la masse atmosphérique : elle est donc le domaine exclusif où se produisent les phénomènes météorologiques.

Le lien entre l'image dans le canal vapeur d'eau (représentant le champ d'humidité au-dessus de 600 hPa) et la dynamique n'est pas direct. Cependant la vapeur d'eau est bien reliée à la dynamique de l'atmosphère : l'humidité est apportée depuis les basses couches par les ascendances et elle est transportée par le vent horizontal ; la subsidence assèche la haute troposphère. Les régions de basse tropopause, accompagnées de forte subsidence correspondent donc à des zones sombres sur l'image satellite. L'interprétation de l'imagerie vapeur d'eau et de la relation entre les intrusions sèches et certains aspects de la cyclogenèse en altitude ont été documentés depuis une quinzaine d'années (Browning 1997, Santurette et Georgiev 2005, Georgiev et al. 2016).

La superposition des analyses du modèle, ou des toutes premières échéances de prévision, avec les images satellites obtenues dans le canal vapeur d'eau permet de diagnostiquer le comportement du modèle.

Illustration sur le cas de la tempête Égon qui a balayé le nord de la France et l'Allemagne les 12 et 13 janvier 2017 :

La dépression Égon est pilotée par un profond thalweg d'altitude associée à une forte anomalie de basse tropopause qui circule de la Bretagne à la Belgique puis au nord-est de l'Allemagne. Un creusement de 980 hPa a été observé. Les images vapeur d'eau associées aux champs dynamiques du modèle ARPEGE illustre le creusement explosif de la dépression.



Comparaisons entre observations et prévision du modèle global ARPEGE du 12 janvier à 06 TU. Pression réduite au niveau de la mer (à gauche) et topographie de la tropopause dynamique (altitude de la surface du tourbillon potentiel à 1.5 Pvu, à droite) :

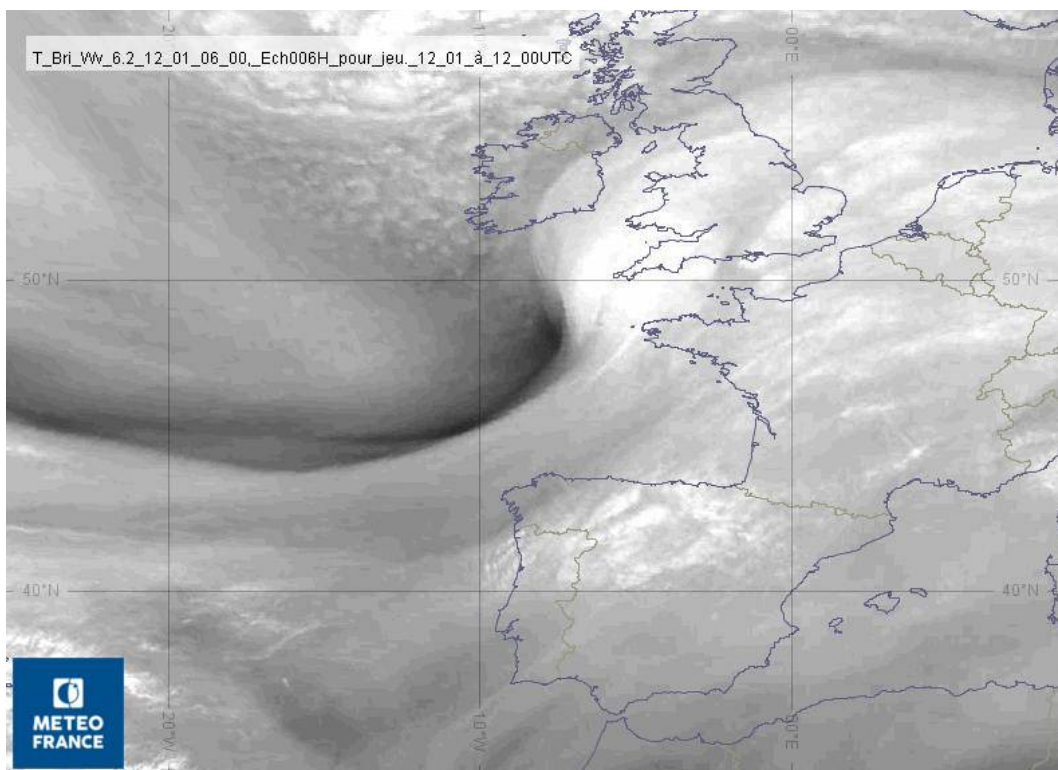
- *(en haut) à 6 h d'échéance superposée aux données Météosat (image dans le canal 6.2 mm sensible à la vapeur d'eau à 12 UTC le 12 janvier 2017,*
- *(au milieu) à 9 h d'échéance superposée aux images WV observées à 15 UTC le 12 janvier*
- *(en bas) à 12 h d'échéance superposée aux images observées à 18 UTC le 12 janvier*

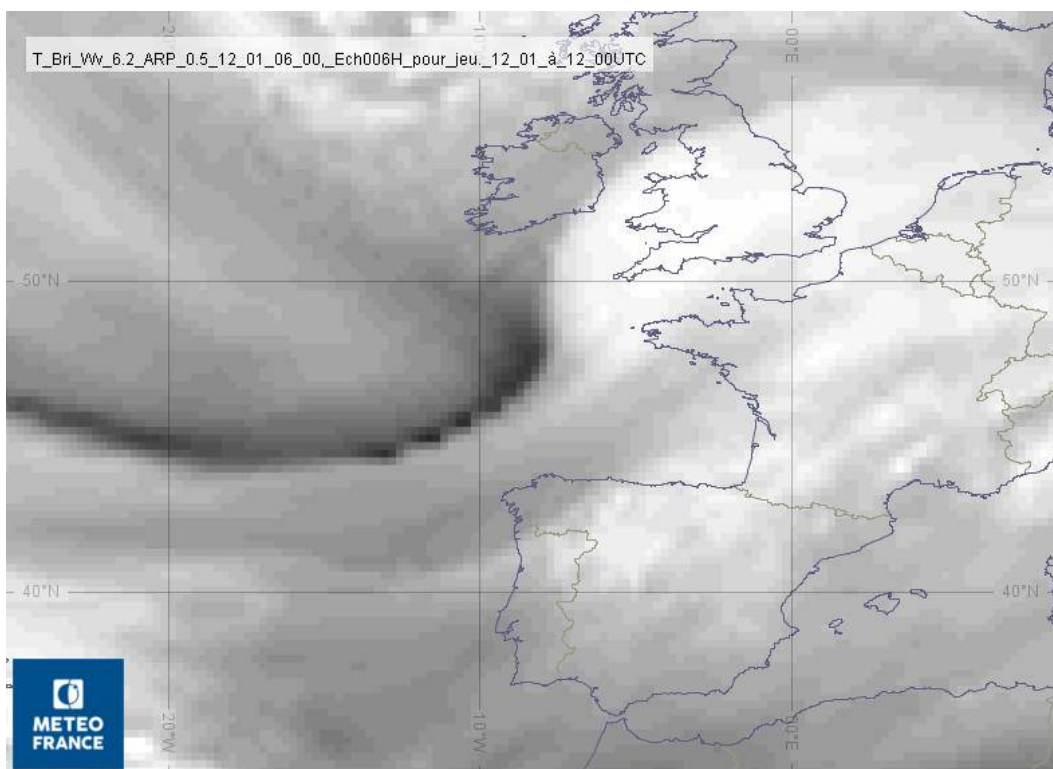
4. Imagerie synthétique

L'utilisation d'un modèle numérique permet à partir de paramètres physiques simulés de recalculer une image vapeur d'eau « synthétique ». Il est alors possible de valider les états initiaux ou une prévision à très courte échéance (3 ou 6 heures) par une comparaison directe entre l'image observée et l'image simulée.

Si un désaccord est observé entre les 2 images, des modifications de l'analyse ou de la prévision à 3 ou 6 heures d'échéance peuvent être envisagées. Au Centre National de Prévision de Toulouse, les prévisionnistes disposent d'un outil graphique qui leur permet de redessiner manuellement (à la souris) des champs bidimensionnels, par exemple la topographie de la tropopause dynamique. Ces nouveaux champs sont introduits dans le système de prévision numérique au moyen de l'inversion du tourbillon potentiel (Arbogast et al. 2008).

L'enjeu est de modifier un état du modèle de manière tridimensionnelle en préservant les grands équilibres de la dynamique atmosphérique afin d'améliorer la prévision du modèle.



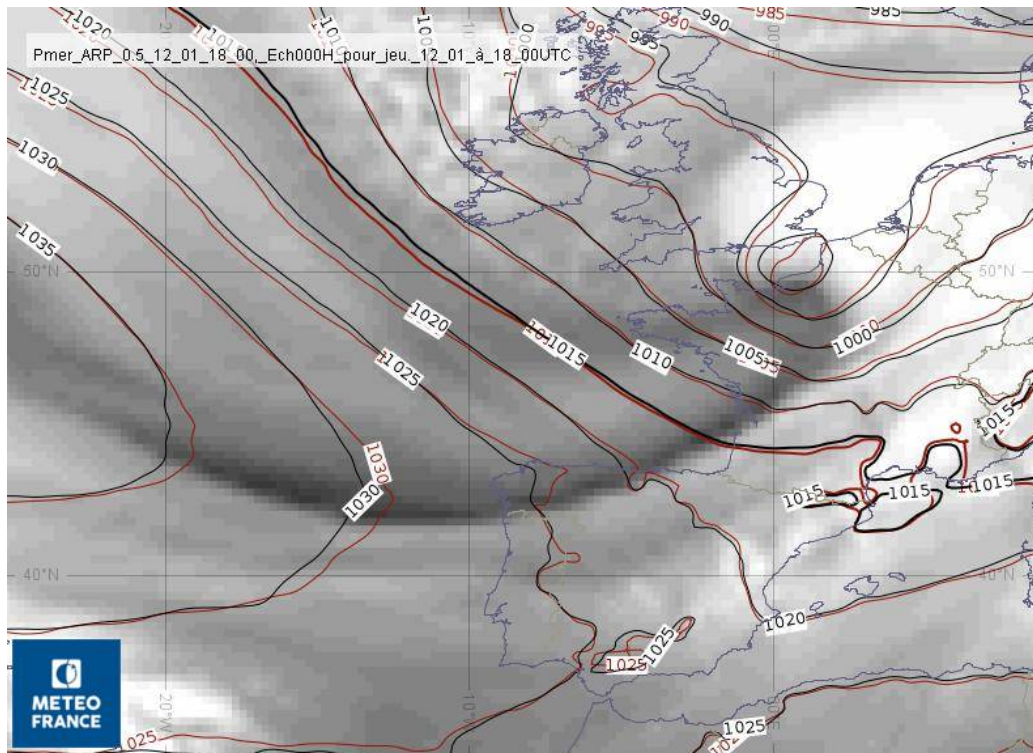


Comparaison entre :

- *une image vapeur d'eau observée dans le canal 6.2 μm (en haut) à 12 TU le 12 janvier 2017 ;*
- *et une image « prévue » par le modèle opérationnel ARPEGE du 12 janvier à 06 TU au bout de 6 heures de prévision.*

Le bon accord entre image observée et image prévue (voir les figures ci-dessus) conforte le prévisionniste dans le scénario proposé par le modèle ARPEGE du 12 à 06 UTC.

Un contrôle *a posteriori* (voir la figure ci-dessous) valide la prévision du modèle ARPEGE.



Prévision à 12 h du modèle global ARPEGE du 12 janvier à 06 UTC (isolignes de couleur marron) comparé à l'analyse ARPEGE du 12 janvier à 18 UTC (isolignes de couleur noire)

Sources :

Christo Georgiev, Patrick Santurette, Karine Maynard, Weather Analysis and Forecasting 2nd Edition, « Applying Satellite Water Vapor Imagery and Potential Vorticity Analysis », Academic Press, 2016.

Arbogast, P.; Maynard, K.; Santurette, P.; Brunet, H.; Dreveton, H.; Poulet, J.M.; Roulet, B.; Arbogast, E, «La correction du tourbillon potentiel : Mesure de l'apport du prévisionniste », La Météorologie n°73, 26-33, mai 2011.

Arbogast Ph., K. Maynard et F. Crépin , 2008 : Ertel potential vorticity inversion using a digital filter initialization method. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 134, 1287-1296.