

16^{ème} Séminaire du pilote privé Avion et ULM

ENAC - 2 AVRIL 2022

Conditions de formation et dissipation des brumes et brouillards

Didier Boutonnet, ACAT - PPL-A,
Ingénieur prévisionniste Météo France

INTRODUCTION

La brume et le brouillard sont deux phénomènes qui impactent directement le vol en VFR par la réduction de la visibilité près du sol qu'ils occasionnent. Ils empêchent le départ et l'arrivée sur les aérodromes (visi mini de 1,5 ou 5km requise).

La brume est une réduction de visibilité entre 1 et 5 kms. Cette réduction est engendrée tout aussi bien par des gouttes d'eau en suspension que des particules de poussières, voire de pollution. Le brouillard est une réduction de visibilité inférieure à 1 km, généré dans 99% des cas par des gouttelettes d'eau en suspension.

Leur prévision de formation tout comme de dissipation est donc très importante pour la sécurité des vols.

Nous nous intéresserons tout d'abord aux différents processus de formation de brouillard, puis nous verrons que celui-ci ne se forme que lorsque des conditions particulières sont réunies.

Nous évoquerons ainsi deux paramètres, T et Td, qui nous donnent des informations pour prendre conscience de l'état de l'atmosphère.

Brouillard : processus de formation.

Le brouillard est un nuage plus ou moins dense et épais qui se forme près du sol. Il est donc composé de gouttelettes d'eau en suspension dans l'atmosphère.

- Une masse d'air se caractérise par sa température « T », son humidité « Hu » ainsi que sa pression « P » (pression atmosphérique).

Son humidité relative représente le rapport entre la quantité réelle de vapeur d'eau (gaz) à sa capacité maximale possible. Elle est exprimée en %. Lorsque cette humidité relative approche puis atteint 100%, on dit que la masse d'air est saturée, elle ne peut plus contenir d'eau à l'état de vapeur.

- Si le processus permettant d'arriver à la saturation se poursuit, il y aura condensation de la vapeur d'eau et ainsi formation de gouttelettes d'eau qui vont ou pas rester en suspension dans l'atmosphère. C'est ainsi que se forment les nuages.

L'humidité est mesurée par des hygromètres. Une fois connue cette humidité, on calcule son contenu réel en vapeur d'eau (exprimé en g/kg d'air) duquel on tire la température de son point de rosée ou dew point Td.

Ainsi le couple T et Td nous renseigne instantanément sur l'humidité de l'air, et ce sont des paramètres inclus dans les messages d'observation aéronautique.

Note ACAT sur T et Td

Brouillard : processus de formation.

Il existe divers types de brouillards selon leur façon de se former, c'est-à-dire d'arriver à la saturation de la masse d'air.

Cette saturation peut être causée :

- soit par le refroidissement de la masse d'air : il s'agira donc de suivre l'évolution de la température T et d'arriver à prévoir les conditions favorables,
- soit par un apport d'eau dans l'atmosphère : pour une masse d'air à une température donnée, si on ajoute de la vapeur d'eau sans modifier sa température, son humidité va augmenter. Ici c'est le T_d qui va évoluer à la hausse.

Dans la réalité, on trouve aussi des brouillards qui sont un mix des deux modes de formation, qui en sera d'autant plus facilitée et surtout rapide...

Brouillard : processus de formation par rayonnement

Le premier processus est le **refroidissement**. Celui pris en compte ici sera le refroidissement isobare, c'est-à-dire à pression constante sous entendu près du sol (à la différence du refroidissement par détente adiabatique (formation des nuages)).

Comment la masse d'air se refroidit-elle?

L'air est un très bon isolant : l'échange de chaleur entre masses d'air de températures différentes est très faible. Le **refroidissement isobare de l'air s'effectue par « contact » avec le sol** qui se refroidit principalement la nuit. Le sol perd de la chaleur par rayonnement infrarouge principalement, d'où le nom de brouillard de rayonnement.

Comment intervient la saturation?

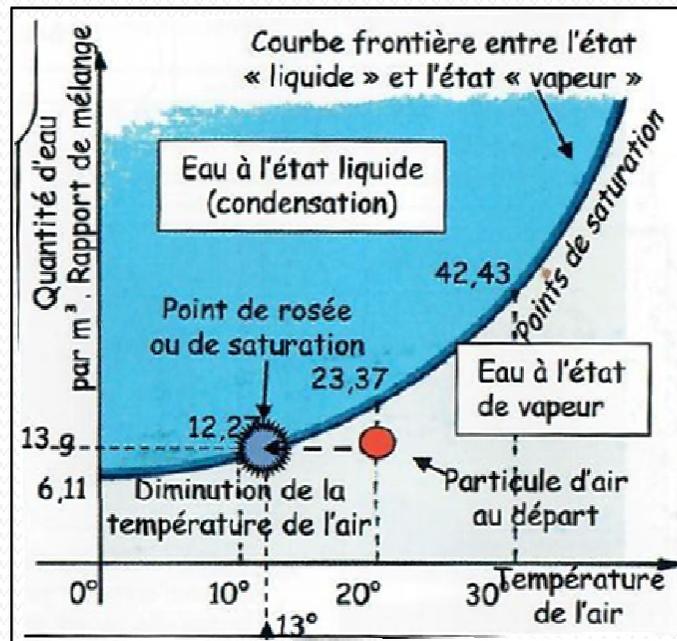
La masse d'air contient au départ une certaine quantité X de vapeur d'eau correspondant à une valeur de T_d . Lorsque sa température T diminue, et avec elle sa capacité maximale potentielle en vapeur d'eau Y , l'humidité relative augmente, et lorsque T et T_d sont très proche voire égaux, alors il y aura saturation, $X=Y$.

Puis, si le refroidissement se poursuit, c'est à dire que T devient inférieur au T_d de départ, il y aura condensation de la vapeur d'eau en eau liquide (il n'existe pas de brouillard de neige!). Par contre le brouillard peut être givrant si lors du refroidissement les températures deviennent négatives : l'eau devient surfondue.

La densité du brouillard dépend donc de la quantité de vapeur d'eau condensée ainsi que du refroidissement. Si la quantité d'eau condensée devient conséquente, le brouillard s'épaissit et un stratus finit par se former.

Brouillard : processus de formation par rayonnement.

Le rapport de mélange (r) est la masse de vapeur d'eau contenue dans un m³ d'air (à peu près 1kg)



Sur ce schéma on considère la particule d'air de température 22dg et de point de rosée 13° (point rouge).

A 22dg sa capacité maximale théorique est de 23,37g/m³ mais son contenu réel en vapeur d'eau est de 12,27g (Td de 13dg).

Lorsque la quantité maximale théorique diminue à cause du refroidissement et rejoint ainsi la quantité réelle, il y a saturation.

Brouillard : processus de formation par rayonnement.

La formation du **brouillard de rayonnement** nécessite donc certaines conditions atmosphériques bien précises pour pouvoir se former.

- En premier lieu, il faut un ciel clair. Le ciel clair permet le refroidissement du sol par rayonnement infrarouge, qui par suite va refroidir l'air.
- Ensuite, un vent non nul mais pas trop fort non plus. Si le vent est nul ou très faible (inférieur à 3kt) la saturation interviendra dans une très mince pellicule près du sol (ou des objets) et ainsi l'eau condensée se déposera sur le sol et ces objets : ce sera de la rosée ou de la gelée blanche si la température est négative (l'eau passe directement de vapeur à solide).
- Par contre si le vent est plus fort (supérieur à 7/8kt), l'agitation et la turbulence homogénéisent la masse d'air, l'humidité est répartie sur une plus grande épaisseur, d'où une saturation plus difficile à atteindre.
- Une humidité de l'air déjà un peu élevée avant le refroidissement, par exemple après le passage d'une perturbation ou après des orages.
- Saisonnalité importante : automne, hiver : nuits assez longues.
- Une topographie favorable : cuvette ou vallée.

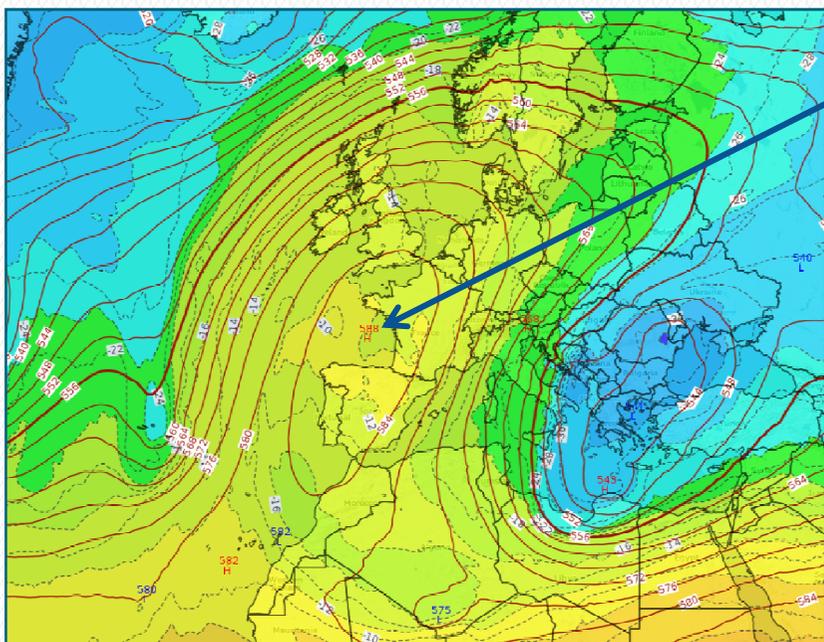
Ainsi une situation anticyclonique est donc toute indiquée pour voir la formation de ce type de brouillard. L'anticyclone favorise une masse d'air plutôt radiative avec un refroidissement qui se fait sur les premiers mètres de l'atmosphère créant ainsi une inversion de température favorable à la stabilité de la masse d'air et à la concentration de l'humidité près du sol.

Brouillard : processus de formation par rayonnement.

Conditions météorologiques favorables au brouillard de rayonnement.

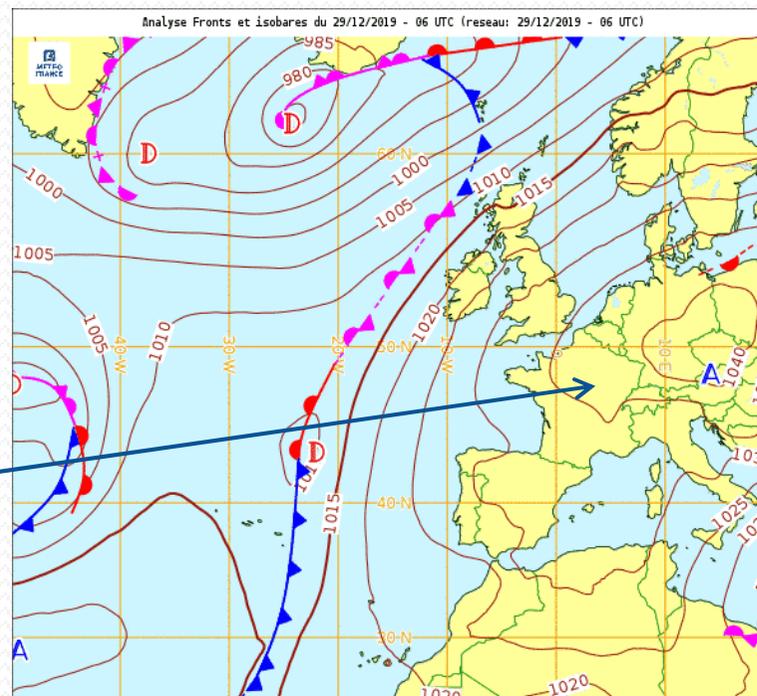
Ce seront des conditions anticycloniques, ainsi il faudra repérer ces situations lors de la planification des vols.

Exemple du 29 décembre 2019 à 1200Z



En altitude, on va retrouver de hauts géopotentiels sur le pays qui écartent les perturbations loin de la région.

En surface, un vaste anticyclone centré sur l'Europe protège la France en maintenant un temps clair, les isobares très lâches indiquent que le vent au sol est généralement faible



Brouillard : processus de formation par rayonnement.

Image satellite dans le domaine visible le 29 décembre 2019 à 1200Z

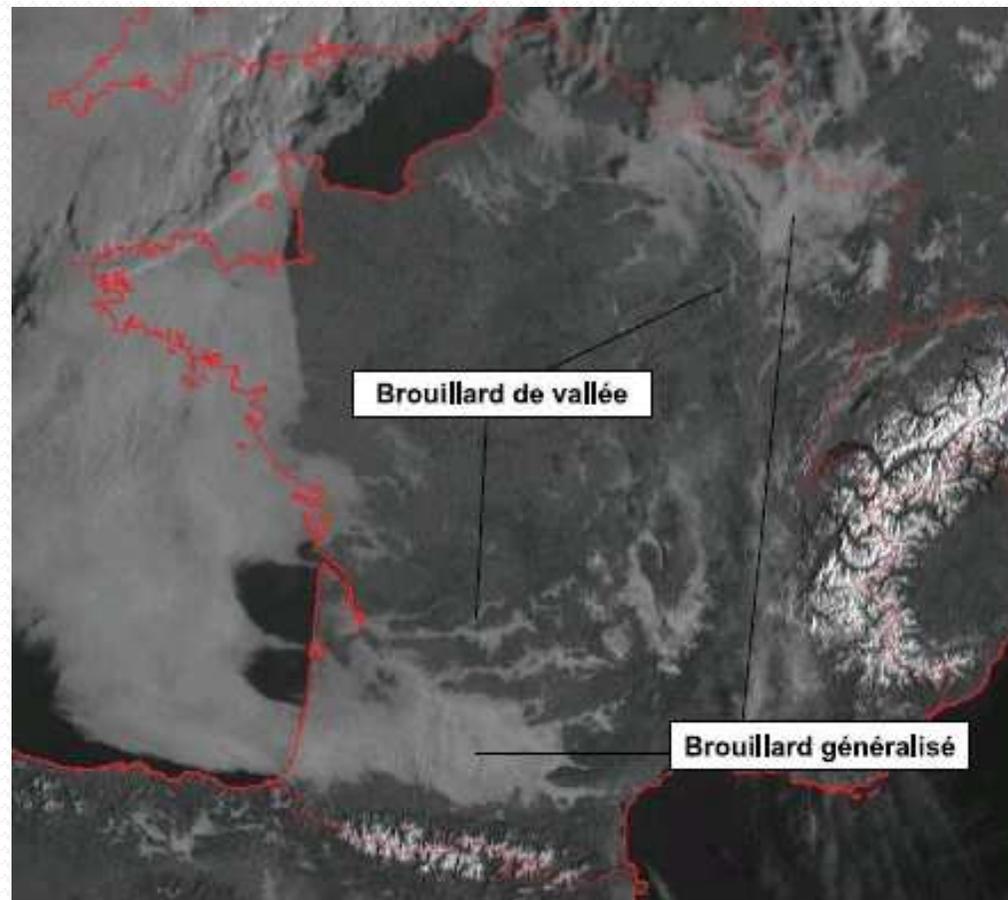


Sur cette image visible on remarque que le ciel est très peu nuageux (quelques cirrus) et surtout on remarque bien les taches grises au sol qui sont des plaques de brouillards.

Brouillard : processus de formation par rayonnement.

Le brouillard de rayonnement aime bien les vallées. D'une part il y a plus d'humidité par proximité des cours d'eau mais aussi parce que l'air froid plus dense se concentre dans les vallées et cuvettes.

Image visible du 7 février 2008 à 1200Z



Brouillard : processus de formation par rayonnement.

Un autre type de brouillard dû à un refroidissement de la surface est **le brouillard d'advection**.

Dans cette situation, on a une masse d'air plutôt douce et humide qui est mise en mouvement (advectée) vers une surface plus froide.

La masse d'air va se refroidir à sa base et du brouillard va se former dans les premiers mètres de celle-ci.

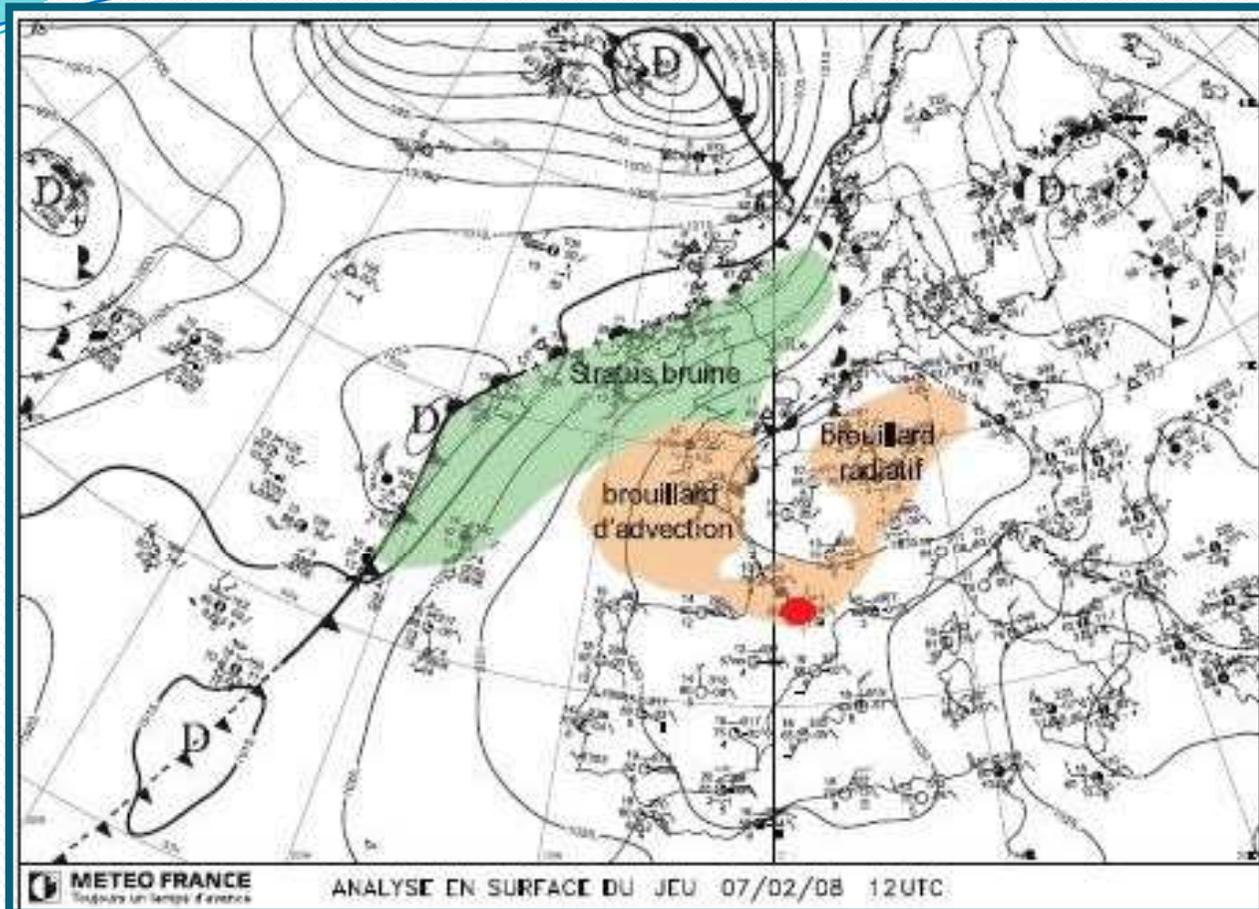
Cette situation peut se produire :

- quand une masse d'air chauffée le jour sur le continent est poussée vers la mer plus froide : du brouillard (et ou stratus) peut se former au large des côtes ;
- quand une masse d'air maritime douce est amenée sur une surface plus froide : refroidissement à la base et formation possible de brouillard.

Le premier type se trouve plutôt vers les côtes de Manche et Atlantique quand le contraste terre/mer est le plus important. Attention : le brouillard formé en mer peut ensuite être ramené sur le littoral avec la brise de mer/vent synoptique. Un vol vers un aéroport situé proche de la mer peut être perturbé par ce phénomène, il faut donc y penser et bien regarder de près les images satellites.

Le deuxième type, plus fréquent, se rencontre plutôt de l'automne au printemps, quand une masse d'air douce d'origine subtropicale arrive sur une mer ou des sols plus froids : c'est un brouillard qu'on retrouve souvent à l'avant ou dans le secteur chaud d'une perturbation. Contrairement au brouillard de rayonnement, le vent peut être modéré, des vitesses de 10 à 15kt sont fréquemment rencontrées.

Brouillard : processus de formation par rayonnement.



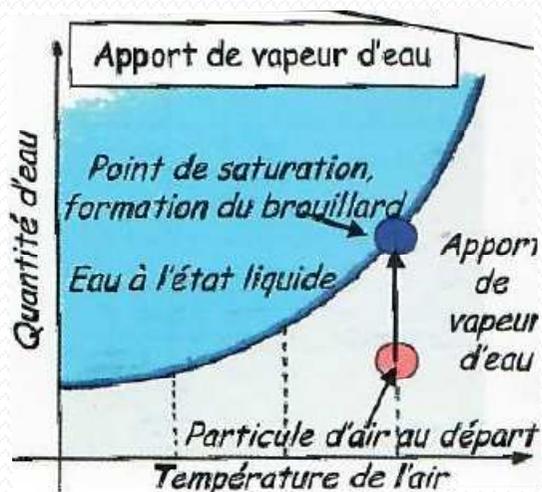
Situation en lien avec image satellite précédente.

Le brouillard de rayonnement s'est formé sur le continent sous un ciel clair.
Le brouillard d'advection se forme sur le proche Atlantique avec l'arrivée de l'air doux liée à la perturbation.

Brouillard : processus de formation par apport de vapeur

Le deuxième processus de formation de brouillard par saturation est **l'apport de vapeur d'eau**. Dans ce processus, la masse d'air s'enrichit plus ou moins en vapeur d'eau issue de l'évaporation des sols (après de la pluie ou de fortes averses) ou bien d'une étendue d'eau (rivière, lacs, mer). Ce processus sera d'autant plus efficace que la masse d'air au départ est humide et plutôt froide/fraîche.

Mais on rencontre aussi ce type de brouillard en été après de forts orages. En effet, après les orages, la masse d'air se rafraîchit parfois nettement. L'eau contenue dans le sol chaud va s'évaporer et venir enrichir la masse d'air en vapeur d'eau jusqu'à finir par la saturer et ainsi permettre au brouillard de se former (conditions de vent favorables mais nébulosité indifférente).



Brouillard : processus de formation par apport de vapeur

Un brouillard d'évaporation peut aussi se produire dans des situations moins caractéristiques.

Ainsi si une zone de précipitations persiste longtemps sur une région, l'apport d'eau que cela représente peut arriver à saturer petit à petit la masse d'air dans les basses couches.

Une partie des gouttes d'eau n'arrivent pas au sol, elles s'évaporent avant. Mais ce faisant elles contribuent à augmenter la teneur en vapeur d'eau de la masse d'air. Et ainsi petit à petit amener celle-ci à saturation.

Cela sera d'autant plus possible que si la masse d'air avant la pluie était déjà très humide. Si le vent est modéré, on aura le plus souvent du stratus, mais si le vent est faible et si en plus on a un refroidissement, alors ce sera du brouillard qui se formera.

Exemple local de brume/brouillard par apport de vapeur d'eau.

Ce processus d'advection se présente parfois à LFCL par vent faible à modéré de secteur Nord. Situé au Sud des vallées du Tarn et de l'Agout, cet aérodrome reçoit par advection l'air très humide de ces vallées. Cette humidité vient ajouter de la vapeur d'eau à un air déjà humide à cause de la proximité de l'Hers qui le borde et donc augmenter le Td.

Si l'écart T-Td est déjà faible, cette advection va le réduire à zéro : l'air se sature et la condensation forme des stratus bas qui progressivement envahissent l'aérodrome et parfois jusqu'au sol (brouillard) et assez rapidement !

Bien entendu ce vent de nord peut aussi amener directement le brouillard ou les stratus formés au nord du terrain.

Brouillard : dissipation.

La dissipation des brouillards est aussi une chose pas toujours évidente à prévoir, surtout l'heure de dissipation...

Pour dissiper un brouillard il y a deux façons :

- soit on réchauffe la masse d'air et le brouillard -> prévision de température.
- soit la masse d'air subit un brassage mécanique par le vent -> prévision de vent.
- soit le brouillard est purement évacué par le vent -> prévision de vent.

Le brouillard de rayonnement se forme souvent par ciel clair. Aussi, dès le lever du soleil, ses rayons vont **augmenter la température**. Dès lors que cette augmentation sera suffisante, **les gouttelettes en suspension vont s'évaporer**, puis la **masse d'air va s'assécher** de plus en plus et la visibilité va augmenter et le **brouillard se dissiper** complètement.

Il va falloir prendre en compte plusieurs paramètres :

- l'épaisseur du brouillard : plus la masse d'eau à évaporer est importante, plus cela prend du temps,
- la saison : en hiver le chauffage peut être insuffisant et la dissipation n'intervient pas,
- la couverture nuageuse qui va arriver après la formation du brouillard : celle-ci empêchera les rayons du soleil de chauffer...

Brouillard : dissipation.

Cas classique : l'évolution en stratus.

Le brouillard assez épais va le plus souvent d'abord évoluer en stratus. Le réchauffement à la base du brouillard va créer une toute petite turbulence qui va d'abord faire s'élever sa base.

Le réchauffement se poursuivant, c'est le stratus lui-même qui va peu à peu se dissiper.

La dissipation par brassage mécanique revient à prévoir l'évolution du vent dans la zone.

Le vent à un action mécanique sur la masse d'air qui modifie le gradient de température dans les très basses couches. Ceci aura tendance à faire diminuer voire annuler l'inversion de température. Cette destruction de l'inversion permet au brouillard de « monter » et d'évoluer en stratus. Ce stratus évoluera ou pas suivant le réchauffement dont il pourra profiter.

En situation anticyclonique cette augmentation du vent interviendra quand cet anticyclone va se déplacer, le gradient de pression va à nouveau augmenter et le vent aussi.

Typiquement si l'anticyclone sur l'Europe centrale se décale vers l'est, le vent de sud va augmenter sur le pays et peut-être venir dissiper ou évacuer les brouillards qui ont pu se former la nuit avant.

=> Le vent d'autan est un très bon dissipateur de brouillard, mais peut aussi amener des stratus formés par advection sur le Languedoc...

Brouillard : dissipation.

Dans certains cas, essentiellement au cœur de la saison hivernale, le brouillard de rayonnement peut persister toute la journée (chauffage diurne insuffisant, couche trop épaisse et trop dense), voire plusieurs jours d'affilée si les conditions synoptiques (de grande échelle) n'évoluent pas.

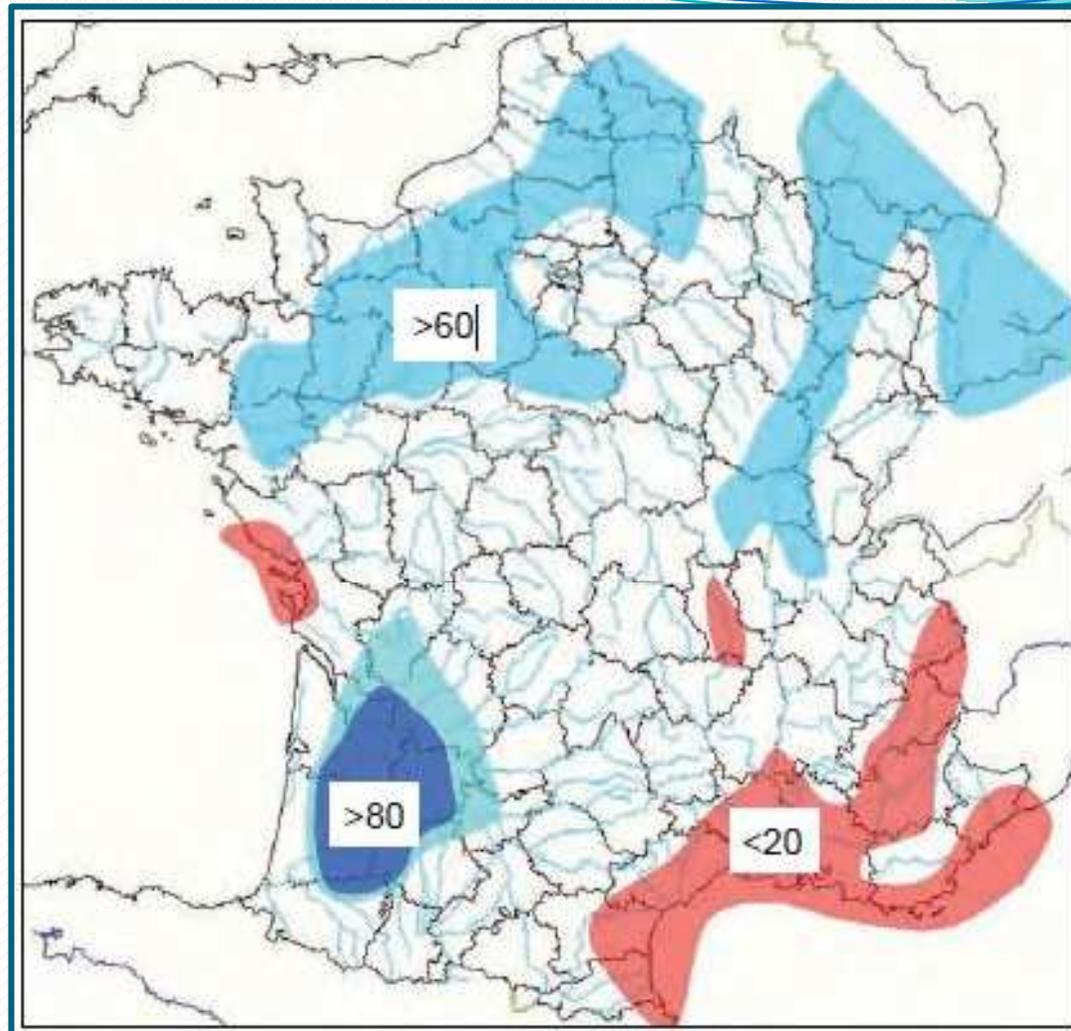
Il peut également évoluer en stratus qui perdurent jusqu'au soir. Dans ces conditions, la nuit suivante, le brouillard a du mal à se reformer, car les stratus inhibent le refroidissement nocturne.

On constate aussi parfois que la dissipation du brouillard intervient plus vite près des grandes villes par effet « d'îlot de chaleur » que les grandes villes représentées.



*Effet d'un îlot de chaleur industriel (usine sidérurgique d'Isbergues – 62) sur la dissipation d'une nappe de brouillard de rayonnement, le 13 octobre 2006.
Photo : Cédric Lahaeye*

Brouillard : climatologie du nombre de jours de brouillard en France



Répartition annuelle des zones de brouillard, en nombre moyen de jours. Pour les occurrences supérieures à 60 jours ; seules les zones d'altitude inférieure à 300 m ont été prises en compte.

D'après Kessler et Chambraud, 1990.

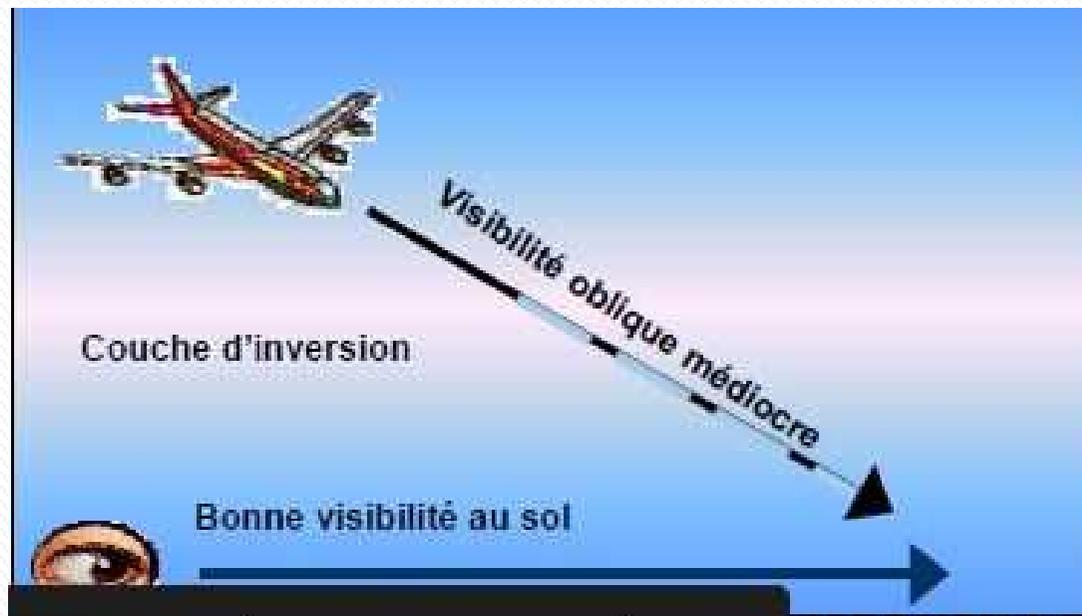
Brouillard : petit effet secondaire à sa dissipation

Un autre phénomène auquel on ne pense pas souvent.

Lorsque le brouillard ou stratus se dissipe, la visibilité horizontale devient bonne et souvent proche de 10km....

Mais en fait c'est parfois très trompeur... Une partie de l'humidité reste présente et vient se bloquer sous la couche d'inversion à une hauteur variable mais parfois inférieure à 2000ft (altitude du tour de piste). Or cette humidité va engendrer un effet miroir et donner une visibilité oblique très mauvaise voire nulle!

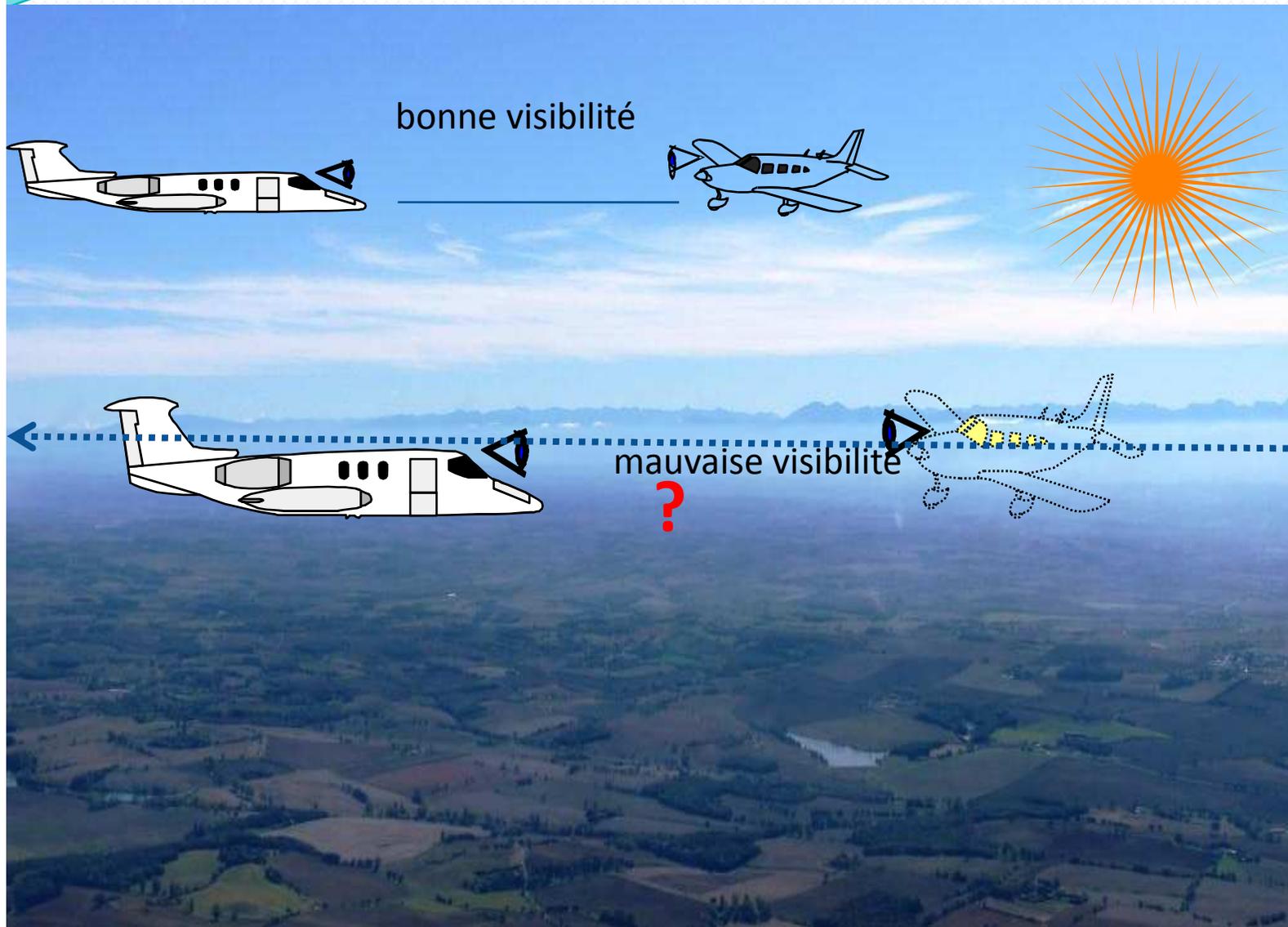
Cet effet est d'autant plus marqué que l'on est face au soleil, donc typiquement au retour vers Lasbordes en hiver (soleil toujours bas)



Et là on dit merci au contrôleur qui va vous donner position et cap à suivre pour trouver la base...

Histoire personnelle vécue à LFCL.

Brouillard : petit effet secondaire à sa dissipation



Couche
d'inversion

Brouillard : ses petites-cousines les entrées maritimes...

Il s'agit de nuages bas type stratus ou stratocumulus advectés depuis la mer vers l'intérieur des terres, hors de toute zone frontale. La progression à l'intérieur des terres peut varier de quelques centaines de mètres à plusieurs dizaines de kilomètres. Ces entrées maritimes peuvent se transformer en brouillard par élévation du relief.

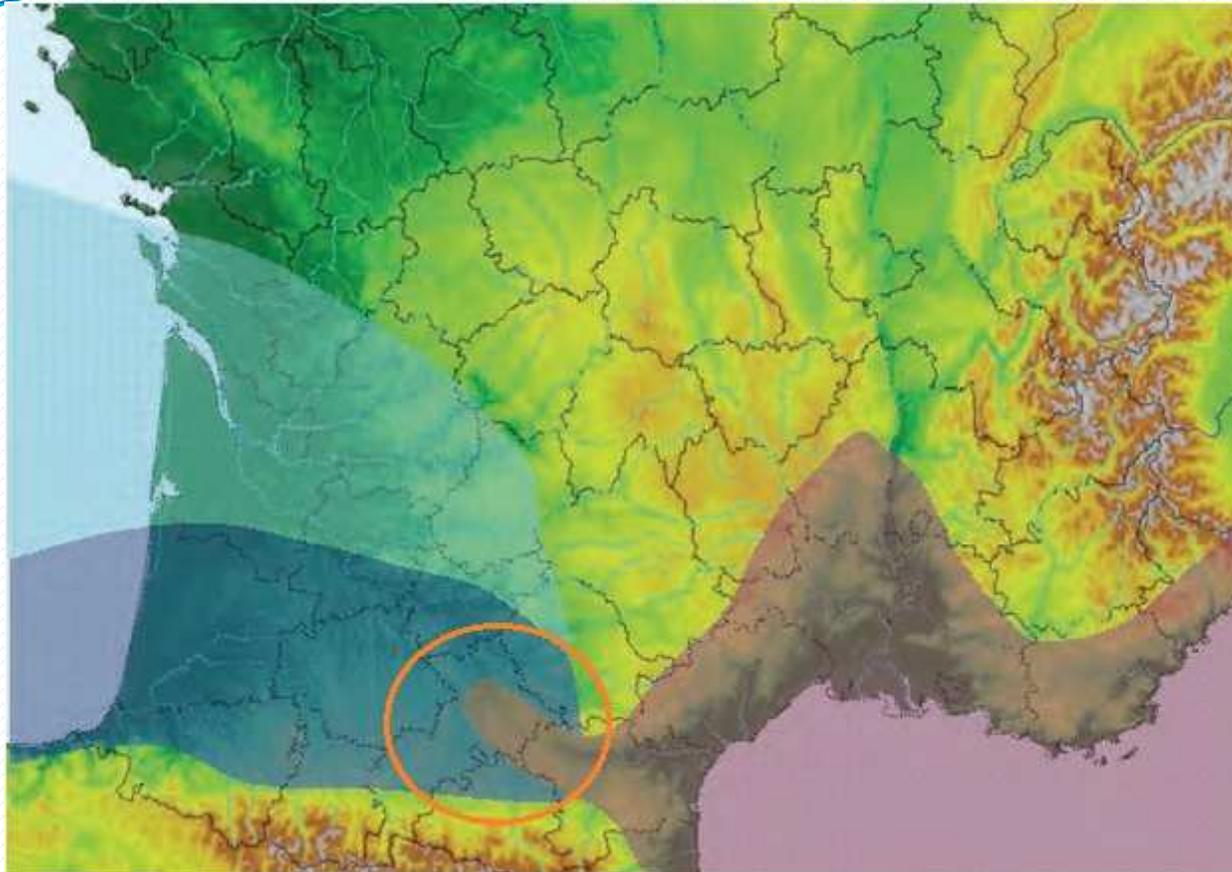
Les conditions favorables à leur formation sont :

- présence d'un flux maritime bien établi dans les basses couches, prenant sa source bien au large (il ne s'agit pas de brises), et advectant de l'air doux et très humide ;
- présence d'une inversion de température dans les basses couches, piégeant l'humidité au dessous ;
- la présence d'une inversion suggère des conditions plutôt anticycloniques, tandis que l'advection d'air doux et humide suggère des conditions plus perturbées.

En France, ce phénomène s'observe surtout dans deux cas :

- en Méditerranée, à la fin d'une période anticyclonique, lorsque le flux s'oriente au secteur S à SE dans les basses couches => région toulousaine touchée si vent d'autan et surtout en hiver,
- sur l'Atlantique, lorsque le flux s'oriente à l'ouest à l'avant d'un front froid peu actif ou passant plus au nord, cas fréquent en fin de printemps et en été => région toulousaine touchée lorsque le vent s'oriente ouest ramenant des stratus formés sur le Golfe de Gascogne

Brouillard : ses petites-cousines les entrées maritimes...



Cette carte montre les zones d'influence des entrées maritimes : en bleu les entrées maritimes atlantiques, en rouge les entrées maritimes méditerranéennes. On voit que Toulouse peut être touché par les deux types, il faut donc toujours y être attentif dès que l'on suppose les conditions favorables.

Brouillard : sa prévision avec Aéroweb

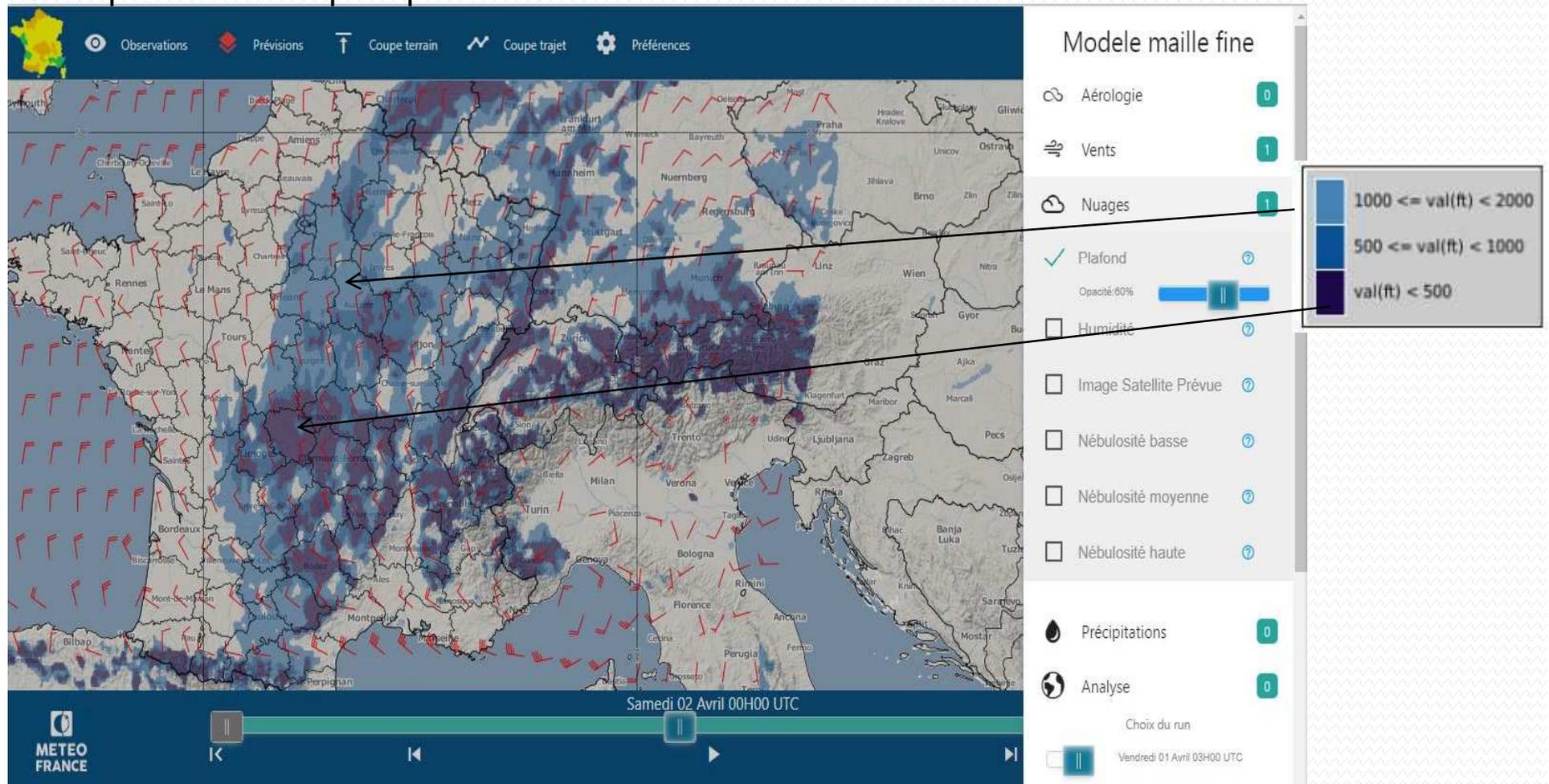
Prévoir le brouillard c'est prévoir une visibilité et un plafond (éventuellement).

Ces paramètres sont disponibles dans l'onglet

Produits complémentaires => Prévision/observation

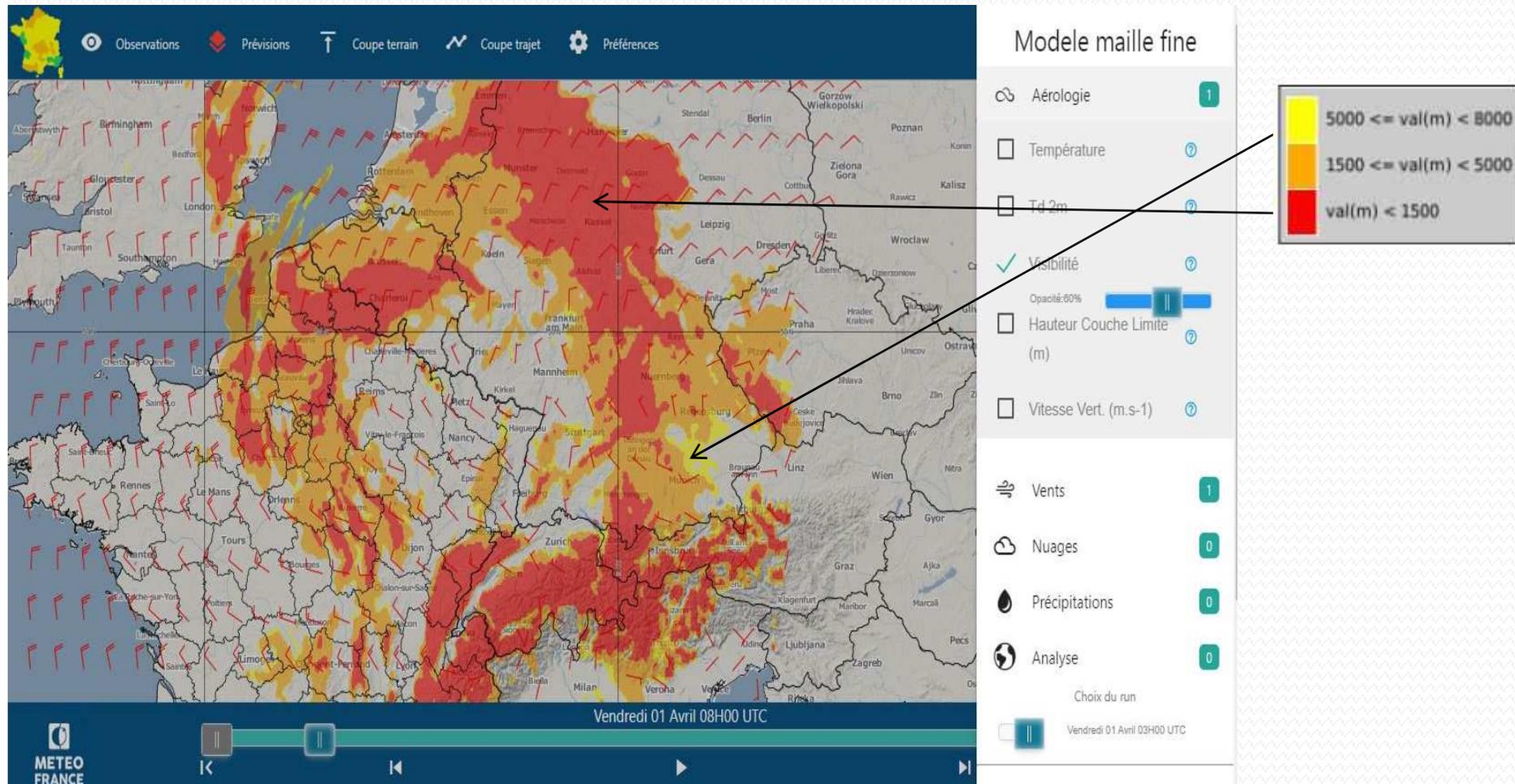
Produits complémentaires
Sigmet graphique (France)
Prévision/Observation

Exemple d'un champ de plafond :



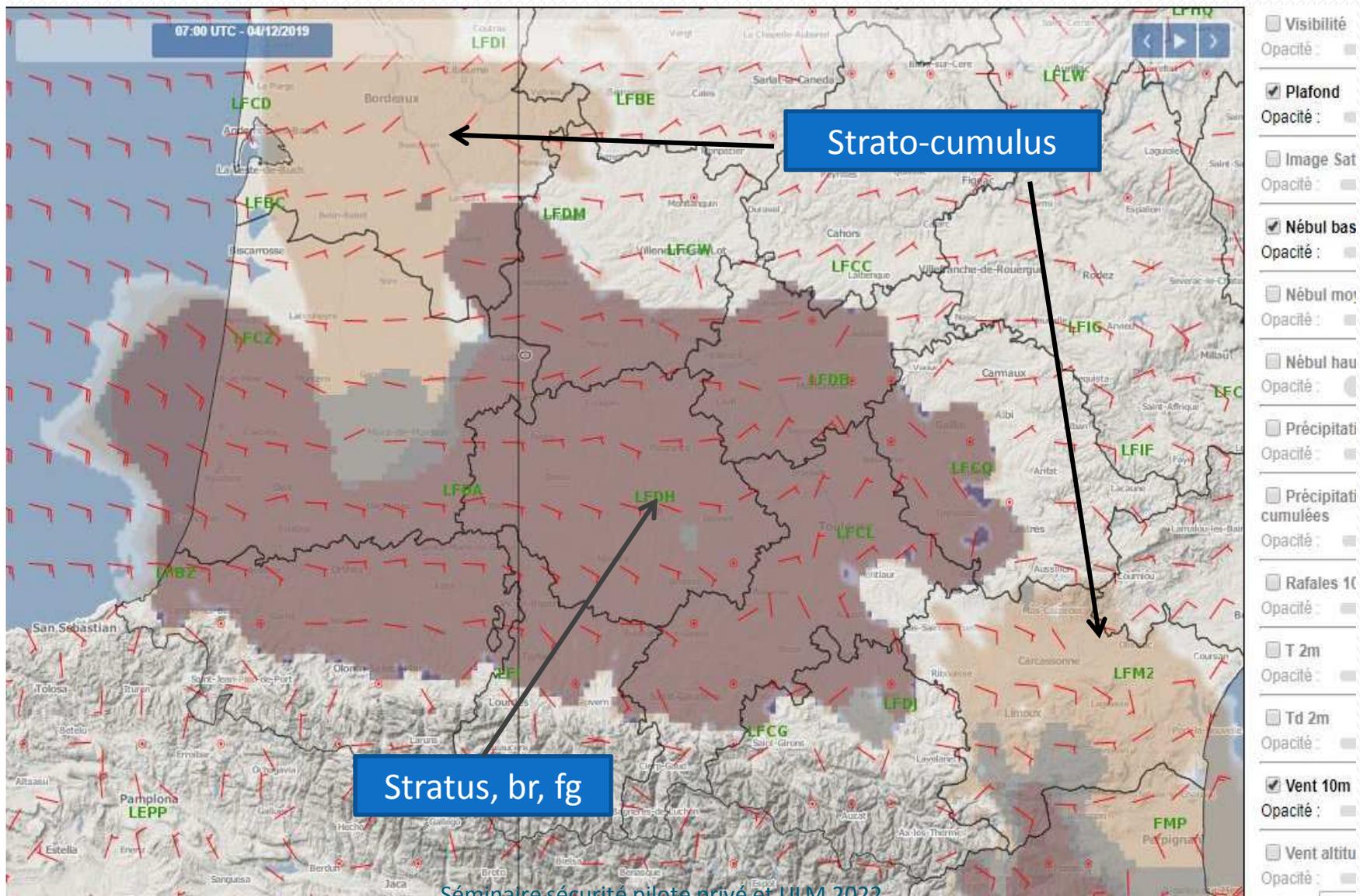
Brouillard : sa prévision avec Aéroweb

Exemple d'un champ de visibilité :



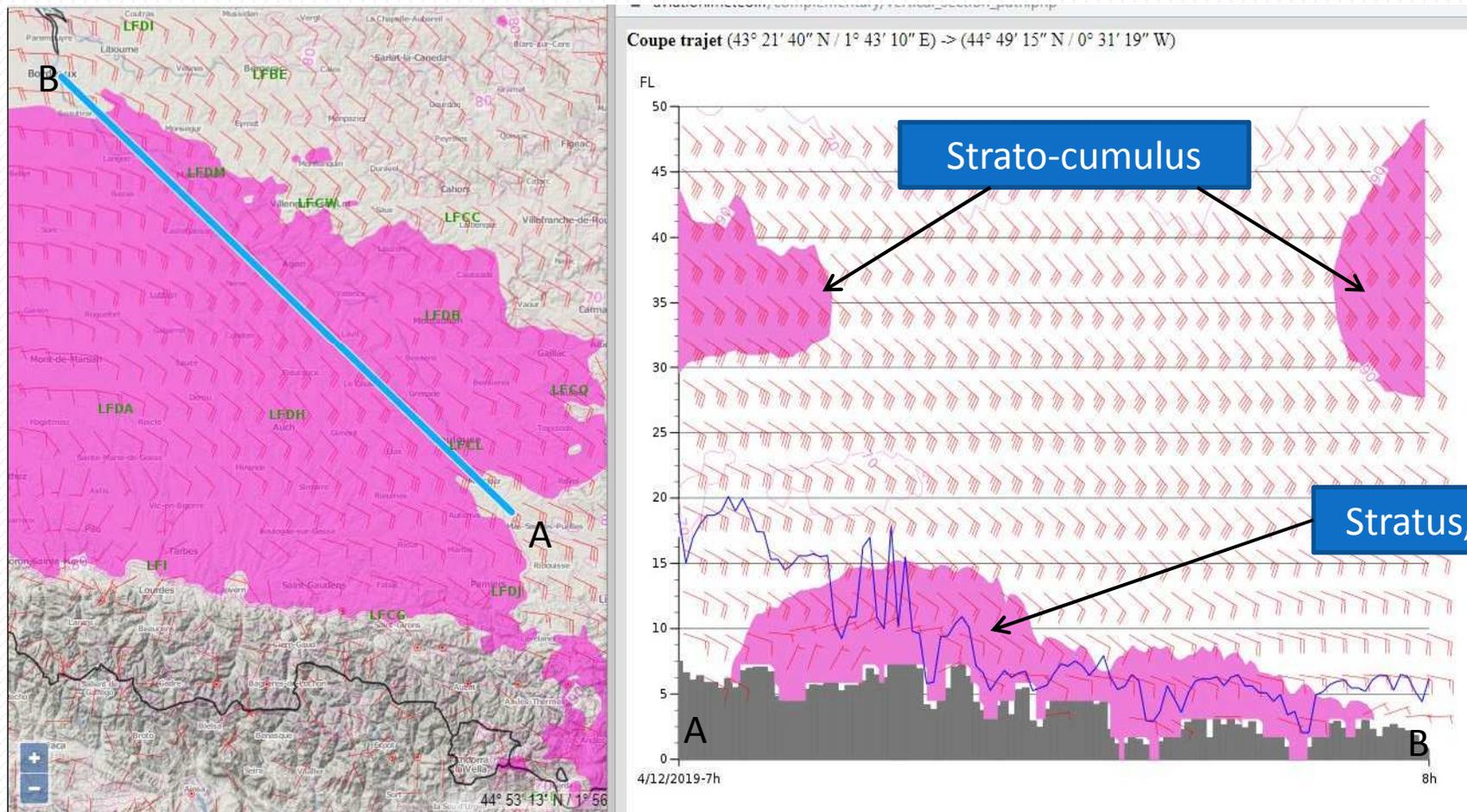
Brouillard : sa prévision avec Aéroweb

On peut superposer le champ Plafond avec le champ Nébulosité basse pour discriminer les nuages les plus bas des autres au-dessus de 2000ft qui posent moins de problème



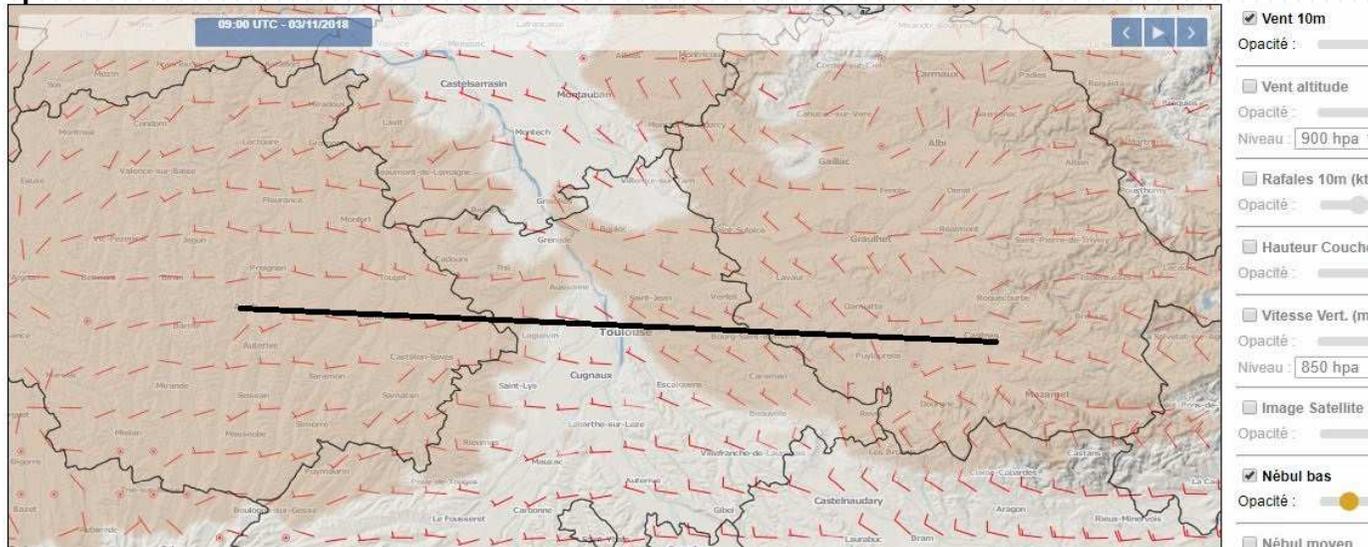
Brouillard : sa prévision avec Aéroweb

Si l'on fait une coupe d'humidité au niveau du sud-ouest, on retrouve bien les stratus et brouillard présent au sud de la Garonne, et les Sc >2000ft de part et d'autre.



Brouillard : exemple d'un trajet DH/CK

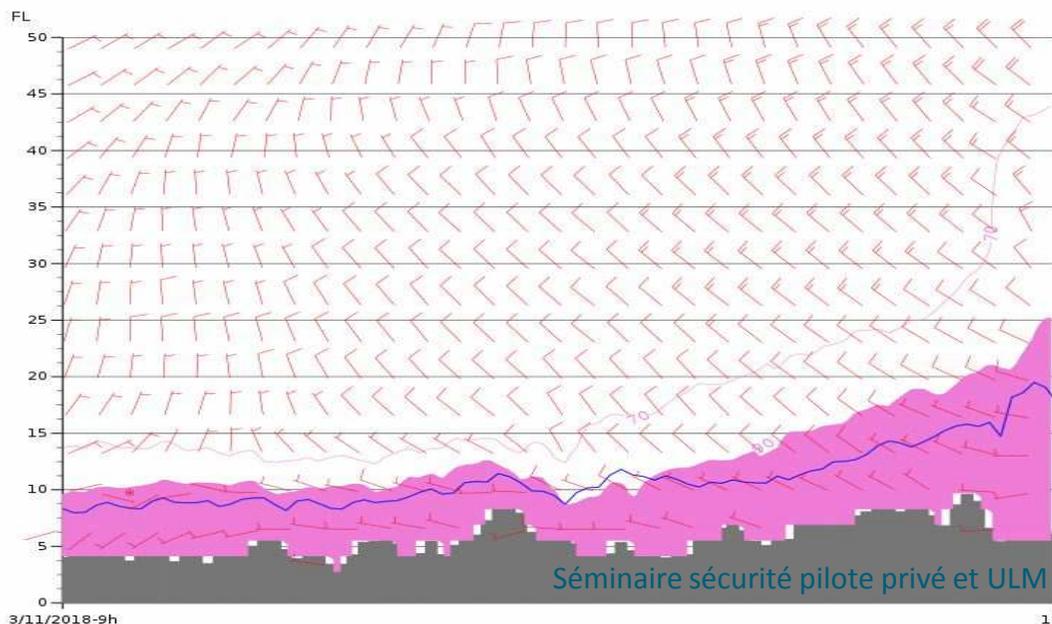
On envisage un vol DH/CK (Auch/Castres) le lendemain matin avec un départ vers 10h locales. Situation anticyclonique avec nuages bas prévus et on cherche à savoir vers quelle heure on pourra décoller...



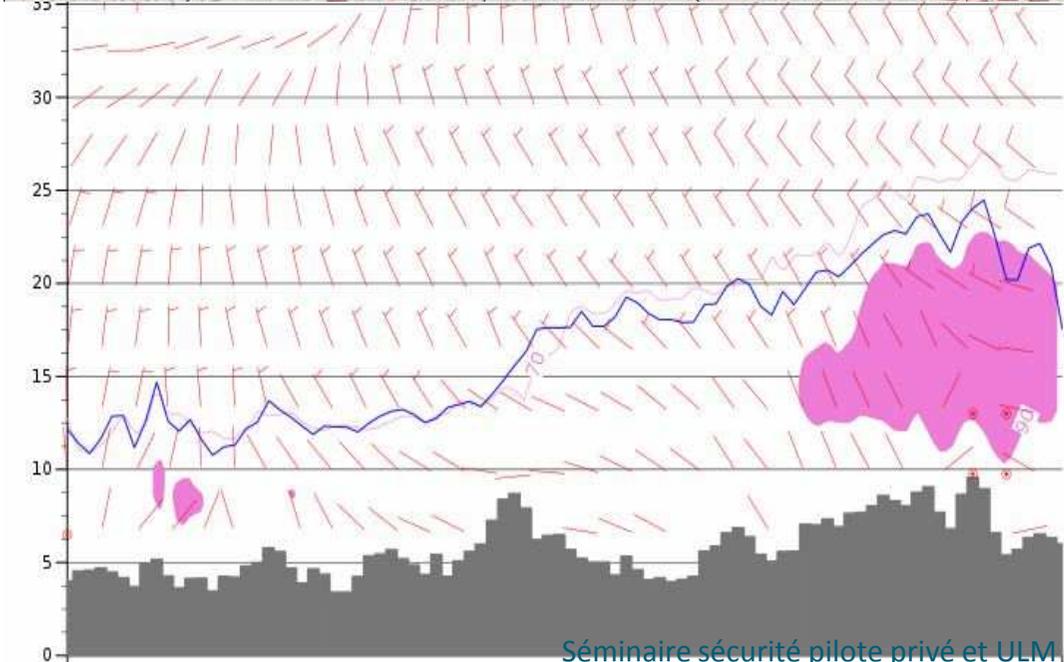
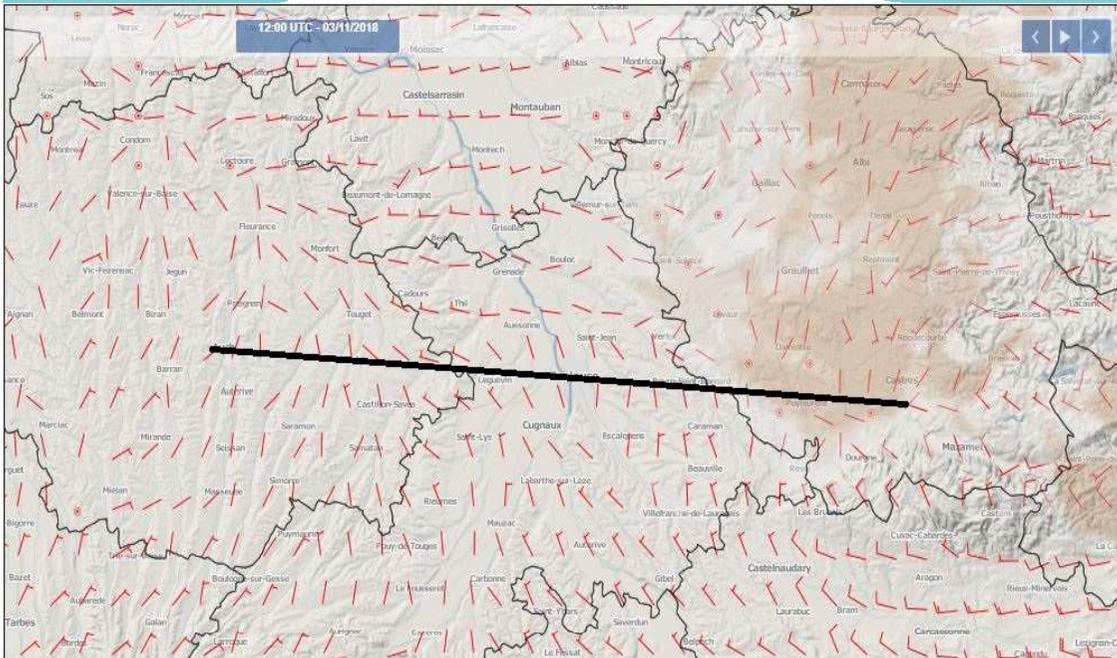
09Z

A 09Z le modèle Arome prévoit une forte nébulosité de basses couches. Afin de savoir à quoi cela correspond, la coupe verticale est nette et claire : c'est du brouillard/St sur le sud-ouest. Le vol n'est pas possible avant 09Z.

Coupe trajet (43.947, 0.049) -> (43.547, 2.252)



Brouillard : exemple d'un trajet DH/CK



- Vent 10m
Opacité : 100 %
- Vent altitude
Opacité : 100 %
Niveau : 900 hpa
- Rafales 10m (kt)
Opacité : 51 %
- Hauteur Couche Limite (m)
Opacité : 100 %
- Vitesse Vert. (m.s-1)
Opacité : 100 %
Niveau : 850 hpa
- Image Satellite Prévue
Opacité : 70 %
- Nébul bas
Opacité : 44 %
- Nébul moyen
Opacité : 100 %

Heure de début :
2018/11/03 12h UTC

Durée : 1 H

Niveau maximal de vol :
FL050

12Z

A 12Z la couche de nuages bas semble se déchirer, plus laborieusement vers Castres. La coupe en Hu et HCLi montre bien cette évolution à l'assèchement et à l'élévation des bases, mais pas encore totale vers l'arrivée. Noter que malgré une absence de Nbas, on trouve encore un peu d'humidité vers Auch et une HCLi très basse : attention à la visi oblique dans ce genre de cas. Vers Castres une évolution en petits cumulus s'amorce.



N'oubliez jamais de consulter la météo avant de partir :

- METAR / TAF

- TEMSI

- WINTEM

- SIGMET

- Mais aussi :

- IMAGES SATELLITES ET RADAR

- PRODUITS COMPLEMENTAIRES

- Sites internet météo d'observations participatives (application Météo France; meteociel ; infoclimat)