

TP Circulation globale et prévision météorologique régionale

UE Météorologie LU2ST045

Jean-Baptiste Madeleine*, Florent Brient
Sorbonne Université

Mars 2022

Dans ce TP, nous allons explorer le climat de la Terre par le biais d'un modèle de prévision numérique du temps (PNT, voir cours 5). Dans une première partie, nous analyserons les caractéristiques *climatiques* de notre planète, c'est-à-dire l'état des variables du système en moyenne, sur des échelles de temps longues, typiquement plusieurs mois. Dans une deuxième partie, nous étudierons les caractéristiques *météorologiques* de l'atmosphère, sur des échelles de temps bien plus courtes, typiquement quelques jours.

Nous analyserons pour cela les résultats de deux simulations réalisées grâce au modèle de PNT développé à l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL) de Sorbonne Université, appelé LMDZ ("LMD" pour le Laboratoire de Météorologie Dynamique où il est développé, et "Z" pour Zoom, car le modèle permet de zoomer, c'est-à-dire de raffiner la grille sur une région donnée). Il est utilisé notamment pour les simulations de changement climatique du GIEC¹, ainsi que pour la simulation de nombreuses planètes du système solaire (Mars, Vénus, Saturne. . .) et exoplanètes.

La première partie du TP est basée sur une simulation climatique, représentant l'état moyen typique de la Terre dans sa configuration actuelle². La simulation de la seconde partie du TP est une prévision météorologique : le modèle est initialisé du mieux possible par les observations d'un jour donné, et prévoit à partir de ce jour l'évolution du temps dans les jours qui suivent³.

La simulation climatique que nous utiliserons dans la première partie a une résolution de 144 points selon la longitude x , 143 points selon la latitude y et 79 points selon l'altitude z . Cela correspond typiquement à des mailles de 200 km en longitude sur 100 km en latitude. Sur la verticale, les niveaux sont espacés de quelques dizaines de mètres proche de la surface puis s'espacent de plus en plus en montant dans la troposphère.

La simulation météorologique utilisée dans la seconde partie a une résolution de 96 points selon la longitude x , 96 points selon la latitude y et 79 points selon l'altitude z . La grille est

*Les simulations et diagnostics utilisés dans ce TP sont le fruit d'années de travail par toute l'équipe du modèle climatique LMDZ. Pour ce TP, plus particulièrement, Ionelat Musat a mis au point les météogrammes, Artem Feofilov et Frédérique Cheruy gèrent la chaîne opérationnelle de prévision, Abderrahmane Idelkadi a réalisé les simulations longues climatiques, Geneviève Sèze a sélectionné les observations de satellites géostationnaires, et enfin Frédéric Hourdin et toute l'équipe œuvrent au quotidien et depuis des années pour rendre facilement utilisable notre modèle par les étudiants et le partager avec eux. Merci également à Déborah Bardet d'avoir relu et testé l'intégralité du sujet.

1. Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat ;
2. Distance au Soleil, paramètres orbitaux, quantité de gaz à effet de serre, propriétés de la surface dont la végétation, les calottes glaciaires, etc.
3. Techniquement, il y a beaucoup de façons de faire cela. Dans notre cas, nous utilisons les prévisions du centre européen (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ou ECMWF) pour guider notre modèle à l'extérieur d'un domaine couvrant la France et ses environs, tandis que notre modèle calcule librement la météorologie à l'intérieur de ce domaine.

étirée afin que la résolution soit meilleure sur la France, comme illustré sur la figure 1, pour atteindre des mailles d'environ 50 km.

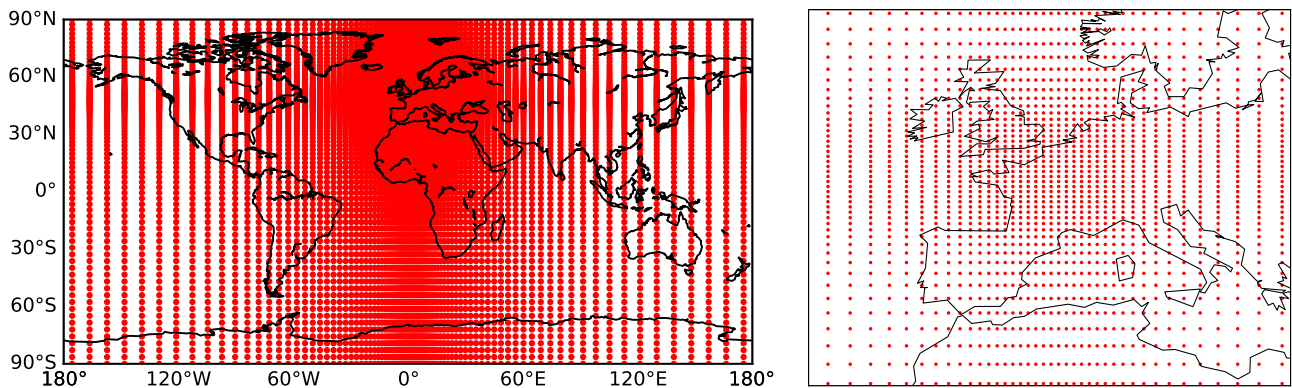


FIGURE 1 – Grille du modèle dans le cas de la simulation météorologique zoomée.

Les résultats de ces simulations (les champs 3D et 2D du vent, de la température de surface, etc.) sont écrits dans des fichiers netCDF (Network Common Data Form), dont l'extension est `nc`. Ce format est partagé par tous les météorologues et climatologues du monde. Pour visualiser ces fichiers, nous utiliserons le logiciel *Panoply*⁴ qui permet de visualiser simplement le contenu de ces fichiers.

1 Climat et circulation globale

Dans cette première partie, nous allons donc analyser les grandes caractéristiques du climat par thème : d'abord le bilan radiatif (section 1.1), puis la dynamique atmosphérique globale (section 1.2) et enfin le cycle de l'eau (section 1.3). À l'aide du logiciel *Panoply*, ouvrir le fichier `climat.nc` qui est disponible sous Moodle. Ce fichier contient les valeurs d'un ensemble de variables en moyenne mensuelle, pour une année typique du climat actuel. Les variables contenues dans ce fichier sont décrites dans le tableau 1.

1.1 Bilan radiatif au sommet

Le climat reçoit son énergie, à 99,9%, du Soleil. Cette partie s'intéresse au bilan radiatif au sommet de l'atmosphère, qui contrôle la dynamique globale de l'atmosphère, cette dernière redistribuant spatialement l'énergie.

1. Faire une carte de l'éclairement incident au sommet de l'atmosphère `SWdnTOA`, et regarder son évolution au cours d'une année. Relier ces cartes à la figure 2, déjà vue en cours, et observer les variations saisonnières. La variable `SWdnTOA` correspond également à la courbe verte sur la figure 3.
2. Rappeler la définition de l'albédo de la surface terrestre. Regarder la variable correspondante, `alb1`, et expliquer ses variations saisonnières. Comment expliquer notamment les variations d'albédo (voir figure 4) en Sibérie? Dans l'océan Arctique? On pourra s'aider du tableau 2.
3. Regarder à présent l'éclairement réfléchi par la Terre, donné par la variable `SWupTOA`. Quels facteurs contrôlent majoritairement la quantité de rayonnement réfléchi par la Terre? On pourra s'aider d'autres variables, par exemple l'albédo `alb1` ainsi que le contenu en eau intégré des nuages `cldq`. Regarder enfin la densité de flux d'énergie restante au système

4. Il peut être téléchargé ici : <https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/download/>. Java doit également être installé sur la machine.

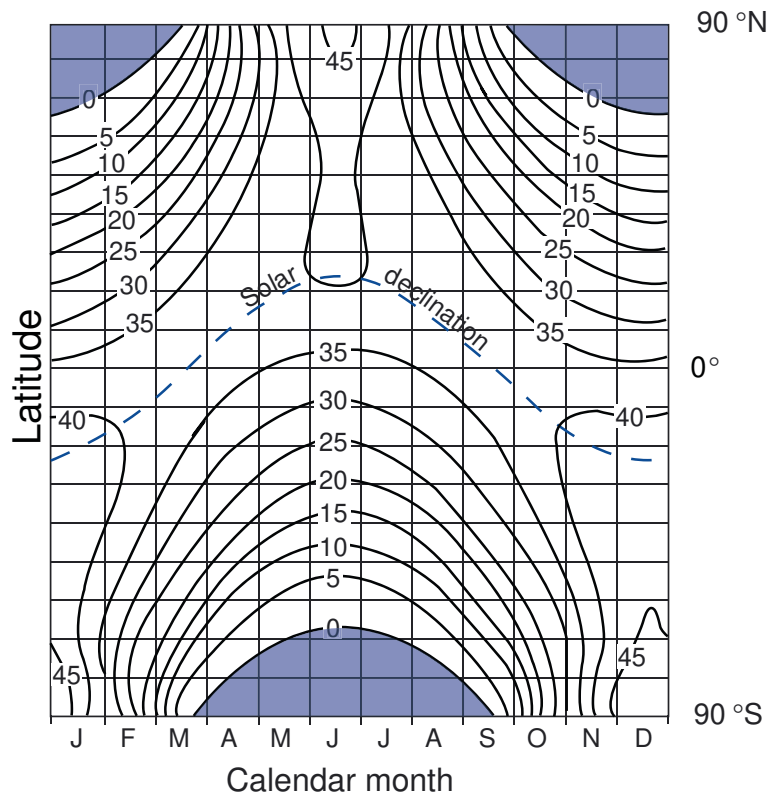


FIGURE 2 – Éclairement incident au sommet de l’atmosphère pour une surface horizontale, exprimé en $\text{MJ m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$. La ligne pointillée indique la déclinaison du Soleil, autrement dit la latitude pour laquelle le Soleil est au zénith à midi. L’intervalle en latitude est de 10° . On rappelle qu’un $\text{MJ m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$ est égal à 11.57 W m^{-2} .

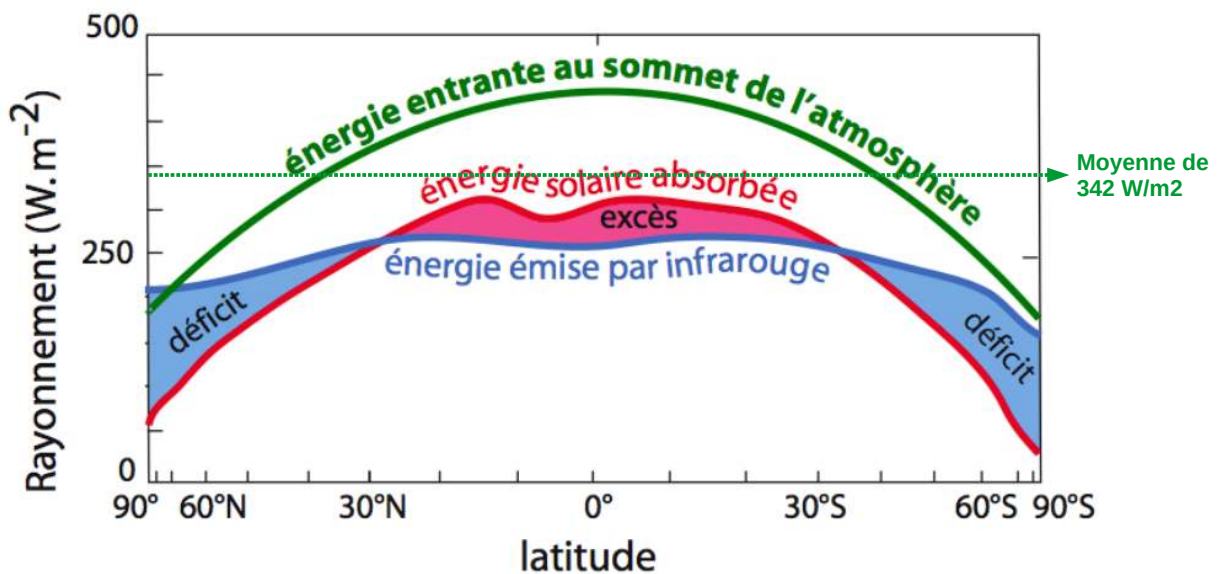


FIGURE 3 – Bilan radiatif au sommet de l’atmosphère terrestre. L’énergie entrante au sommet de l’atmosphère, en vert, est donnée par la variable SWdnTOA . L’énergie solaire absorbée, en rouge, est donnée par la différence $\text{SWdnTOA} - \text{SWupTOA}$, aussi appelée tops. L’énergie émise dans l’infrarouge, en bleu, est donnée par la variable top1 .

Nom	Description	Unité
lon	Longitude	Degrés
lat	Latitude	Degrés
presnivs	Niveaux de pression verticaux	Pa
time_counter	Axe temporel	Secondes
phis	Géopotential en surface gz	$m^2 s^{-2}$
SWdnTOA	Éclairement solaire incident au sommet	$W m^{-2}$
SWupTOA	Éclairement solaire réfléchi au sommet	$W m^{-2}$
tops	Éclairement solaire entrant au sommet	$W m^{-2}$
topl	Émittance infrarouge sortante au sommet	$W m^{-2}$
nettop	Bilan radiatif au sommet de l'atmosphère	$W m^{-2}$
alb1	Albédo de la surface	
psol	Pression à la surface	Pa
slp	Pression au niveau de la mer	Pa
cldq	Masse d'eau nuageuse totale de la colonne	$kg m^{-2}$
prw	Masse d'eau précipitable (liquide ou solide) totale dans la colonne	$kg m^{-2}$
t500	Température sur la surface isobare à 500 hPa	K
z500	Altitude de l'isobare à 500 hPa	m
u500	Vent zonal (positif vers l'est) à 500 hPa	$m s^{-1}$
v500	Vent méridien (position vers le nord) à 500 hPa	$m s^{-1}$
u10m	Vent zonal (positif vers l'est) à 10 m	$m s^{-1}$
v10m	Vent méridien (position vers le nord) à 10 m	$m s^{-1}$

TABLE 1 – Description des variables contenues dans le fichier `climat.nc` et étudiées ici.

climatique, `tops`, qui est la différence entre ce qui arrive (`SWdnTOA`) et ce qui est réfléchi (`SWupTOA`).

4. Regarder enfin l'émittance infrarouge sortante au sommet de l'atmosphère, donnée par la variable `topl`. Commenter la distribution géographique de cette variable. Qu'est-ce qui contrôle les fortes diminutions de `topl` dans les tropiques ? À quelle saison et dans quelle région du globe l'infrarouge émis au sommet est-il le plus fort ? Pourquoi ? On pourra s'aider, encore une fois, d'autres variables.
5. En utilisant les noms de variable du modèle, le bilan radiatif au sommet de l'atmosphère s'écrit alors :

$$\text{nettop} = \text{tops} - \text{topl} = (\text{SWdnTOA} - \text{SWupTOA}) - \text{topl},$$

Surface	Albédo
Sol nu	0.17
Forêt de conifères	0.08
Forêt à feuilles caduques	0.15–0.2
Désert de sable	0.40
Neige fraîche	0.80–0.90
Glacier	0.2–0.4
Herbe verte	0.25
Glace de mer	0.5–0.7
Eau de mer (Soleil au zénith)	0.03–0.1

TABLE 2 – Exemples de valeurs d'albédo pour différents types de surfaces.

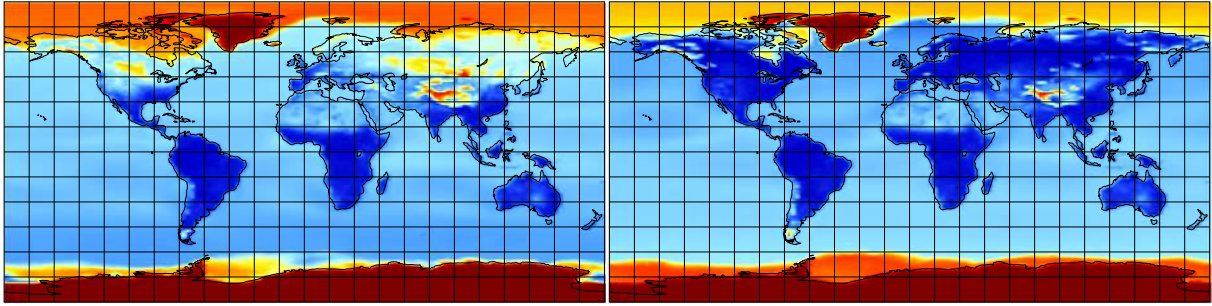


FIGURE 4 – Albédo de la surface en Décembre (gauche) et en Juin (droite).

Ceci correspond à la différence entre la courbe rouge (`tops`) et la courbe bleue (`top1`) sur la figure 3. Quelles sont les régions les plus déficitaires/excédentaires en énergie ?

6. En moyenne, la Terre tend vers l'équilibre radiatif. Rappeler ce qu'est l'équilibre radiatif. Compléter les densités de flux théoriques au sommet de l'atmosphère pour le modèle à une couche (schéma 5). L'albédo combiné de la surface et de l'atmosphère sera noté A_b et l'émissivité de l'atmosphère sera notée ϵ . Relier cette équation :

$$\text{nettop} = \text{tops} - \text{top1} = (\text{SWdnTOA} - \text{SWupTOA}) - \text{top1}$$

aux grandeurs théoriques du modèle à une couche.

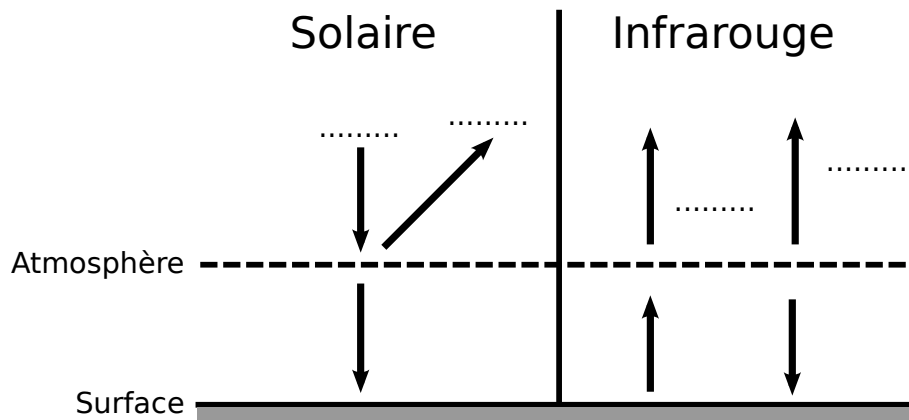


FIGURE 5 – Schéma des densités de flux dans un modèle simple à une couche.

1.2 Équilibre hydrostatique et dynamique

7. Visualiser la pression à la surface en Pa, donnée par la variable `psol`. Quelle est l'origine de ces variations de pression ? Tracer la valeur de `psol` en moyenne zonale⁵, grâce à la deuxième option de *Panoply* "georeference zonal average line plot". Grâce aux variations de `psol` ainsi qu'à l'équation hypsométrique, calculer l'altitude du plateau Antarctique. Vérifier votre résultat grâce au géopotentiel en surface `gz`, donné par la variable `phis`. On supposera une température moyenne $\langle T \rangle$ de 0°C .
8. Visualiser à présent la pression ramenée au niveau de la mer donnée par la variable `slp`. Rappeler la différence entre `psol` et `slp`. Identifier la ceinture anticyclonique subtropicale ainsi que les dépressions des moyennes latitudes. Regarder également `slp` en moyenne zonale. Quel est le mois où la différence de pression au niveau de la mer est-elle la plus grande entre

5. Une moyenne zonale est une moyenne selon la longitude.

30°N et 60°N ? Quel impact cela a-t-il sur le vent géostrophique moyen proche de la surface ? En utilisant la différence de pression observé sur la figure, estimer à cette saison le vent géostrophique moyen à 45°N. On prendra $\rho = 1 \text{ kg m}^{-3}$.

9. Regarder l'altitude de l'isobare à 850 hPa, nommée z_{850} . Rappeler pourquoi cette surface isobare est plus haute dans les tropiques que dans les hautes latitudes. D'après l'équilibre du vent géostrophique, quelle va être la direction principale de l'écoulement sur cette surface isobare ? Le vérifier en comparant z_{850} à une carte des vents au même niveau (utiliser pour cela les variables u_{850} et v_{850} , voir image 6).

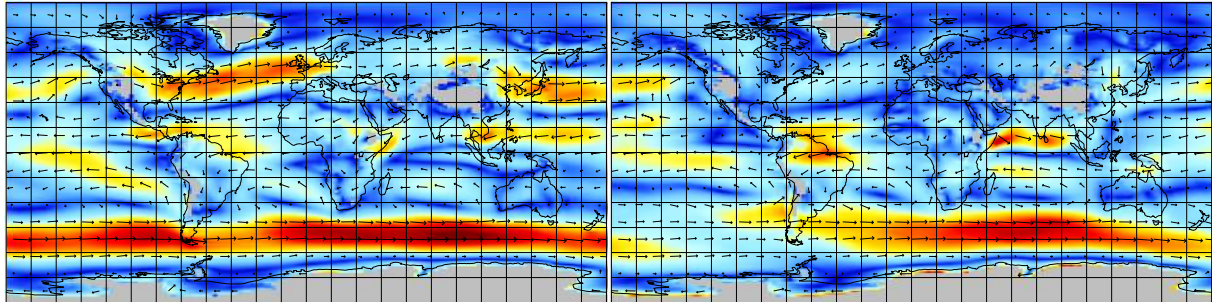


FIGURE 6 – Carte des vents à 850 hPa en Décembre (gauche) et en Juin (droite).

10. Tracer à présent l'altitude de l'isobare à 500 hPa (variable z_{500}) en moyenne zonale. Quel est le mois où la différence d'altitude de l'isobare est la plus grande entre 30°N et 60°N ? Déduire pour ce mois le vent géostrophique à 500 hPa à 45°N (voir TD2).
11. Regarder à présent les vents proches de la surface, en utilisant les variables u_{10m} et v_{10m} . Sur cette carte des vents, identifier les alizés, ainsi que les courant-jets.

1.3 Nuages et vapeur d'eau

12. Regarder l'humidité spécifique à 850 hPa (variable q_{850}) ainsi que la température au même niveau (variable t_{850}). Que remarque-t-on ?
13. Cartographier les nuages en regardant la colonne d'eau nuageuse cl_{dq} . Où se situent les nuages principalement ?
14. Identifier les régions les plus pluvieuses grâce à une carte de la colonne d'eau précipitable prw . Où se situent-elles ? On pourra s'aider de la carte du vent à 10 mètres.

2 Prévision météorologique régionale

Cette seconde partie propose d'analyser la prévision du temps pour la semaine à venir. Pour cela, nous procéderons en deux temps :

1. Bulletin météorologique basé sur le modèle :
 - Analyse des météogrammes ;
 - Analyse des cartes météorologiques ;
 - Approfondissement à l'aide des fichiers de simulation.
2. Analyse de la météorologie réelle :
 - Point quotidien ;
 - Mesures de stations météorologiques ;
 - Approfondissement à l'aide de cartes d'analyses et d'images satellite.

2.1 Bulletin météorologique

2.1.1 Météogramme

Un météoqramme résume les principales variables météorologiques simulées en un lieu donné sur une même figure. Un exemple de météoqramme est donné sur la figure 7. Il contient :

1. Un premier panneau donnant l'évolution des nuages sur la verticale, indiquant le rapport de mélange massique en grammes de gouttelettes/cristaux par kg d'air ;
2. Sur ce même panneau est indiqué la direction des vents. Cette figure est difficile à comprendre de prime abord, car les flèches donnent la direction du vent sur l'horizontal, et cette information est donnée sur un profil vertical. Mais les flèches violettes indiquent bien ici la direction du vent aux différents niveaux verticaux. Par exemple, la zone entourée montre que vers 9000 mètres d'altitude, les vents soufflent vers le Nord-Est ;
3. La température à 2 mètres en degrés Celsius ainsi que la température ressentie fonction de l'humidité (dite Humidex) ;
4. La vitesse du vent à 10 mètres ainsi que les possibles rafales en violet ;
5. La fraction nuageuse (trait noir), qui indique la fraction du ciel qui est couverte (0 = pas de nuages, 1 = ciel totalement couvert) ;
6. La pluie en vert (en mm/hr) ainsi que la CAPE (Convective Available Potential Energy), qui tend à être forte lorsque l'instabilité de l'atmosphère est grande (temps orageux).

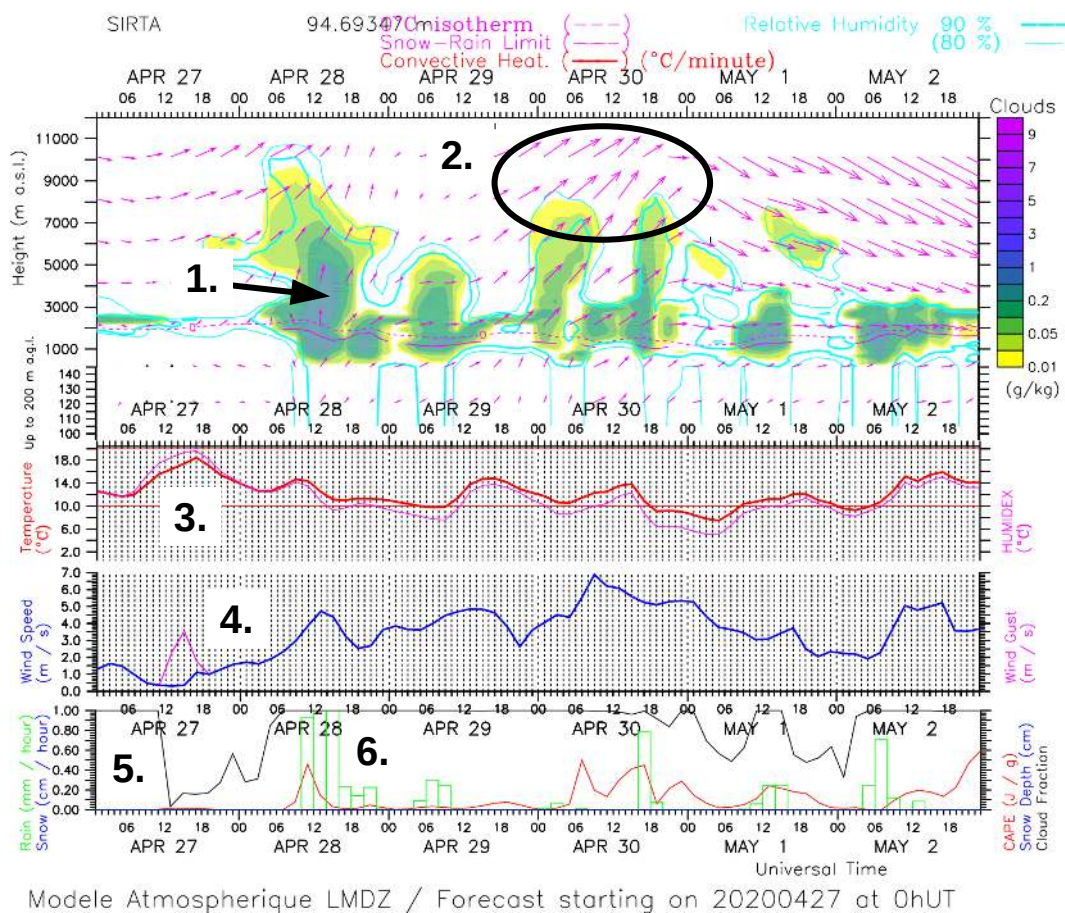


FIGURE 7 – Exemple de météoqrammes pour la station météorologique du Sirta (Palaiseau) du lundi 27 avril 2020 au samedi 2 mai 2020.

2.1.2 Cartes de prévision météorologique

Les cartes météorologiques sont de même type que celles utilisées lors du TD3, mais correspondent bien sûr à la situation actuelle. Chaque carte est une moyenne sur 2 heures :

- Dossier `pmer` : Carte de la pression au niveau de la mer en hPa. L'intervalle entre chaque contour est de 5 hPa.
- Dossier `pmer-cf` : Carte de la pression au niveau de la mer, à laquelle est ajoutée la couverture nuageuse entre 680 et 440 hPa, soit entre 3000 et 6500 m.
- Dossier `zt500` : Carte de z_{500} , l'altitude de l'isobare à 500 hPa. L'altitude est donnée en décamètres (dam), et l'intervalle entre chaque contour est de 5 décamètres, donc 50 mètres. Est ajoutée à cette carte la température de la surface isobare à 500 hPa en Kelvins (couleurs).

2.1.3 Fichiers de simulation

Pour analyser davantage les prévisions du modèle, il est possible d'ouvrir le fichier de résultat avec *Panoply*. Il faut pour cela le télécharger dans le dossier `simulation`.

2.2 Analyse de la météorologie réelle

L'analyse de la météorologie consiste à collecter au jour le jour les informations météorologiques disponibles pour comparer la réalité aux météogrammes prévus et confirmer ou pas la prévision établie.

2.2.1 Point quotidien

Cela passe d'abord par un point quotidien⁶ qui peut être établi facilement chaque jour. Un exemple de point est donné sur la figure 8.

2.2.2 Mesures de stations météorologiques

Le point quotidien peut être complété d'un résumé d'observations de stations météorologiques, donnant principalement la pression, la température, le vent, l'humidité, et la précipitation. Ce site public recueille plusieurs données de station :

<https://www.infoclimat.fr/graphiques-des-stations-meteo-temps-reel.html>
<https://www.meteo-villes.com/>

2.2.3 Approfondissement à l'aide de cartes et images satellite

Les prévisions peuvent être enfin comparées aux analyses, c'est-à-dire aux cartes établies après observations. On peut les trouver par exemple sur le site MétéoCentre :

<https://meteocentre.com/analysis/map-surface.php?lang=fr&area=eur>

Il est possible également de suivre l'imagerie satellite pour mieux contraindre la couverture nuageuse :

<https://www.ssec.wisc.edu/data/geo/#/animation?satellite=met-prime>
<https://fr.sat24.com/fr>
<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>

6. Historiquement appelé CRQ pour Compte-Rendu Quotidien, il est aujourd'hui appelé TCM à Météo-France, pour Tableau Climatologique Mensuel.

	Phénomènes, éléments ou paramètres remarquables
mer. 1	Temps couvert, faiblement neigeux par moments avec réduction de la visibilité. Vent d'Est souvent violent, avant une baisse de régime en soirée.
jeu. 2	Journée grise et humide, faiblement neigeuse par intermittence. Mauvaise visibilité. Le vent d'Est souffle assez fort avant de faiblir en soirée.
ven. 3	Ciel très nuageux à couvert avec un peu de neige en matinée. Vent d'E faible. Visibilité médiocre le matin, devenant bonne ensuite.
sam. 4	Ciel couvert jusqu'à la mi-journée avec un peu de neige, ensuite très nuageux avec éclaircies en fin journée. Vent faible de direction variable.
dim. 5	Ciel couvert et bas toute la journée, excepté temporairement en matinée. Un peu de brouillard le matin et une petite chute de neige en fin de journée. Vent faible, généralement d'Ouest.
lun. 6	Très nuageux malgré une timide embellie en début d'après-midi. Bonne visibilité. Vent faible en journée de Sud puis d'Est.
mar. 7	Couvert avec chutes de neige en matinée, réduisant sérieusement la visibilité. Vent d'E fort à temporairement violent.
mer. 8	Ciel couvert toute la journée, avec une très bonne visibilité. Vent d'E à SE fort le matin, assez fort puis modéré l'après-midi.
jeu. 9	Quelques nuages en début de journée, laissant place à un ciel peu nuageux par la suite. Vent d'Est faible à modéré le matin, tournant Ouest l'après-midi.
ven. 10	Très belle journée ensoleillée avec une excellente visibilité (rares nuages). Vent d'Est modéré au petit matin, plus faible ensuite.

FIGURE 8 – Exemple de point quotidien pour le mois de Janvier 2020 à la station Dumont D'Urville, en Antarctique.

2.3 Ce qui est attendu de vous !

Pour cette partie, il vous est demandé plusieurs points :

Avant le TP2 :

1. Choisir une période de 7 jours sur les quatre semaines entre le TP1 et le TP2 (fichiers disponibles sur Moodle). Analyser l'émagramme choisi de la station parisienne en décrivant, jour par jour (sur 7 jours), le temps attendu pour les jours à venir ;
2. Établir un point quotidien de la station sur les 7 jours choisis et comparer au météoگرامme prévu, en regardant régulièrement par la fenêtre et en utilisant des données d'une station météorologique proche (site *InfoClimat*) ;

Pendant le TP2 :

3. Choisir une journée qui vous intéresse sur cette semaine. Compléter et annoter les cartes météorologiques correspondantes (en y ajoutant talwegs, dorsales, advections thermiques, éventuels fronts chauds et froids, voir TD3) ;
4. Revenir sur les cartes de prévision du jour que vous aviez choisi, et de comparer vos cartes prévues à la situation réellement observée sur les cartes d'analyse (site *MétéoCentre*) et les images satellite (*Met-Prime*).