Devoir 1
À remettre le 31 janvier à 9h

Exercice 1.1
M. Orage est un prévisionniste de la chaine de télévision «OSM» dont les compétences en analyse laissent à désirer. La figure 1.1 montre un exemple d'une analyse de température faite par M. Orage. À noter :

- La bifurcation de l'isotherme 30°F
- Le croisement des deux isothermes 40°F et 45°F

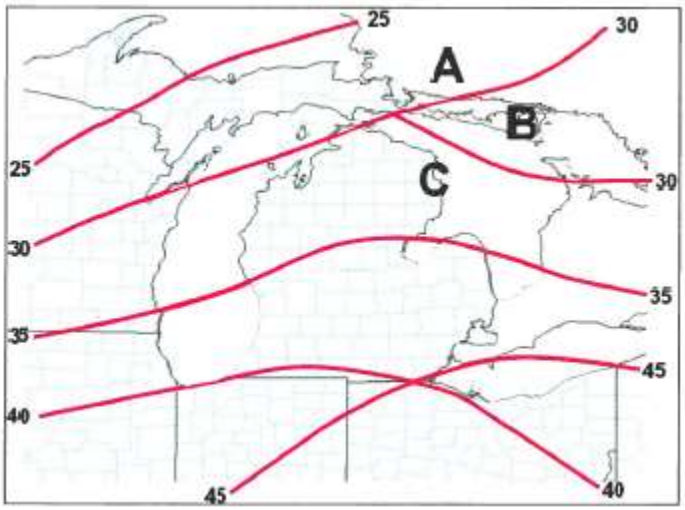

Figure 1.1 – Un exemple d'une analyse du champ de température erronée

1) En appliquant les règles du traçage des isolignes données dans le TP#2 déterminez :
   a) L'intervalle des températures possibles dans la région A
      Réponse : Les températures dans la région A se situent dans l'intervalle 25 °F < T_A <30 °F.
   b) L'intervalle des températures possibles dans la région C
      Réponse : Les températures dans la région C se situent dans l'intervalle 30 °F < T_A <35 °F.
   c) Démontrez que la bifurcation de l'isotherme 30°F conduit à une inconsistance dans les températures possibles dans la région B, ce qui veut dire que cette bifurcation est physiquement irréaliste.
      Réponse : Les températures dans la région B doivent être simultanément plus élevées (branche supérieure de l'isotherme) et moins élevées que 30°F (branche inférieure de l'isotherme). La situation est physiquement impossible.
2) À quelle inconsistance amène l'intersection des isothermes 40°F et 45°F?
   Réponse :
   1) point d'intersection : la température est égale à 40 °F puisque situé sur l'isotherme 40, mais aussi de 45°F puisque l'isotherme 45 y passe aussi.
   2) région située entre les isothermes 40 et 45 à droite du point d'intersection : les températures devraient être supérieures à 45°F (elle est située à droite de l'isotherme 45) mais aussi inférieures à 40°F (elle est située à gauche de l'isotherme 40).
   La situation est physiquement impossible.

Exercice 1.2. Avant de faire cet exercice, lisez l'annexe mathématique à la fin de ce document.

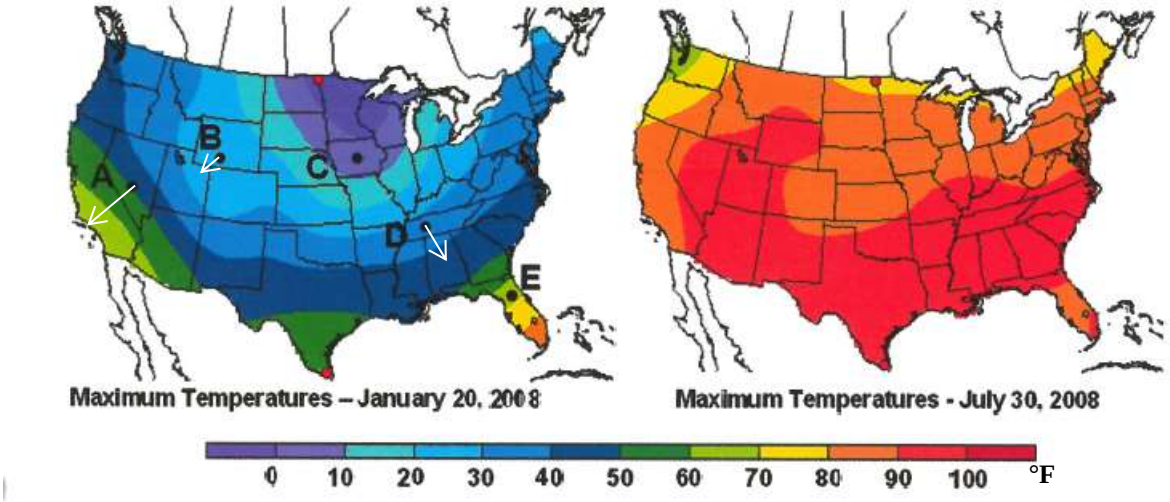

Figure 1.2 – Cartes des températures maximales aux États-Unis le 20 janvier 2008, à gauche, et le 30 juillet 2008, à droite.

La figure 1.2 montre deux cartes de températures maximales des États-Unis : une en hiver, le 20 janvier 2008, et une autre en été, le 30 juillet 2008.

1) Les points noirs étiquetés A, B, C, D, E indiquent 5 villes. Estimez la température maximale à chacun des endroits le 20 janvier et le 30 juillet 2008.

	Température le 20 janvier (°F)	Température le 30 juillet (°F)
A	50	93
B	25	92
C	5	85
D	34	94
E	68	88

Quand les points ne se situent pas sur une isotherme on doit estimer la température par une interpolation linéaire.

Réponse :

Janvier : $T_A = 50°F$; $T_B = 25°F$; $T_C = 5°F$; $T_D \sim 34°F$; $T_E \sim 68°F$

Juillet : $T_A = 93°F$; $T_B = 92°F$; $T_C = 85°F$; $T_D \sim 94°F$; $T_E \sim 88°F$

2) Brownsville (25,9°N; 97,5°W) est une ville du sud du Texas (point rouge). La petite communauté de Pembina (49,0°N; 97,2°W) se situe au nord de Brownsville au croisement des frontières Dakota du Nord, Minnesota et Manitoba (point rouge).

a) Estimez le gradient de température entre Brownsville et Pembina en hiver et en été, en sachant que chaque degré de latitude correspond à une distance de 111 km.

Réponse : Par définition de gradient de température moyen entre les deux villes

$$\left|\vec{\nabla}T\right| = \frac{dT}{dn} \cong \frac{\Delta T}{d} = \frac{(T_B - T_P)[°F]}{d\,[km]}$$

Température à Brownville : en été $T_B = 100$ °F; en hiver $T_B = 60$ °F;

Température à Pembina : en été $T_P = 75$ °F; en hiver $T_P = -2$ °F;

Distance entre les deux villes = d ~ (49,0° – 25,9°).111[km/°] = 2564,1 km

$$\left|\vec{\nabla}T\right|_{été} = \frac{(T_B - T_P)[°F]}{d\,[km]} =$$

$$\left|\vec{\nabla}T\right|_{été} = 0,00975\,°F\,/\,km$$

$$\left|\vec{\nabla}T\right|_{été} = 0,00975\,[°F\,/\,km]\cdot 1,6[km\,/\,mille]$$

$$\left|\vec{\nabla}T\right|_{été} = 0,0156\,°F\,/\,mille$$

$$\left|\vec{\nabla}T\right|_{hiver} = \frac{(T_B - T_P)[°F]}{d\,[km]} =$$

$$\left|\vec{\nabla}T\right|_{hiver} = 0,02418\,°F\,/\,km$$

$$\left|\vec{\nabla}T\right|_{hiver} = 0,0387\,°F\,/\,mille$$

b) Notez la grande différence entre ces deux gradients. Pensez-vous que ce fait est une caractéristique du climat ou une anomalie observée en 2008?
Réponse : Le gradient est approximativement 2,5 fois plus élevé en hiver qu'en été. Ceci est une caractéristique climatique puisque pendant l'hiver, la différence d'ensoleillement entre les régions polaires et les régions tropicales est maximale.

3) Dans le cours, nous présentons une méthode pour calculer un gradient en utilisant la différence d'un paramètre entre deux points donnés, comme vous avez surement fait en 2). Cette définition peut être facilement adaptée pour estimer le gradient en un seul point. Pour visualiser comment faire cela, imaginez un segment de droite, de n'importe quelle longueur arbitraire, centré sur l'emplacement d'intérêt. Estimez ensuite la valeur du paramètre aux extrémités du segment. Vous pouvez calculer le gradient en utilisant les valeurs estimées et la distance représentée par la longueur du segment. Ce gradient ainsi calculé est, essentiellement, une estimation du gradient au point qui est à mi-chemin entre les extrémités du segment, dans la direction du segment. Il est une des composantes du vecteur gradient**.**
Bien sûr, la valeur calculée dépend de la longueur et de l'orientation de la ligne. Traitons d'abord la longueur. À mesure que la ligne devient de plus en plus courte, le gradient calculé représente mieux les changements locaux proches du point. Plus la ligne est longue, plus le gradient représente une vision à grande échelle des variations spatiales du paramètre.
En ce qui concerne l'orientation de la ligne, vous pouvez théoriquement calculer les gradients dans n'importe quelle direction. Vous aurez la composante du vecteur gradient selon cette direction. En général, cependant, on aimerait avoir le vecteur gradient. Pour bien définir un vecteur, il faut connaître l'intensité ou grandeur du vecteur, sa direction et son sens. Les gradients sont calculés à angles droits par rapport à l'iso-ligne locale qui traverse le point d'intérêt. Cette approche capte le plus grand taux de changement au voisinage du point, c'est-à-dire du vecteur gradient, et est la direction utilisée dans la définition mathématique du gradient. Le sens du vecteur est vers les grandeurs les plus élevées. **(Si vous ne l'avez pas fait encore, je vous invite à lire l'annexe 1 pour bien connaître le vecteur gradient).**

En utilisant cette dernière approche, calculez l'intensité (en °F/mille) et représentez par une flèche dans la figure le vecteur gradient aux points A, B et D. Comme échelle de longueur, sachez que la longueur de la frontière entre le Dakota du Nord et le Dakota du sud est égale à 350 milles.
Note : si le point se situe sur une isotherme, il est facile de trouver l'orientation de la ligne (doit être perpendiculaire à l'isotherme). Dans d'autres cas, il faut estimer la forme de l'isotherme qui passe par le point.

Solution :
Pour évaluer les distances on utilise comme échelle la longueur de la frontière entre le Dakota du Nord et le Dakota du sud (7 mm dans la carte équivalent à 350 milles)

A : d = 6 mm . (350 milles/ 7 mm) = 300 milles ; ΔT = 60 °F – 40°F = 20°F : $\nabla T = 0,07\,°F\,/\,mille$
B : d = 10 mm . (350 milles/ 7 mm) = 500 milles ; ΔT = 30 °F – 20°F = 10°F : $\nabla T = 0,02\,°F\,/\,mille$
C : d = 5 mm . (350 milles/ 7 mm) = 250 milles ; ΔT = 40 °F – 30°F = 10°F : $\nabla T = 0,04\,°F\,/\,mille$

La direction du gradient en chacun des points est représentée par les flèches blanches dont la grandeur est quasi-proportionnelle à sa grandeur.

Exercice 1.3 : L'AMS (American Meteorological Society) tient une rencontre annuelle chaque janvier. Le lieu de rencontre change chaque année mais, quel que soit le choix, mère nature se manifeste toujours en les offrant un temps intéressant. En 2007, la rencontre a eu lieu à San Antonio, TX. La figure 1.3 montre le pointage des observations dans cette région, le 13 janvier 2007 à 00Z, la veille du début des conférences. San Antonio est représentée par l'étoile. Analysons cette carte pour avoir une idée du temps qu'il fait.

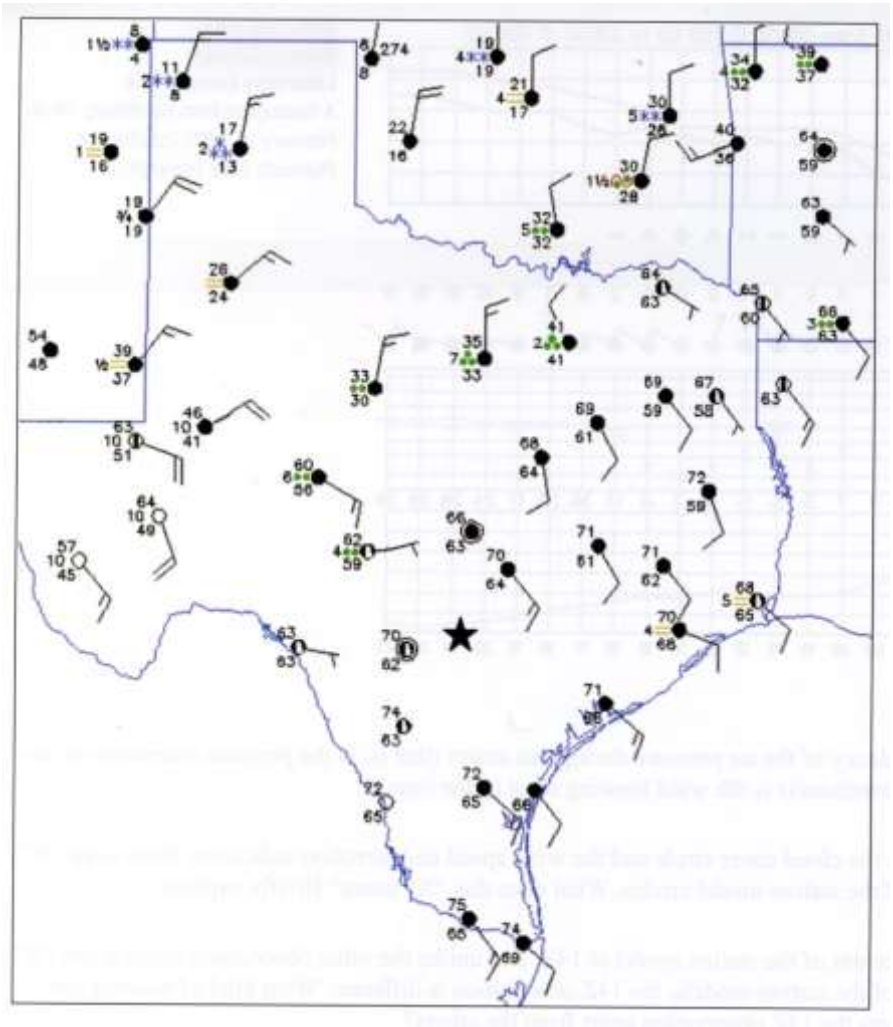

Figure 1.3 : carte des observations relevées le 13 janvier 2007 à 00Z, au Texas et aux états environnants.

a. Tracer les isothermes à des intervalles de 10 °F.
Voir le document exercice1.3-dev1-solution.pdf

b. Vous avez déjà entendu parler de fronts et vous savez aussi que les fronts sont associés à du mauvais temps. Les fronts sont des frontières entre deux masses d'air de température et d'humidité différentes. Ainsi, un front est une région où le gradient de température est très important. Dans ces régions, les isothermes sont plus proches. Pour déterminer cette région, colorer en gris la région où les températures sont égales ou supérieures à 60°F, ce qui représente de l'air relativement chaud. Colorier d'une autre couleur la région où la température est égale ou inférieure à 30°F, ce qui représente de l'air relativement froid. La région non ombrée est la région de rencontre entre les deux masses d'air. Le front est dans cette région. Voir le document exercice1.3-dev1-solution.pdf

c. Utiliser les données sur le vent pour analyser le comportement du vent (surtout sa direction) d'un côté et d'autre du front.

On voit que le vent dans la masse d'air froid, proche du front, est plus intense que le vent du coté chaud. La direction dans la masse d'air froid a une forte composante du nord, pendant que dans la masse d'air chaud, le vent est plus du sud-est.

d. Pour déterminer le déplacement d'un front froid, on observe la vitesse de l'air du côté de la masse d'air froid. Si le vent a une composante verticale au front, le front se déplace dans cette direction (le front avance). Avec cette règle en tête, est-ce que les températures à San Antonio tendent à augmenter ou à diminuer après le 13 janvier 2007? Justifiez la réponse en vous appuyant sur les données de la carte.

La température tendra à diminuer à San Antonio. La vitesse de déplacement de l'air froid est supérieure (et de sens contraire) à la vitesse de déplacement de la masse d'air chaud. On est en présence d'un front froid qui se déplace dans la direction de San Antonio (l'étoile).

Exercice 1.4

La surface d'un corps noir isolé reçoit un rayonnement d'irradiance F = 1 kW m^{-2}. Elle est entourée d'un espace vide dont on peut supposer qu'il est au zéro absolu.

a) Pourquoi on suppose que la température de l'espace environnant est = 0 K?
b) Quelle température prend la surface à l'équilibre?

Solution :

a) Si on considère que le corps est entouré de vide, il n'y a pas de matière dans son environnement, donc le mouvement thermique environnant (utilisé dans la définition de température) est nul. Ainsi, par définition de température (proportionnelle à l'énergie cinétique moyenne des particules microscopiques qui constituent la matière), la température dans le vide ne peut pas être supérieure à 0 K.

b) Données : F = 1 kW m^{-2} ; corps noir
Demande : La température d'équilibre T_e = ? K
Connaissances : Le corps noir est en équilibre thermique lorsque ses pertes d'énergie (irradiance émise par le corps) sont égales aux gains (le rayonnement reçu). Puisque l'espace environnant est supposé au zéro absolu, il ne rayonne pas; le corps noir reçoit donc seulement l'irradiance F. Puisque le corps est noir, il absorbe tout le rayonnement reçu et émet selon la loi de Stefan-Boltzmann.

Équilibre : rayonnement reçu par unité de temps et par unité de surface = rayonnement émis par unité de temps et par unité de surface :

F = F*

1000 W/m^2 = σT^4,

$$T = \left(\frac{F}{\sigma}\right)^{1/4} = \left(\frac{10^3 Wm^{-2}}{5{,}7\times10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}}\right)^{1/4} = 364K$$

Le corps est à l'équilibre à la température de 364 K.

Exercice 1.5

1) En sachant que le maximum d'émission solaire est observé à la longueur d'onde λ_m = 0,475 µm :

   a. Calculez la température de couleur du Soleil.

   Solution :

   Données : λ_m = 0,475 µm

   Demande : Température du soleil = ? K

   Connaissances : La loi qui fait le lien entre le maximum d'émission d'un corps noir et sa température est la loi de déplacement de Wien.

   De la loi de déplacement de Wien :

$$\lambda_m[\mu m] = \frac{2897[\mu m\,K]}{T} \Rightarrow T = \frac{2897[\mu m\,K]}{0{,}475[\mu m]} = 6099\,K \cong 6100\,K$$

   La temprature du Soleil, consideré comme un corps noir avec l'émission maximale d'énergie à la longueur d'onde λ_m = 0,475 µm est de 6100 K.

   b. Trouvez l'irradiance monochromatique de longueur d'onde λ_m émise par le Soleil.

   La loi de Planck nous donne la radiance monochromatique d'un corps noir :

   Données : λ_m = 0,475 µm ; Température du soleil = 6100 K

   Demande : $F_{\lambda m}$(T=6100 K) = ? W.m^{-2}. µm^{-1}

   Connaissances : La loi de Planck nous donne la radiance spectrale en fonction de la température :

$$B_\lambda(T) = \frac{c_1\lambda^{-5}}{\pi\left(\exp\left(c_2/\lambda T\right)-1\right)}$$, c_1 = 3,74 ×10^{-16} Wm^2 et c_2 = 1,45×10^{-2} mK.

   Comme le rayonnement d'un corps noir est isotrope, l'irradiance monochromatique est

$$F_\lambda(T) = \pi B_\lambda(T) = \frac{c_1\lambda^{-5}}{\left(\exp\left(c_2/\lambda T\right)-1\right)} \cong c_1\lambda^{-5}\exp\left(-c_2/\lambda T\right)$$

$$F_\lambda(T) = 3{,}74\cdot10^{-16}\left[Wm^2\right]\cdot\left(0{,}475\cdot10^{-6}[m]\right)^{-5}\cdot\exp\left(-1{,}45\cdot10^{-2}[m\cdot K]/\left(0{,}475\cdot10^{-6}[m]\cdot6100[K]\right)\right)$$

$$F_\lambda(T) = 3{,}74\times10^{8}\left[W\cdot m^{-2}\cdot\mu m^4\right]\cdot\left(0{,}475[\mu m]\right)^{-5}\cdot\exp\left(-1{,}45\cdot10^{4}[\mu m\cdot K]/\left(0{,}475[\mu m]\cdot6100[K]\right)\right)$$

$$F_\lambda(T) = 1{,}08\cdot10^{8} W\,m^{-2}\mu m^{-1}$$

   L'irradiance monochromatique de longuer d'onde λ_m = 0,475 µm émise par le Soleil est égale à 1,08.10^8 W.m^{-2}. µm^{-1}.

   c. En utilisant les informations sur le spectre électromagnétique (notes de cours), faites une liste des types de radiation émises par le Soleil (e.g., ultraviolet, infrarouge,

etc.) : ultraviolet, visible et infrarouge proche

2) Si la surface terrestre se comportait comme un corps noir et que sa température était 0˚C,
   a. Quelle serait l'irradiance terrestre?
      Données : corps noir à la température de 0°C = 273 K
      Demande : F = ? W/m^2
      Connaissances :
      En supposant que la surface terrestre se comporte comme un corps noir on peut utiliser la loi de Stefan-Boltzmann pour calculer l'irradiance
      $$F = \sigma T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \left[Wm^{-2}K^{-4} \right] \cdot \left(273K \right)^4 = 315 Wm^{-2}$$
      L'irradiance terrestre est égale à 315 W/m^2
   b. Quelle serait la longueur d'onde du maximum d'émission?
      Données : T = 273 K;
      Demande : λ_m = ? µm
      Connaissances :
      Loi de Wien :
      $$\lambda_m \left[\mu m \right] = \frac{2897 \left[\mu m\, K \right]}{T} = \frac{2897 \left[\mu m\, K \right]}{273 \left[K \right]} = 10,6\, \mu m$$
      La longueur d'onde à laquelle l'irradiance spectrale est maximale et égale à 10,6 µm.

   c. En utilisant la classification des divers types de rayonnement électromagnétique, quel est le type de rayonnement émis par la surface terrestre? Infrarouge

Bibliographie

Monteiro, Eva, 2018 : Cours SCA2626 : présentations ppt et TPs
Triplet, J.P. et G. Roche, 1997: Météorologie générale.
Grenci and Nese, 2008 : A World of Weather

Annexe mathématique

Champs scalaires et vecteur gradient

La pression est une grandeur scalaire; en tous points de l'atmosphère, elle s'exprime par un simple nombre. Il en va de même pour la température; par contre, le vent s'exprime à l'aide de trois éléments caractérisant un vecteur : direction, sens et intensité.

L'ensemble de tous les «vecteurs vents» pris à un instant donné dans l'atmosphère constitue ce qu'on appelle le **champ de mouvement atmosphérique**; c'est un champ vectoriel, tandis que le champ de pression et celui de température correspondent à ce qu'on appelle des **champs scalaires**.

Nous allons porter notre attention sur ces derniers et montrer comment, à l'aide d'un vecteur baptisé «vecteur gradient», il est possible de décrire la structure locale d'un champ scalaire. Cette notion est d'un grand intérêt en météorologie.

Soit une fonction scalaire F, telle qu'à un instant donné, à chaque point M de coordonnées (x_M,y_M,z_M) corresponde une valeur et une seule de F, désigné par F(x_M,y_M,z_M). L'ensemble de tous valeurs de F constitue le champ à trois dimensions F(x,y,z).

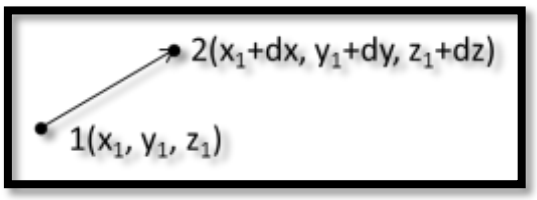

Figure A.1

Alors au point 1 (figure A.1) de coordonnées (x_1,y_1,z_1) correspond F_1(x_1,y_1,z_1). Au point 2, très proche du point 1, et de coordonnées (x_1+ dx,y_1 + dy,z_1+dz) correspond F_2(x_1+ dx,y_1 + dy,z_1+dz).

Appelons $d\vec{s} = dx\vec{i} + dy\vec{j} + dz\vec{k}$ le vecteur qui unit les deux points.

Puisque 2 est très proche de 1, F_2 est très peu différent de F_1 et peut s'écrire $F_2 = F_1 + dF$. La très petite variation dF s'exprime mathématiquement par la différentielle de la fonction F, à savoir :

$$dF = \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_{y,z} \cdot dx + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_{x,z} \cdot dy + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)_{x,y} \cdot dz$$

Où on reconnait ici les trois dérivées partielles de la fonction F par rapport à x, y et z.

Par définition, on appelle «gradient de F», le vecteur $\vec{\nabla}F = \frac{\partial F}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial F}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial F}{\partial z}\vec{k}$, $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ étant les vecteur unitaires sur les axes x, y et z respectivement.

La différentielle de la fonction apparait alors comme le produit scalaire entre le gradient de la fonction et le vecteur distance $d\vec{s} = dx\vec{i} + dy\vec{j} + dz\vec{k}$ et on peut écrire

$$dF = \vec{\nabla}F \cdot d\vec{s}$$

1) Quelle est la direction du vecteur $\vec{\nabla}F = \frac{\partial F}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial F}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial F}{\partial z}\vec{k}$ (gradient de F)?

Considérons dans l'espace une surface iso-F, c'est-à-dire une surface sur laquelle F (x,y,z) est constante. Si les points 1 et 2 sont situés sur cette surface, alors F a la même valeur dans les deux points, et $dF = \vec{\nabla}F \cdot d\vec{s}$ =0. Ceci veut dire que le vecteur gradient $\vec{\nabla}F$ est perpendiculaire au vecteur $d\vec{s}$ (distance entre les deux points) se situant dans une surface «iso-F». On peut conclure que :

Le vecteur gradient de F est perpendiculaire aux surfaces «iso-F».

2) Quel est son sens?

Soient deux points très proches 1 et 3 (figure A.2) avec $\vec{n}$ la normale à la «iso-surface» (donc dans la direction de $\vec{\nabla}F$) et dirigée, par exemple, vers les F croissants : $F_3 > F_1$.

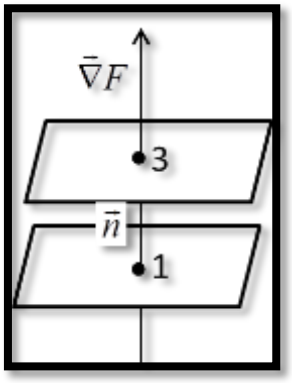

Figure A.2

Alors, allant de 1 vers 3, dF > 0. Soit $d\vec{n}$ la distance entre 1 et 3. Par définition de différentielle, $dF = \vec{\nabla}F \cdot d\vec{n} = \left|\vec{\nabla}F\right| \cdot \left|d\vec{n}\right| \cdot \cos\alpha > 0$ où α est l'angle entre les deux vecteurs. Or, comme le gradient a la même direction que la normale, l'angle α est égal à 0 ou π. Mais comme dF > 0, $\alpha = 0$ ce qui veut dire que :

Le vecteur gradient de F est orienté dans le même sens que la normale, c'est-à-dire dans le sens des F croissants.

Supposons maintenant que $\vec{n}$ est dirigée vers les F décroissants : $F_3 < F_1$.

Alors, allant de 1 vers 3, dF < 0. Soit $d\vec{n}$ la distance entre 1 et 3. Par définition de différentielle, $dF = \vec{\nabla}F \cdot d\vec{n} = \left|\vec{\nabla}F\right| \cdot \left|d\vec{n}\right| \cdot \cos\alpha < 0$ où α est l'angle entre les deux vecteurs. Or, comme le gradient a la même direction que la normale, l'angle α est égal à 0 ou π. Mais comme dF < 0, $\alpha = \pi$ ce qui veut dire que :

Le vecteur gradient de F est orienté dans le sens contraire à la normale, c'est-à-dire dans le sens des F croissants.

Le vecteur gradient d'un scalaire est perpendiculaire aux iso-surfaces de ce scalaire et pointe dans le sens de sa croissance.

3) Quelle est son intensité ou grandeur?

On a vu que les composantes du gradient de F sont $\frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial F}{\partial y}, \frac{\partial F}{\partial z}$.

Si l'on reprend le cas précédent, on avait $d\vec{n}$ porté par la normale en 1, à la surface iso-F.

Puisque les deux vecteurs $d\vec{n}$ et $\vec{\nabla}F$ sont colinéaires

$$dF = \vec{\nabla}F \cdot d\vec{n} = \left|\vec{\nabla}F\right| \cdot \left|d\vec{n}\right| \Rightarrow \left|\vec{\nabla}F\right| = \frac{dF}{\left|d\vec{n}\right|} = \frac{dF}{dn}$$

Le gradient de F exprime la rapidité avec laquelle le scalaire F varie dans l'espace.

En conclusion : le vecteur gradient indique la direction dans laquelle les changements spatiaux sont les plus élevés. Cette direction est perpendiculaire aux iso-surfaces (vecteur à 3 dimensions) ou aux iso-lignes (vecteur à 2 dimensions) et le sens du vecteur est des plus basses valeurs vers les plus hautes.

Exemple 1 :

a) Déterminez le gradient du champ de température T à un instant donné (t = constant) et à un niveau z constant : $T = a.(x^2 + y^2)$.

Le gradient sera bidimensionnel puisque z = constant et $T = a \cdot \left(x^2 + y^2 \right)$. Les lignes où T = cste (isothermes) sont des cercles concentriques comme représenté dans la figure A.2.

$\vec{\nabla} T = \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_y \vec{i} + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_x \vec{j} = \left(2 \cdot a \cdot x \right) \vec{i} + \left(2 \cdot a \cdot y \right) \vec{j}$. On voit que le gradient augmente avec l'augmentation de x et y (augmentation de la distance au centre des isothermes.

b) Quel est le gradient au point x=1 km et y = 1 km en sachant que a = 10^{-3} °C^2/km^2?

$$\vec{\nabla} T = 2 \cdot \left(10^{-3} \left[°C / km^2 \right] \cdot 1 [km] \right) \vec{i} + 2 \cdot \left(10^{-3} \left[°C / km^2 \right] \cdot 1 [km] \right) \vec{j}$$

$$\vec{\nabla} T = 2 \cdot 10^{-3} \left[°C / km \right] \vec{i} + 2 \cdot 10^{-3} \left[°C / km \right] \vec{j}$$

Représentation graphique : les cercles représentent les isothermes T1 < T2 < T3; La flèche noire montre le vecteur gradient dont la **grandeur** ou **intensité** est $\left| \vec{\nabla} T \right| = \sqrt{2 \cdot \left(10^{-3} \left[°C / km \right] \right)^2 + 2 \cdot \left(10^{-3} \left[°C / km \right] \right)^2} = 2 \cdot 10^{-3} \left[°C / km \right] = \frac{dT}{dn}$, c'est-à-dire égale à la variation de la température dans la direction perpendiculaire à l'isotherme locale; la **direction** est perpendiculaire à l'isotherme locale (qui passe par le point (1,1)) et son **sens** est tel qu'il pointe vers les isothermes de cote croissante.

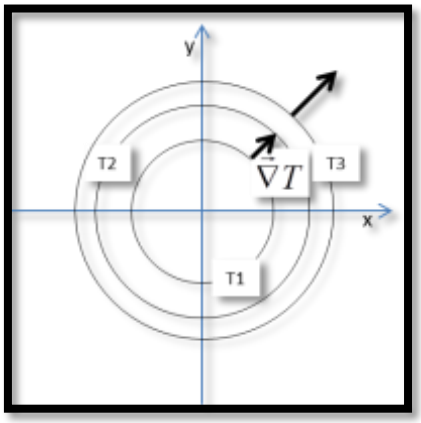

Figure A.3 – Les flèches représente le gradient de température à deux endroits différents.

En météorologie, nous n'avons pas des fonctions continues des paramètres météorologiques, puisque les mesures sont discrètes. Nous avons des cartes à une coordonnée constante (par exemple, dans les cartes de surface Z = 0 m) où on peut voir les «lignes de niveau» ou iso-lignes tracées à des intervalles de variation du paramètre constant (par exemple, on trace des isothermes à des intervalles Δp = 4 hPa). Pour calculer le gradient du paramètre, on utilise la méthode des différences finies.

Exemple 2 :
La figure A.4 montre le champ de pression au niveau moyen de la mer le premier juillet 2012 à 00 UTC. On veut estimer le gradient de pression au point A (point rouge), sur l'isobare 1016 hPa. La distance entre les deux isobares les plus proches (1016 et 1024 hPa) est de 440 km (trait bleu centré sur le point A).

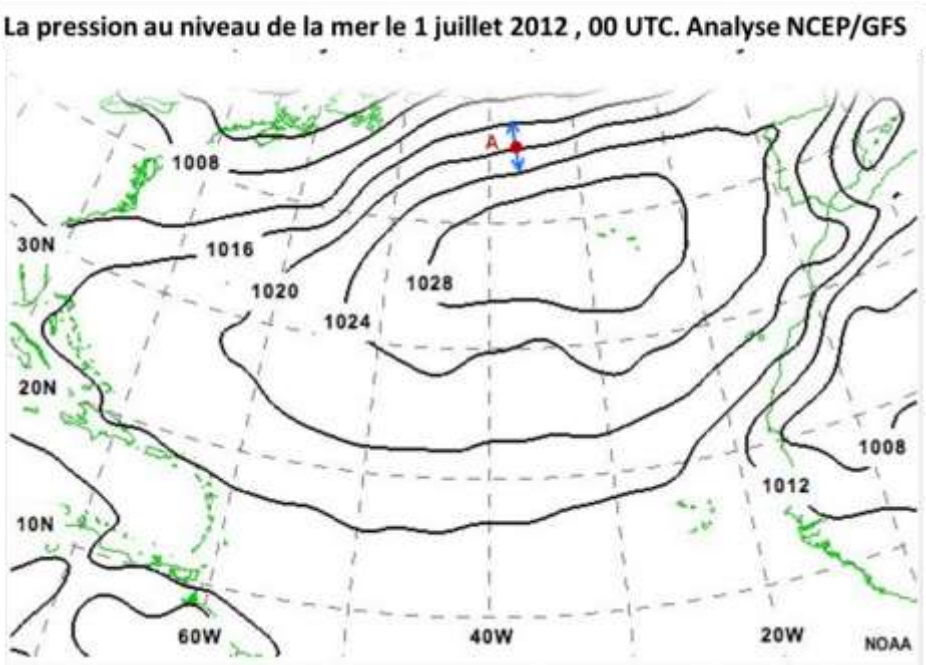

Figure A.4

$$\left|\vec{\nabla} p\right| = \frac{dp}{dn} \cong \frac{\Delta p}{d} = \frac{(1024-1016)[hPa]}{440[km]} = 1,2 \cdot 10^{-2}\ hPa/km$$

La figure A.5 montre le vecteur gradient de pression (en bleu). Il pointe vers les hautes pressions et est localement perpendiculaire aux isobares.

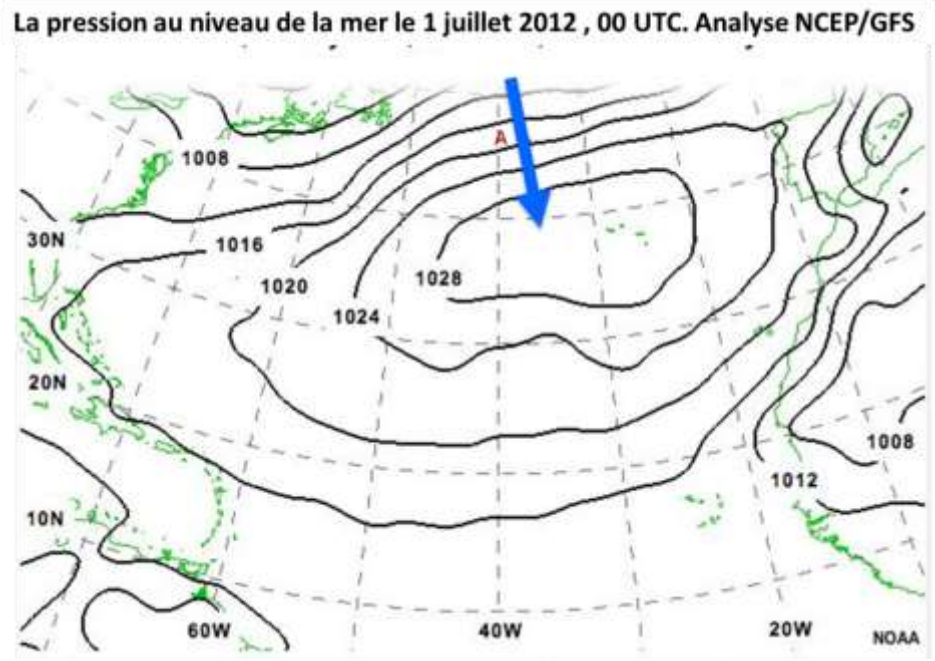

Figure A.5