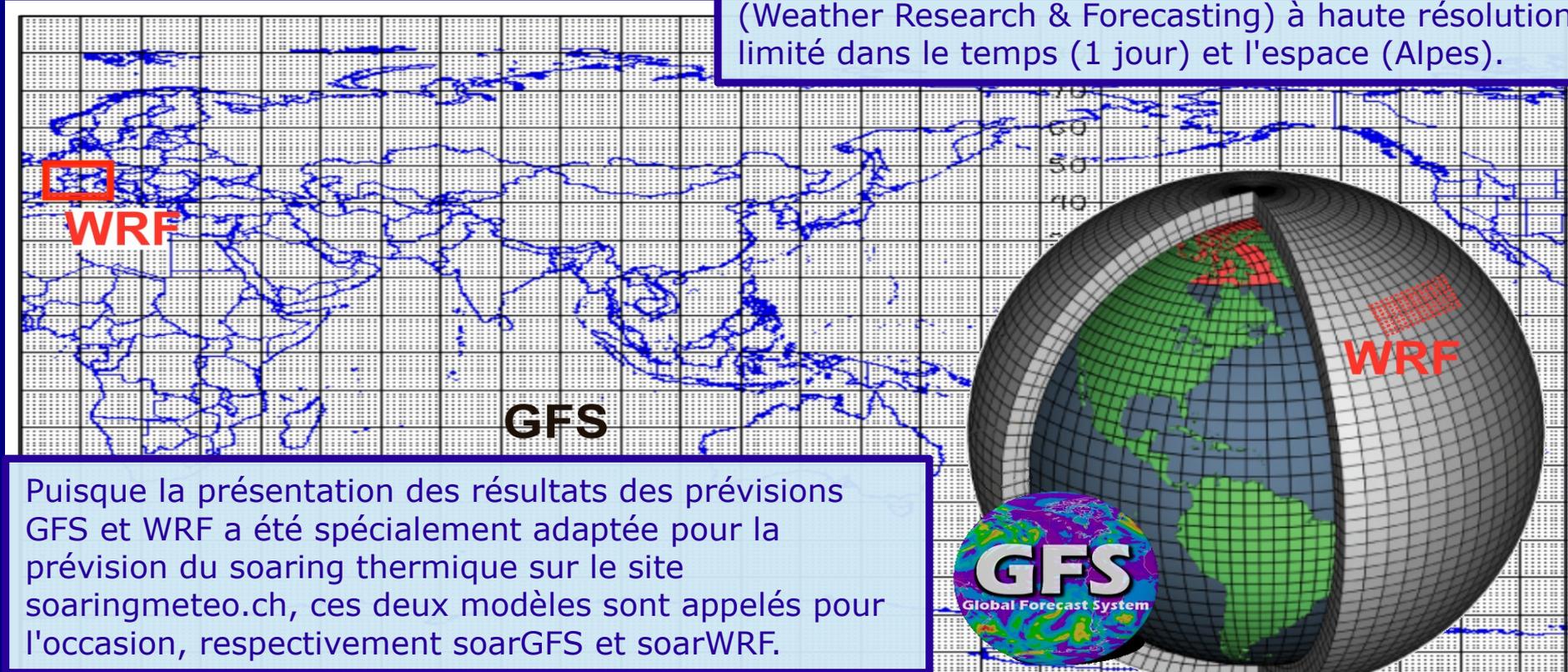


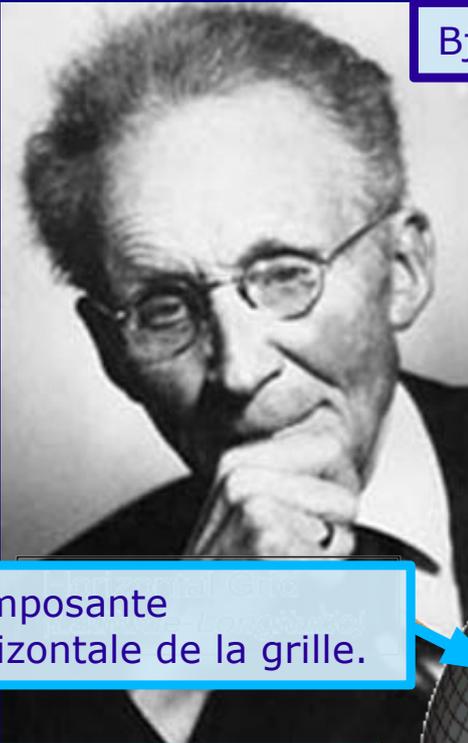
Le but de ce document est d'expliquer comment fonctionnent les modèles numériques de prévisions du temps et comment les interpréter. On parlera essentiellement du modèle GFS (Global Forecast System) à basse résolution mais à long terme (7 jours) et pour le monde entier et du modèle WRF (Weather Research & Forecasting) à haute résolution mais limité dans le temps (1 jour) et l'espace (Alpes).



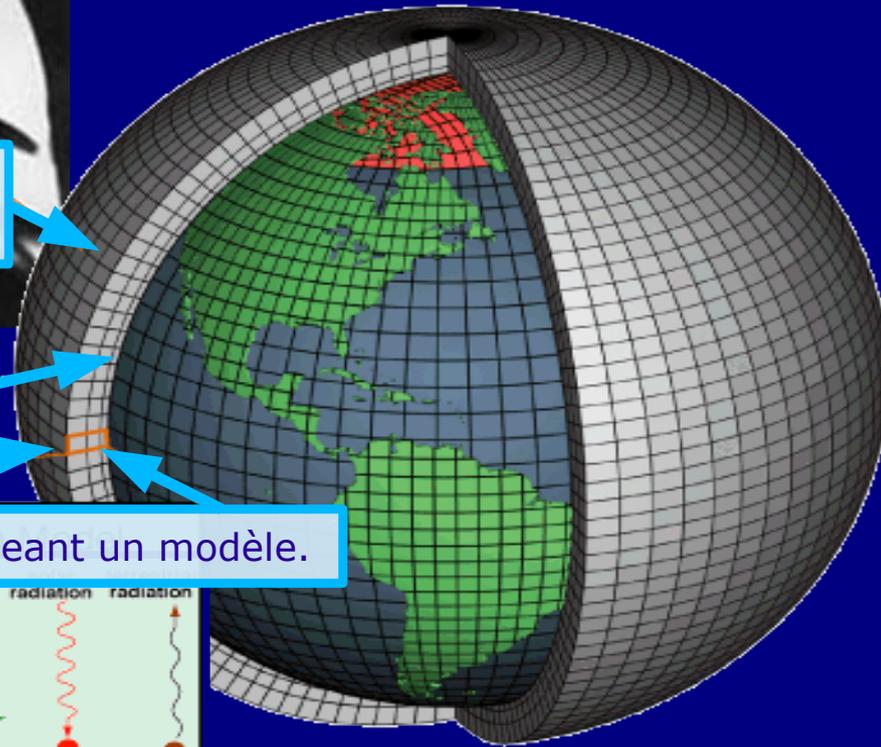
Puisque la présentation des résultats des prévisions GFS et WRF a été spécialement adaptée pour la prévision du soaring thermique sur le site [soaringmeteo.ch](http://soaringmeteo.ch), ces deux modèles sont appelés pour l'occasion, respectivement soarGFS et soarWRF.

# Les modèles numériques pour la prévision du temps

Bjerknes, 1862-1951, géophysicien, mathématicien et physicien norvégien.



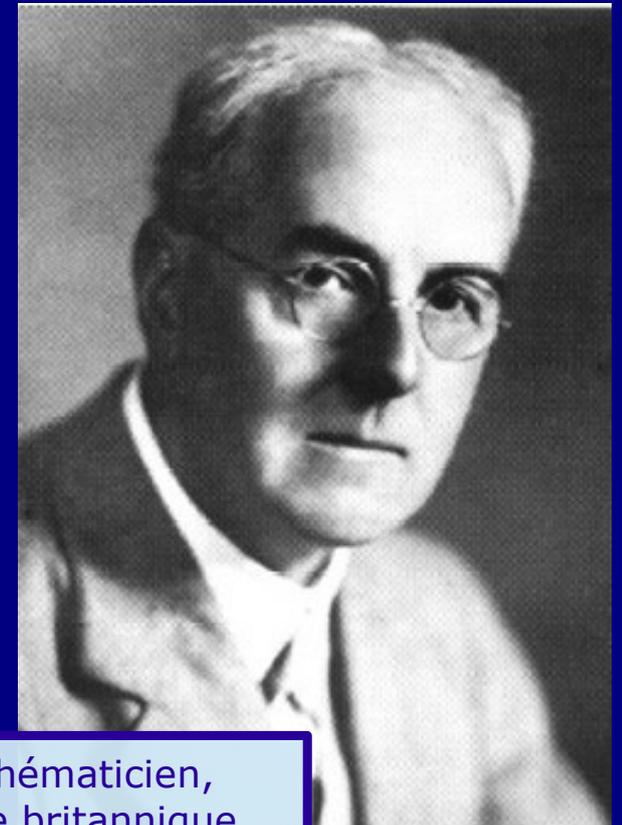
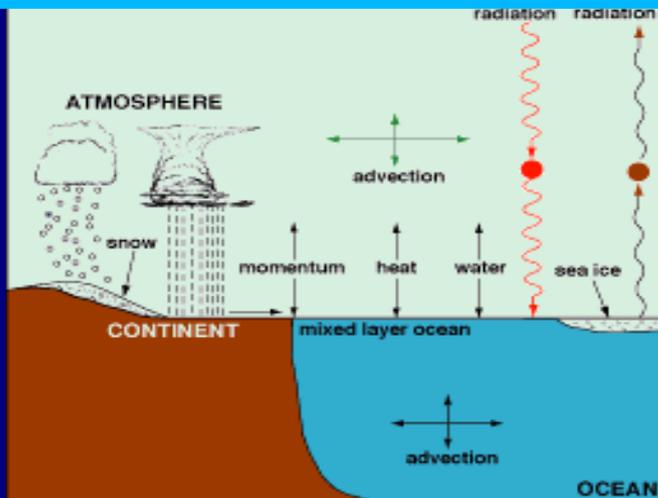
Au début du 20ème siècle, Bjerknes puis Richardson ont déjà énoncé les principes de la simulation mathématique du temps à partir d'un état météorologique de départ connu et mesuré. Cette simulation repose sur les lois de la physique des fluides.



Composante horizontale de la grille.

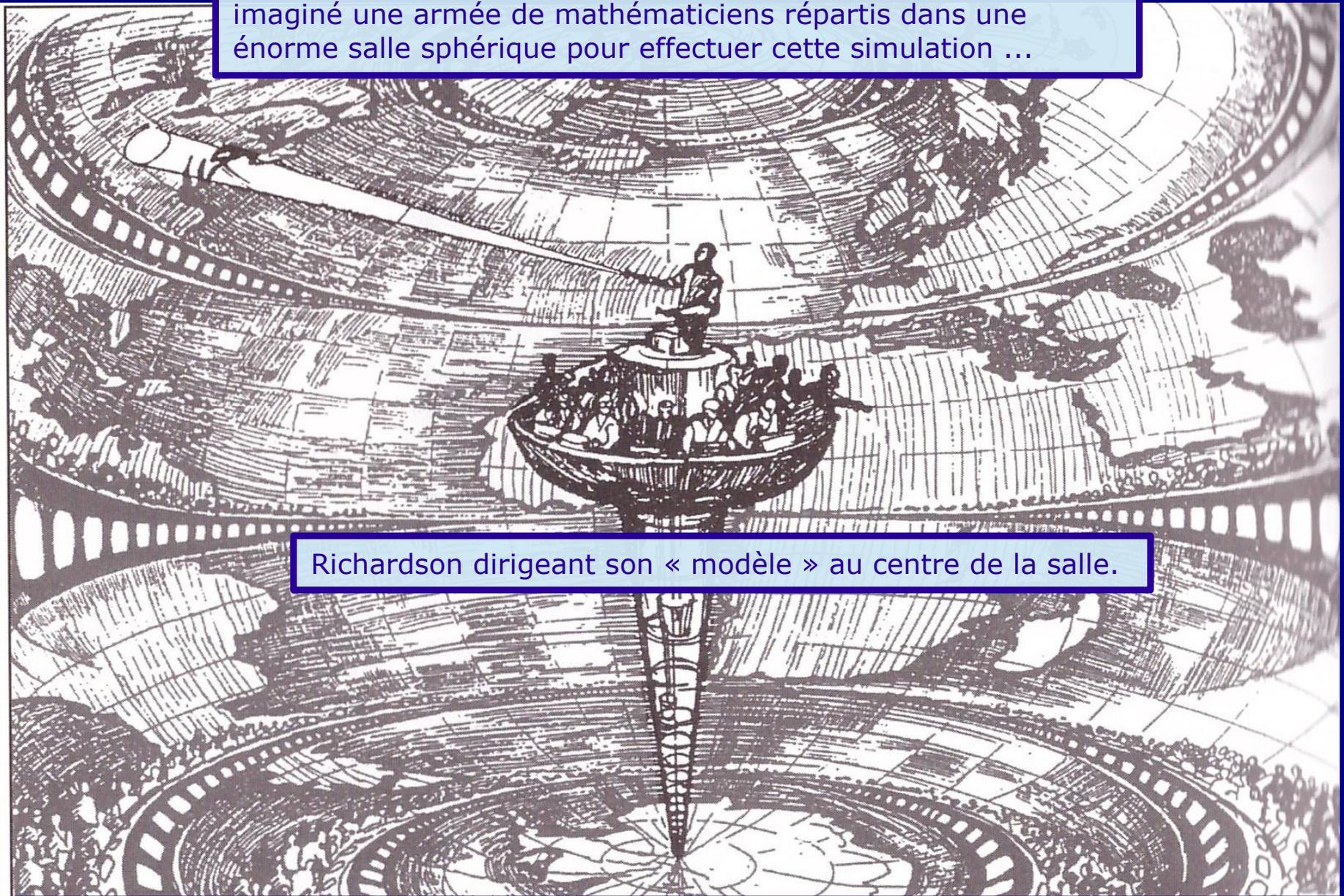
Composante verticale de la grille.

Processus physiques dirigeant un modèle.



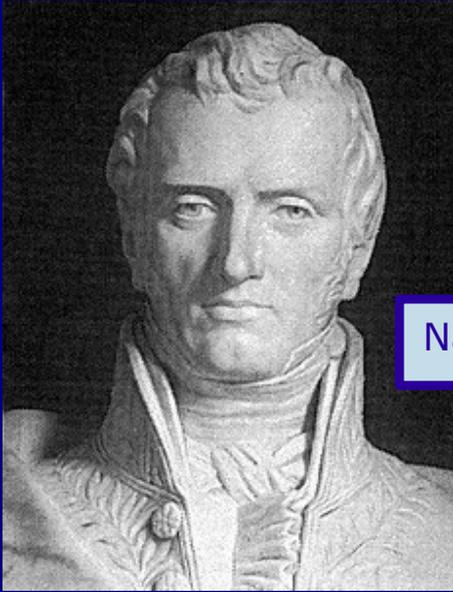
Richardson, 1881-1953, mathématicien, météorologue et psychologue britannique.

Petit anecdote amusante, Richardson, avant l'ordinateur, avait imaginé une armée de mathématiciens répartis dans une énorme salle sphérique pour effectuer cette simulation ...



Richardson dirigeant son « modèle » au centre de la salle.

Ce n'est qu'à partir de 1950, avec les premiers ordinateurs que ces principes ont pu être appliqués d'abord expérimentalement. Les premières prévisions numériques opérationnelles ont été instaurées au début des années 1960. Les modèles n'ont cessé depuis lors de se développer, grâce à l'augmentation fulgurante de puissance de calcul des ordinateurs et aux progrès énormes en méthodes de calculs et en météorologie théorique.



Les équations primitives atmosphériques sont une variante des équations de Navier-Stokes qui décrivent le mouvement des fluides, en tenant compte du principe de conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement. Ce sont ces équations qui sont utilisées dans les calculs de base des modèles.

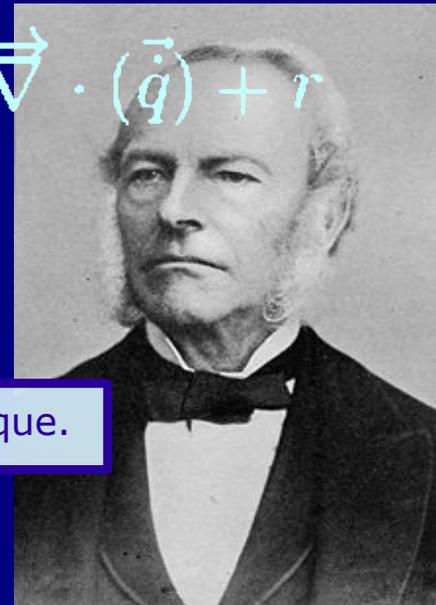
Navier, 1785-1836, ingénieur et mathématicien français.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \otimes \vec{v}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \bar{\bar{\tau}} + \rho \vec{f}$$

$$\frac{\partial (\rho e)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [(\rho e + p) \vec{v}] = \vec{\nabla} \cdot (\bar{\bar{\tau}} \cdot \vec{v}) + \rho \vec{f} \cdot \vec{v} - \vec{\nabla} \cdot (\vec{q}) + r$$

Stokes, 1819-1903, mathématicien et physicien britannique.

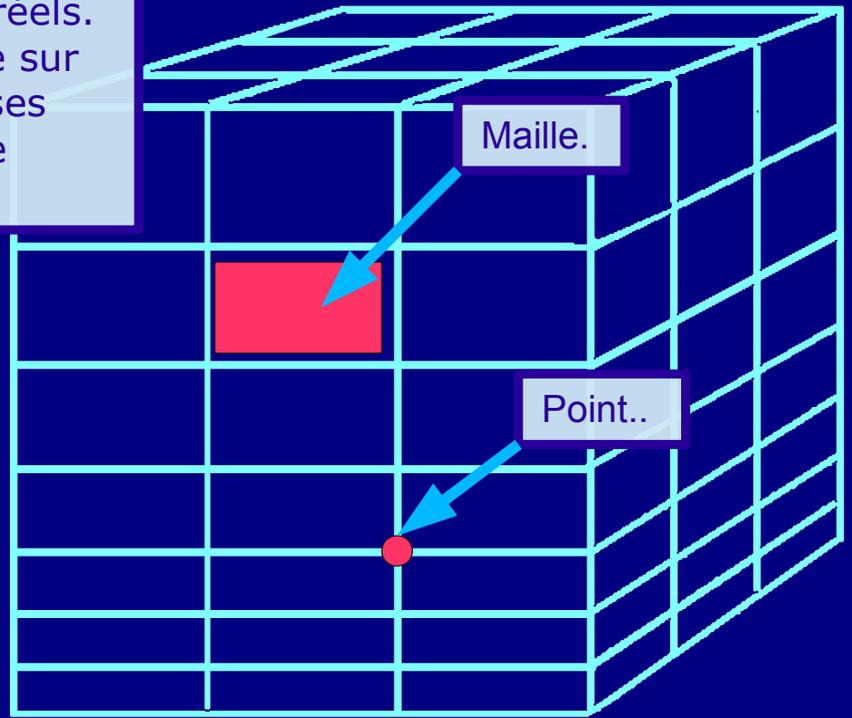


Pour limiter les calculs il faut rompre la continuité (en pratique l'échelle moléculaire) du temps et de l'espace des phénomènes réels. La simulation devient ainsi discontinue dans le temps et l'espace sur une grille tridimensionnelle de calcul avec ses mailles séparant ses points. Les résultats de cette simulation ont donc une apparence « pixelisée », semblable à une image numérique grossière.

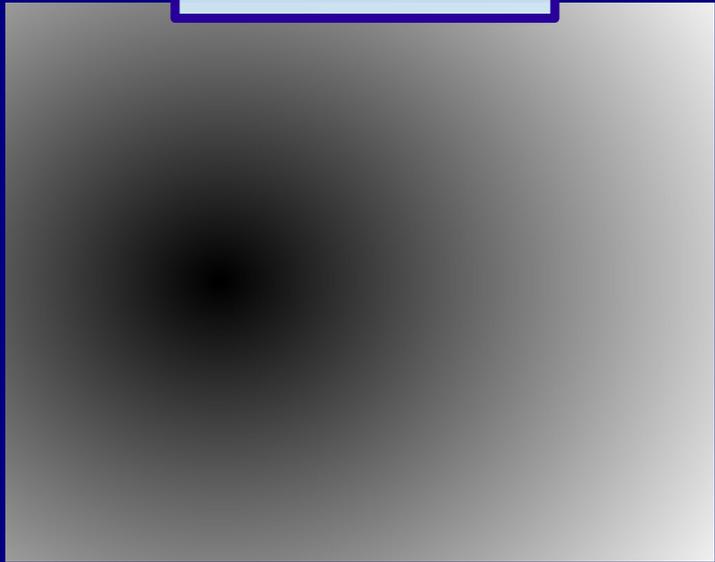
De même, le temps n'est plus une variable continue, les calculs sautant d'une étape à la suivante.



Les paramètres se situent soit aux points soit aux centres des mailles de la grille.

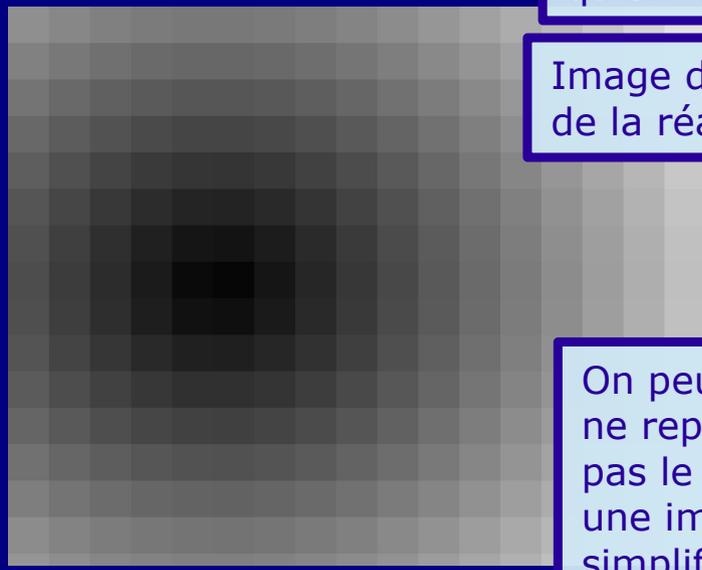


Réalité continue.



En général, les mailles (composante verticale) sont plus fines en basse qu'en haute atmosphère.

Image discontinue et pixelisée de la réalité (modèle).



On peut donc dire que les modèles ne représentent ni ne prévoient pas le temps réel mais décrivent une image grossière, moyenne et simplifiée du temps.



Il y a deux types de modèles classés selon la méthodologie de calculs. Les modèles lagrangiens, plus rarement utilisés, et les modèles eulériens. La description Lagrangienne consiste à étudier les propriétés du fluide en suivant une particule dans son mouvement. La description Eulérienne consiste en une étude locale fixe des propriétés d'un fluide en mouvement.

Lagrange, 1736-1813, mathématicien, mécanicien et astronome, italien puis français.



Description eulérienne.



Voici une analogie avec la mesure des vitesses des voitures sur une route : Une description eulérienne consisterait à choisir des points sur la route, et à mesurer la vitesse de chaque voiture qui passe par ces points. Une description lagrangienne consisterait à être dans une voiture et à mesurer la vitesse à plusieurs instants.

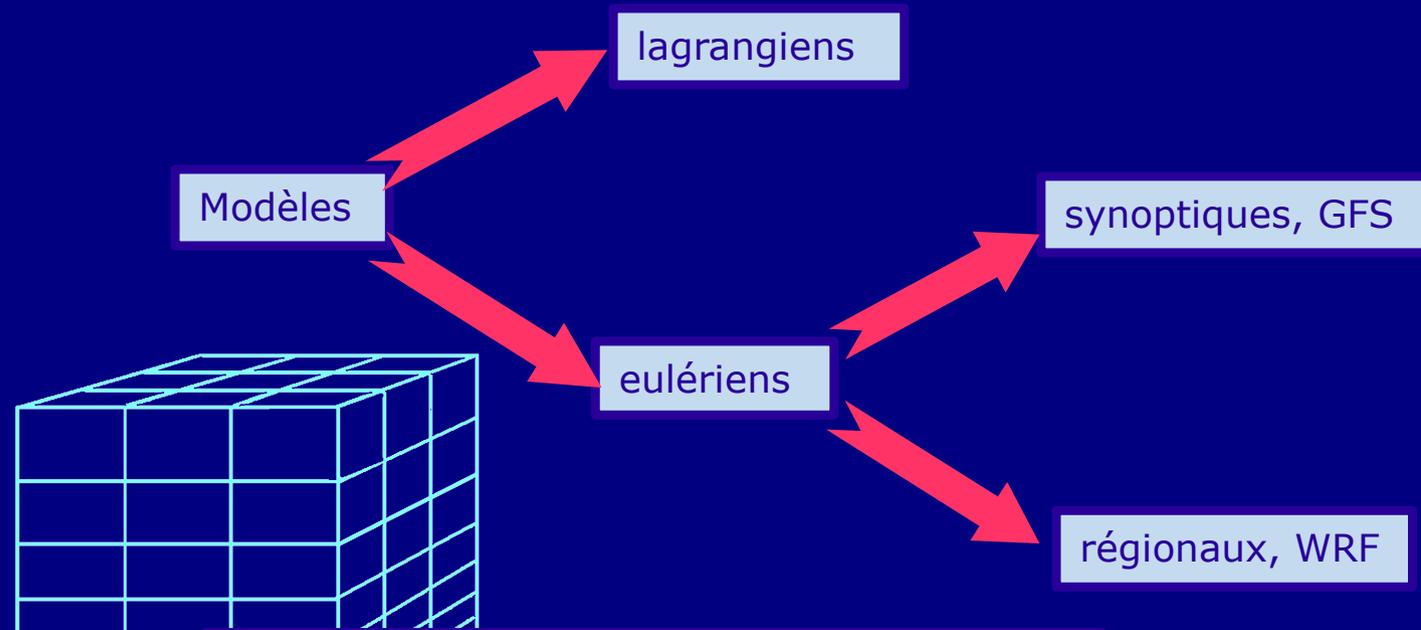


Description lagrangienne.



Alptherm, développé par le Dr Bruno Neininger dans les années 90, est un modèle lagrangien simple décrivant les convections (thermiques) atmosphériques. Ce modèle a besoin des résultats (c'est-à-dire doit être couplé avec) des modèles eulériens pour fonctionner. Mais dans ce document on ne décrit que les modèles eulériens.

Euler, 1707-1783, mathématicien et physicien suisse.

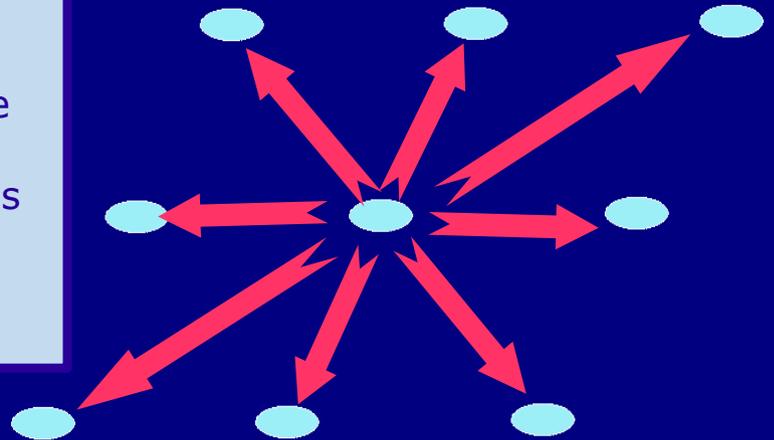
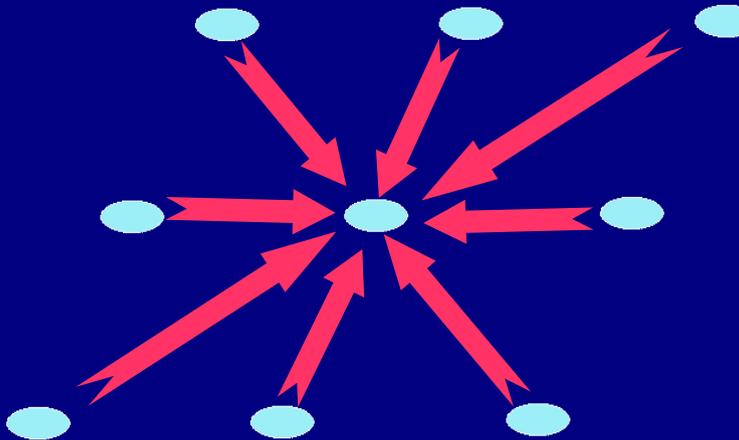


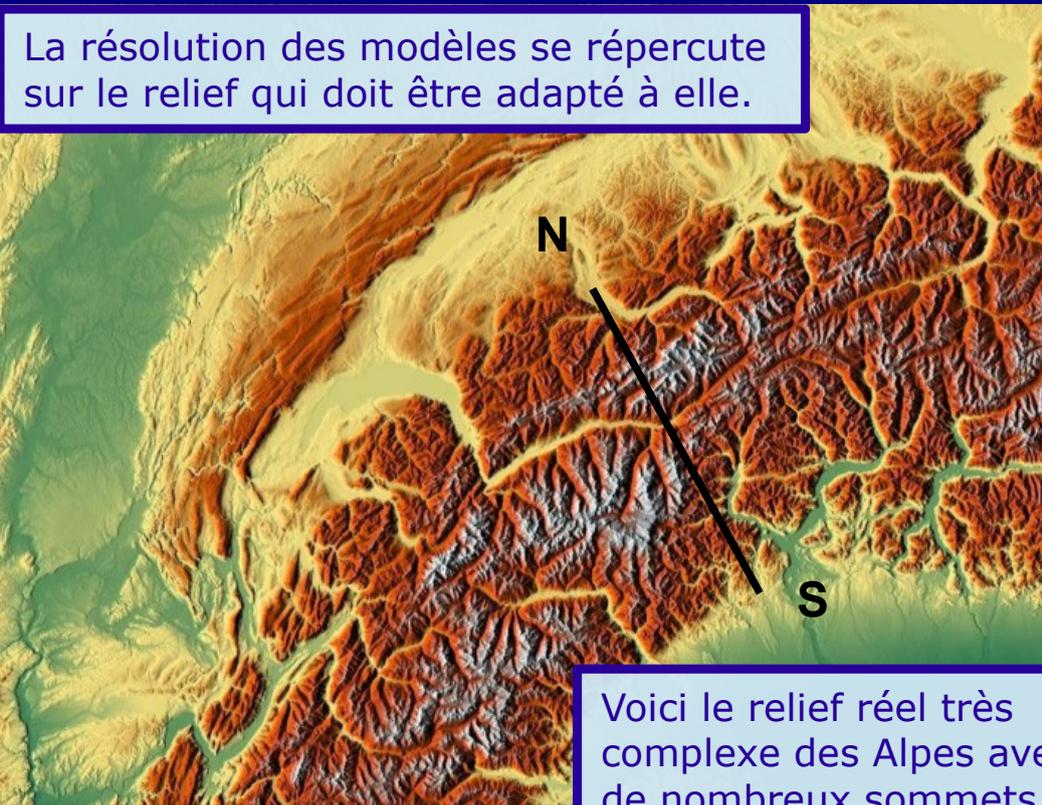
Pour les modèles eulériens, il y a deux types de modèles classés selon la résolution de leur grille. Les modèles mondiaux à échelle synoptique (à macro-échelle avec des larges mailles d'environ 40 Km) et ceux à échelle régionale (à méso-échelle) de meilleure résolution spatiale et temporelle (avec des mailles de quelques km) mais limités à une région.



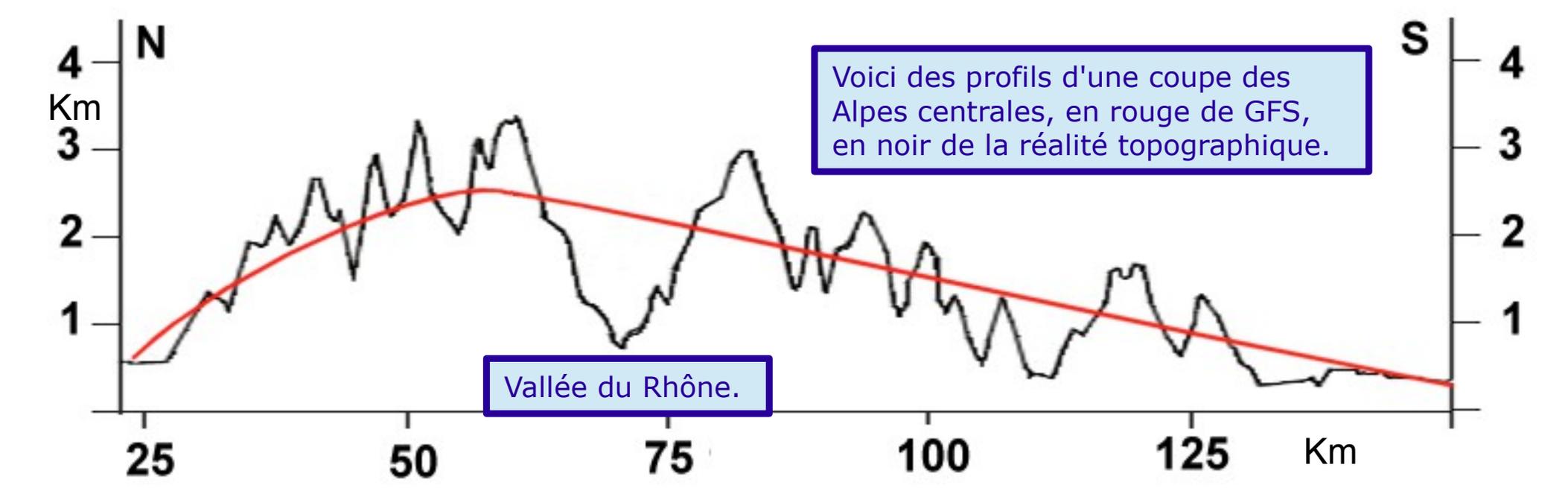
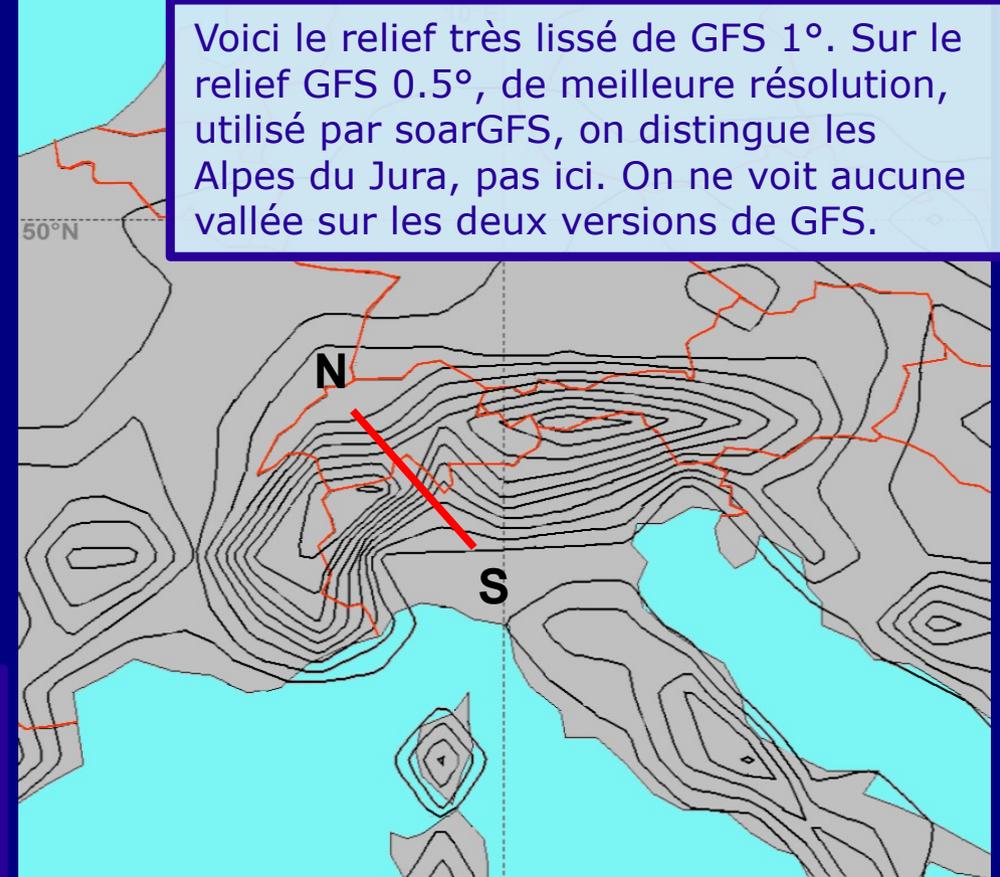
Ce sont les modèles eulériens qui sont caractérisés par une grille tridimensionnelle de calcul dont les points et parfois le centre des mailles représentent le lieu des paramètres météorologiques calculés.

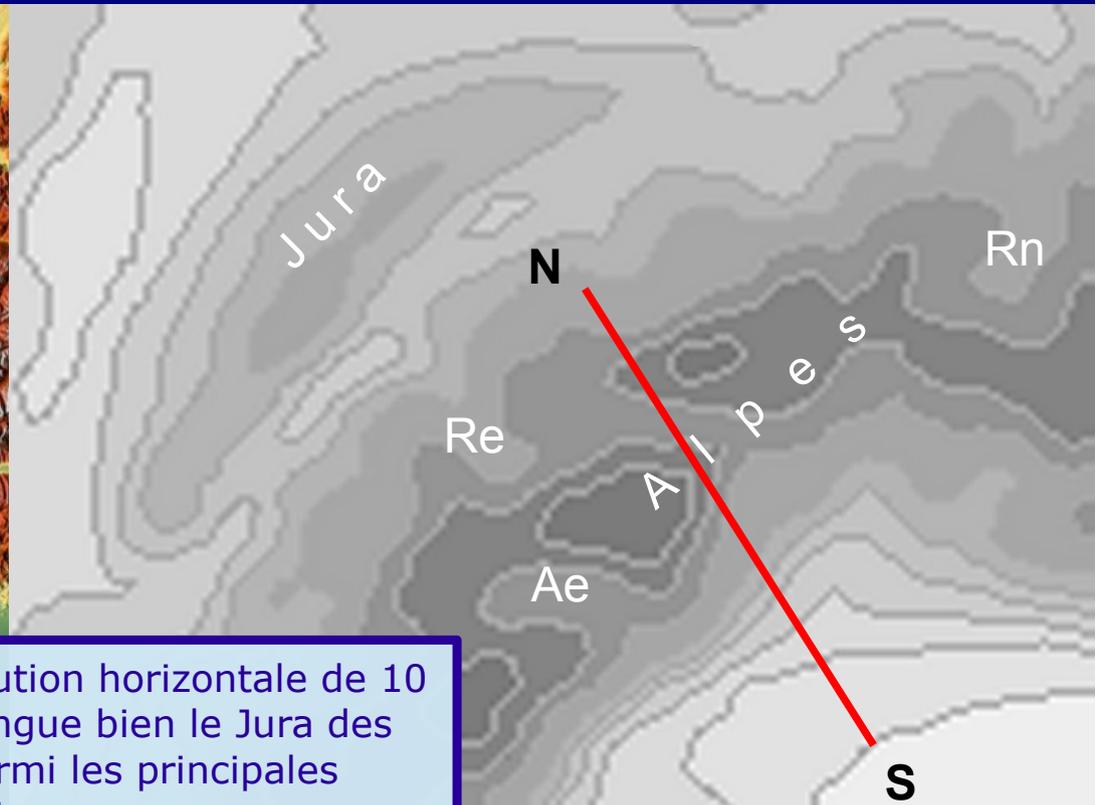
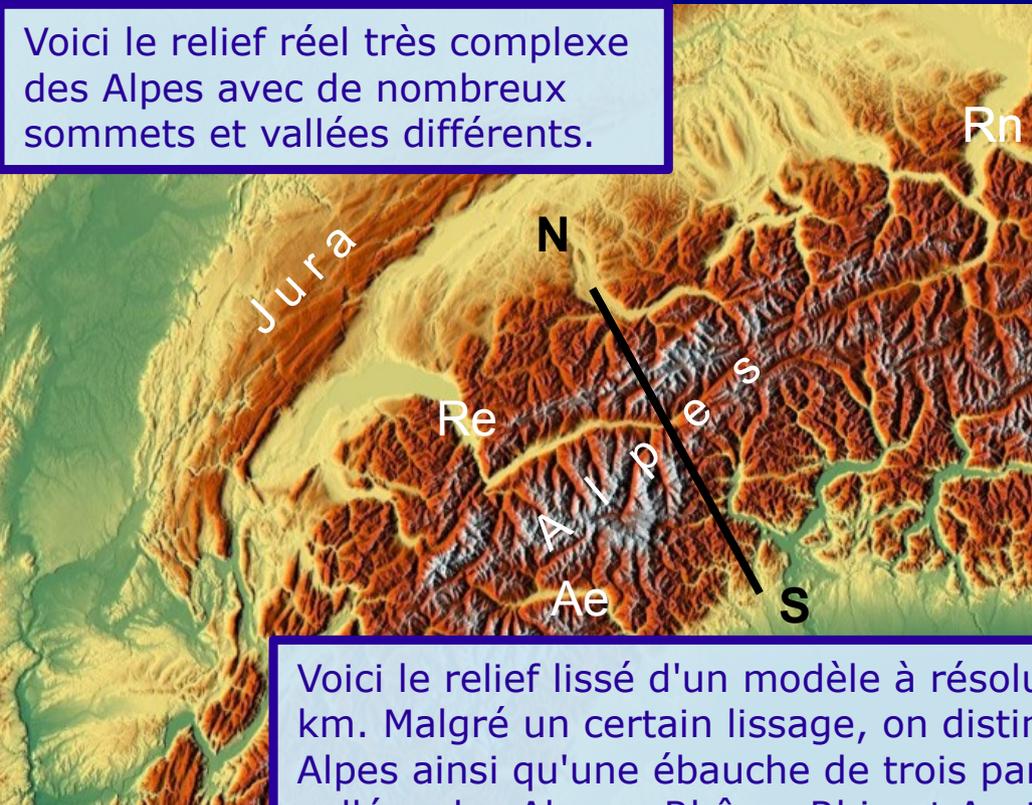
Un principe important est que chaque point de la grille est influencé par tous les autres points de celle-ci et que chaque point influence les autres dans l'évolution des paramètres météorologiques.



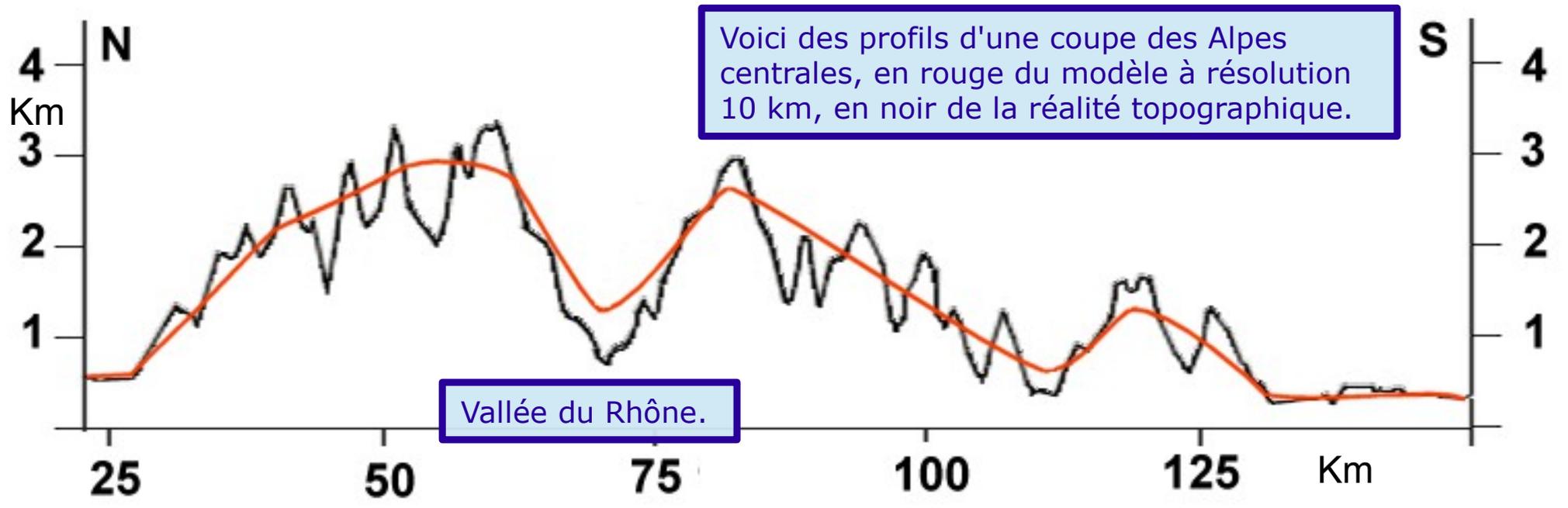


Voici le relief réel très complexe des Alpes avec de nombreux sommets et vallées différents.





Voici le relief lissé d'un modèle à résolution horizontale de 10 km. Malgré un certain lissage, on distingue bien le Jura des Alpes ainsi qu'une ébauche de trois parmi les principales vallées des Alpes : Rhône, Rhin et Aosta.



Voici des profils d'une coupe des Alpes centrales, en rouge du modèle à résolution 10 km, en noir de la réalité topographique.

Vallée du Rhône.



Il existe de très nombreux modèles opérationnels gouvernementaux et privés dans le monde. On parlera ici uniquement des deux modèles américains : GFS, à échelle synoptique et WRF, à mésoéchelle, les deux utilisés chez soaringmeteo.

Malgré ses larges mailles, GFS (Global Forecast System) est utile pour la prévision des thermiques, pour autant que les sorties (résultats) soient bien interprétées par l'humain. Il est l'un des modèles de prévision numérique du temps du service météo national américain (NOAA-NCEP).

Performant et d'un très haut niveau technologique, il est le seul modèle global dont les résultats sont disponibles régulièrement, gratuitement et intégralement. Ceux-ci se trouvent dans des serveurs du NCEP sous la forme de fichiers informatiques spéciaux, officiellement reconnus par l'Organisation Mondiale de Météorologie (filiale de l'ONU), appelés « grib », qu'il faut savoir déchiffrer.





Habituellement il existe trois sortes de graphiques : les cartes, les météogrammes et les profils aérologiques, ces derniers souvent dessinés sur des émagrammes.

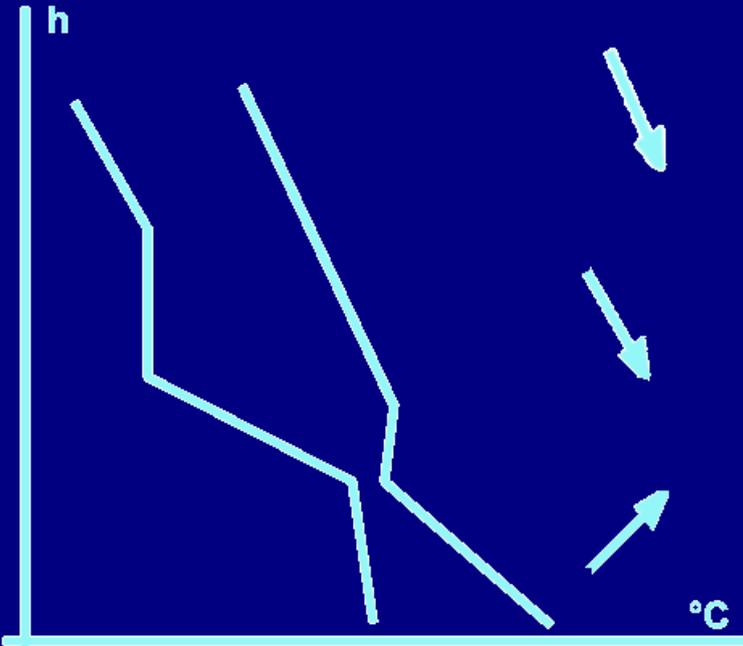
Les cartes sont des graphiques sur lesquels sont représentés un ou quelques paramètres sur toute une région, à un moment précis, sous forme de pictogrammes ou de courbes d'isovaleurs : isobares (pressions), isothermes (températures), isotaches (vitesses) ... Lat = latitude sud-nord. Long = longitude ouest-est.

Lat

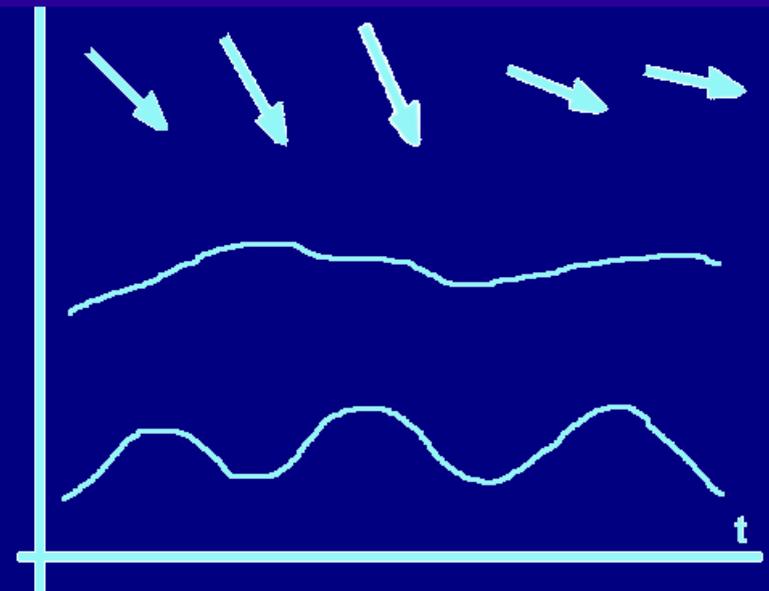


Long

Les météogrammes sont des graphiques sur lesquels sont représentés un ou plusieurs paramètres  $p$  à un endroit précis mais pendant une période  $t$  de quelques heures à quelques jours.

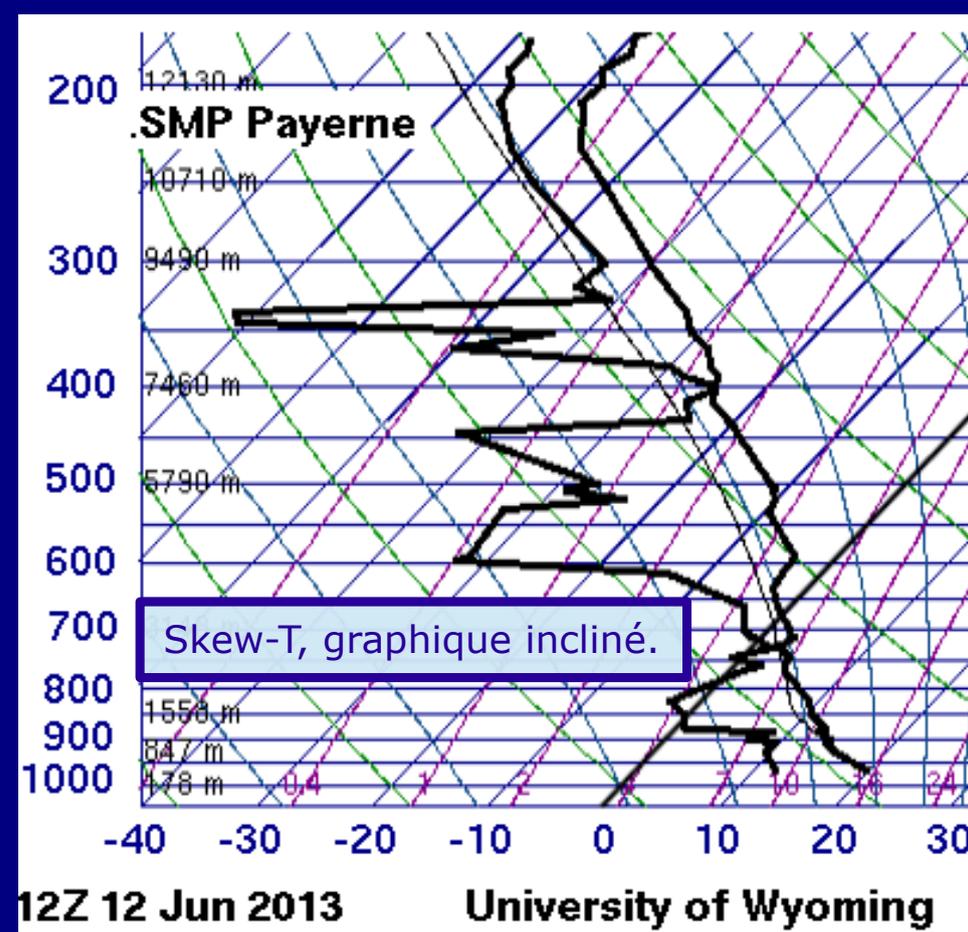
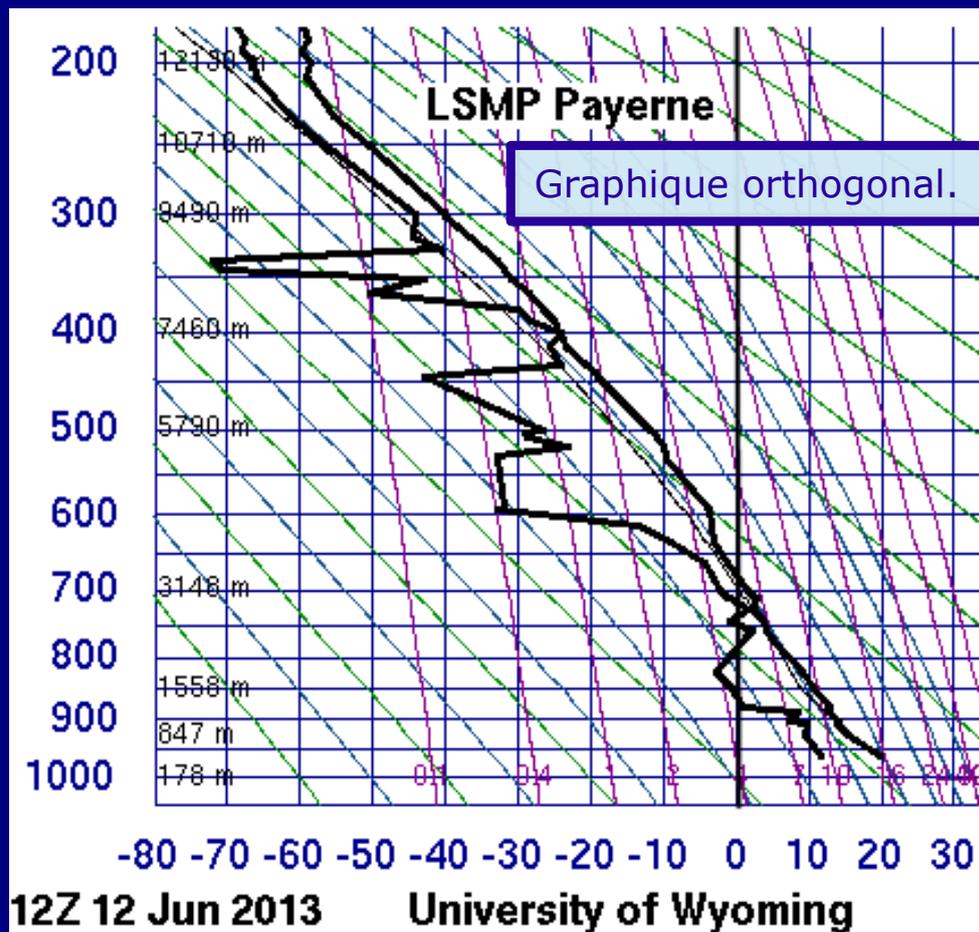


Les profils aérologiques sont des graphiques sur lesquels sont représentés la température, l'humidité et les vents à différentes altitudes  $h$  (on les appelle les courbes d'état) à un endroit et à un moment précis.



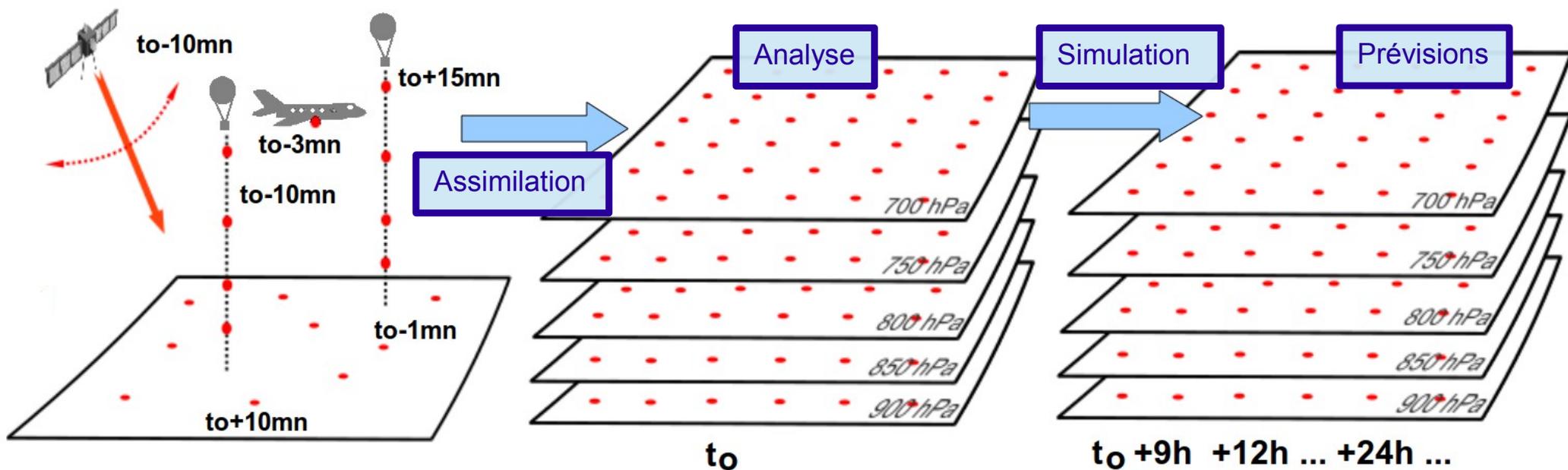
Les profils aérologiques peuvent représenter non seulement les résultats prévus d'un modèle mais aussi les mesures d'un radiosondage.

Voici deux profils aérologiques strictement identiques sur un graphique orthogonal classique et sur un émagramme moderne (skew-T).



Dans cet exemple, il s'agit des mêmes courbes d'état issu du radiosondage du 12 juin 2013 à 12Z de Payerne mais sur deux graphiques différents.

Le principe de fonctionnement de GFS 0.5° est le suivant. Les données atmosphériques mesurées (stations au sol, radiosondages, satellites), irrégulièrement distribuées dans le temps et l'espace, sont assimilées par des calculs complexes et grâce à des super-ordinateurs sur une grille virtuelle tridimensionnelle régulière d'initialisation au temps précis  $t_0$ , recouvrant toute la Terre, appelée aussi analyse. Les analyses sont effectuées (on appelle cette opération « assimilation ») 4 fois par jour à 00Z, 06Z, 12Z et 18Z. Z = UTC = heure universelle soit celle du Royaume-Uni.



L'assimilation n'est pas une simple interpolation géométrique mais consiste en des calculs et méthodes plus complexes avec plusieurs étapes dont des très courtes prévisions par simulation.

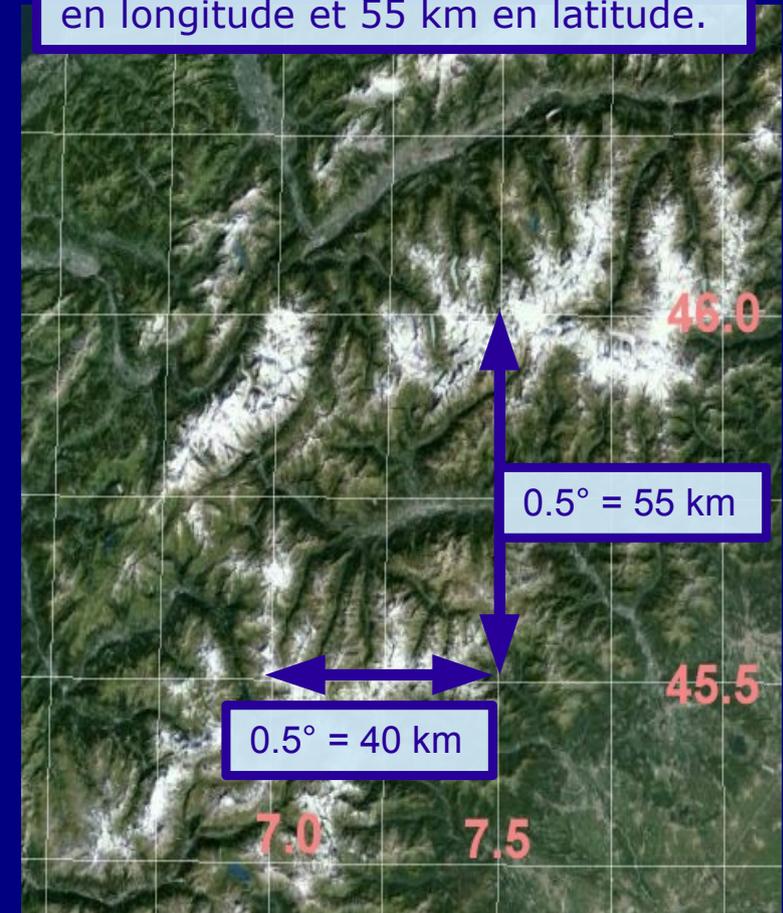
Ensuite, grâce à d'autres super-ordinateurs, GFS calcule et simule l'évolution des paramètres météorologiques, en tenant compte des lois de la physique des fluides. Il produit finalement les résultats chaque troisième heure sur une durée de 7 jours, pour chaque point de la grille réparti sur tout le globe. Les résultats sont contenus dans les fichiers grib.

La version GFS sélectionnée pour soarGFS (car il en existe quelques unes) a une résolution horizontale de  $0.5^\circ$ , soit des mailles séparées d'environ 40-60 km, et une résolution verticale de 64 niveaux. C'est la version la plus récente, à la résolution la plus fine. Je ne présente pas tous les niveaux ni toutes les mailles. Puisque on ne vole que pendant la journée, seules les trois périodes diurnes, soit 09Z, 12Z et 15Z (11h, 14h et 17h, heures d'été) sur une durée de 7 jours, ce qui fait 21 périodes en tout, sont affichées dans ma présentation soarGFS.

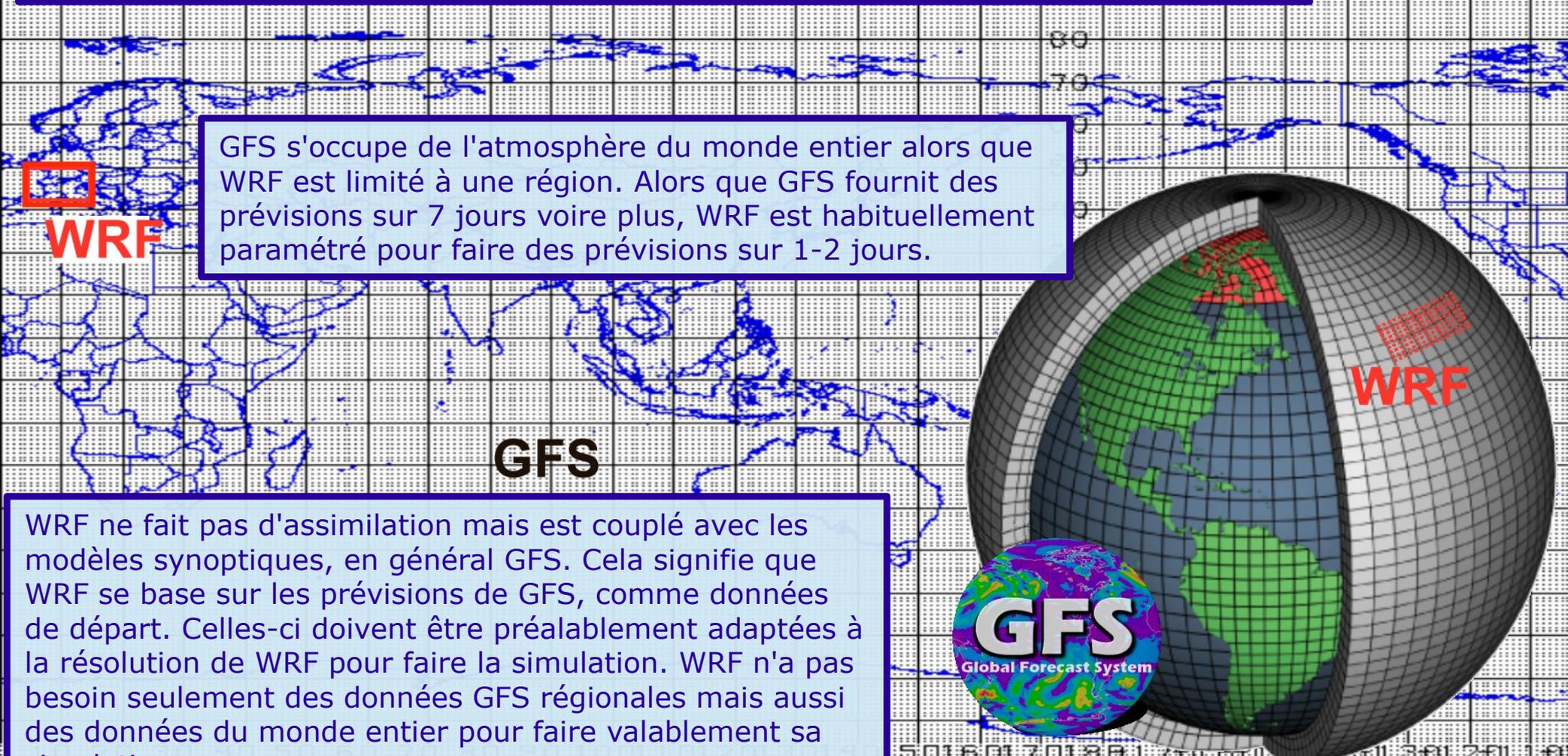
hPa	m
surface	variable
900	1000
850	1500
800	2000
750	2500
700	3000
600	4300
500	5500
400	7300
300	9300
200	12000

La composante verticale de la grille, de résolution variable suivant l'altitude, consiste en un ensemble de couches isobares, dont l'altitude est mesurée en hPa. Pour soarGFS, seules les couches du tableau annexe ont été prises en compte. La valeur exacte de l'altitude des couches de pression varie sans cesse en fonction de l'heure de la journée, des conditions météo et de la saison.

La composante horizontale de la grille à une résolution de  $0.5^\circ$  en longitude et latitude ce qui correspond pour les Alpes à 40 km en longitude et 55 km en latitude.



Le principe de fonctionnement de WRF est semblable à celui de GFS. Il y a cependant quelques différences. Sa résolution horizontale est d'abord beaucoup plus fine, entre 2-12 km en général. L'avantage est que le relief et la prévision des paramètres météo est plus proche de la réalité, autrement dit l'image du temps est moins grossière et lissée.

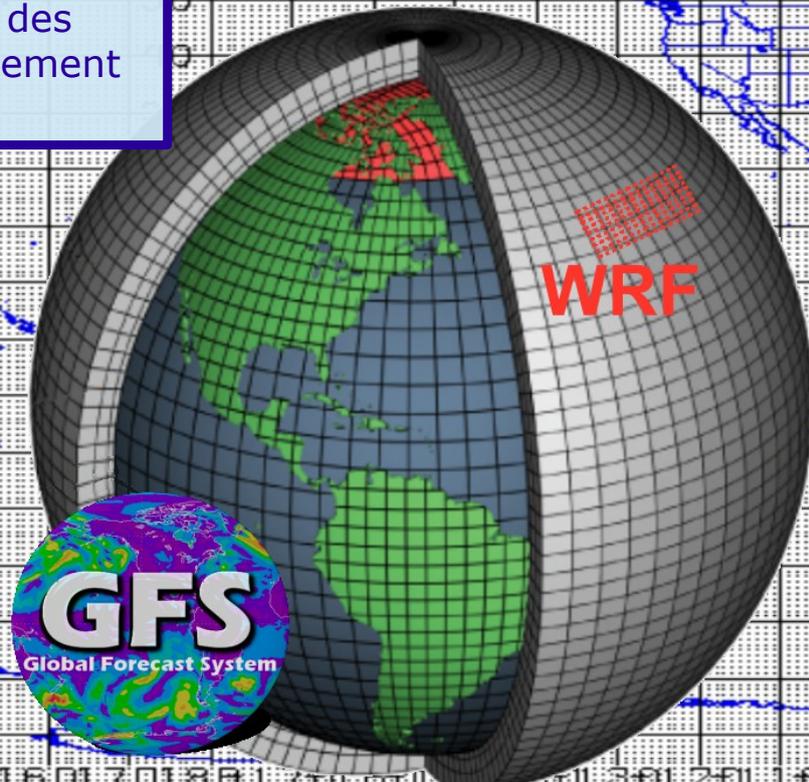


**WRF**

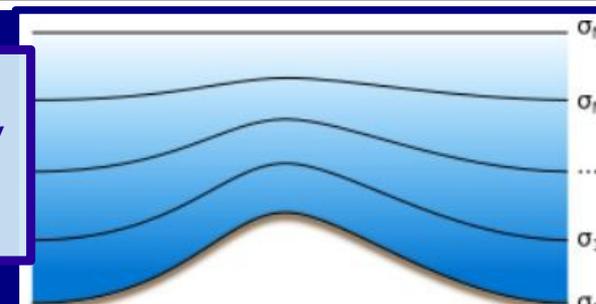
GFS s'occupe de l'atmosphère du monde entier alors que WRF est limité à une région. Alors que GFS fournit des prévisions sur 7 jours voire plus, WRF est habituellement paramétré pour faire des prévisions sur 1-2 jours.

**GFS**

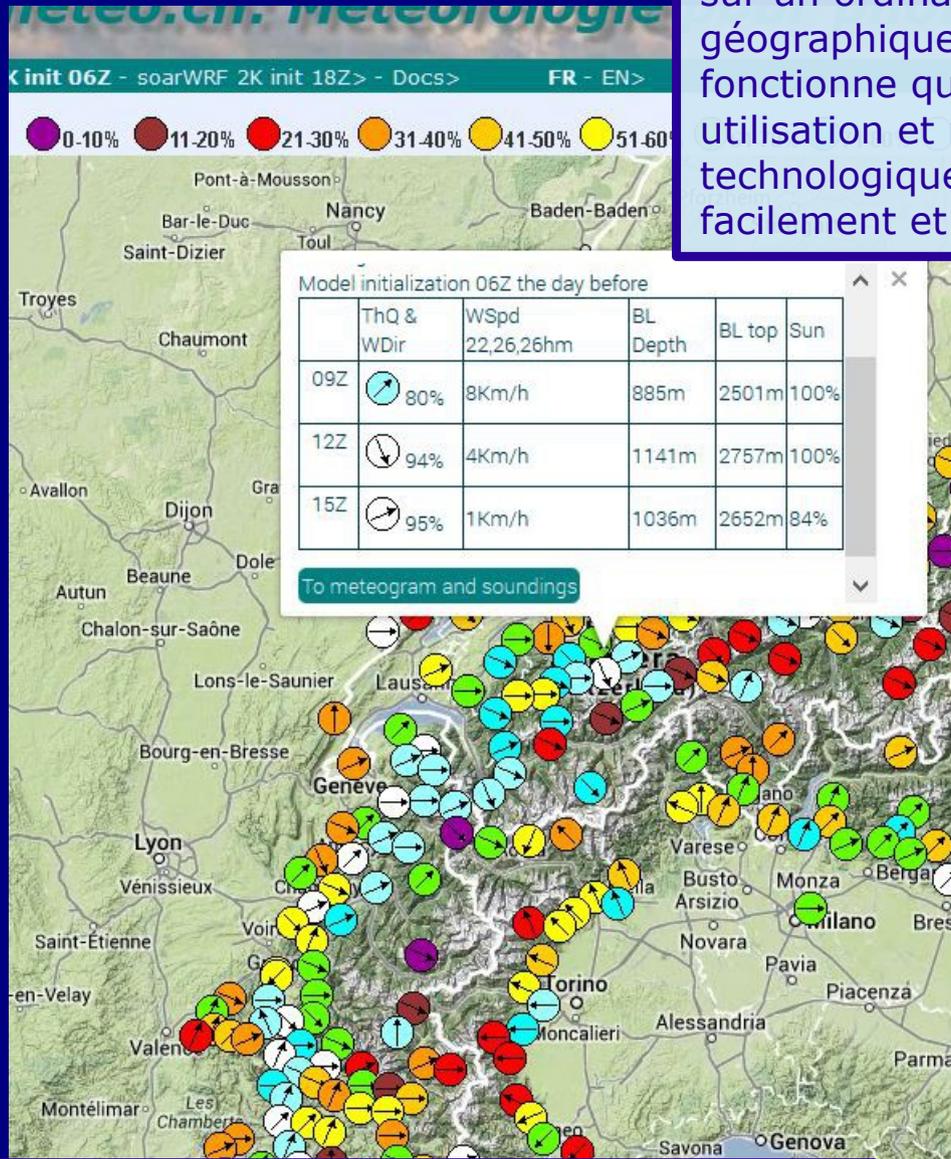
WRF ne fait pas d'assimilation mais est couplé avec les modèles synoptiques, en général GFS. Cela signifie que WRF se base sur les prévisions de GFS, comme données de départ. Celles-ci doivent être préalablement adaptées à la résolution de WRF pour faire la simulation. WRF n'a pas besoin seulement des données GFS régionales mais aussi des données du monde entier pour faire valablement sa simulation.



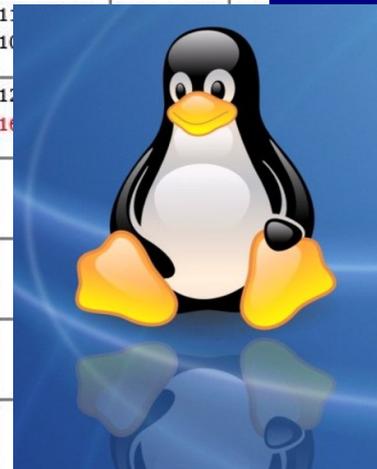
La résolution verticale est à peu près identique à celle de GFS. A la place des niveaux de pression il y a les couches sigmas  $\sigma$  qui suivent le relief. Ce sont des couches de pression normalisées.



Enfin, il faut soi-même compiler, installer, paramétrer WRF sur un ordinateur privé et surtout créer un domaine géographique pour pouvoir fournir des prévisions. WRF ne fonctionne que sur les plates-formes Unix et Linux. Son utilisation et même sa modification, malgré son très haut niveau technologique, sont libres. Le code source en Fortran est facilement et librement accessible sur internet.



11000m	BLD/BLTop	0/1616	176/1792	617/2233	885/2501	1141/2757	1036/2652	
Sun/Rad	99 / 31	100 / 201	100 / 377	100 / 525	100 / 679	100 / 843	100 / 1007	
10000m	SH/LH	0 / 0	-10 / 58	36 / 125	87 / 176	136 / 265	185 / 414	
T2m Td2m	5.4 0.3	13.2 4.5	14.7 4.9	15.5 5.1	16.3 5.3	17.1 5.5	17.9 5.7	
9000m								
8000m								
7000m		↘ 74	↘ 75	↘ 74	↘ 73			
6000m		↘ 65	↘ 64	↘ 64	↘ 64			
5000m		↘ 53	↘ 46	↘ 48	↘ 51	↘ 53	↘ 55	
4000m		↘ 44	↘ 38	↘ 40	↘ 44	↘ 46	↘ 47	
3000m		↘ 40	↘ 31	↘ 34	↘ 37	↘ 37	↘ 37	
		↘ 37	↘ 27	↘ 31	↘ 32	↘ 30	↘ 28	
		↘ 34	↘ 24	↘ 28	↘ 26	↘ 22	↘ 19	
		↘ 31	↘ 21	↘ 24	↘ 21	↘ 16	↘ 12	
		↘ 28	↘ 19	↘ 20	↘ 15	↘ 10	↘ 6	
2000m		→ 23	↘ 15	↘ 11	↘ 8	↘ 5	↘ 3	
		→ 19	↘ 13	↘ 12	↘ 9	↘ 6	↘ 6	
1616m		→ 19	↘ 15	↘ 13	↘ 11	↘ 8	↘ 8	
1000m								
		6Z	7Z	8Z	9Z	10Z	11Z	12Z



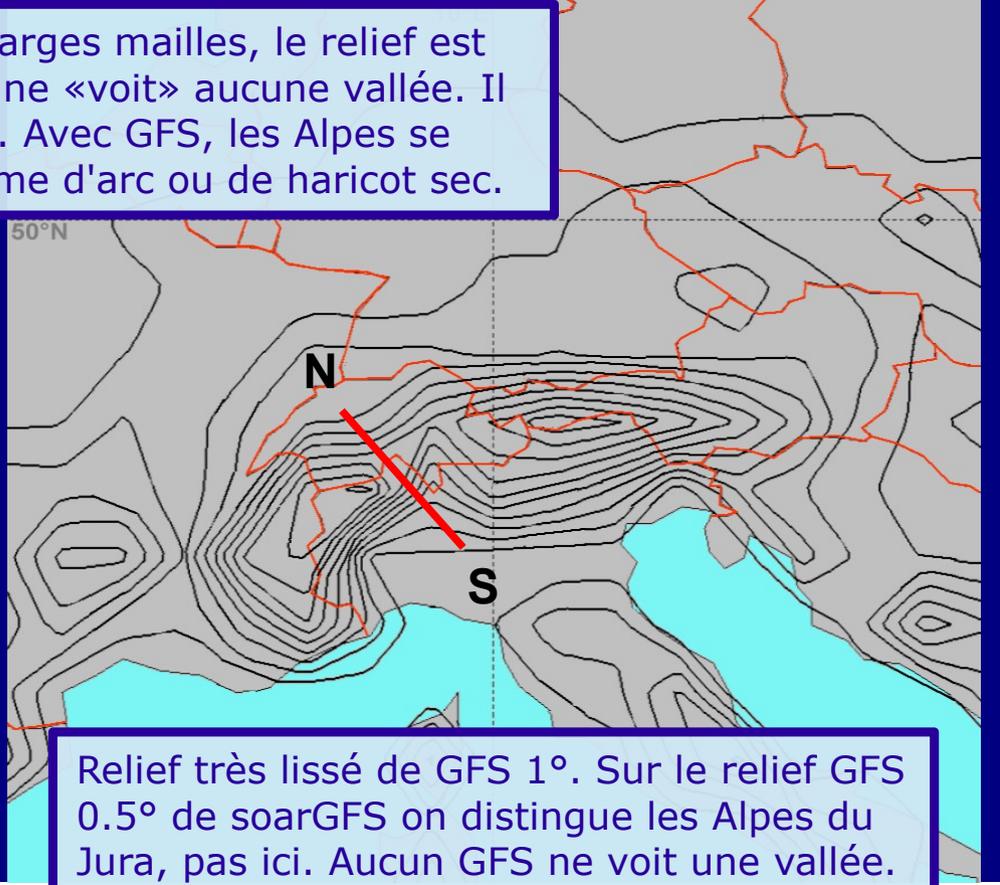
SoarWRF, le programme WRF de soaringmeteo, a une résolution horizontale de 2 km et présente les résultats chaque heure de 6Z (8 heures du matin, heure d'été) à 15Z, (17 heures, heure d'été).

Actuellement soarGFS et soarWRF ne concernent que l'arc alpin.

Puisque le modèle GFS 0,5° est un modèle synoptique à larges mailles, le relief est extrêmement simplifié. Par exemple, pour les Alpes, GFS ne «voit» aucune vallée. Il «devine» juste le Plateau suisse entre le Jura et les Alpes. Avec GFS, les Alpes se présente donc comme une énorme montagne lisse en forme d'arc ou de haricot sec.

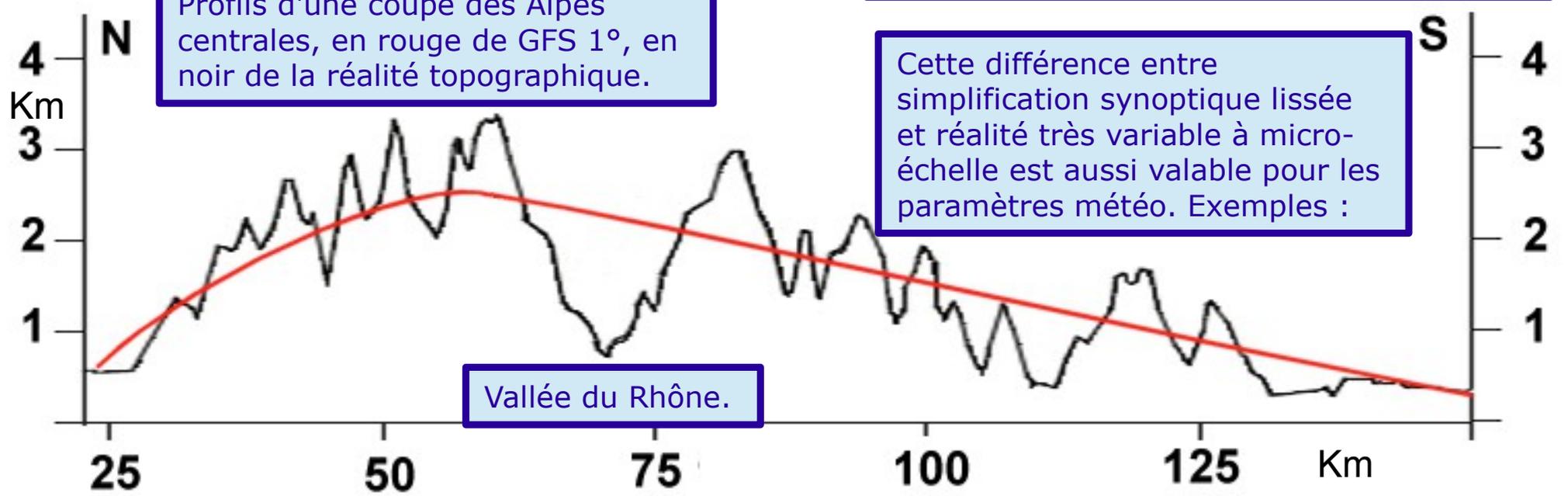


Relief réel très complexe des Alpes avec de nombreux sommets et vallées différents.



Relief très lissé de GFS 1°. Sur le relief GFS 0.5° de soarGFS on distingue les Alpes du Jura, pas ici. Aucun GFS ne voit une vallée.

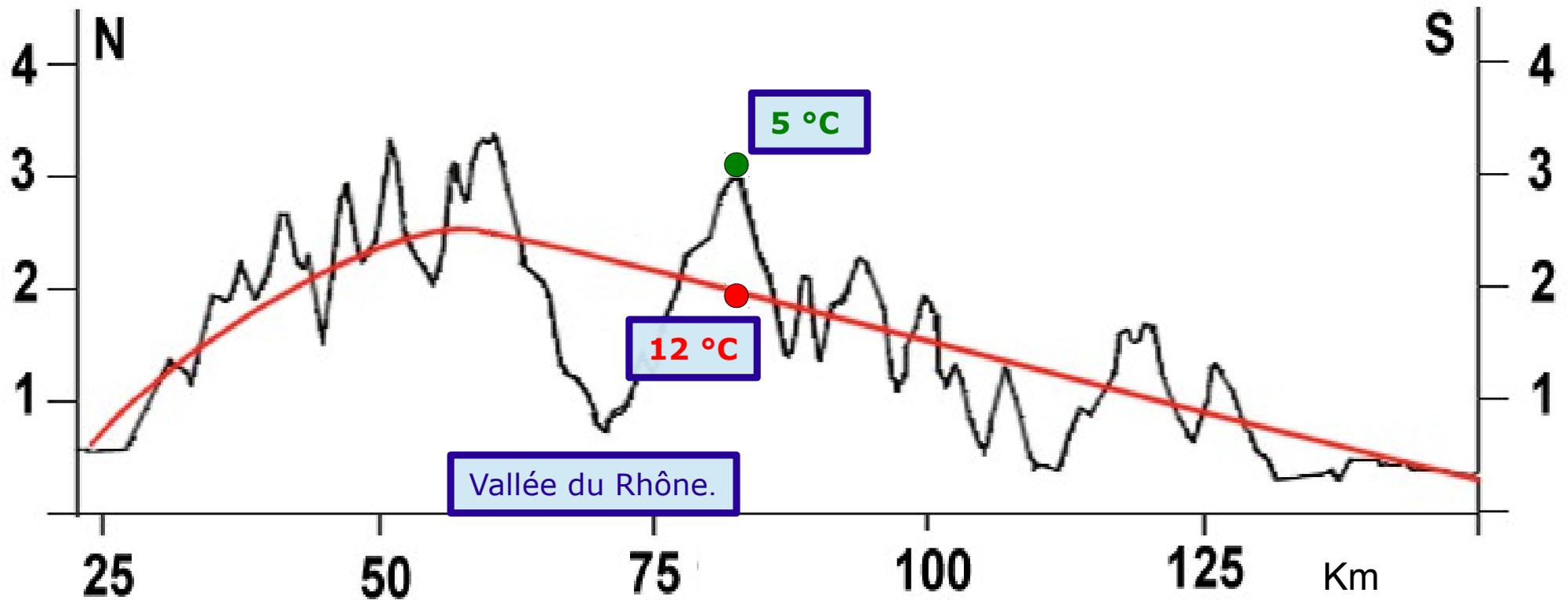
Profils d'une coupe des Alpes centrales, en rouge de GFS 1°, en noir de la réalité topographique.



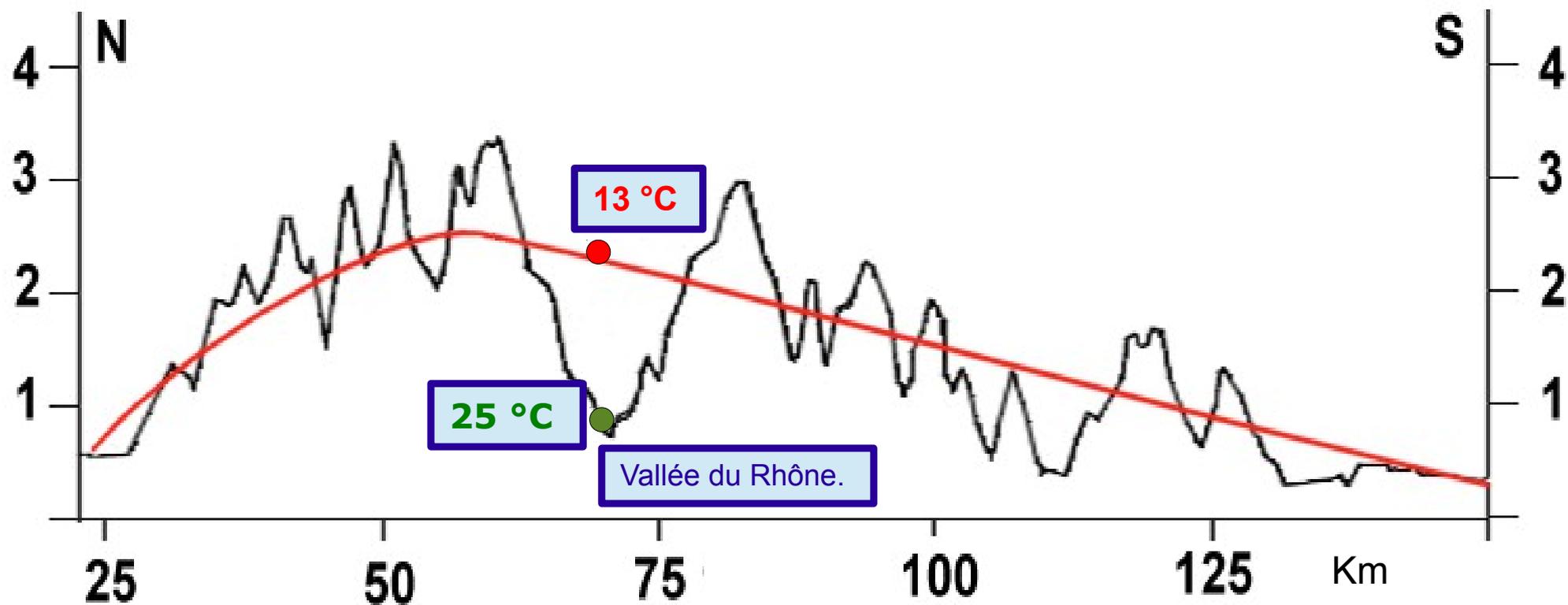
Cette différence entre simplification synoptique lissée et réalité très variable à micro-échelle est aussi valable pour les paramètres météo. Exemples :

Vallée du Rhône.

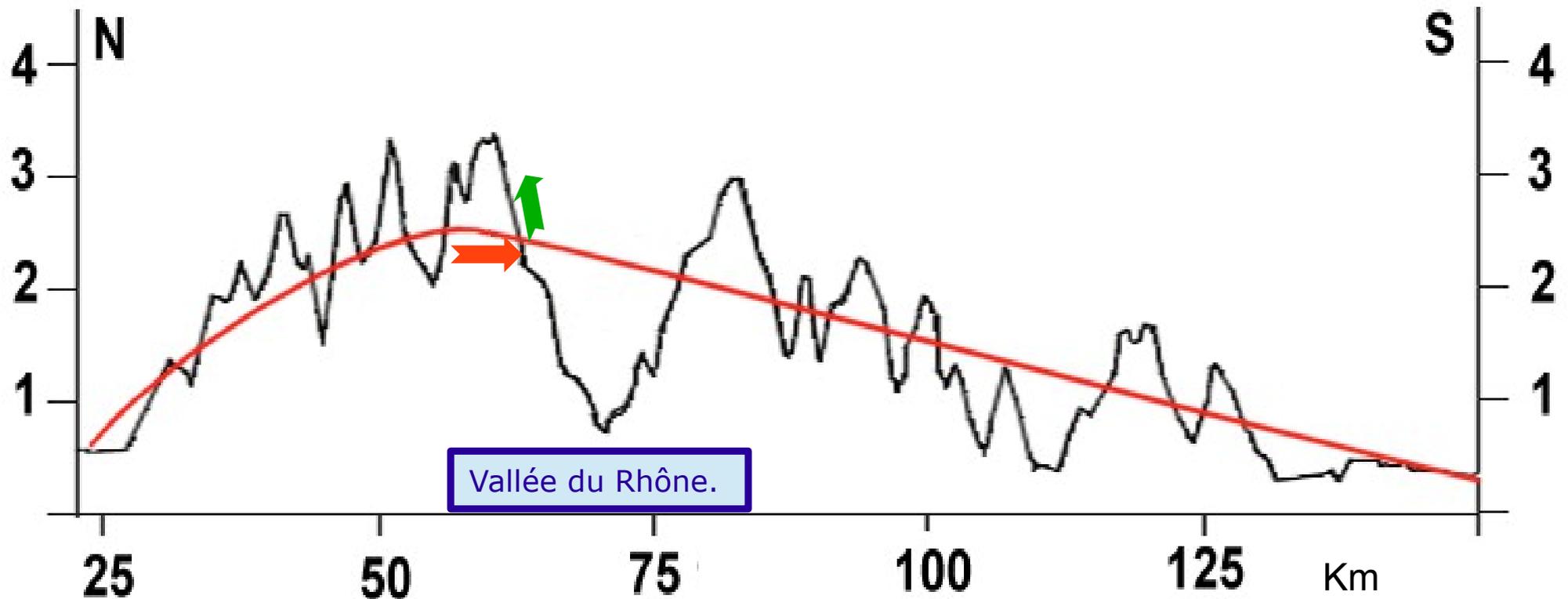
Imaginons une température prévue de 12°C par GFS au niveau d'un pic non visible à macroéchelle. Cependant la température réelle vaut par exemple 5°C au sommet du pic puisque l'altitude de ce dernier, à échelle réelle, est évidemment plus haute que celle du modèle.



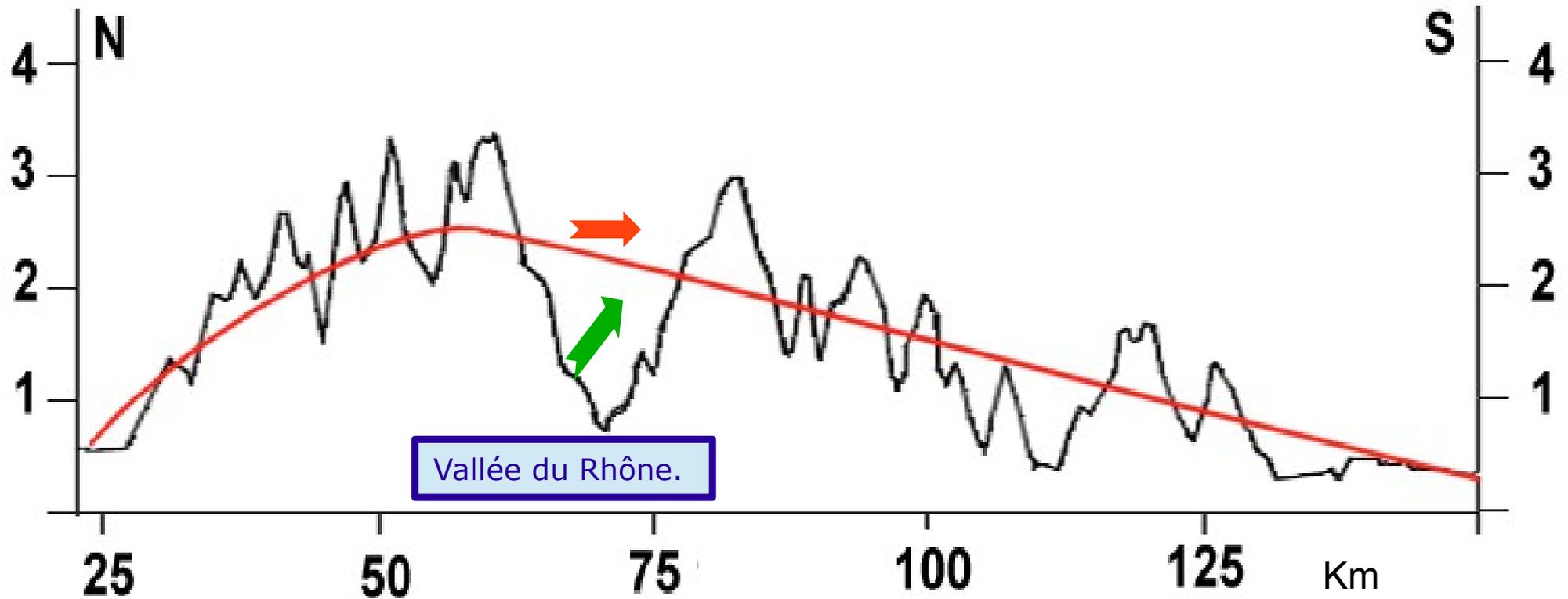
Inversement, au fond de la large vallée non vue par GFS, le modèle prévoit par exemple une température de 13°C alors qu'en réalité on mesure 25°C car l'altitude réel dans cette vallée profonde est plus basse que celle du modèle.



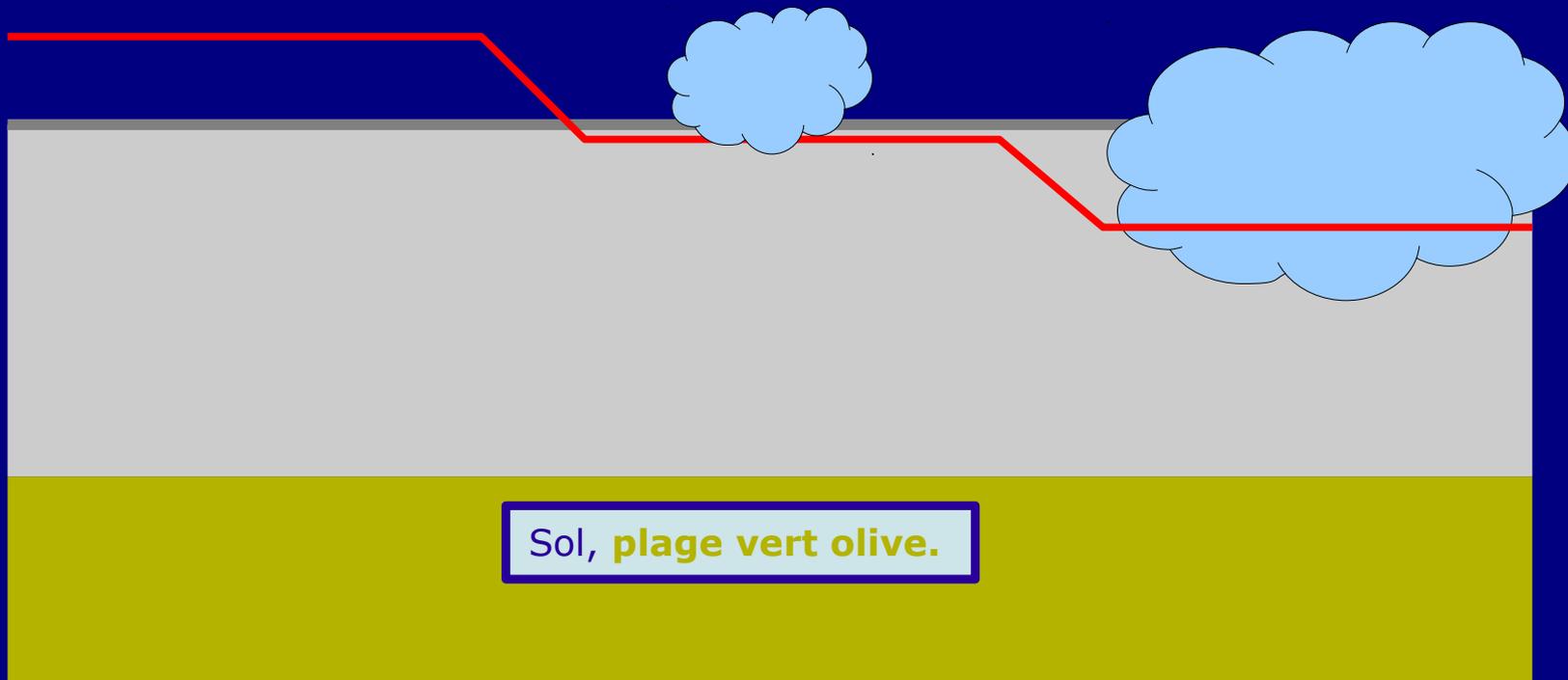
Le raisonnement est aussi valable avec le vent. Admettons un petit **vent du N** prévu par GFS au niveau d'un pic montagneux. En réalité sur la face sud exposée au soleil, on observe un **petit vent local thermique ascendant venant du sud** le long de cette pente.



Et dans le fond de la vallée, à la place du **vent du nord faible** prévu par GFS on observe bien entendu un **vent de vallée** modéré (vent régional) dans la direction montante de la vallée.



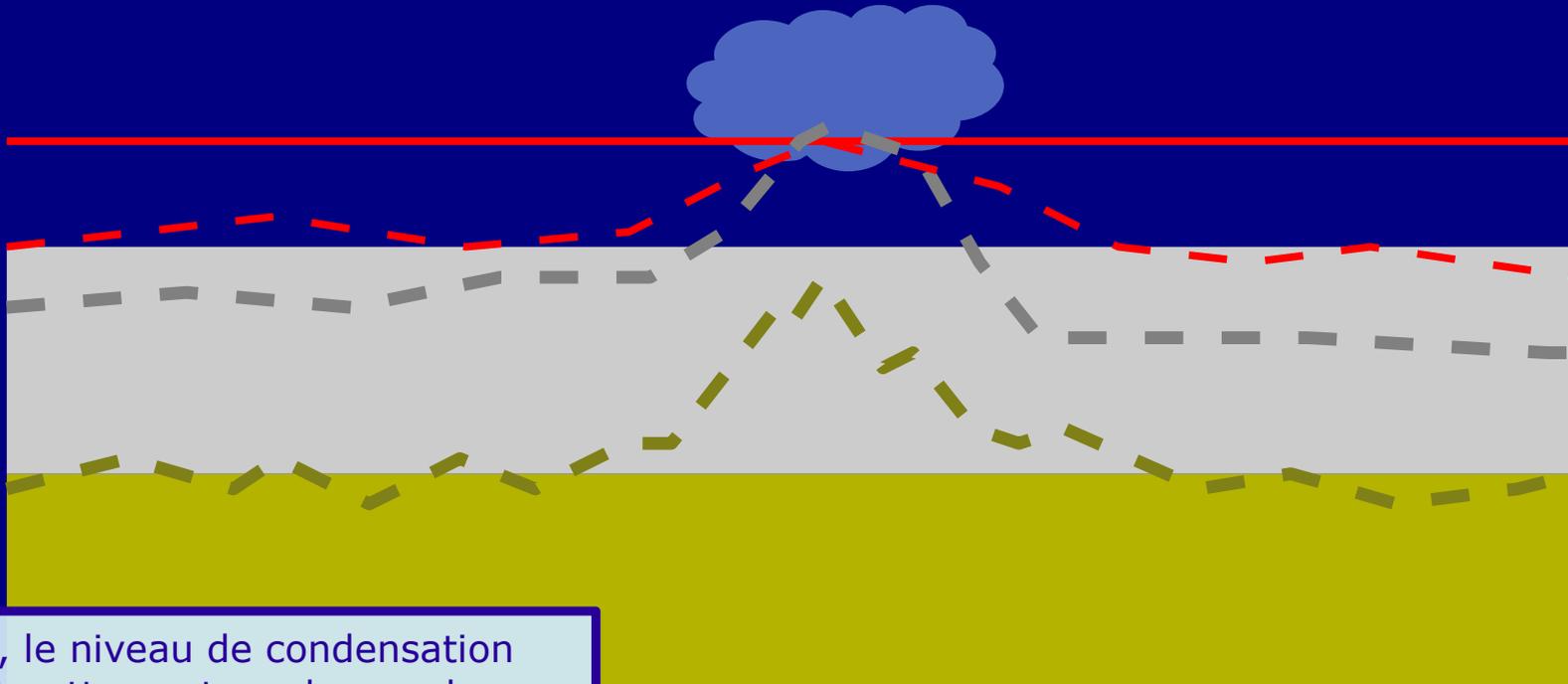
Voici encore un exemple d'interprétation entre l'échelle synoptique et celle de la réalité avec le plafond de la couche convective et le niveau de condensation des cumulus.



Mais avant, un petit rappel sur la base des cumulus est utile. L'altitude de la base des cumulus, c'est-à-dire le niveau de condensation des nuages de la couche convective, dépend du degré d'humidité de l'air au sol. Plus c'est humide, moins la base des cumulus est élevée et vice-versa. Rappelons que la couche convective, notion très importante, est la couche de la basse troposphère où se produisent nos thermiques.

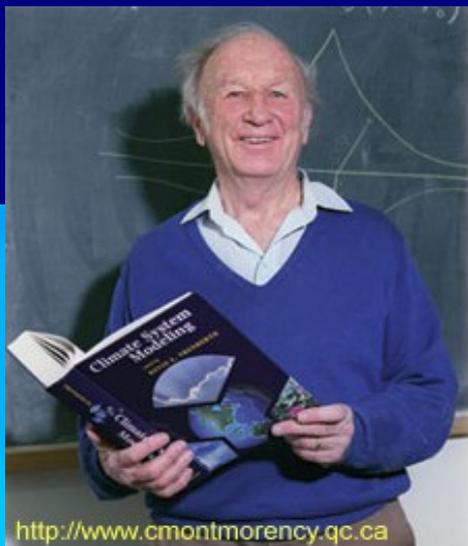
Si l'altitude de condensation (**ligne rouge**) se trouve au-dessus du sommet (**ligne grise**) de la couche convective (**plage grise**), il n'y a pas de condensation possible donc pas de cumulus puisque par définition le thermique qui engendre le nuage ne dépasse pas le sommet de la couche convective. Par contre il y a de jolis cumulus si les 2 lignes sont environ à la même altitude (milieu de la figure). Si le niveau de condensation est nettement plus bas que le sommet de la couche convective il y a risque de surdéveloppement nuageux (à droite de la figure).

Pour un modèle comme GFS on peut trouver l'exemple suivant :



Ici, le niveau de condensation est nettement au-dessus du sommet de la couche convective, prévus à échelle synoptique par GFS. En réalité, au-dessus d'une montagne «non vue» par GFS, le sommet de la couche convective peut rejoindre le niveau de condensation. Les cumulus peuvent donc se former sur ce relief alors que GFS n'a pas prévu de cumulus à cet endroit !

En continu, l'état du temps prévu et le relief lissé vu par GFS. En pointillé, la réalité plus variable. En vert le sol et le relief. En rouge le niveau de condensation. En gris la couche convective.



<http://www.cmontmorency.qc.ca>

Lorenz, météorologue américain, (1917-2008).



Les prévisions de soarGFS se déroulent sur 7 jours. Évidemment, à partir du 3ème et 4ème jour, la précision du modèle diminue. Vous risquez d'être souvent déçus des prévisions des derniers jours.



C'est que, comme tous les modèles, GFS subit « l'effet papillon » et les conséquences de la théorie du chaos, décrit par Lorenz. Le battement d'aile d'un papillon peut provoquer une tempête plusieurs jours après, à l'autre bout de la planète. C'est une image qui n'est en réalité pas tout à fait exacte. Mais plus précisément, la moindre petite différence entre deux états initiaux peut amener à des prévisions diamétralement opposées quelques jours après. Une minuscule différence entre les états initiaux peut augmenter de façon exponentielle avec le temps. C'est la limite inévitable de la prévisibilité des modèles.

Une image fractale, symbole de la théorie du chaos.

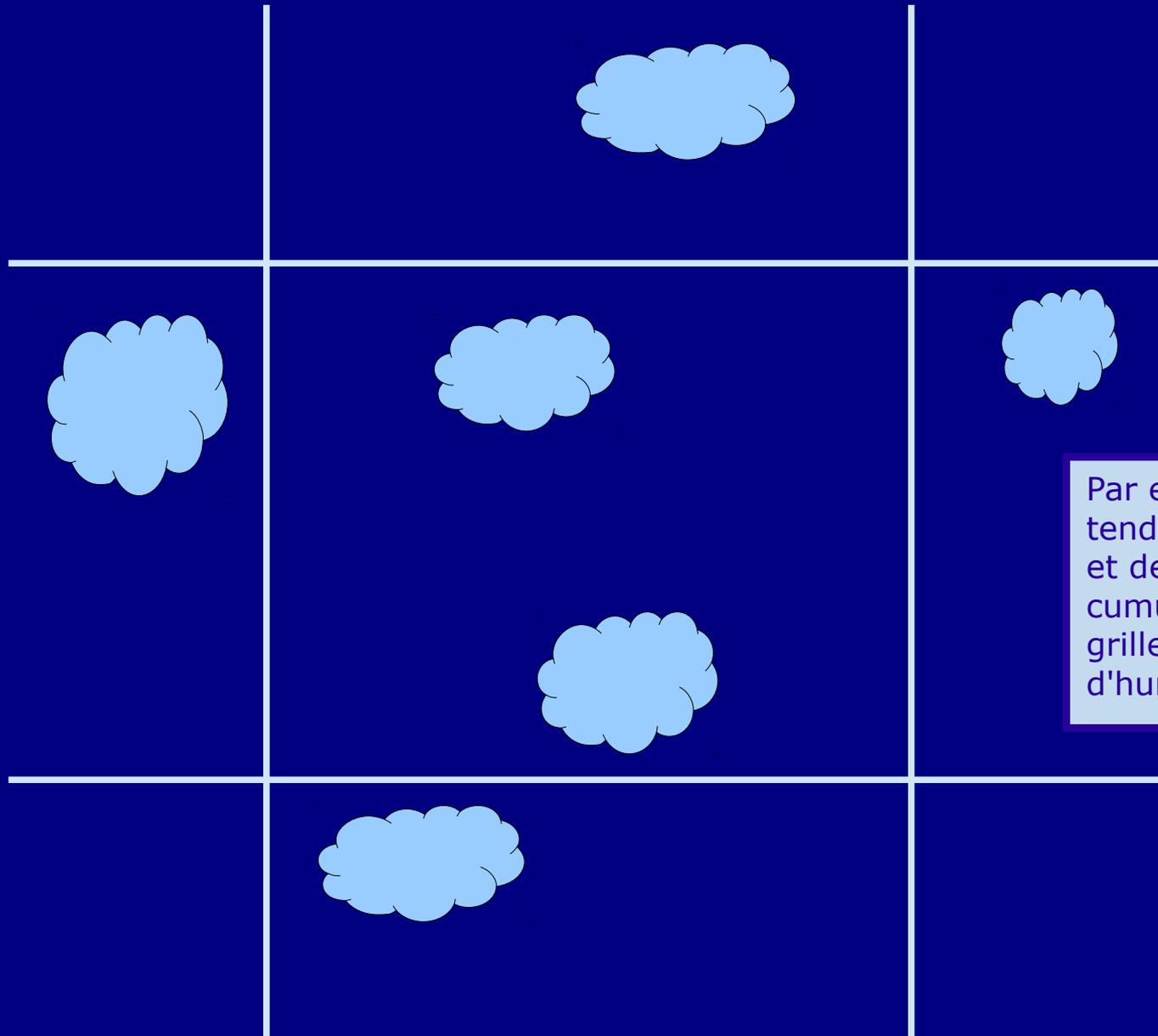
Il y a cependant une petite astuce empirique qui semble naturelle et sensée. Un lundi par exemple vous voulez évaluer les conditions de vol pour le week-end suivant. Vous remarquez ce week-end ensoleillé et peu venteux. Si ces conditions météo sont prévues sans changement notable le lendemain mardi et le surlendemain mercredi pour ce même week-end, alors la probabilité de prévisions fiables augmente nettement !

GFS 0.5° forecast around #46.5-E7. Landmark name: Gruyère-Riviera. Mean macroscale ground elevation: 1016m. Table generated on 2013-Sep-27 at 10:29:55Z.

Forecast time and soundings links	09Z>	12Z>	15Z>	09Z>	12Z>	15Z>	09Z>	12Z>	15Z>	09Z>	12Z>	15Z>	09Z>	12Z>	15Z>	09Z>	12Z>	15Z>				
Forecast date and similar days links	Saturday 28 September 2013>			Sunday 29 September 2013>			Monday 30 September 2013>			Tuesday 01 October 2013>			Wednesday 02 October 2013>			Thursday 03 October 2013>			Friday 04 October 2013>			
Initialization date : 27_sep.2013 at 06Z	+27h	+30h	+33h	+51h	+54h	+57h	+75h	+78h	+81h	+99h	+102h	+105h	+123h	+126h	+129h	+147h	+150h	+153h	+171h	+174h	+177h	
ThQ (%) (Thermal Quality)	0	42	0	0	0	11	39	93	87	1	81	70	0	0	0	0	0	0	0	0	27	71
Wind dir. & speed at 600 hPa (* Kmh)	246 18	224 27	221 35	182 19	192 17	172 13	52 8	290 8	272 13	291 25	288 27	298 31	308 20	300 17	298 20	257 36	263 32	272 29	231 24	229 20	232 33	
Wind direction Icon at 600 hPa																						
Wind dir. & speed at 650 hPa (* Kmh)	239 16	220 27	221 34	203 20	213 11	152 6	25 9	306 6	280 10	274 19	264 19	269 23	302 12	308 11	298 12	244 37	262 25	264 23	227 25	227 33	225 35	
Wind direction Icon at 650 hPa																						
Wind dir. & speed at 700 hPa (* Kmh)	238 17	222 24	228 32	215 16	216 7	135 3	3 12	327 6	279 8	269 17	264 17	269 20	280 8	273 8	267 8	217 30	264 21	256 18	227 23	227 31	226 35	
Wind direction Icon at 700 hPa																						
Wind dir. & speed at 750 hPa (* Kmh)	237 16	219 21	221 25	205 11	186 4	62 4	355 10	322 3	250 5	267 13	266 12	267 11	295 4	232 5	222 9	195 24	245 18	245 14	223 17	221 24	218 28	
Wind direction Icon at 750 hPa																						
Wind dir. & speed at 800 hPa (* Kmh)	225 12	212 14	209 11	161 7	78 5	55 0	349 4	293 4	267 4	258 10	251 6	221 5	45 1	162 4	179 9	200 17	220 15	227 10	213 12	213 13	212 16	
Wind direction Icon at 800 hPa																						
Wind dir. & speed at 850 hPa (* Kmh)	201 7	247 5	352 7	112 6	32 9	20 14	279 2	306 7	316 7	242 7	284 5	305 4	82 4	11 4	33 6	207 13	208 12	265 5	218 8	250 8	272 7	
Wind direction Icon at 850 hPa																						
Wind dir. & speed at 900 hPa (* Kmh)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	257 5	281 7	303 8
Wind direction Icon at 900 hPa																						
Wind dir. & speed at 10m AGL (* Kmh)	150 1	317 5	351 8	70 3	13 8	3 10	203 4	310 7	318 7	253 4	305 5	321 5	27 3	349 7	5 7	204 5	232 6	302 5	267 4	289 7	305 7	
Wind direction Icon at 10m AGL																						
Total cloud cover (%)	36	33	36	75	78	60	3	2	3	8	10	27	66	57	67	98	96	96	5	69	57	15
Low level cloud cover (%)	0	0	0	4	2	2	1	3	4	3	3	2	0	0	0	2	16	3	0	0	0	1
Middle level cloud cover (%)	0	0	1	50	31	2	1	1	1	0	2	1	0	0	0	98	94	0	2	0	2	1
High level cloud cover (%)	36	33	35	50	65	59	1	0	0	0	6	27	66	57	66	97	93	1	68	56	13	
Convective cloud cover (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Boundary layer cloud cover (%)	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	2	0	0	0	0	1	1	1	2	0	0	1
3h accum. total precipitation (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3h accum. convective precipitation (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K-index thunderstorm probability (%)	36	32	44	61	65	66	58	61	63	53	54	54	26	23	25	47	57	60	44	40	44	
High level cloud cover (%)	7	26	92	42	38	55	73	72	79	0	0	1	5	7	4	39	97	9	97	99	89	62
Convective cloud cover (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Boundary layer cloud cover (%)	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	2	0	0	0	0	1	1	1	2	0	0	1
3h accum. total precipitation (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3h accum. convective precipitation (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K-index thunderstorm probability (%)	58	57	51	25	32	43	58	65	66	56	62	62	55	53	47	16	17	27	56	53	59	

Inversement, si ces prévisions changent beaucoup d'un jour à l'autre, elles deviennent très aléatoires et peu fiables.

Certains phénomènes, comme les thermiques et les cumulus, sont plus petits que la résolution du modèle. On doit donc donner à ces « petits » phénomènes une existence implicite au sein du modèle. La paramétrisation est un ensemble de méthodes et calculs qui prédit ces phénomènes en fonction de valeurs moyennes de certains paramètres au point de grille.



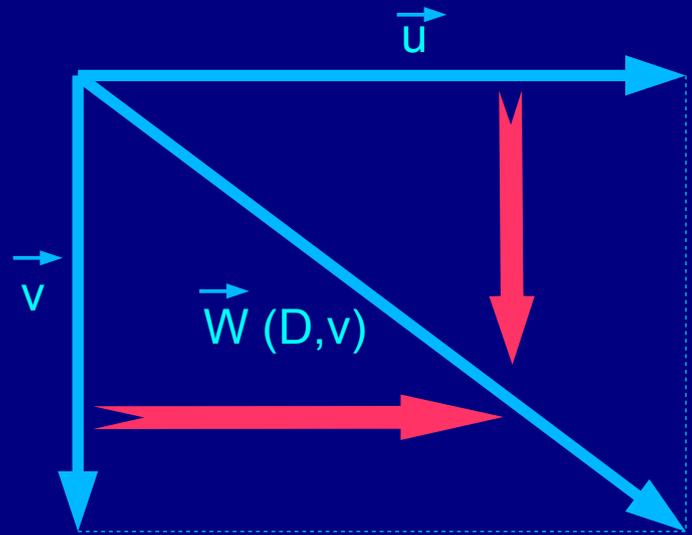
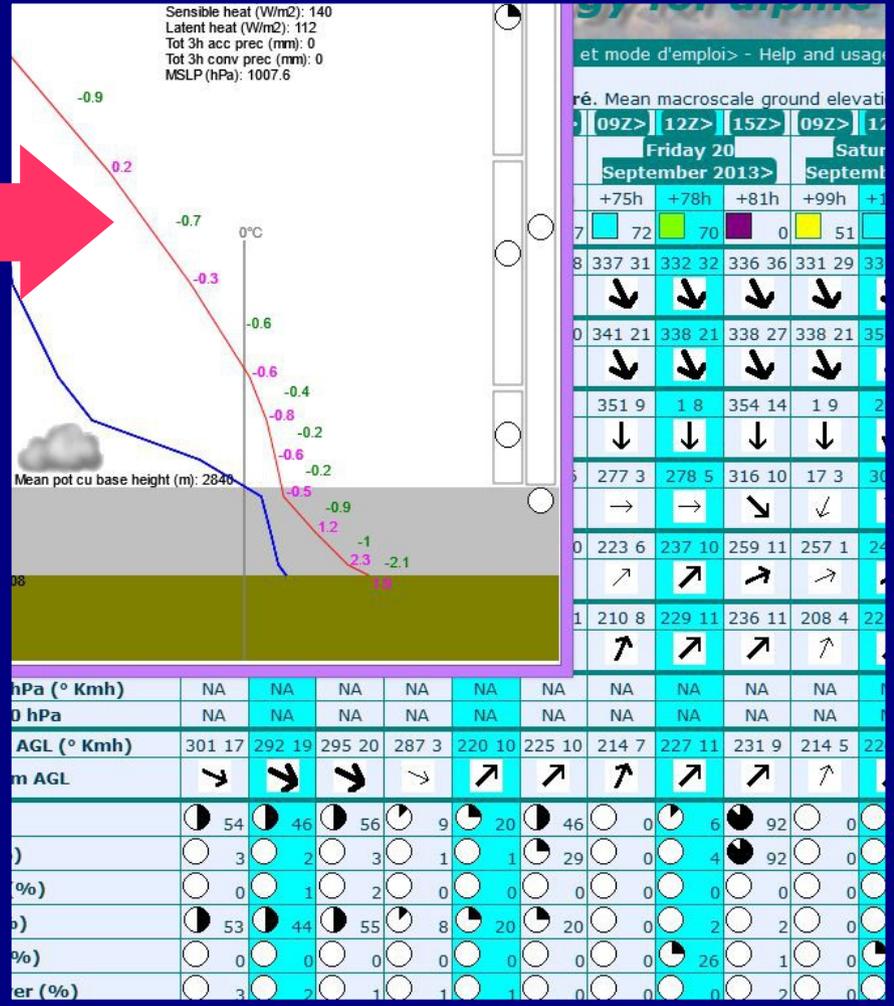
Par exemple on peut calculer une tendance générale de la quantité et de l'altitude de la base des cumulus aux alentours du point de grille à partir de la valeur d'humidité de l'air en ce point.

```

56:21435:d=2013091406:HGT:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=12096
57:21972:d=2013091406:TMP:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=214.7
58:22316:d=2013091406:RH:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
59:22860:d=2013091406:UGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
60:23404:d=2013091406:VGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=9437.62
61:23948:d=2013091406:HGT:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=234.6
62:24492:d=2013091406:TMP:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=61
63:25036:d=2013091406:RH:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
64:25580:d=2013091406:UGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
65:26124:d=2013091406:VGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=9437.62
66:26668:d=2013091406:HGT:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=234.6
67:27212:d=2013091406:TMP:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=61
68:27756:d=2013091406:RH:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
69:28300:d=2013091406:UGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
70:28844:d=2013091406:VGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=9437.62
71:29388:d=2013091406:HGT:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=234.6
72:30000:d=2013091406:TMP:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=61
73:30612:d=2013091406:RH:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
74:31224:d=2013091406:UGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
75:31836:d=2013091406:VGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=9437.62
76:32448:d=2013091406:HGT:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=234.6
77:33060:d=2013091406:TMP:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=61
78:33672:d=2013091406:RH:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
79:34284:d=2013091406:UGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
80:34896:d=2013091406:VGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=9437.62
81:35508:d=2013091406:HGT:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=234.6
82:36120:d=2013091406:TMP:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=61
83:36732:d=2013091406:RH:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
84:37344:d=2013091406:UGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
85:37956:d=2013091406:VGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=9437.62
86:38568:d=2013091406:HGT:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=234.6
87:39180:d=2013091406:TMP:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=61
88:39792:d=2013091406:RH:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
89:40404:d=2013091406:UGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
90:41016:d=2013091406:VGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=9437.62
91:41628:d=2013091406:HGT:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=234.6
92:42240:d=2013091406:TMP:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=61
93:42852:d=2013091406:RH:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
94:43464:d=2013091406:UGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
95:44076:d=2013091406:VGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=9437.62
96:44688:d=2013091406:HGT:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=234.6
97:45300:d=2013091406:TMP:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=61
98:45912:d=2013091406:RH:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
99:46524:d=2013091406:UGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
100:47136:d=2013091406:VGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=9437.62
101:47748:d=2013091406:HGT:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=234.6
102:48360:d=2013091406:TMP:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=61
103:48972:d=2013091406:RH:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
104:49584:d=2013091406:UGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
105:50196:d=2013091406:VGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=9437.62
106:50808:d=2013091406:HGT:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=234.6
107:51420:d=2013091406:TMP:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=61
108:52032:d=2013091406:RH:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
109:52644:d=2013091406:UGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
110:53256:d=2013091406:VGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=9437.62
111:53868:d=2013091406:HGT:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=234.6
112:54480:d=2013091406:TMP:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=61
113:55092:d=2013091406:RH:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
114:55704:d=2013091406:UGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
115:56316:d=2013091406:VGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=9437.62
116:56928:d=2013091406:HGT:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=234.6
117:57540:d=2013091406:TMP:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=61
118:58152:d=2013091406:RH:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
119:58764:d=2013091406:UGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
120:59376:d=2013091406:VGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=9437.62
121:59988:d=2013091406:HGT:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=234.6
122:60600:d=2013091406:TMP:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=61
123:61212:d=2013091406:RH:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
124:61824:d=2013091406:UGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
125:62436:d=2013091406:VGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=9437.62
126:63048:d=2013091406:HGT:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=234.6
127:63660:d=2013091406:TMP:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=61
128:64272:d=2013091406:RH:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
129:64884:d=2013091406:UGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
130:65496:d=2013091406:VGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=9437.62
131:66108:d=2013091406:HGT:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=234.6
132:66720:d=2013091406:TMP:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=61
133:67332:d=2013091406:RH:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
134:67944:d=2013091406:UGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
135:68556:d=2013091406:VGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=9437.62
136:69168:d=2013091406:HGT:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=234.6
137:69780:d=2013091406:TMP:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=61
138:70392:d=2013091406:RH:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
139:71004:d=2013091406:UGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
140:71616:d=2013091406:VGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=9437.62
141:72228:d=2013091406:HGT:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=234.6
142:72840:d=2013091406:TMP:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=61
143:73452:d=2013091406:RH:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
144:74064:d=2013091406:UGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=96
145:74676:d=2013091406:VGRD:200 mb:123 hour fcst::lon=9.000000,lat=46.000000,val=9437.62

```

Une fois les calculs de simulation réalisés par un modèle, les données prévisionnelles disponibles en sortie (« output ») doivent subir un post-traitement. La production de graphiques conviviaux fait partie du post-traitement mais avant il y a souvent des calculs complémentaires.

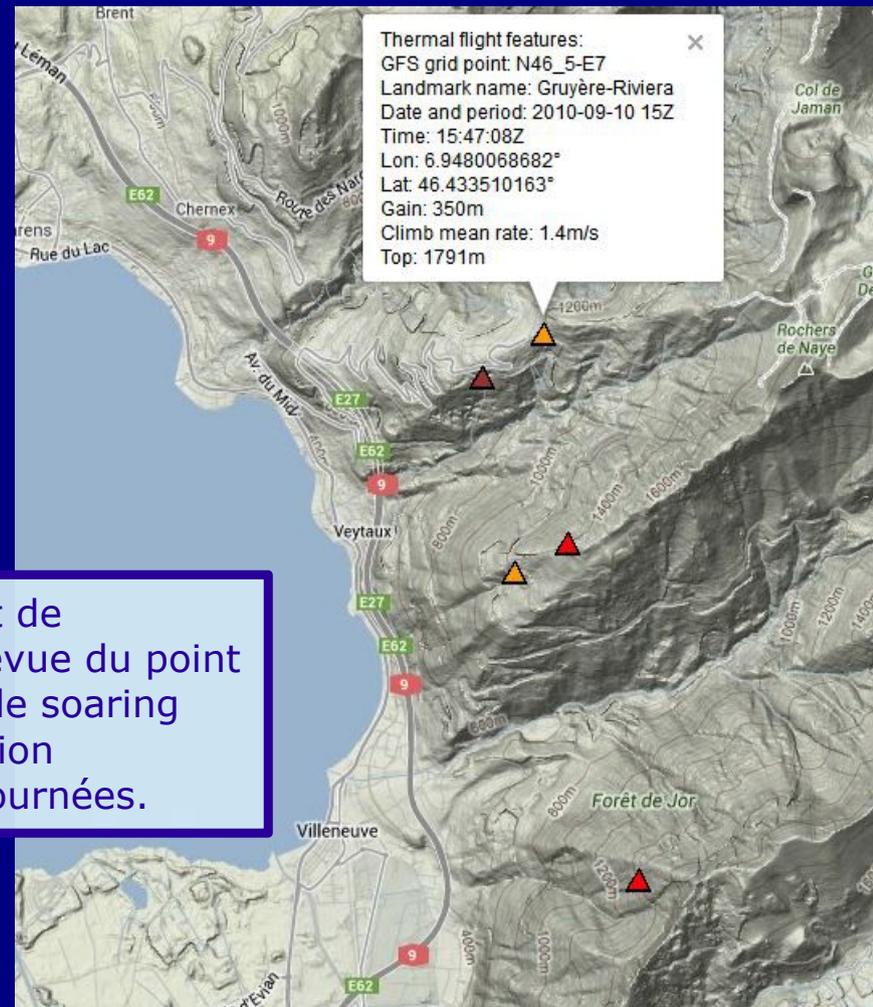


On peut réaliser des paramétrisations post-traitement mais aussi des calculs de paramètres plus accessibles aux utilisateurs. Par exemple, les vents sont fournis par les modèles sous la forme de composantes vectorielles u (est-ouest) et v (sud-nord). A partir de u et v on peut calculer la direction D en degrés et la vitesse V du vent W. Pour l'humidité, on peut calculer la température de point de rosée à partir de la température de l'air, de la pression atmosphérique et de l'humidité relative.

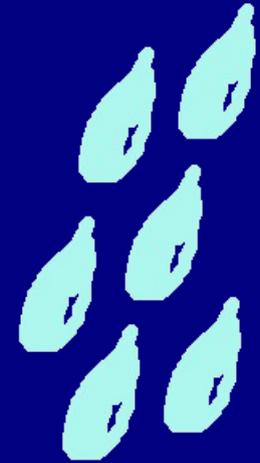
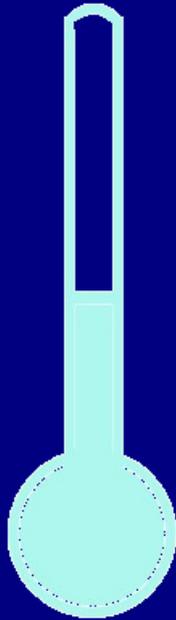
Un post-traitement particulier et très utile est le MOS (Model Output Statistics). MOS tente de corriger les biais des prévisions des modèles. Par exemple la température de l'air au fond d'une vallée non vue par le modèle peut être corrigée à partir de valeurs météorologiques prévues par le modèle et de la statistique entre les anciennes températures mesurées de ce fond de vallée et les valeurs archivées d'anciennes prévisions du modèle.

Le MOS existe aussi pour le vent local, la tendance orageuse, le risque de gel, la probabilité de précipitations. etc. MOS permet aux prévisions numériques d'être clairement plus performantes.

Dans soarGFS, il y a un MOS original. Il s'agit de retrouver des journées semblables à celle prévue du point de vue météo, puis de rechercher les traces de soaring thermique réalisées lors des vols de compétition enregistrés par GPS pendant ces anciennes journées.



Les paramètres prédits par un modèle peuvent être classés par ordre décroissant de précision : 1/ vents, 2/ température, 3/ humidité, 4/ nuages, 5/ pluie. Les nuages et la pluie sont donc difficiles à prévoir !



Augmenter la résolution d'un modèle d'un facteur 2 signifie une augmentation du temps de calcul de 16 fois. Il y a donc des limites sérieuses pour améliorer la précision des modèles.

L'évaluation humaine (pilotes) des résultats d'un modèle devrait se faire en tenant compte des limites et des failles du modèle, de son expérience de vol et des souvenirs d'observations du ciel, avec nuances et modestie, notamment lorsque le modèle émet des prévisions peu probables.

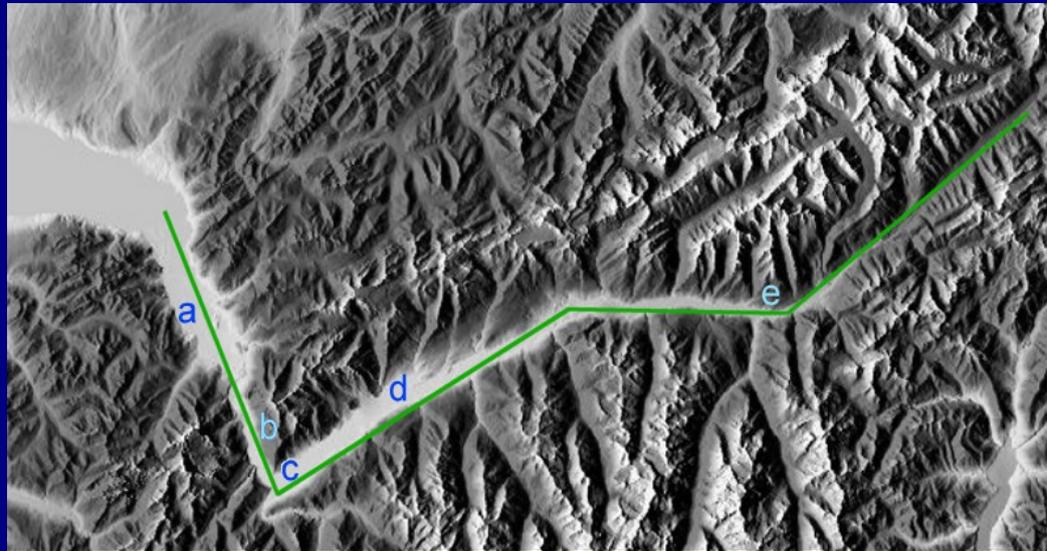
Voici trois exemples de failles des modèles :

1/ Le modèle a tendance à sous-estimer l'humidité du sol et de l'air en basse couche surtout lorsqu'il y a eu de fortes précipitations précédentes mais aussi en automne lorsque les nuits sont longues et que l'humidité du sol a de la peine à s'évacuer. Pour cela il est utile de consulter les cartes radar de la nuit et de la veille pour estimer la quantité de pluie tombée dans la région de vol. Un autre indice est de comparer les températures de point de rosée mesurées le matin dans diverses stations météo et celle prévues du modèle. Cette sous-estimation de l'humidité conduit à ce que les cumulus sont plus nombreux et plus bas que prévus.

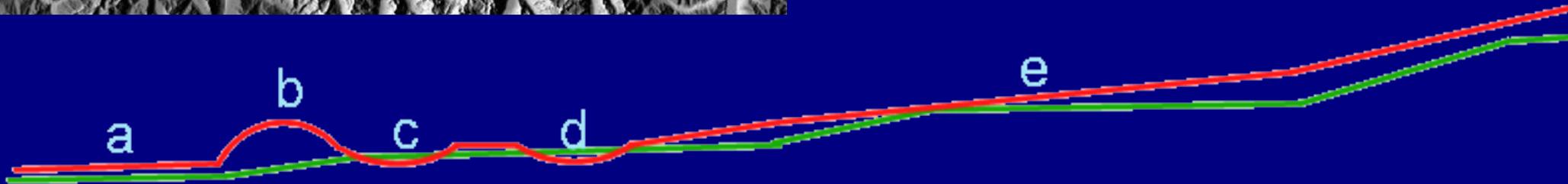
En rouge la courbe d'état de température. En bleu la courbe de température de point de rosée (humidité). En continu, les courbes et la nébulosité prévues par le modèle. En pointillé, les courbes et la nébulosité réelles observées.



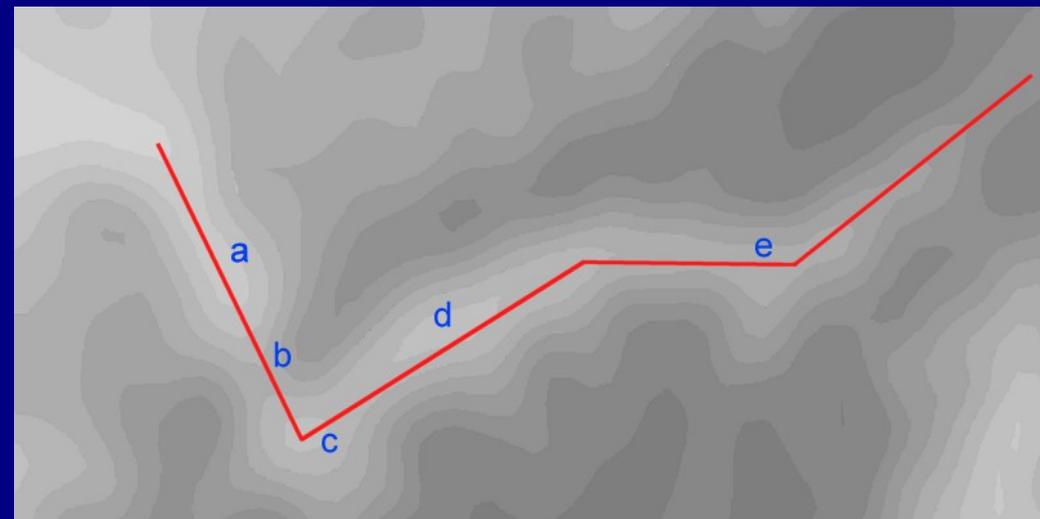
**2/** Lorsqu'une large vallée, bien visible à méso-échelle, présente un rétrécissement local, un col apparaît sur le relief du modèle alors qu'il n'existe pas en réalité. Ceci fausse sensiblement la prévision du vent de vallée en amont et probablement par ricochet celle d'autres paramètres.



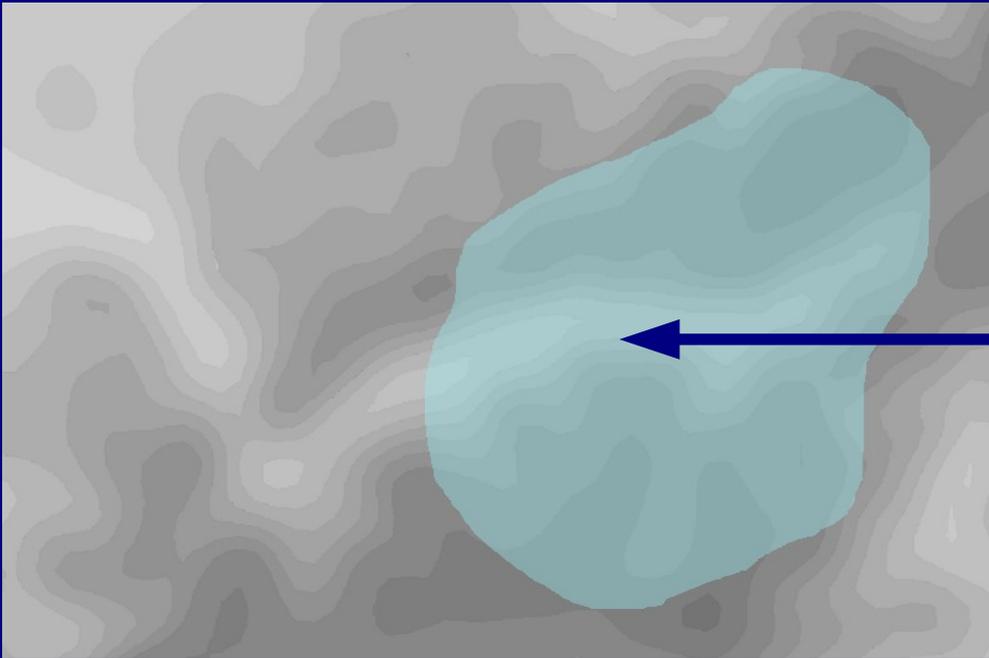
En rouge, profil du fond de vallée « vu » par le modèle. En vert, profil topographique réel du fond de vallée. Malgré des irrégularités, le fond de vallée réel monte toujours d'aval en amont.



Le fond de vallée « vu » par le modèle monte régulièrement en a et e. En b, il y a un faux col à cause du rétrécissement local de vallée et en c et d, il y a de fausses cuvettes en raison de l'élargissement local de la vallée.

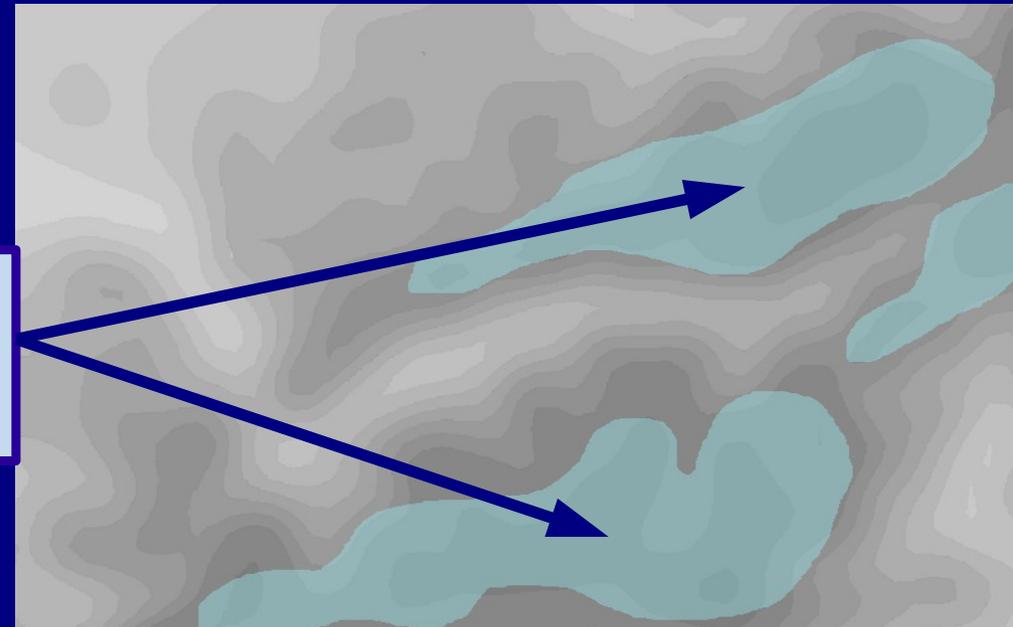


**3/** Pour une raison peu claire, les modèles à méso-échelle tendent à ne pas adapter la couverture neigeuse au sol à leur relief à méso-échelle. Au printemps surtout, des vallées sont considérées comme couvertes de neige alors qu'en réalité elles ne le sont pas. L'épaisseur de la couche convective et la force des thermiques dans ces vallées seront très sous-estimées.



Couverture neigeuse grossière qui indique faussement qu'une portion de la large vallée est recouverte de neige.

Couverture neigeuse adaptée au relief du modèle. Hélas cette configuration n'est pas encore implémentée dans nombreux modèles haute résolution.



Voilà, vous savez l'essentiel sur les modèles numériques pour la prévision du temps (météo).

