



Temperatur, Feuchtigkeit einer Thermik

Température, humidité et flottabilité d'un thermique

Die konvektive Grenzschicht (KG), in der sich unsere Thermik bewegt, wurde in früheren Ausgaben des «Swiss Glider» bereits ausführlich beschrieben. Wie aber entwickeln sich die Temperatur T und die Feuchtigkeit (Taupunkt Td) in der Thermik im Vergleich zur umgebenden Luft in dieser KG? Und wie beeinflussen sich diese Werte untereinander, damit die Thermikluft steigt?



Jean Oberson www.soaringmeteo.ch

Wir alle haben gelernt, dass die Thermik steigt, weil die Luft in der Thermik wärmer und somit leichter ist. Das ist aber etwas vage. Zudem, und das ist weniger bekannt, ist auch Wasserdampf leichter als trockene Luft. Dieses unsichtbare Gas besteht aus mikroskopisch kleinen Wassertropfen, die in der Luft schweben – nicht zu verwechseln mit Nebel, der sichtbar ist. Nun unterscheiden sich aber auch die Feuchtigkeit der Luft in der Konvektion und diejenige der umgebenden Luft; darauf werden wir noch eingehen. Somit ist die Frage interessant, welche Rolle die Feuchtigkeit, zusätzlich zur Temperatur, in diesem grossartigen, natürlichen und umweltfreundlichen Motor, der Thermik, spielt.

Ein konkretes Beispiel (Abb. 1). Nehmen wir eine 1 m^3 grosse, 1 kg schwere Luftmasse V, die von einer Luft umgeben ist, die 2 g mehr pro Kubikmeter wiegt. Nach dem Archimedischen Prinzip ist der Netto-Auftrieb, dem V ausgesetzt wird, gleich 2 g. Diese beiden Werte, 2 g und 1 kg, sind nicht zufällig gewählt, entsprechen sie doch dem Auftrieb und

La couche convective (CC), dans laquelle se confinent nos thermiques, a été largement décrite dans des articles précédents du «Swiss Glider». Mais comment évoluent la température T et l'humidité (température de rosée Td) dans un thermique par rapport à l'air ambiant de cette CC et comment ces deux valeurs agissent-elles pour que l'air du thermique monte?

Nous avons tous appris qu'un thermique monte car l'air y est plus chaud et donc plus léger, mais ceci reste assez vague. De plus, et c'est moins connu, la vapeur d'eau, gaz invisible, à ne pas confondre avec le brouillard, qui lui est visible et constitué de micro-gouttelettes d'eau liquide en suspension dans l'air, est plus légère que l'air sec. Or, on le verra par la suite, il existe aussi une différence d'humidité entre l'air de la convection et l'air ambiant. Il est dès lors intéressant de se demander quel rôle joue l'humidité, en plus de la température, dans notre fabuleux moteur naturel et écologique, le thermique.

Prenons un exemple concret (figure 1). Soit un volume V de 1 m^3 d'air pesant 1 kg, entouré d'air pesant 2 g de plus par m^3 . Selon la loi d'Archimède, la poussée nette vers le haut, appelée flottabilité, que subit V est de 2 g. Ces valeurs de 2 g et de 1 kg ne sont pas prises au hasard mais correspondent bien, comme ordre de grandeur, à la flottabilité et au poids de 1 m^3 d'air dans un thermique à 1500–2000 m d'altitude. Évidemment, en raison de la variation de pression avec



und Auftrieb

dem Gewicht einer 1 m^3 grossen Luftmasse in einer Thermik zwischen 1500 und 2000 m Höhe. Da sich der Luftdruck mit der Höhe verändert, wird die Luft über 2000 m allmählich leichter, darunter allmählich schwerer. Da kommt einem schon der Gedanke, dass 2 g nicht gerade viel sind, um unsere Flügel zu tragen! Berechnen wir mal das Volumen einer Thermik mit plausiblen Massen: 100 m breit und 500 hoch. Das ergibt $100 \times 100 \times 500 = 5$ Millionen m^3 – ein riesiger Heissluftballon! Mit einem Auftrieb von 2 g pro m^3 haben wir es mit einem Gesamtauftrieb von rund 10 Tonnen zu tun!

Wie kommt man auf diese Werte von 2 g und 1 kg? Zuerst muss der Unterschied zwischen T und Td, einer Thermik und der umgebenden Luft, herausgefunden werden. Diesbezüglich gibt es nur wenige Experimente. Milford (1978) und Lindemann (1981) haben mit einem Motorsegler die Lufttemperatur in und ausserhalb der Thermik gemessen. Heimann (1985), Schmidt und Schumann (1990) simulierten die atmosphärischen Konvektionen auf Mikroskala am Computer. Zwischen 2006 und 2008 habe ich selber solche Werte mehrmals während Gleitschirmflügen gemessen (siehe meine Homepage). Nachdem ich all diese Experimente zusammengefasst habe, indem ich auch die Verzerrungen der jeweiligen Methoden berücksichtigte, konnte ich die Thermik und ihre Umgebung graphisch so darstellen, dass sie der Realität möglichst nahe kommt (Abb. 2). Am Boden beträgt der Temperaturunterschied zwischen der Luft der Thermikquelle und deren umgebenden Luft etwa 3 bis 5°C . Löst sich die Luftblase vom Boden, kühlt sie schnell ab, weil sie sich mit der kälteren Umgebungsluft turbulent vermischt.

l'altitude, l'air devient progressivement plus léger au-dessus de 2000 m et plus lourd au-dessous. On peut se dire que deux grammes, ce n'est pas grand chose pour soutenir nos aéronefs! Mais calculons le volume d'une thermique. Imaginons ses dimensions plausibles: environ 100 m de large et 500 m de haut. Cela donne $100 \times 100 \times 500 = 5$ millions de m^3 ! Soit une énorme montgolfière! Avec une flottabilité de 2 g par m^3 , cela donne une poussée globale de 10 tonnes environ!

Comment est-on arrivé aux valeurs de 2 g et de 1 kg? Il faut d'abord trouver les différences de T et Td entre un thermique et l'air ambiant. Il n'y pas énormément d'expériences et d'études sur le sujet. Milford (1978) puis Lindemann (1981) ont mesuré en motoplaneur les températures de l'air dans et hors du thermique. Heimann (1985) puis Schmidt et Schumann (1990) ont simulé par ordinateur, à microéchelle, les convections atmosphériques. J'ai moi-même mesuré à plusieurs reprises ces valeurs, entre 2006 et 2008, lors de vols en parapente (voir mon site web). En faisant la synthèse de toutes ces expériences et en tenant compte des biais inhérents à chaque méthode, j'ai pu me faire une représentation du thermique et de son environnement qui me paraît très probablement proche de la réalité (figure 2). Au sol, les différences de T entre l'air des sources des thermiques et l'air adjacent est d'environ $3\text{--}5^\circ\text{C}$. Lorsque la bulle se détache du sol, elle se refroidit très vite par mélange turbulent avec l'air ambiant plus frais, si bien qu'à mi-hauteur de la CC, les différences de T et Td sont d'environ $0,5$ à 1°C . Au sommet de la CC, l'air dans le thermique est souvent légèrement plus froid que l'air ambiant car, dans la 2^{ème} moitié de la

Somit beträgt der Unterschied zwischen T und Td auf halbem Weg in der kG noch 0,5 bis 1°C. Ganz oben in der kG ist die thermische Luft oft etwas kälter als die umgebende Luft, weil sich der Temperaturgradient der umgebenden Luft im Gegensatz zu dem der thermischen Luft in der zweiten Hälfte der kG etwas abschwächt und etwas weniger als 1°C/100 m beträgt. Somit kann die Thermik auf dieser Höhe etwas schwerer sein als die umgebende Luft und aufgrund ihrer Trägheit trotzdem weiter steigen. Etwa so, wie ein riesiges Schiff auch dann noch etwas weiterfährt, wenn der Rückwärtsgang bereits eingeschaltet ist. Im Gegensatz zum Temperaturunterschied scheint der Td-Unterschied im oberen Teil der kG grösser zu sein als zu Beginn der Thermik. Man sollte sich definitiv nicht mehr nach den alten Schemen richten (Abb. 3), die rein spekulativ und somit verfälscht und verwirrend sind. Sie entsprechen nicht der Realität; das wurde durch die oben erwähnten Experimente und Untersuchungen belegt. Trotzdem werden sie weiterhin in zu vielen Flugbüchern dargestellt, was mich etwas irritiert. Einerseits zeigen sie einen absolut unrealistischen Temperaturunterschied zwischen der thermischen und der umgebenden Luft, andererseits kennen die Autoren solcher Schemen das Grundprinzip der kG offensichtlich nicht – für mich ein gravierender Fehler, vor allem dann, wenn man Bücher über das Wetter schreibt.

Sind diese Temperatur- und Feuchtigkeitsunterschiede einmal dargelegt, muss das Gesetz für reale Gase angewendet werden. Diese Gleichung ist etwas länger, jedoch kaum komplizierter als diejenige für perfekte Gase, die wir in der Schule gelernt haben. Kleiner Rückblick: Es handelt sich um eine einfache algebraische Gleichung. Die Masse eines Luftpakets ist proportional zu seinem Druck und Volumen und umgekehrt proportional zu seiner Temperatur. Das heisst im Klartext, dass das Luftpaket umso schwerer ist, als dessen Druck und Volumen gross sind. Je höher dafür die Temperatur ist, desto leichter ist das Luftpaket. Für die reale Luft, dessen Feuchtigkeit variabel ist, muss die virtuelle Temperatur Tv und nicht die Temperatur T angewendet werden. Diese Tv hängt tatsächlich von der Luftfeuchtigkeit ab. Die Neugierigsten unter euch finden die praktische mathematische Ent-

CC, le gradient de température de l'air ambiant, contrairement à celui de l'ascendance, s'affaiblit un peu et devient légèrement inférieur à 1°C/100 m. Le thermique peut donc, à cette hauteur, être un peu plus lourd que l'air ambiant mais continue quand même de monter à cause de son inertie. Comme un énorme paquebot qui, après avoir navigué à vive allure, continue à avancer un peu malgré le passage à la marche arrière des moteurs. Contrairement à la différence de T, la différence de Td semble devenir un peu plus grande au sommet de la CC qu'au départ du thermique. Il ne faudrait définitivement plus se fier aux anciens schémas (figures 3), issus de spéculations mentales farfelues et erronées, qui ne correspondent pas à la réalité mise en évidence par les expériences et les travaux cités ci-dessus. Ils continuent cependant à être présentés dans de trop nombreux manuels de vol, ce qui m'agace un peu. D'une part, ces schémas montrent une différence de T entre l'air du thermique et l'air ambiant complètement irréaliste, d'autre part les auteurs de ces schémas ne connaissent manifestement pas la notion fondamentale de CC, ce qui me semble grave pour des auteurs d'ouvrages météo.

Une fois ces différences de température et d'humidité mises en évidence, il faut utiliser la loi des gaz réels dont l'équation est un peu plus longue mais à peine plus compliquée que celle des gaz parfaits, que nous avons étudiée à l'école. Souvenons-nous! Il s'agit d'une équation algébrique simple: la masse d'une parcelle d'air est proportionnelle à sa pression et à son volume et inversement proportionnelle à sa température. En clair, plus la pression et le volume sont grands et plus cette parcelle est lourde. Plus sa température est grande et plus elle est légère. Pour l'air réel, qui présente une humidité variable, il faut utiliser la température virtuelle Tv à la place de T. Cette Tv dépend effectivement de l'humidité de l'air. Pour les curieux, vous trouverez sur la figure 4 le développement mathématique pratique de cette loi physique. En l'occurrence, on peut calculer la masse M d'une parcelle d'air (1 m³ par exemple) dont on connaît la température T, la pression P et l'humidité. Pour l'humidité, on doit d'abord transformer Td (°C) en r (le rapport de mélange en g de vapeur d'eau par kg d'air sec), une

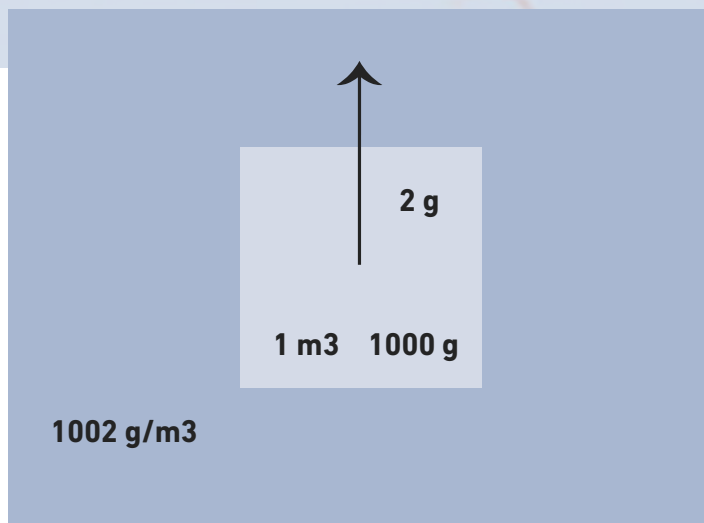


Abb. 1: Ein fiktives Beispiel: Blau ein Luftpaket mit $V = 1 \text{ m}^3$ leichter Luft. Die umgebende Luft (dunkelblau) ist 2 g/m^3 schwerer.
Fig. 1: Exemple fictif: en bleu clair une parcelle $V = 1 \text{ m}^3$ d'air léger. En bleu foncé, l'air ambiant est plus lourd de 2 g/m^3 .

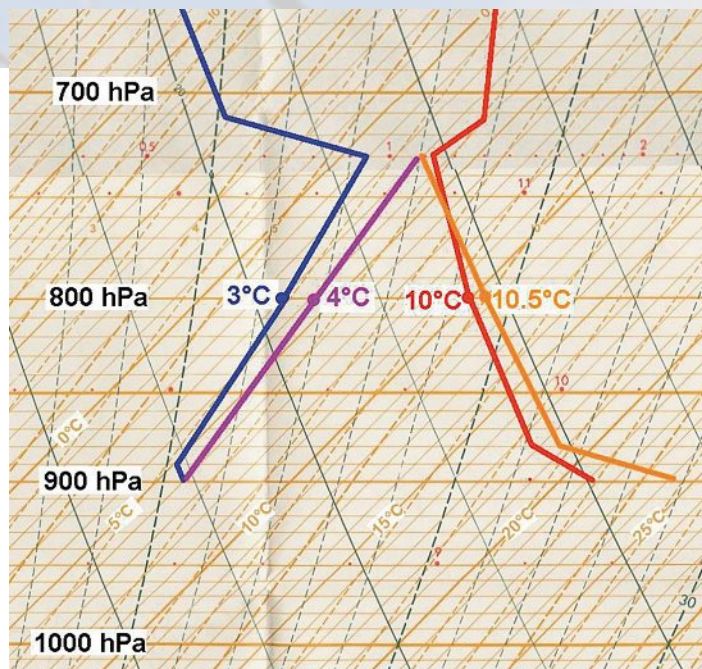


Abb. 2: T und Td in und ausserhalb der Thermik. Dunkelblau: Td in der umgebenden Luft. Violett: Td in der Thermik. Rot: T in der umgebenden Luft. Orange: T in der Thermik. Unterhalb der Temperaturinversion weisen die blaue (Td) und die rote (T) Kurve eine für die kG typische Struktur auf. Horizontale, beige Linien = Höhe in hPa. Schräge, beige Linien = Isotherme.
Fig. 2: Schéma des T et Td, dans et hors du thermique. En bleu foncé: Td dans l'air ambiant. En violet, Td dans le thermique. En rouge: T dans l'air ambiant. En orange, T dans le thermique. Sous l'inversion de température, la courbe bleue (Td) et la courbe rouge (T) montrent une structure typique de la CC. Lignes beige horizontales = altitude en hPa. Lignes beige obliques = isothermes.

wicklung dieses physischen Gesetzes in Abbildung 4. Sie ermöglicht es, die Masse M eines Luftpakets (z.B. 1 m³) zu berechnen, wenn man seine Temperatur T, seinen Druck P und seine Feuchtigkeit kennt. Dazu muss man zuerst Td (°C) in r (das Mischverhältnis von Wasserdampf in g in 1 kg trockener Luft) umrechnen – eine andere Art, die Feuchtigkeit zu berechnen. Am einfachsten verwendet man das wohlbekannte Emagramm, um die Umrechnung graphisch darzustellen (Abb. 4).

Hier ein Beispiel anhand der Werte aus Abbildung 2 bei 800 hPa (ca. 2100 m) mit T = 10 und Td = 3°C in der umgebenden Luft und T = 10,5 und Td = 4°C in der Thermik. Dank unserer Formel finden wir tatsächlich heraus, dass 1 m³ Luft mit T = 10 und Td = 3°C (r = 6 g/kg) etwa 1 kg wiegt. Wenn T und Td nacheinander auf 10,5 respektive 4°C (r = 6,3 g/kg) erhöht werden, dann wird das Luftpaket zuerst um 1,73 g, dann um 0,18 g, also insgesamt um 1,91 g leichter. Damit wird klar, dass die Feuchtigkeit eine etwa 10 Mal kleinere Rolle spielt als die Temperatur, wenn es um den Auftrieb geht (hier: 0,18 g gegen 1,73 g).

Auf unseren üblichen Flughöhen gilt als ungefähre Wert, dass 1 m³ Luft 1 kg wiegt. Die Thermik weist einen Auftrieb von 2 g/m³ auf, weil sie 2 g/m³ leichter ist als die umgebende Luft. Dieser schwache Auftrieb hängt von T und Td ab, die in der Thermik nur wenige Zehntel Grad wärmer sind als in der umgebenden Luft. Weil das Volumen der Thermik jedoch gewaltig ist (einige Millionen m³), erreicht deren Auftrieb einige oder sogar etliche Tonnen. So kann sie eben doch mehrere Flügel tragen. Trotz der kleinen Unterschiede zwischen der Thermik und der umgebenden Luft hat der Auftrieb der Thermik tatsächlich mit der etwas höheren Temperatur und, weniger, auch mit der etwas höheren Feuchtigkeit zu tun. Die Thermik ist mit einem Objekt vergleichbar, das man mit Schwung senkrecht nach oben wirft: Unten ist der Schub am grössten, dafür ist die Geschwindigkeit gering. In der Mitte ist die Geschwindigkeit am höchsten, dafür ist der Auftrieb geringer. Und obwohl der Auftrieb ganz oben negativ wird, steigt die Thermik wegen ihrer Trägheit noch ein wenig weiter an.

autre façon de mesurer l'humidité. Le plus simple est d'utiliser notre fameux émagramme pour effectuer graphiquement cette transformation (figure 4).

Exemple avec les valeurs de la figure 2 à 800 hPa (2100 m environ), T = 10 et Td = 3°C dans l'air ambiant, T = 10,5 et Td = 4°C dans le thermique. Par notre formule, on trouve effectivement que 1 m³ d'air à T = 10 et Td = 3°C (r = 6 g/kg) pèse environ 1 kg. Si on augmente successivement T à 10,5 puis Td à 4°C (r = 6,3 g/kg) ce volume d'air sera 1,73 g puis 0,18 g plus léger, donc au total 1,91 g plus léger. On voit donc que l'humidité joue un rôle environ 10 fois moins important dans la flottabilité que la température (ici 0,18 g par rapport à 1,73 g).

En conclusion, comme ordre de grandeur approximatif: 1 m³ d'air pèse 1 kg à nos altitudes habituelles de vol. Le thermique présente une flottabilité de 2 g/m³ car il est 2 g/m³ plus léger que l'air ambiant. Cette faible poussée est due à des T et Td dans les thermiques de quelques dixièmes de °C de plus seulement que dans l'air ambiant. Mais comme le volume du thermique est gigantesque (quelques millions de m³), sa flottabilité atteint quelques voire plusieurs tonnes, de quoi soutenir de nombreuses ailes. Malgré ces faibles différences entre le thermique et l'air ambiant, la flottabilité du thermique est bel et bien due à son petit excès de température mais aussi, dans une bien moindre mesure, à son petit excès d'humidité. Le thermique est un peu comme un objet lancé en l'air par impulsion. En bas, il présente le maximum de poussée mais une vitesse faible, au milieu la vitesse est la plus forte mais la flottabilité est moins importante. Bien que celle-ci devienne souvent négative au sommet, le thermique monte encore un peu par inertie.

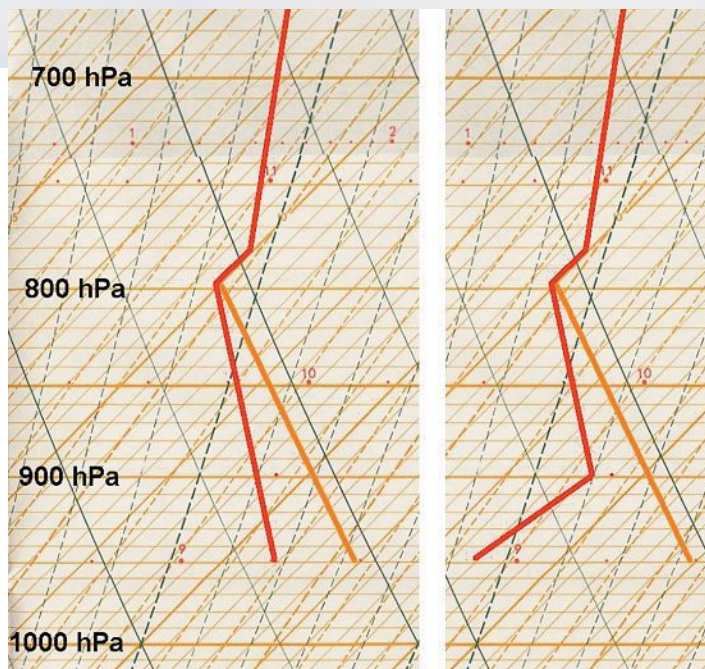


Abb. 3: Zwei Beispiele von nicht realistischen und falschen Schemen, die T und Td in und ausserhalb der Thermik darstellen. Solche Abbildungen findet man leider in vielen Hängegleiter-, Segelflug- und sogar Meteobüchern und Internetseiten. Hier wird das Grundprinzip der konvektiven Grenzschicht schlicht ignoriert.

Fig. 3: Deux exemples de schémas non réalistes et faux des T et Td, dans et hors des thermiques. Ces schémas se retrouvent malheureusement dans de nombreux ouvrages et sites Internet de vol libre, de vol-à-voile et même de météo, en ignorant honteusement la notion fondamentale de couche convective.

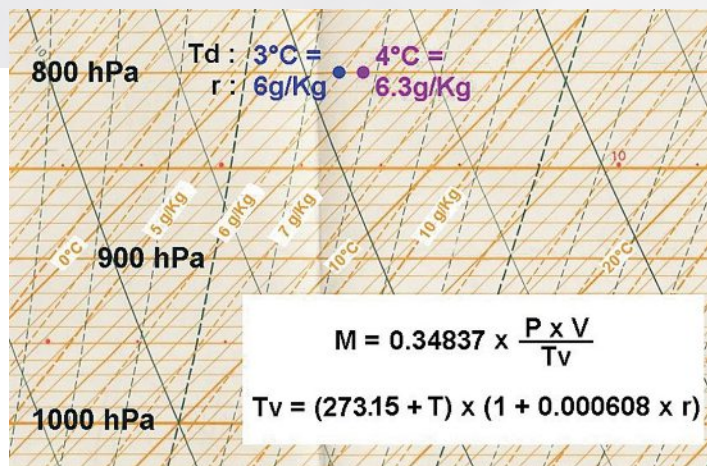


Abb. 4: Mit dem Emagramm kann man die Td in r (Mischverhältnis von Wasserdampf in g in 1 kg trockener Luft) je nach Druck (Höhe) umrechnen. Td und r sind also zwei Möglichkeiten, die Luftfeuchte zu berechnen. Unterbrochene beige, schräge Linien = Isolinen zum Mischverhältnis in g/kg. Ununterbrochene beige, schräge Linien = Isotherme in °C für T und Td. Horizontale, beige Linien = Isobaren in hPa (Höhe). Z.B. kreuzt sich Td = 3°C auf 800 hPa mit der Isolnie r = 6 g/kg, und Td = 4°C befindet sich auf gleicher Höhe zwischen den Isolnien r = 6 und r = 7, jedoch näher zur ersten, weshalb ich auch r = 6,3 g/kg geschätzt habe. Bei beiden Formeln gilt: M in kg, P in hPa, V in m³, (kalkulierte) Tv in °K (Kelvin) und T in °C.

Fig. 4: L'émagramme permet de transformer les Td en r (le rapport de mélange en g de vapeur d'eau par kg d'air sec) en fonction de la pression (altitude). Td et r sont donc deux façons différentes de mesurer l'humidité de l'air. Lignes discontinues obliques beige = isolignes des rapports de mélange en g/kg. Lignes continues obliques beige = isothermes en °C pour T et Td. Lignes continues horizontales beige = isobares en hPa (altitude). Par exemple Td = 3°C à 800 hPa se croise avec l'isoligne r = 6 g/kg et Td = 4°C à la même altitude se situe entre les isolignes r = 6 et r = 7, mais plus près de la première c'est pourquoi j'ai estimé r = 6,3 g/kg. Pour les deux formules: M est en kg, P en hPa, V en m³, Tv (calculé) en °K (Kelvin), T en °C.