

PARAPENTE

Manuel de formation

Fédération **F**rançaise de **P**arachutisme

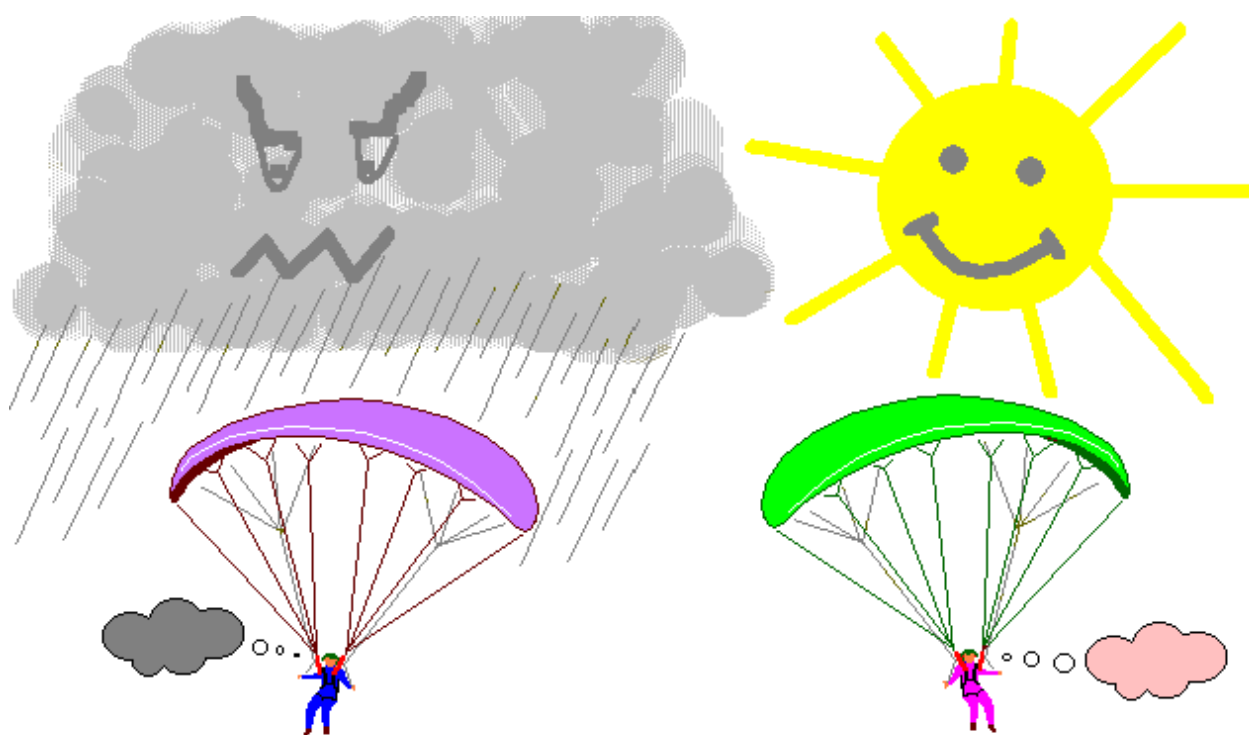
Ce manuel a été téléchargé sur <http://www.sxb.rte.fr/FFP-manuel>

Il est la propriété de la Fédération Française de Parachutisme,
il est interdit de le reproduire et de le distribuer
sans l'accord écrit de la fédération.

Toute utilisation commerciale est strictement interdite.

Fédération Française de Parachutisme
62, rue de Fécamp
75 012 PARIS

METEOROLOGIE



INTRODUCTION

Le vol en parapente, étant donné le rayon d'action et la vitesse de vol, est concerné par les plus petits mouvements de la masse d'air. Cependant, le parapentiste est également obligé de connaître l'ensemble de la météorologie afin de prévoir l'évolution des conditions.

C'est pourquoi nous aborderons l'étude de la météorologie à travers **4 échelles** distinctes :

L'échelle CLIMATOLOGIQUE :

Elle permet de caractériser les particularités météorologiques en fonction des régions du globe et des saisons.



L'échelle METEOROLOGIQUE :

C'est l'échelle de la météorologie courante, utilisée pour suivre les perturbations, décrire les courants d'altitude, etc. C'est l'échelle des prévisions télévisées.



L'échelle AEROLOGIQUE :

Elle concerne l'étude des particules d'air de quelques centaines à quelques milliers de mètres de diamètre : étude des *ascendances sous nuages*, effet du vent sur le relief, les brises, etc.



L'échelle MICROMETEOROLOGIQUE :

Elle intéresse les très petits mouvements de l'air, tels que : *environnement thermique, turbulences*.



Pour une bonne compréhension, nous diviserons notre cours de météorologie en deux parties :

METEOROLOGIE : qui reprendra les chapitres concernant les échelles **météorologique** et **climatologique**.

AEROLOGIE : qui concernera les échelles **aérologique** et **micrométéorologique**.

LES PARAMETRES D'ETAT DE L'ATMOSPHERE

L'air dans lequel nous évoluons n'a pas toujours et partout la même "odeur" et la même "saveur". Des différences sont bel et bien ressenties physiologiquement, par exemple en comparant l'air que l'on trouve au Sahara avec celui d'une colline du nord de l'Ecosse, ou encore sur un même lieu entre une belle journée du mois d'août et un jour neigeux en décembre.

Mais comment caractériser scientifiquement ces différences et décrire complètement chacune de ces *masses d'air*, ainsi que toutes les situations intermédiaires possibles ? En fait, la connaissance du niveau de 4 **paramètres** suffit à décrire l'**état de l'atmosphère** en un lieu et un moment déterminés. Lieu et moment déterminés, car bien entendu, la nature n'étant pas si simple, ces paramètres vont subir des variations continues.

Pour notre explication, comparons deux particules d'air : l'une prélevée au sommet du Mont-Blanc, la seconde au cœur de la forêt amazonienne.

Une première différence est facile à percevoir, du fait de la faible tolérance du corps humain à ses variations : la **température** de l'air.

La seconde différence sera perçue en cas d'effort prolongé : on "manquera d'air" au sommet du Mont-Blanc : ceci est dû à une **pression atmosphérique** bien plus faible en altitude, qui fait que la respiration devra être plus prolongée qu'au milieu de l'Amazonie pour absorber une quantité d'oxygène équivalente.

La troisième sera fortement ressentie par un Européen (sans doute beaucoup moins par un autochtone) en Amazonie : l'**humidité**. Celle-ci sera proche ou égale à 100%, c'est-à-dire provoquant une condensation en gouttelettes d'eau permanente dans une telle forêt, alors que l'air sera beaucoup plus sec en altitude, nécessitant alors une réhydratation fréquente chez un alpiniste.

Enfin, si ces trois paramètres concernent la nature même d'un volume d'air, le quatrième caractérise ses mouvements par rapport au sol : c'est la **vitesse du vent**.

En résumé, on caractérise donc une *masse d'air* grâce à ses 4 *paramètres d'état* :

- LA PRESSION ATMOSPHERIQUE,
- LA TEMPERATURE,
- L'HUMIDITE,
- LA VITESSE DU VENT.

Quelques exemples :

Pression atmosphérique

Moyenne : 760 mm Hg, ou 1013 hPa selon le système SI

Records :

Maxi : 1084 hPa - Sibérie

Mini : 867 hPa - cyclone tropical

(il s'agit de valeurs ramenées au niveau de la mer)

Température

Moyenne du Jura : Hiver : 1°C

Été : 21°C

Records :

+58°C - Libye

-78°C - Sibérie

-88,3°C - Antarctique

Humidité

Moyenne France : 70%

Maxi : tous les jours ou presque : 100% dans un nuage !

Mini : non, pas 0% dans la nature, mais environ 30% dans les déserts !

Vitesse du vent

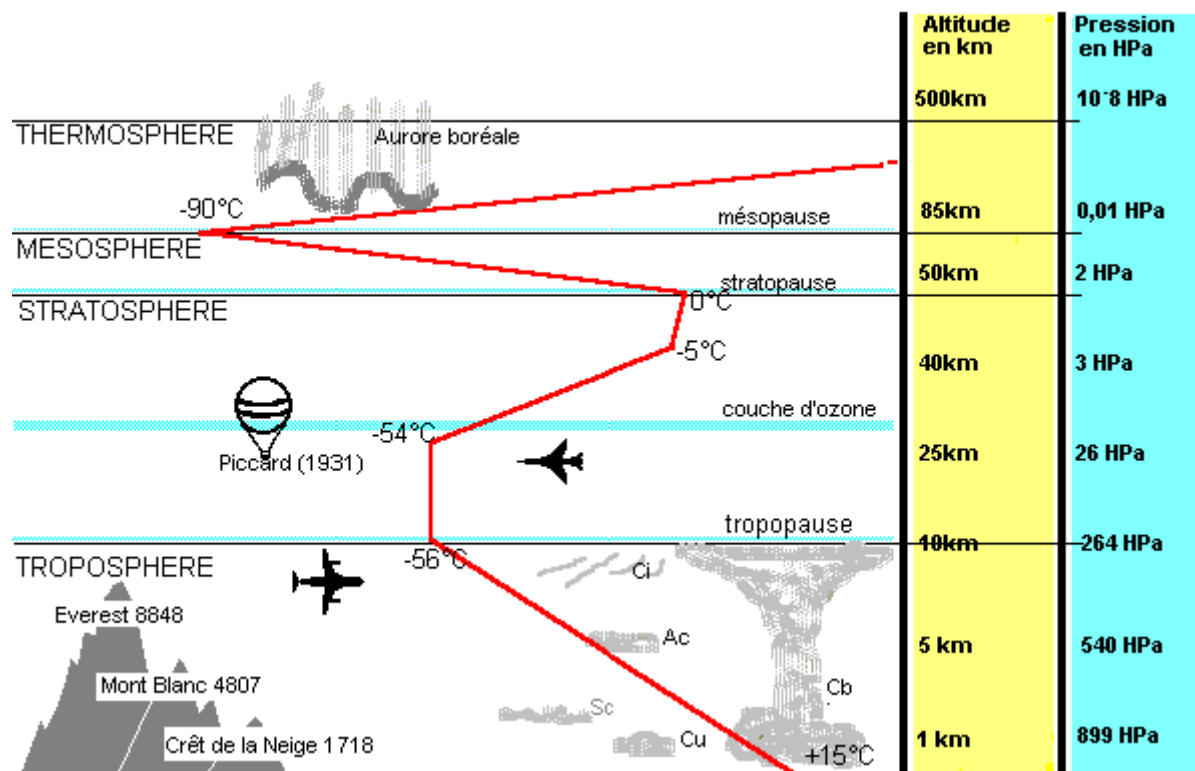
Moyenne : incalculable, et très dépendante de l'altitude.

Maxi : environ 300 km/h

dans la *Troposphère (Jet-Streams)*

L'ATMOSPHERE

L'atmosphère est l'enveloppe de gaz entourant la planète, ces gaz étant retenus par la force de gravitation. La présence de particules de gaz, donc d'atmosphère, est détectable à plusieurs milliers de kilomètres de la surface; cependant la plus grande partie se trouve concentrée dans les basses couches. L'étude de l'atmosphère a permis de constater qu'elle est divisée en plusieurs tranches bien distinctes. Seule la couche inférieure nous permet de respirer et nous intéresse pour le vol libre : c'est la **Troposphère**, dont la limite inférieure est le sol, et la limite supérieure la **Tropopause**.



L'atmosphère standard

L'O.A.C.I. (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) a défini une loi de variation de la pression atmosphérique et de la température qui permet de caractériser l'*atmosphère standard*. Cette caractéristique permet, entre autres, l'étalonnage d'instruments de vol et l'homologation de records.

Altitude en mètres	Température en degrés Centigrades (°C)	Pression en hectopascals (hPa)	Décroissance de la pression pour 1000m d'altitude en hPa
0	15°0	1 013	114
1 000	8°5	899	104
2 000	2°0	795	94
3 000	- 4°5	701	85
4 000	-11°0	616	76
5 000	-17°5	540	68
6 000	-24°0	472	62
7 000	-30°5	410	53
8 000	-37°0	357	50
9 000	-43°5	307	43
10 000	-50°0	264	37
15 000	-56°5	120	13
20 000	-56°5	55	4

LA FORCE DE CORIOLIS

Coriolis : mathématicien et physicien français (1792-1843)

La force de Coriolis est une loi de la *cinématique*, dont l'énoncé est relativement simple : *toute particule en mouvement dans l'hémisphère nord est déviée vers sa droite* (vers sa gauche, dans l'hémisphère sud).

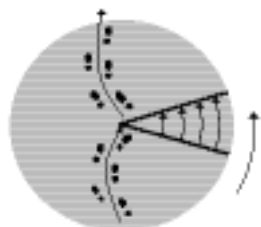
Son action est prépondérante dans l'étude des vents.

Description du phénomène :



La Terre tourne autour d'un axe nord-sud (eh oui!). Etant donnée la forme sphérique du globe terrestre (deuxième découverte!), la *vitesse linéaire* d'un point de sa surface n'est pas constante et dépend de la *latitude* de ce point : elle augmente en partant d'un pôle, passe par un maximum à l'équateur, puis décroît jusqu'à l'autre pôle :

Donc, si un mobile descend du pôle nord à l'équateur, il va être confronté à la vitesse de déplacement de la Terre de manière croissante . En poursuivant sa route vers le pôle sud, il va à nouveau voir décroître cette vitesse.



Tout se passe comme si un marcheur partait du centre d'un manège pour rejoindre la périphérie, il va se sentir dévié dans le sens opposé au défilement du manège sous ses pas.

Dans le cas du schéma, l'accélération du défilement de droite à gauche fait qu'il va être déporté sur sa droite . Si, maintenant, le marcheur (nous le laisserons se reposer tout à l'heure devant une bonne bière) part de l'extérieur vers le centre du manège, le défilement de sa gauche vers sa droite va être de plus en plus lent : il sera donc dévié... vers sa droite !

Vu au dessus du pôle Nord

Le sens de la déviation de Coriolis ne dépend pas du sens de déplacement du mobile sur laquelle elle s'exerce, mais uniquement du sens de rotation du support qui lui donne naissance.

Le sens de notre schéma correspond au sens de rotation de la Terre dans l'**hémisphère nord**, avec une rotation vers la **droite**.

Action de la force de Coriolis :

En fait, cette force est négligeable dans la plupart des cas, mais devient très importante dans certains phénomènes, dont fait partie le déplacement des masses d'air : le vent météorologique (en raison de la réunion des facteurs d'influence de la force de Coriolis : faible masse des particules, grande échelle de mouvement).

De plus, on le comprend aisément en se référant à l'exemple ci-dessus, plus le déplacement est rapide, plus la déviation de Coriolis engendrée est importante.

Enfin, pour qu'il y ait une force de Coriolis il faut qu'il y ait **changement de vitesse du support lors du déplacement sur celui-ci**. Donc, la force de Coriolis est **maximale aux pôles** et **négligeable à l'équateur**.

LES NUAGES

Les nuages sont l'expression la plus visible de ce qu'on appelle les *météores*. En effet, si dans le langage courant ce terme désigne un objet d'origine interstellaire, pour le météorologue il désigne tout simplement et beaucoup plus généralement un ensemble de particules étrangères à la masse d'air, c'est-à-dire à la composition de l'atmosphère. Parmi ceux-ci, on distingue entre autres les *lithométéores*, qui vont du grain de poussière d'origine volcanique ou de pollution à la météorite, et les *hydrométéores*, qui sont constitués en majeure partie d'eau, autant dire les nuages généralement (mais les trombes en font partie également).

Pour les classer, les météorologues ont pris le parti de tout simplement décrire leur forme d'une part, et les situer en altitude d'autre part. Ce qui permet à toute personne avertie de les reconnaître facilement.

Les formes sont :

- Les nuages en couches, ou *strates*, qui comprennent le terme **stratus** (strato-),
- Les nuages *d'accumulation* qui comprennent le terme **cumulus** (cumulo-).

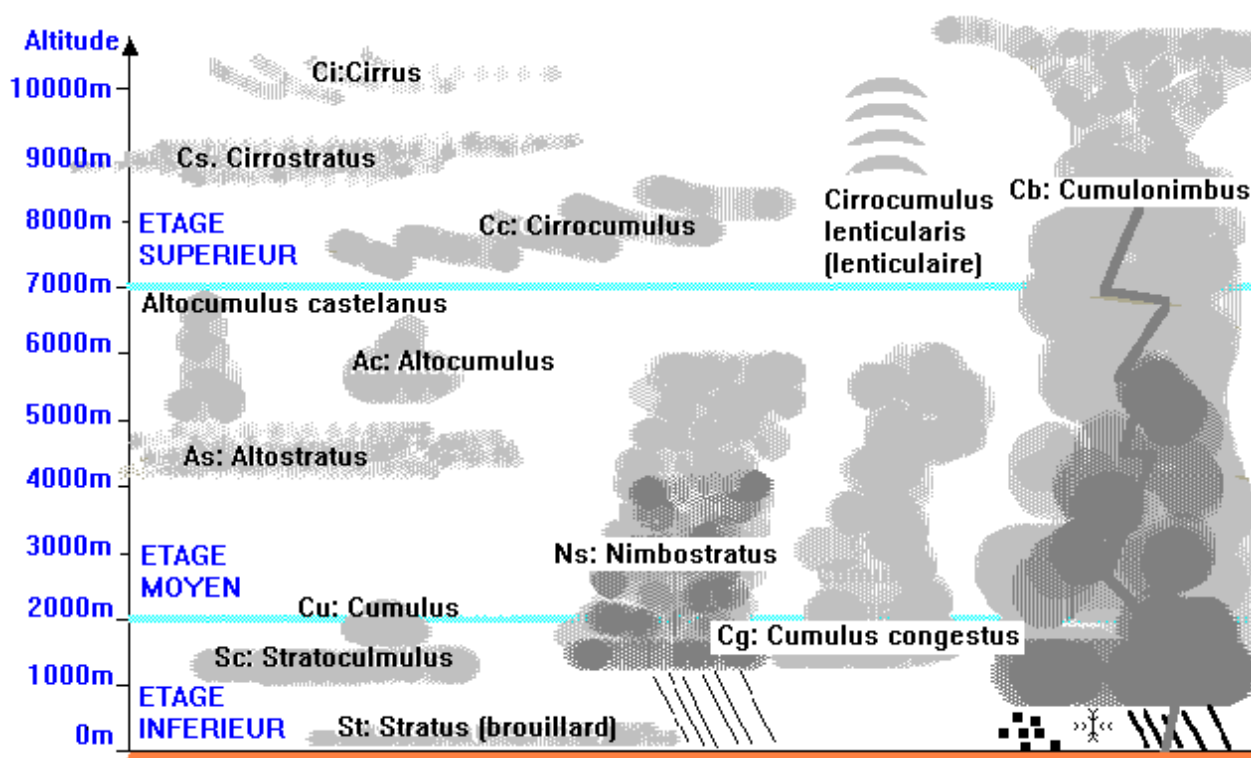
Les altitudes ont été réparties en 3 étages de la troposphère :

- L'étage inférieur : de 0 à 2000m d'altitude environ (sous nos latitudes),
- L'étage moyen : de 2000m à 7000m environ,
- L'étage supérieur : de 7000m aux limites de la troposphère.

Des préfixes sont utilisés pour identifier l'étage d'appartenance du nuage : **cirro-** pour l'étage supérieur **alto-** pour l'étage moyen et pas de préfixe pour l'étage inférieur.

Enfin, des suffixes sont employés pour désigner une caractéristique complémentaire éventuelle. Le plus important pour nous est le suffixe **nimbus** (nimbo-) qui désigne les nuages produisant des précipitations.

Le schéma ci-dessous regroupe les principaux types de nuages :



Les nuages les plus dangereux pour la pratique du parapente sont :

Les nuages à fort développement vertical :

Cumulonimbus en tête, mais aussi **Cumulus congestus** et dans une certains cas **Nimbostratus** . Ce sont tous des nuages qui ont une capacité ascendante propre, celle-ci étant dans beaucoup de cas apte à rendre vaines toutes tentatives de fuite verticale ou horizontale. Un parapente "capté" par l'un de ces aimants va littéralement être promené durant des heures et à des altitudes incompatibles avec la respiration et la résistance au froid de l'être humain...

Les nuages symptômes de vent :

Lenticulaires et **Cumulus de rotor**, qui ne présentent aucun danger par eux-mêmes, mais par ce qu'ils indiquent : vent très fort pour le premier, turbulences pour le second.

LA LOI DE BUYS BALLOT

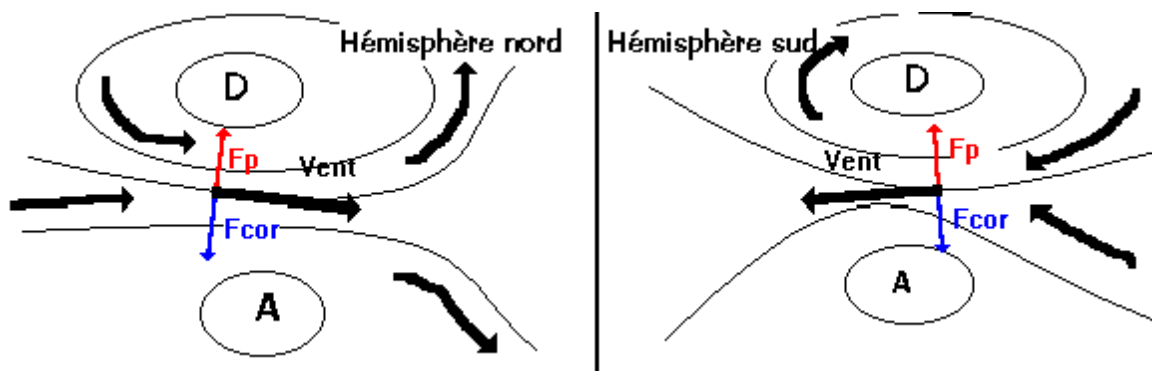
Christophorus Henricus : météorologue hollandais (1817-1890)

Dans l'atmosphère terrestre réelle existent des zones où la pression est élevée, des zones de *hautes pression* ou **anticyclones**, correspondant à des "montagnes d'air" au sens littéral puisque la *tropopause* s'y trouve à une altitude plus grande. Leur pendant est constitué par les zones de *basse pression*, les **dépressions**, correspondant à des "vallées". (voir à ce sujet la page "terminologie isobarique")

La nature ayant horreur du vide, leur mise en présence va donner naissance à des vents qui vont partir de l'anticyclone pour combler la dépression. Ces vents vont alors être soumis à plusieurs forces :

- Leur force génératrice, F_p , est la force due à la différence de pression entre l'anticyclone et la dépression. F_p est perpendiculaire aux *lignes isobares* (lieux des points où la pression est la même).
- Mais la mise en mouvement de la masse d'air sur la Terre va également générer une *Force de Coriolis* F_{cor} , qui va équilibrer F_p en étant opposée et égale en valeur.

Quels sont alors la direction et la force du vent obtenu ? Dans l'hémisphère nord, la force de Coriolis est une déviation vers la droite. La direction du vent est donc perpendiculaire à F_{cor} et F_p et son sens de manière à ce que F_{cor} soit à sa droite. On obtient le schéma suivant :



Comme on le voit sur le schéma, les sens sont inversés dans l'hémisphère sud (alors qu'ils sont pourtant identiques en France et en Grande-Bretagne !). D'où le principe énoncé par *Buys Ballot* :

Dans l'hémisphère nord, le vent tourne autour des anticyclones dans le sens des aiguilles d'une montre et tourne autour des dépressions dans le sens inverse.

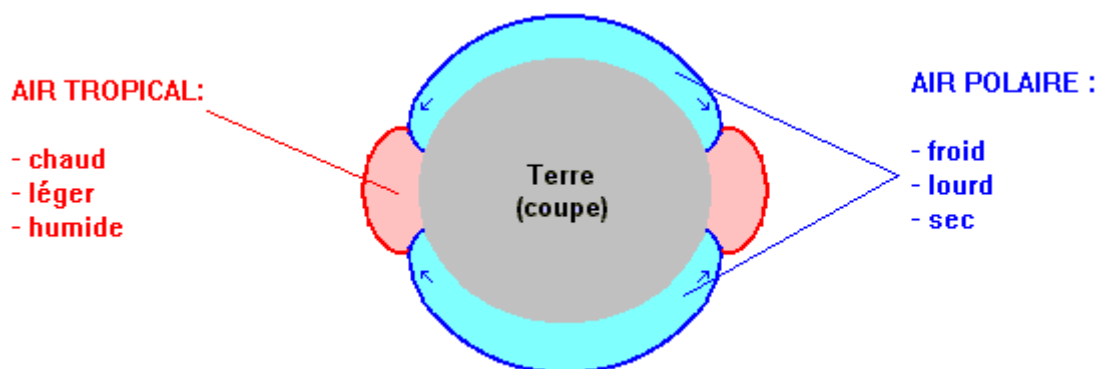
Dans l'hémisphère sud, c'est bien sûr le contraire.

Quand à la vitesse : plus les *isobares* sont resserrées plus celle-ci est élevée.

LA PERTURBATION

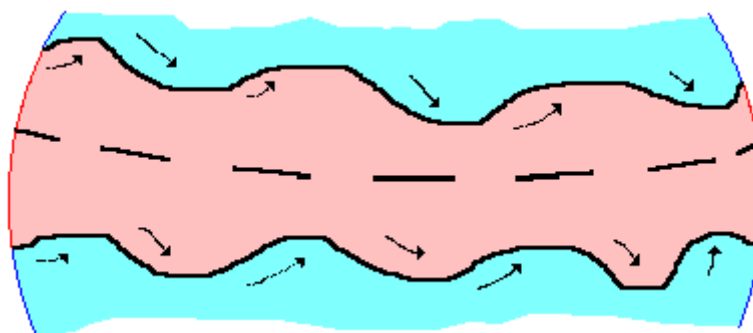
L'atmosphère terrestre est constituée de masses d'air très différentes suivant la latitude. On peut grossièrement les diviser en deux types :

- **Air polaire**, plutôt **froid**, **sec** et **dense**, résultat de la faible insolation de ces masses d'air au latitudes élevées ;
- **Air tropical**, plutôt **chaud**, **humide** et **léger**, en raison de la forte insolation de ces régions, facteur favorable au brassage, donc au réchauffement de l'air au contact du sol et à son humidification.

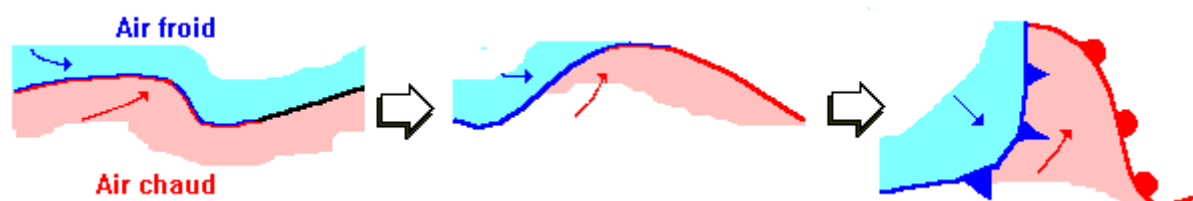


Les natures différentes de ces masses d'air font qu'elles ne peuvent pas se mélanger, mais qu'aux zones de contact, elles glissent l'une sur l'autre (l'air tropical, plus chaud donc plus léger, au-dessus) ou l'une contre l'autre.

La rotation de la Terre, l'ensoleillement variable suivant les lieux et les saisons, génèrent des mouvements à l'intérieur de chacune de ces masses d'air. Nos *régions tempérées* correspondent justement à leur latitude de contact, appelée le **front polaire**. Les natures différentes et les vitesses de déplacement différentes, voire de sens contraire, font du front polaire une zone de conflits entre ces masses d'air. La matérialisation de ces conflits sont les **ondulations du front polaire** :



Lorsqu'une ondulation s'amplifie au point de créer l'avancée d'une langue d'air chaud tropical dans la masse d'air froid polaire, naît une **perturbation**, liée à la dépression dans la masse d'air tropical par rapport à son environnement d'air polaire :

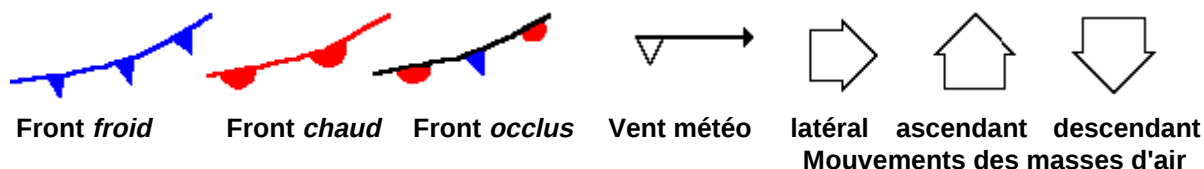


Cette perturbation, poussée par les courants d'ouest dominants à nos latitudes (45°), va ensuite rejoindre nos côtes afin d'arroser l'herbe et de plonger les parapentistes dans le désespoir.

FRONTOLOGIE

La *frontologie*, c'est l'étude des différents *fronts* d'une perturbation. Ce terme de front peut prêter à confusion avec le *front polaire* dont nous avons parlé ci-dessus. En effet, comme pour le front polaire, les fronts d'une perturbation sont une limite de séparation entre 2 masses d'air de caractère différent. De plus, il arrive fréquemment sous nos latitudes que les fronts de la perturbation soient effectivement la descente et la remontée du front polaire lors du passage de la perturbation ! Pour avoir une idée claire de la question, n'hésitez pas à relire plusieurs fois les schémas, et à les compléter par les prévisions météorologiques télévisées de qualité.

Dans nos schémas, nous utiliserons la symbolisation suivante :



Les passages de front :

Il faut bien comprendre qu'un front sépare **toujours** deux masses d'air de natures différentes, dont le mélange direct est **impossible**. L'observation du passage d'un front depuis le sol représente donc un changement d'une masse d'air à l'autre, de l'air **antérieur** à l'air **postérieur**, ce qui fait que nous ne respirons pas le même air avant et après le passage du front.

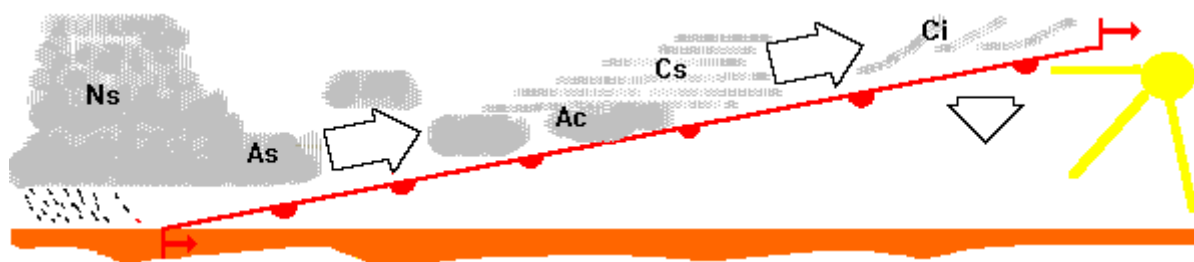
De plus, n'oublions pas les rapports de densités suivants :

- L'air chaud est plus léger que l'air froid
- La vapeur d'eau est plus légère que l'air sec, ce qui fait que par rapport à de l'air sec et froid, l'air plus chaud et plus humide (= chargé en vapeur d'eau) montera pour se placer au-dessus.

Passage d'un front chaud :

Un front chaud est constitué d'air postérieur chaud, par rapport à une masse d'air antérieure comparativement plus froide (ce qui n'empêche pas en été d'avoir une masse d'air *froid* à 25°C!).

L'air chaud, léger, a beaucoup de mal à remplacer au sol la masse d'air froid plus lourde, il glisse le long d'une pente de faible inclinaison par-dessus celle-ci. En France, une arrivée de front chaud peut durer plus d'une journée entre les premiers signes en altitude (voile de *Cirrostratus*) et l'arrivée effective de la masse d'air chaud au sol, avec une pente qui peut couvrir les 2/3 du pays.



Ce qui se passe au niveau de la masse d'air :

A l'arrivée du front chaud en altitude, la *convection* (thermique) s'affaiblit au fur et à mesure qu'il se rapproche, pour deux raisons :

- affaiblissement de l'ensoleillement en raison du voile de cirrostratus annonciateur du front,
- et surtout, affaissement de la masse d'air antérieure, surmontée petit à petit par l'air chaud gagnant du terrain.

Les nuages annonciateurs... et les suivants :

Les premiers signes annonciateurs d'un front chaud sont les *Cirrus* (Ci) de haute altitude, suivis par des *Cirrostratus* (Cs) s'épaississant jusqu'à former un voile masquant le soleil. Ce voile est ensuite complété par des

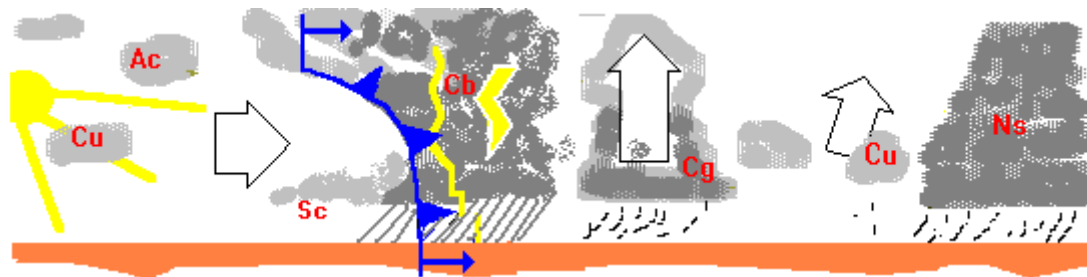
Altostratus (Ac) qui vont contribuer à son assombrissement, surtout quand il seront regroupés en *Altostratus* (As). Le front passe alors au niveau du sol, les *Altostratus* sont complétés par le haut et le bas pour former un ensemble de *Nimbostratus* (Ns). Une pluie (fine en général) commence à tomber. Nous sommes passés dans le **Corps** de la perturbation.

Passage d'un front froid :

Un front froid, à l'inverse bien entendu du front chaud, est constitué d'air postérieur froid par rapport à une masse d'air antérieur chaud. Un front froid est généralement précédé d'un corps de perturbation, lui-même précédé d'un front chaud. C'est la situation que nous prenons en exemple. Néanmoins, il faut savoir que **ce n'est pas toujours le cas** (exemple de l'*occlusion* ci-après).

L'air froid, lourd, va repousser très activement l'air chaud antérieur, léger, et qui oppose d'autant moins de résistance qu'il est propulsé à la fois vers l'avant et vers le haut. L'arrivée du front froid a lieu pratiquement en même temps au sol et en altitude, et de façon très nette. Une bonne image du front froid peut être observée lorsque vous renversez du café sur une toile cirée : le front d'étalement de la flaque est une reproduction à petite échelle d'un front froid dans l'atmosphère.

Ce qu'il faut retenir dans tous les cas, c'est qu'un front froid fait partie des phénomènes météorologiques **violents**, en raison de son avancée rapide et du soulèvement général brutal de la masse d'air antérieure.



Ce qui se passe au niveau de la masse d'air :

Le corps de la perturbation, si les fronts chaud et froid sont suffisamment éloignés l'un de l'autre, se disloque en partie ou complètement, formant ce qu'on appelle le *trou bleu*, sans nuages ni précipitations. Attention, c'est le cas général, mais non exclusif ! A l'approche du front froid, la convection se rétablit de manière importante et généralisée, en raison du soulèvement de la masse d'air. Le passage du front est très marqué si celui-ci est *actif*, par un amoncellement nuageux formant une barrière. Le front lui-même et ses précipitations refroidissent l'atmosphère, stoppant ensuite la convection, qui reprendra avec l'ensoleillement qui caractérise le début de la *traîne* de la perturbation, de manière qui peut être plus ou moins active. La traîne peut être très *active*, dans ce cas on y rencontrera la même violence et les mêmes types de nuages et précipitations que dans le front lui-même (*grains*).

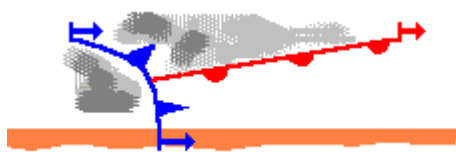
Les nuages :

Le corps formé de *Nimbostratus* (Ns) se disloque peu à peu, laissant des résidus sous forme de *Cumulus* (Cu). A l'approche du front, ceux-ci vont se regonfler, et passer au stade de *Cumulus congestus* (Cg). Les précipitations reprennent parfois. Le front est là, accompagné par un cortège de nuages de tous types, desquels émergent souvent de fantastiques *Cumulonimbus* (Cb). Les précipitations prennent un caractère violent, accompagnés parfois de coup de tonnerre et de coups de vent. Avec le passage en traîne, les précipitations peuvent s'interrompre assez rapidement. Le ciel se détermine alors entre la *traîne active*, qui déclenchera à nouveau d'importantes précipitations, et la traîne calme, qui se fera alors sous un superbe ciel très bleu ("lavé" des pollutions atmosphériques et des gouttes en suspension) peuplé de beaux *Cumulus* (Cu) sous lesquels vont à nouveau naviguer de nombreux engins de vol... C'est cette dernière situation, la plus optimiste, que nous avons choisi d'illustrer ci-dessus !

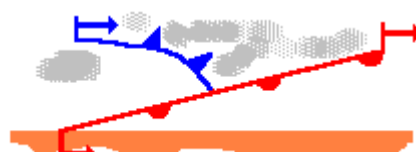
L'occlusion :

L'occlusion, c'est le moment où le front froid, plus rapide, a rejoint le front chaud dans la circulation d'une perturbation. C'est pour elle le début de la fin, car les masses d'air vont se stabiliser par le comblement de la dépression qui lui a donné naissance. Ce qui se passe alors est déterminé par le caractère du front occlus : on

peut avoir une occlusion à *caractère froid* ou à *caractère chaud*, avec toute l'échelle des temps correspondants. Une occlusion donne en général un temps perturbé à plus longue échéance.



Occlusion à caractère froid



Occlusion à caractère chaud

Changement du temps durant le passage des fronts :

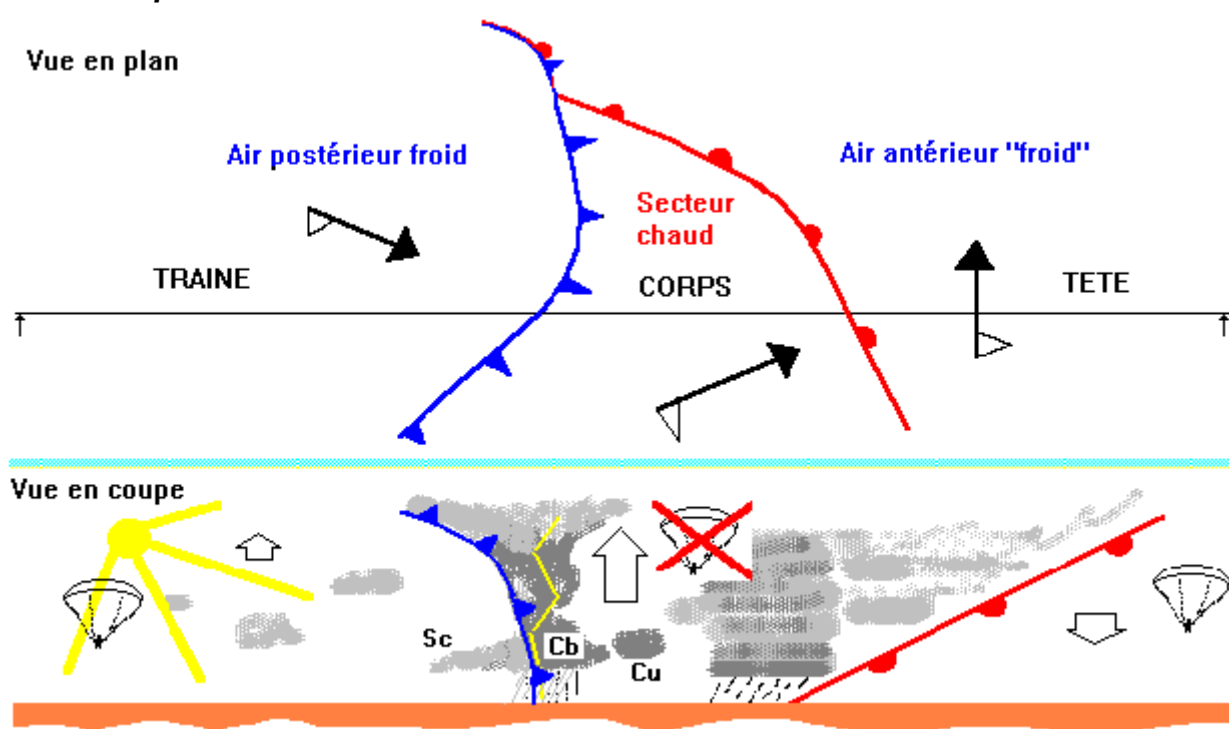
On peut résumer les changements du temps durant le passage des fronts par le tableau suivant :

	FRONT CHAUD			FRONT FROID	
	Avant	Pendant	Après	Pendant	Après
Vent	Se stabilise au S ou SO en forcissant	Tourne au SO et forcé encore parfois	Légers changements de direction, fort	Tourne à l'O ou NO en rafales	Tourne au N et faiblit
Pression	Chute rapidement	Reste stationnaire	Peu encore baisser	Augmente brusquement	Montée lente
Température	Peut augmenter lentement	Augmente lentement	Reste stationnaire	Baisse rapidement	Peut baisser
Visibilité (hors nuages)	Mauvaise	Assez bonne	Faible	Assez bonne	Augmente
Nébulosité	Ci, Cs, As, Ns	As, Ns	St, Sc	St, Cu, Sc, Cb	Cu
Précipitations	Pluie continue	Bruine intermittente	Bruine intermittente	Averses et orages	Averses, grains

Conclusions pour le vol en parapente : (en France métropolitaine)

	FRONT CHAUD			FRONT FROID	
	Avant	Pendant	Après	Pendant	Après
Type de vol	dynamique	<u>AUCUN</u>	dynamique	<u>AUCUN</u>	Thermique
Orientation	S à SO		S à SO		O à N
Précautions, risques	se méfier du renforcement du vent qui peut faire reculer		Comme avant, vent fort et surtout <u>arrivée du front froid</u>		Risques liés au vol thermique et formations nuageuses

Schéma récapitulatif

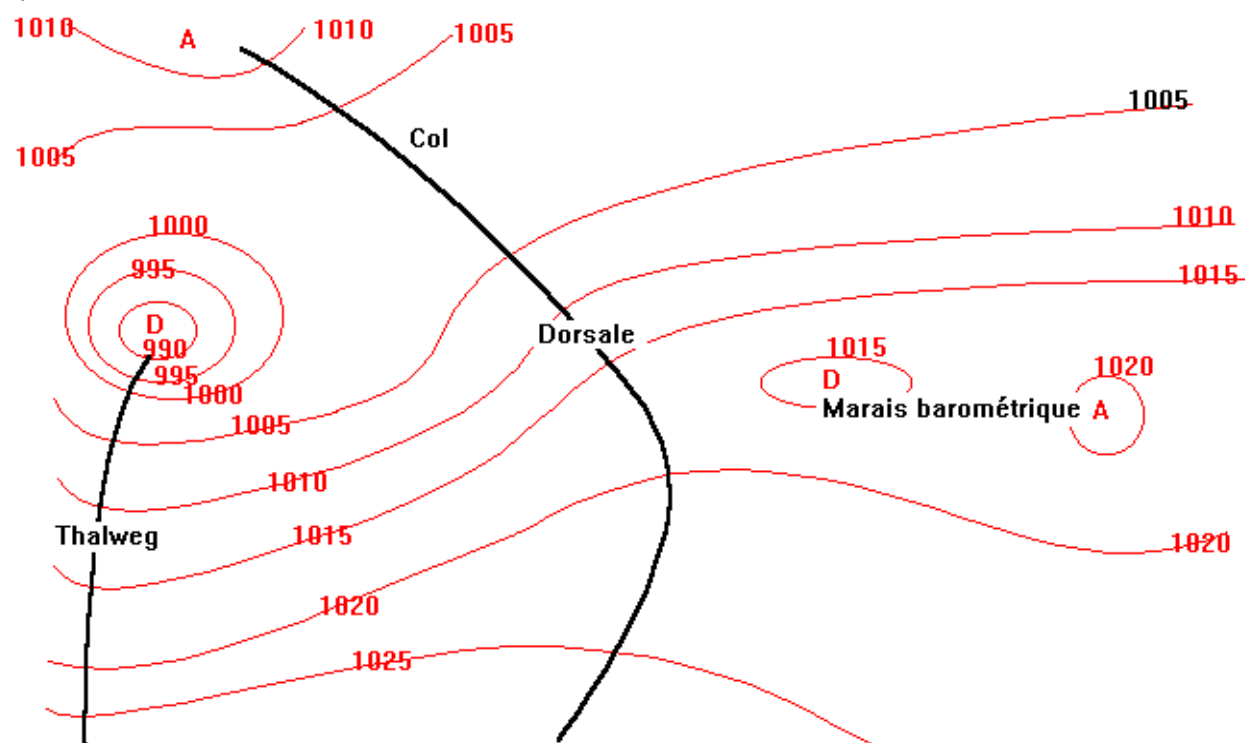


TERMINOLOGIE ISOBARIQUE

Les cartes météorologiques les plus complètes comportent, outre les symboles de fronts et de vents cités ci-dessus, une véritable cartographie des relevés de pressions atmosphériques, indiquées par les *lignes isobares*, équivalentes au niveau des pressions (ramenées au niveau de la mer) de la carte *topographique*, avec ses courbes de niveau. Il existe des cartes isobariques aussi bien pour les pressions relevées au niveau du sol, qu'à une altitude déterminée (en général 3000m) ; d'ailleurs les deux cartes peuvent être très différentes pour un même lieu et un même moment. Il est bien évident qu'en raison des évolutions permanentes de la pression atmosphérique, une carte isobarique n'a qu'une validité à brève échéance, en général quelques heures dans la même journée.

Cependant, pour qui sait la lire, une carte comportant les seuls relevés *barographiques* (= les lignes isobares) constitue une mine d'information sur le temps qu'il fait et celui qu'il va faire au cours d'une journée.

Les cartes à disposition du public sont malgré tout renseignées habituellement avec d'autres symboles tels que vents et situation des fronts éventuels.



S'il fallait rajouter les fronts, ceux-ci seraient placés avec la symbolisation utilisée pour notre cours de frontologie, quant aux vents, ils sont représentés comme suit :



Rappel : 1Kt = 1 Noeud (Knot en anglais) = 1 Mille nautique/heure = 1,85 km/h

Enfin, une petite comparaison avec les termes topographiques permet de mieux comprendre :

Terme	Niveau de pression atmosphérique	Equivalence topographique
<i>Anticyclone</i>	Haute, la plus élevée du secteur	Sommet montagneux
<i>Dorsale</i>	Haute, par rapport à l'environnement immédiat	Crête montagneuse
<i>Dépression</i>	Basse, la plus faible du secteur	Gouffre ou cuvette
<i>Thalweg</i>	Basse, par rapport à l'environnement immédiat	Sillon, fond de vallée
<i>Col</i>	Point bas d'une dorsale	Col !
<i>Marais barométrique</i>	Peu de variation dans l'espace	Plaine ou plateau

LES SAISONS DU PARAPENTISTE

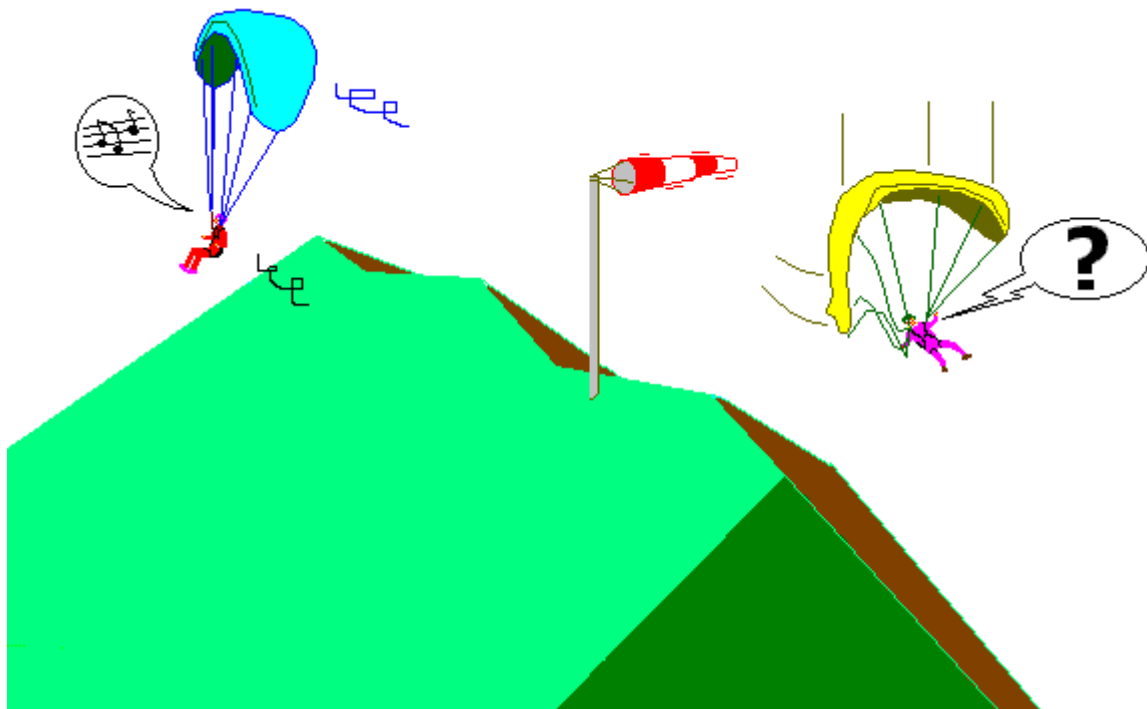
Pour conclure ce cours de météorologie, nous allons faire un petit cours de climatologie appliquée au parapente, en parlant des différentes conditions de vol rencontrées en cours d'année et des saisons les plus propices pour le massif jurassien, si tant est qu'il existe encore des saisons pour nos merveilleuses machines volantes avec les performances atteintes désormais... Ce tableau ne peut pas être exhaustif, il se base plutôt sur des expériences vécues et donc limitées : on a toujours quelque chose à apprendre en volant.

Un "bon pilote" de parapente doit à mon humble avis se situer au milieu du tableau, avec si possible une petite tendance optimiste... mais on ne refait pas le caractère des gens.

Mois	Le risque-tout	L'optimiste	Le pessimiste	Le timoré
Janvier	C'est le mois où je m'éclate en dynamique dans des vents d'enfer, et les pétards qu'il y a sont bien secs !	Il y a toujours moyen de trouver un site bien exposé pour du soaring, et même du vol thermique sur un site sud bien ensoleillé.	Quand il y a du vent, c'est de la bise et c'est trop fort pour voler, ou alors le temps est complètement bouché.	Il fait très froid : on risque les engelures, et puis les décors enneigés me font craindre la glissade dans le trou.
Février	Alors là, ça commence à me plaire : pétards secs mais qui te montent de 500m d'un coup... évidemment, ça fermente un peu...	Les contrastes herbe sous le décollage/neige derrière sont très favorables aux vols thermiques.	Février, c'est au bas mot 10 jours de chutes de neige, et quand ça fond, c'est mouillé partout.	Ca y est, il y a déjà de nouveau des brises fortes et puis alors les thermiques font n'importe quoi.
Mars	C'est le bout du tunnel : on peut commencer à zoner partout et puis il faut profiter du fait que les pécores ne sont pas là à regarder pousser l'herbe pour se vacher n'importe où.	Très belles journées de vol thermique alternent avec des beaux dynamiques d'ouest. En plus, apparition des premières restitutions !	Les giboulées... ça vous dit quelque chose ? Et puis dès qu'on monte un petit peu, ça caille un maximum.	Le vent n'arrête pas de tourner d'une journée à l'autre : j'ai toujours peur de décoller d'un site sous le vent météo.
Avril	Alors là mon gars, tu ne me vois que deux fois dans la journée : juste avant le vol et longtemps après, vu la longueur de la récup'.	C'est le mois des premiers vols thermodynamiques véritables, qui permettent de tenir l'après-midi en l'air.	15 jours de pluie, 15 jours de bise, le tableau d'avril est tout tracé.	Il y a des fois, en avril, je n'arrive pas à redescendre sans les oreilles, manoeuvre qui me fait frémir rien que d'y penser.
Mai	Deux bons vols dans une journée : un aller-retour de 20 bornes mini, suivi d'une restitution avec repose au déco en pleine nuit.	Les thermiques deviennent amples, autant en dimension horizontale que verticale, en plus les débutants volent en thermique de restitution.	C'est la feuille qui fait son apparition, le thermique se ramollit, en plus on vous dit que la bise, c'est 3, 6 ou 9 jours sans voler...	Même en restitution, je commence à ne plus pouvoir descendre : je n'ose plus décoller avant le soleil couchant.
Juin	Le vol sous et dans les nuages, ça me connaît ! Bien sûr, des fois on se fait un peu peur, mais ça passe toujours avec la baraka que j'ai habituellement.	La restitution devient carrément délirante, c'est normal ce sont les jours les plus longs de l'année : difficile de trouver le sommeil quand on se pose à 22 heures.	Au menu : choux-fleurs en pagaille, tonnerre et humidité le soir après l'averse...	Moi qui crains les nuages après tout ce qu'on entend sur les décollages, c'est le mois où je fais le plus de navettes aux autres.

Mois	Le risque-tout	L'optimiste	Le pessimiste	Le timoré
Juillet	Des plafonds qui nécessitent presque l'oxygène, je fais la nique aux deltas en leur faisant l'intérieur dans les noyaux.	Chaque jour, c'est soit des conditions thermiques excellentes, soit une super restitution si la journée a été trop stable.	Les orages, encore et toujours les orages...	La brise décoiffe sur les décors, je ne sors plus ma voile de son sac avec des conditions aussi dantesques.
Août	Décollage à 9 heures, posé à 21 heures, tant pis si on saute un repas dans la foulée: j'ai toujours une demi-orange dans mon sac.	Les journées offrent une variété extraordinaire de vols, entre celui du matin et la restitution du soir.	Une chaleur à crever sur les décollages, les élèves sous le coup d'une insolation qui gerbent dans la navette ou tombent dans les pommes.	Plus moyen de trouver un site sans soleil et sans thermique en cette saison. Je me protège du soleil sous mon bob "Ricard".
Septembre	Là, j'adore : on rase le relief pour récolter les thermiques le long du caillou, on se fait secouer tout près du relief, c'est vachement excitant !	Le thermique est suffisamment calme pour que même les moins aguerris en profitent en plein milieu de journée.	Y a plus rien comme brise ! En plus, revoilà la mousson. Les pluies succèdent aux intempéries...	Les nuages reviennent en force : mes connaissances théoriques sans cesse révisées me font reconnaître les bons des mauvais, mais j'ai toujours un doute.
Octobre	On fonce dès qu'une feuille bouge, on la vise et dès que ça bipe, on enroule serré à faire péter les commandes, quitte à finir en vrille à plat : les arbres sont là pour nous accueillir.	Il y a encore moyen de voler en soaring dans des brises qui sont à cette saison très douces et régulières.	Les barrages se remplissent et je me demande si je n'aurais pas mieux fait de choisir un sport en salle.	Il reste encore quelques noyaux thermiques, et il faut toujours que ça tombe sur moi : je me fais encore des frayeurs en m'imaginant enroulé dans ma voile après une abattée gigantesque.
Novembre	Le soaring à 40, c'est super : on se frôle, on pose sur la voile du copain : tout ce que j'aime, quoi.	C'est la saison du beau vol dynamique, avec parfois la bonne surprise de croiser une bulle qui monte momentanément 200m plus haut.	La Toussaint, le jour des morts : très peu pour moi, merci.	Je recommence à craindre de reculer en décollant avec les vents forts qu'il y a.
Décembre	Il faut absolument que je tente un décollage à skis de mon site-falaise habituel.	L'air froid des soarings est lisse et laminaire : le pied.	Au coin du feu, c'est quand même bien plus chaud et moins humide.	Retour de la neige sur les décors: on peut se faire très mal si on glisse en montant.

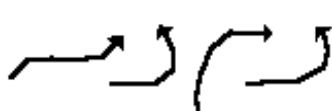
AEROLOGIE



LA TURBULENCE

L'atmosphère parfaitement calme n'existe pratiquement pas, et les aéronefs sont la plupart du temps confrontés à la *turbulence*. La turbulence est une discontinuité dans l'écoulement de l'air, (donc pour qu'il y ait turbulence il faut un mouvement d'air, horizontal ou vertical) et est perçue comme un désordre de l'atmosphère.

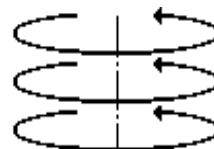
Les turbulences sont d'origine dynamique ou thermique. On peut les classer en :



Remous



Rotor
tourbillon à axe horizontal



Rouleau
tourbillon à axe vertical

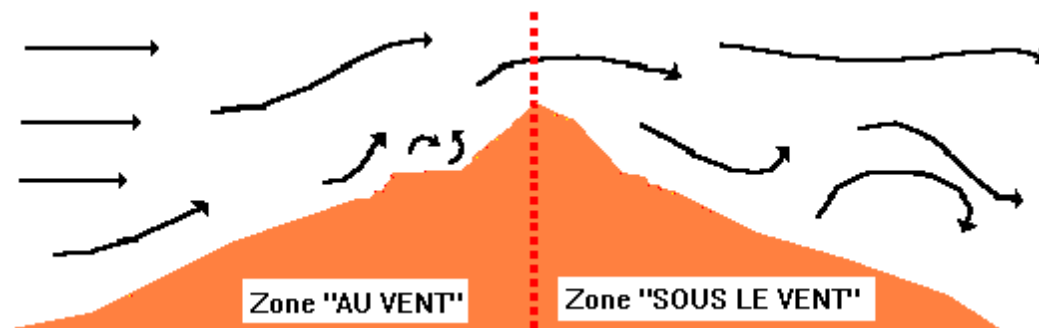
Ces mouvements sont bien gênants pour le vol, mais il est impossible de les étudier *in situ*, aussi nous nous contenterons d'analyser les turbulences par leurs deux grandes familles : la *turbulence d'obstacle* et la *turbulence de cisaillement*. Le but est bien entendu de tenter de les prévoir et de les localiser dans l'espace afin de mieux les éviter.

La turbulence d'obstacle :

Elle naît de la rencontre du vent et d'un obstacle qui va le forcer à changer de direction,. Son intensité va être proportionnelle à la force du vent, et dépendre de la forme de l'obstacle : plus celui-ci formera barrière, plus elle sera forte.

De plus, il est capital de distinguer la zone **au vent** (du côté d'où vient le vent) et la zone **sous le vent**.

En effet, les turbulences du côté au vent n'auront lieu qu'en cas de discontinuité du relief, et seulement dans la proximité de celui-ci :



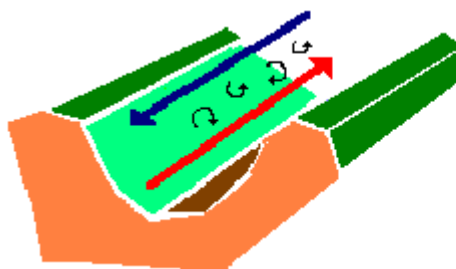
Par contre, sous le vent, la turbulence sera beaucoup plus intense et peut aller jusqu'à une distance de dix fois la hauteur de l'obstacle en aval d'un vent fort.

Il existe une autre forme de turbulence d'obstacle, qu'il est même possible de rencontrer sans aucun vent météo ni activité thermique : c'est le *sillage* de vos copains parapentistes ou de tout type d'aéronef suivi de trop près...

La turbulence de cisaillement :

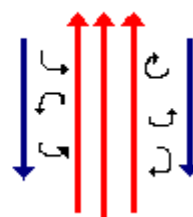
Elle est provoquée par la proximité l'un de l'autre de deux vents contraires :

horizontaux :



opposition vent de vallée/vent météo

verticaux :



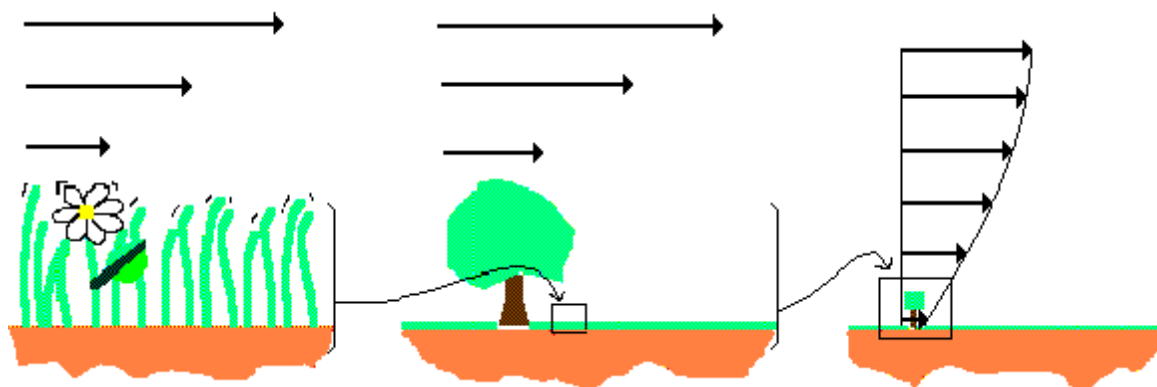
périphérie thermique

LE GRADIENT DE VENT

Un *gradient*, au sens physique du terme, est un taux de variation fonction de la distance. Le *gradient de vent* (... à l'approche du sol) est donc le taux de variation du vent entre l'altitude où il ne subit plus de variation due à la proximité du sol et l'altitude 0 mètre. Le terme peut bien entendu également être utilisé pour décrire la variation du vent dans une couche de cisaillement, donc sans faire intervenir la surface terrestre.

En se rapprochant du sol, la vitesse du vent va logiquement diminuer. Pour vous en convaincre tout à fait, amusez-vous à observer un jour de vent fort, l'herbe en plaçant votre visage à ras du sol : les brins d'une hauteur de 10cm ne bougent pratiquement pas, alors qu'on est décoiffé en se redressant !

C'est ce qu'on appelle le phénomène de *couche limite* : l'air emprisonné autour des brins d'herbe ne communique plus avec la couche supérieure et subit un cisaillement permanent avec celle-ci. En extension à ce phénomène de couche limite, plusieurs autres couches coexistent de la même manière à mesure que l'on s'éloigne du sol, jusqu'à arriver à l'altitude où l'on ressentira le vent réel (d'origine météo ou autre). Eh bien ! ces couches se rencontrent jusqu'à plusieurs dizaines de mètres du sol :



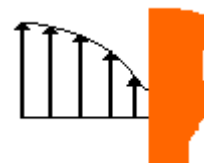
La cause essentielle du gradient vient du fait que l'air possède une *viscosité dynamique*, c'est-à-dire une tendance à "coller" lorsqu'il est en mouvement sur une surface. Une cause secondaire provient de l'*énergie cinétique* perdue dans le contournement des obstacles de petite dimension, chacune de ces deux causes partageant une responsabilité dans le gradient de vent ; la première à ras du sol, la seconde plus haut.



Le gradient a lieu sur terrain plat



Mais aussi le long d'une pente



ou d'une falaise

Les effets du gradient de vent :

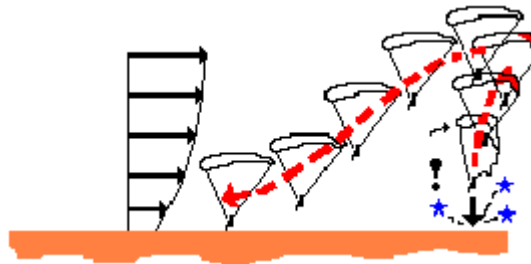
Au décollage



Il peut être une aide au décollage, car en rencontrant un vent de plus en plus fort, l'aile va perdre sa survitesse en s'élevant.

Attention : comme tout ce qui est bénéfique mais incertain, ne pas compter dessus pour récupérer une situation délicate, et être prudent s'il y a 25km/h de vent à 1m du sol...

A l'atterrissage



C'est l'effet inverse : l'aile doit récupérer la vitesse "mangée" par la diminution du vent en perdant de l'altitude rapidement. Si on l'empêche de le faire en maintenant un freinage excessif, on risque tout simplement le **décrochage** à 10m/sol !

Pour minimiser les effets du gradient de vent :

- **Eviter la proximité immédiate du relief** (le long d'une falaise, il provoque une attraction vers celle-ci),
- Savoir qu'il sera **toujours présent par vent fort**, et **souvent s'il est modéré**,
- **Garder une réserve de vitesse à l'atterrissage** (prise de vitesse en finesse max.) pour éviter le décrochage.

L'ASCENDANCE DE PENTE

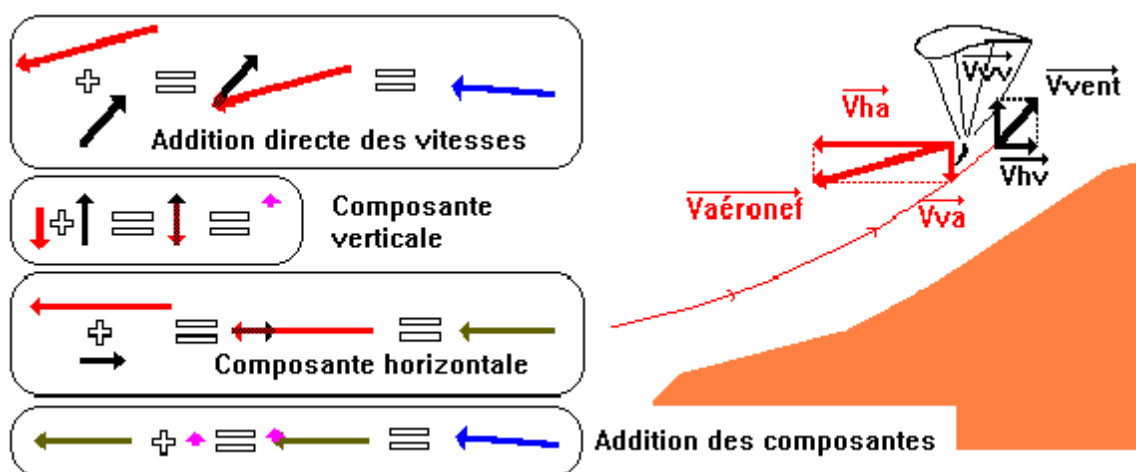
L'ascendance de pente ou *ascendance dynamique*, est ce phénomène "magique" qui permet à un parapente de monter sous vos yeux au décollage, puis de passer et repasser devant durant des heures, son pilote jouant avec le vent, ralentissant, manoeuvrant à sa guise. L'origine de ce phénomène, c'est le vent qui subit un soulèvement à sa rencontre avec la pente sous le décollage.

Les éléments nécessaires :

- le vent météo et les différentes brises
- un relief formant **barrage** à ce vent

Analyse du phénomène :

On comprendra l'ascendance de pente en analysant les composantes des vitesses du vent et celles de l'aéronef :



$V_{aéronef}$: Vitesse de l'aéronef dans la masse d'air,

V_{ha} : Composante horizontale de la vitesse de l'aéronef dans la masse d'air,

V_{va} : Composante verticale de la vitesse de l'aéronef dans la masse d'air.

V_{vent} : Vitesse du vent par rapport au sol,

V_{hv} : Composante horizontale de la vitesse du vent par rapport au sol,

V_{vv} : Composante verticale de la vitesse du vent par rapport au sol.

Sur le schéma ci-dessus, les encadrements représentent un *calcul vectoriel*. On voit d'après celui-ci qu'additionner directement les vitesses du vent et de l'aéronef aboutit au même résultat qu'additionner les **composantes** des vitesses respectives, horizontales et verticales du vent et de l'aéronef. Dans ce cas de figure, nous avons choisi une situation plaisante, puisque le parapente **avance en montant**.

Ce cas favorable n'est malheureusement pas le cas systématique, comme on peut le voir ci-dessous en analysant :

L'effet sur l'altitude :

Si $V_{vvent} < V_{vaéronef}$, le parapente subit une **perte d'altitude**.

Si $V_{vvent} > \text{ou} = V_{vaéronef}$, il y a **gain d'altitude** ou **altitude stable**.

C'est l'aspect **agrément** du vol : le seul "risque", dans le premier cas, est de "faire un plouf".

L'effet sur le déplacement :

Si $V_{hvent} < V_{haéronef}$, le parapente **avance par rapport au sol**.

Si $V_{hvent} = V_{haéronef}$, le parapente "fait du **surplace**".

Si $V_{\text{vent}} > V_{\text{haéronef}}$, le parapente recule par rapport au sol.

C'est l'aspect **sécurité** du vol, qui lui nécessite une analyse préalable au décollage. Celle-ci pourra se faire :

- en comparant la sensation de vent sur un site à ce qu'on connaît déjà
- en utilisant un anémomètre
- en observant les manches à air ou les autres voiles déjà en vol.

Un bon pilote commencera toujours par vérifier l'aspect sécurité en premier lieu en arrivant sur le site, pour ensuite s'intéresser à l'aspect agrément du vol, du moins s'il cherche "à tenir" pour le vol envisagé.

Le rendement :

Le *rendement* de l'ascendance de pente est un *rapport*, qui s'exprime en général en pourcentage :

Rendement de l'ascendance = $\frac{\text{Composante ascendante du vent qui la génère}}{\text{Vitesse totale de vent}}$

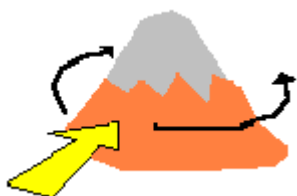
Il dépend de la vitesse du vent et de la forme du relief, comme exposé ci-après.

Malheureusement, le rendement de 100% qui permettrait de grimper "comme un ballon" avec des vents très faibles, n'existe sur aucune pente au monde...

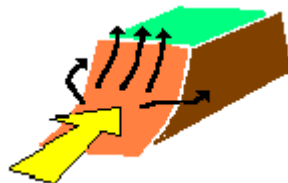
Les facteurs importants pour le rendement :

L'allongement de la pente : C'est aussi un *rapport*, il est égal à : $\frac{\text{largeur de la pente}}{\text{hauteur moyenne}}$

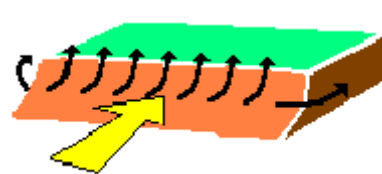
Les meilleurs rendements sont obtenus avec des pentes d'allongement important. La raison est que, pour une pente d'allongement faible ou médiocre, il est tout simplement plus facile pour le vent de **contourner** l'obstacle plutôt que de le surmonter, ne générant ainsi aucune ascendance dynamique. Les bons rendements s'obtiennent en général avec des pentes d'allongement supérieur à 10. C'est la raison pour laquelle un terail peut générer parfois une meilleure ascendance qu'une montagne de 1000m de dénivelé :



Rendement proche de 0%

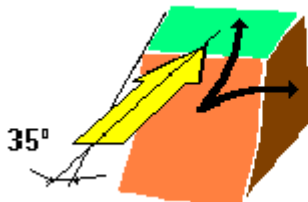


Rendement médiocre



Excellent rendement

Le vent travers : Le rendement est bien entendu idéal lorsque l'axe du vent est perpendiculaire à une pente, il baisse rapidement en cas de vent de travers :



35°



60°

Sur une pente à 95%, le rendement est de moitié pour 35° de déviation, sur une pente à 25%, il faut 60°.

La force du vent : Si le vent est trop fort, l'écoulement n'est plus *laminaire*, il y a *perte d'énergie* par turbulence :



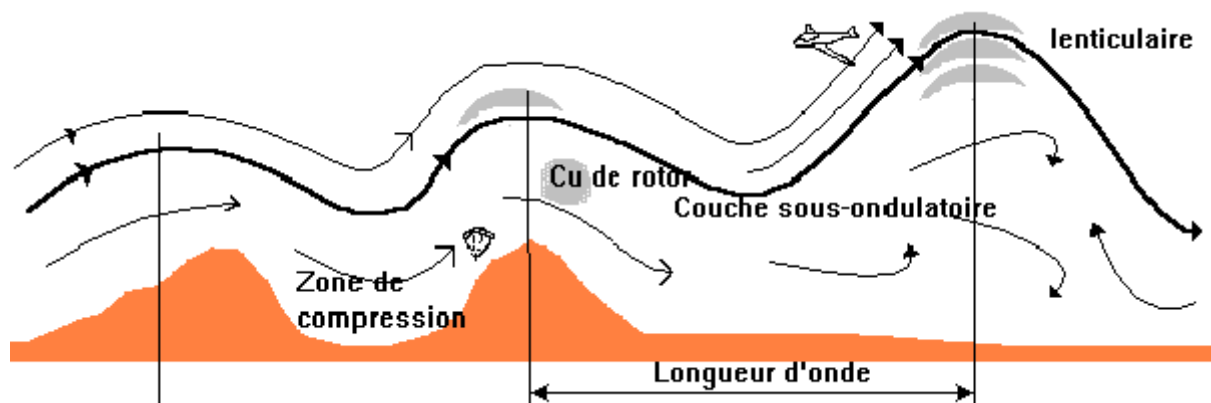
Le relief de détail sur la pente : L'idéal est bien sûr un relief lisse et uniforme, toute autre forme provoque une baisse de rendement :



La perte d'énergie est provoquée par les *frottements* et par les *obstacles*.

L'onde :

Par rapport au cas de l'obstacle évoqué ci-dessus, qui est généralement néfaste pour le rendement de l'ascendance, il existe un cas particulier bien connu des pilotes de planeur, qu'il peut nous arriver de rencontrer sous une forme réduite, c'est le vol **d'onde due au relief et au vent**.



Dans certains cas bien particuliers (de force, d'orientation du vent par rapport à des reliefs bien placés, cela fait beaucoup de paramètres, d'où la rareté du phénomène), l'air, *très légèrement comprimé* à sa redescende d'un premier relief, rencontre la base d'un second relief. L'impulsion ascendante arrive alors juste au même endroit que la détente de l'air : on dit que le vent est *en phase* avec le relief. L'ascendance qui en résulte devient alors beaucoup plus importante que ne le permettrait le simple effet dynamique du relief, et la troisième "vague", sous le vent du relief, atteint des altitudes faramineuses : c'est en *vol d'onde* qu'à été établi le record de gain d'altitude en planeur : 12000m, sous le vent des monts Tatra, en ex-Tchécoslovaquie !

Le vol d'onde présente cependant quelques inconvénients majeurs pour le parapente :

- les vitesses de vents qui le permettent sont souvent incompatibles avec la pratique du parapente,
- les altitudes atteintes peuvent faire rêver, mais 12000m sans oxygène et à l'air libre...
- la *couche sous-ondulatoire* est généralement extrêmement turbulente, avec des zones descendantes de grande ampleur elles aussi : il est possible de la traverser avec les vitesses du planeur, mais difficile de l'envisager à 40km/h avec le parapente.

Notez tout de même la présence de lenticulaires, caractéristique du phénomène : le nuage est en perpétuelle phase de formation par condensation du côté *au vent*, dans la *phase ascendante*, en même temps qu'il se désagrége en permanence par réévaporation dans la phase descendante. La présence de nuages de ce type à basse altitude indique à tout parapentiste avisé la présence de vents forts, souvent accompagnés de turbulences à basse altitude.

Un autre nuage caractéristique est le Cumulus de rotor que l'on voit ici à l'aplomb du second relief : c'est souvent le point de départ pour l'ascenseur de l'onde utilisé par les planeurs. Prière de rester *au vent* de ce type de nuage, bien entendu...

Les conditions d'établissement de l'onde :

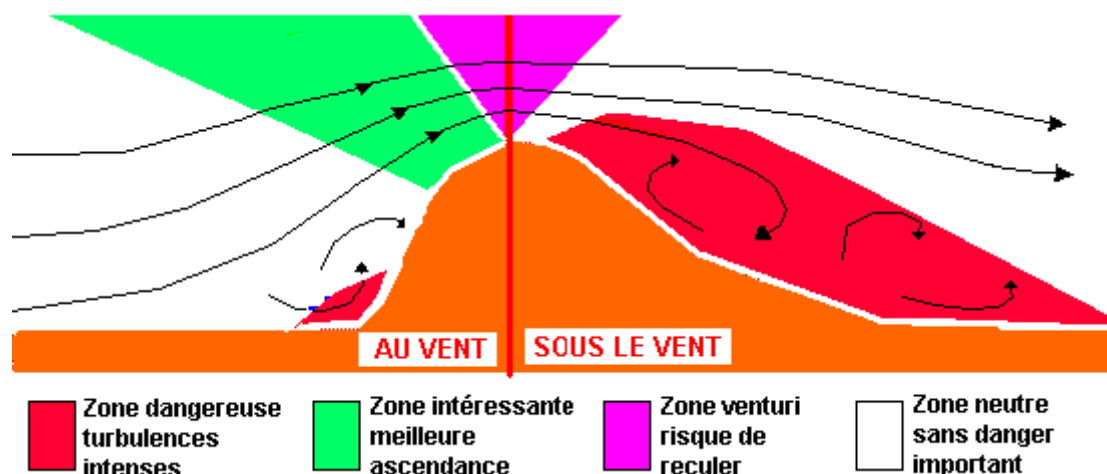
Le vent : étant donnée l'ampleur du phénomène, il ne peut cette fois s'agir que de *vent météo*, qui est le seul à pouvoir fournir une alimentation suffisante et constante en force et en direction pour que l'onde s'organise.

Le relief : nous avons illustré notre schéma par le cas du double relief en phase, cas le plus favorable mais qui n'est pas le seul à générer de l'onde. En effet, parfois un seul relief peut suffire, à condition qu'il ait une forme appropriée, que va épouser au mieux la vague de l'onde. On s'est d'ailleurs aperçu que la forme du relief a plus d'importance sous le vent qu'au vent pour la formation d'onde.

L'atmosphère : Le fait qu'elle soit sèche ou humide influe assez peu, par contre la condition la plus importante est sa *stabilité* : s'il y a trop de thermiques, ceux-ci vont en effet perturber l'installation d'une onde qui ne prendra alors naissance que le soir, à l'heure où la réglementation aéronautique nous intime l'ordre de nous poser... Pour ce qui est de l'humidité, elle peut si elle est présente donner lieu à un phénomène aérologique monstrueux pour l'aviation de tourisme : un seul nuage, mais de quelques milliers de mètres d'épaisseur, s'étendant sur des centaines de kilomètres de long et de large, interdisant tout atterrissage dans la zone...

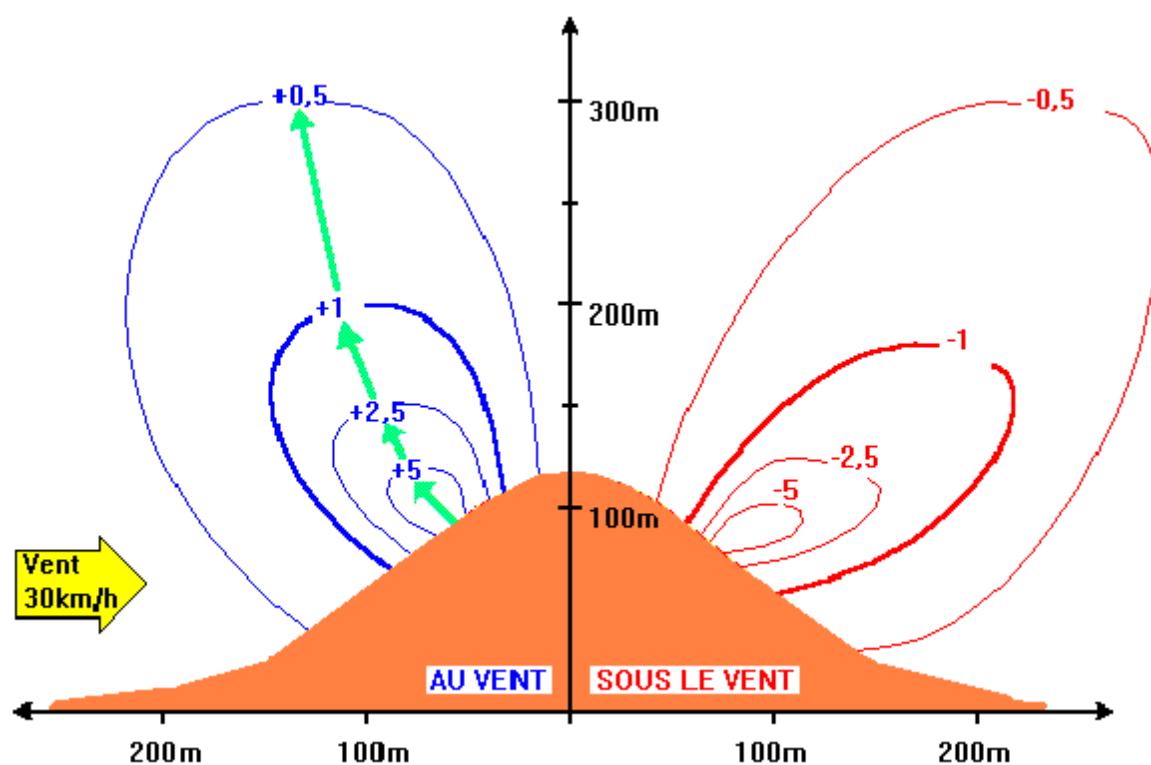
Les zones d'évolution :

On a coutume de dire, s'agissant de l'ascendance de pente, que "c'est la plus facile à exploiter, ça monte partout". Ceci est absolument faux s'agissant du vol dynamique, il faudrait dire : "ça monte partout, devant et à une certaine distance de la pente" pour être exact. Il est même relativement dangereux d'essayer de vérifier sans précautions la première phrase, car les zones d'évolution du schéma ci-dessous sont à respecter scrupuleusement si l'on veut éviter les mauvaises surprises :



On peut noter particulièrement :

- La zone dangereuse est principalement située sous le vent, sous le niveau de la crête ; exceptée une possible zone au vent du relief, au pied de celui-ci s'il est abrupt.
- Le trait vertical épais, qui représente une barrière à ne **pas franchir à basse altitude**, car si le vent est fort, on risque de reculer dans les turbulences.
- La zone la plus intéressante du point de vue des valeurs d'ascendance est celle où les filets de vent présentent la plus grande pente : on voit qu'elle se situe en avant du relief, de plus en plus à mesure que l'on monte, comme l'indique également le schéma suivant, sur un relief doux donc sans turbulences.



Sur cette figure sont mis en évidence les éléments suivants :

- La zone de meilleure ascendance est située **au vent, en avant du relief**. La ligne idéale est figurée par le trait épais : en *sortie de décollage*, il faut commencer par avancer pour monter à la fois plus efficacement et sans risque de passer sous le vent. Ensuite, on adoptera la technique du *vol en crabe* pour naviguer en restant dans la zone la plus favorable.
- L'altitude maximum atteinte dans la meilleure zone est directement dépendante des performances de l'aile :
 - Un *taux de chute minimum* proche de 1m/s permettra de *plafonner* à environ 200m/sol,
 - Un parapente plus ancien, taux de chute 2m/s, ne montera au maximum qu'à 160m environ.
 - Un bon rapace, taux de chute 0,5m/s, restera inaccessible à 300m d'altitude !

LES QUATRE TRANSFERTS D'ENERGIE

Ce chapitre aurait théoriquement plus eu sa place dans notre cours de météorologie, étant donné l'échelle importante de certains phénomènes que nous allons décrire. Cependant, la compréhension des éléments d'aérologie est intimement liée aux *transferts d'énergie*, c'est pourquoi nous en parlerons ici, de manière "géographiquement" plus proche du cours d'aérologie.

La **chaleur** est souvent confondue dans l'esprit commun avec la **température**. Pour le physicien, les deux notions ne se situent absolument pas sur le même plan :

- La **chaleur** est une valeur d'**énergie**, elle décrit en quelque sorte la *réserve de puissance* d'un *corps* ou d'un *élément* (le sol, l'atmosphère).
- La **température** est une simple mesure d'un paramètre.

Dans le langage du physicien, il existe autant de différences entre les deux qu'entre **énergie cinétique** (c'est la *réserve de puissance* d'un corps en mouvement) et **vitesse** par exemple.

L'atmosphère reçoit son énergie, sa **chaleur**, depuis son moteur essentiel : le **soleil**, par l'intermédiaire de quatre *transferts d'énergie*. Ce sont :

Le rayonnement :

C'est une méthode de transmission par *exposition* directe, qui fonctionne bien vis-à-vis de beaucoup de solides, moins bien vis-à-vis des liquides, et qui est quasi-négligeable vis-à-vis des gaz. La terre et la mer reçoivent ce *rayonnement* et l'utilisent à diverses fins, parfois très complexes : cela peut être par exemple la *photosynthèse* réalisée par les plantes. Le rayonnement, ce n'est pas que de la lumière, le soleil en fournit sous bien d'autres formes que le seul *spectre visible*, ce sont aussi des **infrarouges** dont la longueur d'onde est située juste en dessous et qui sont le **vecteur essentiel de la chaleur solaire**, les *ultraviolets* qui font beaucoup de maux cutanés tout en donnant l'impression de faire du bien par le bronzage, les ondes *électromagnétiques* et enfin les rayonnements nucléaires *alpha, bêta et gamma*, qui sont heureusement pour nous très atténués par leur traversée de l'atmosphère. Sans exposition au soleil, la nuit par exemple, la terre renvoie une partie de son rayonnement vers l'espace (la nature est partageuse de l'énergie !) . L'**albédo** d'un corps est un rapport qui exprime la partie de rayonnement directement *réfléchi* et donc non *absorbée*. En physique, un *corps noir* possède un *albédo nul* car il absorbe tout.

La conduction :

C'est la propagation à l'intérieur d'un corps, si vous préférez *sans changement de milieu* ou par contact avec le milieu voisin. Elle fonctionne bien dans les solides, moins bien dans les liquides et mal dans les gaz. Lorsque vous utilisez une cuillère métallique pour remuer votre soupe, vous vous brûlez (évidemment...) par *conduction thermique* d'une extrémité à l'autre de la cuillère. Cette petite expérience vous convaincra aisément que le métal possède une meilleure *conductivité thermique* que le bois que tout bon cuisinier utilisera pour cet usage...

La convection :

Pour les *milieux fluides*, liquides et gazeux, la nature a néanmoins trouvé un transfert d'énergie très efficace : il s'agit de la transmission à l'intérieur du fluide par transport de molécules : mouvements convectifs dans l'eau d'un lac, *bulles thermiques* dans l'air, le brassage dû aux variations de la masse volumique.

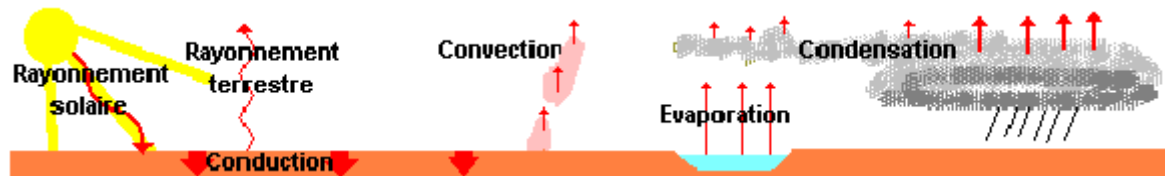
Le changement de phase : évaporation et condensation :

Même si la vapeur n'est plus au goût du jour actuellement, n'oublions pas qu'elle a constitué le moteur essentiel de nos ancêtres. La transmission d'énergie par la vapeur ne date pas d'hier... au point que ce n'est qu'assez récemment que les Kilowatts ont supplanté les chevaux vapeur. Une partie de l'histoire industrielle humaine est d'ailleurs résumée dans ces termes. De plus, l'évaporation est un excellent "pont" pour passer d'un type d'énergie à l'autre : dans une centrale nucléaire, l'énergie de base est la *chaleur*, transformée en *énergie mécanique* grâce à la vapeur (échangeurs thermiques entre circuit primaire et secondaire) qui passe dans des turbines reliées aux génératrices qui vont enfin la transformer en *énergie électrique* qui est actuellement le mode de transport d'énergie le plus pratique.

Dans l'atmosphère terrestre également, le transport d'une grande quantité de chaleur en altitude est réalisé par un cycle où la chaleur est **prélevée par évaporation**, transportée en altitude par convection, puis **restituée par condensation** (nuages).

L'évaporation refroidit le milieu alors que la condensation le réchauffe.

Ajoutons enfin que l'eau n'est visible que sous sa *phase solide*, la glace, et sous sa *phase liquide*, l'eau ; tandis que sa *phase gazeuse*, la vapeur, est **invisible** et **plus légère que l'air sec**, ce qui renforce la convection.



L'EFFET DE FOEHN (et non "effet de fun")

L'*effet de foehn*, du nom valaisan des vents de ce type, est une situation météorologique intimement liée aux *transferts d'énergie* dont nous venons de parler, combinés aux effets dynamiques du vent sur le relief. Pour qu'il y ait effet de foehn, il faut : **un relief** et **du vent météo**.

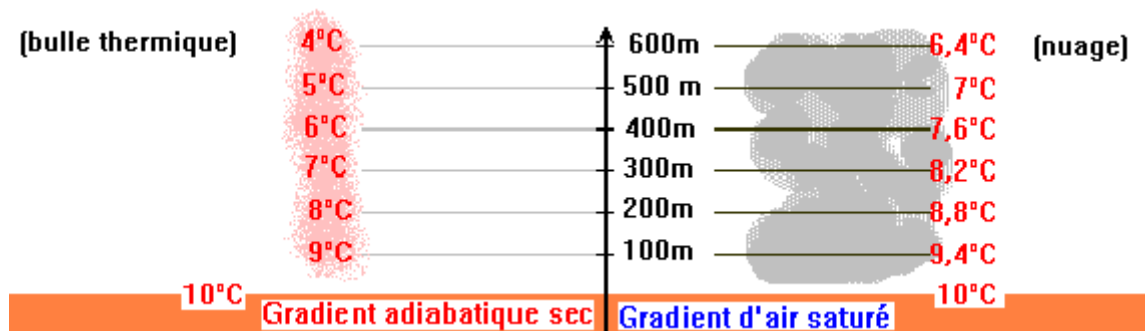
Pour bien le comprendre, il nous faudra d'abord parler du :

Gradient de température adiabatique sec :

Les savants français *Gay-Lussac* et *Charles* ont démontré que, pour un **gaz parfait**, à volume constant, la température est directement liée à la pression. L'air atmosphérique **non saturé** correspond assez bien à un *gaz parfait*, ce qui fait qu'il subit une **décroissance de température proportionnelle à la décroissance de pression, donc d'altitude dans l'atmosphère terrestre**. Aux altitudes qui nous intéressent, dans la basse couche, la décroissance de température appelée **gradient adiabatique sec** (*sans vapeur d'eau*) est très proche de **- 1°C** (pour une montée en altitude de 100m).

Gradient de température de l'air saturé :

Lorsque l'air est *saturé* la condensation dégage de la chaleur et réchauffe le milieu. La décroissance de la température sera inférieure à la décroissance en milieu sec pour se situer généralement entre 0,5 et 0,8°C en fonction de l'humidité avec une moyenne de : **- 0,6°C** (pour une montée en altitude de 100m).



L'effet de foehn :

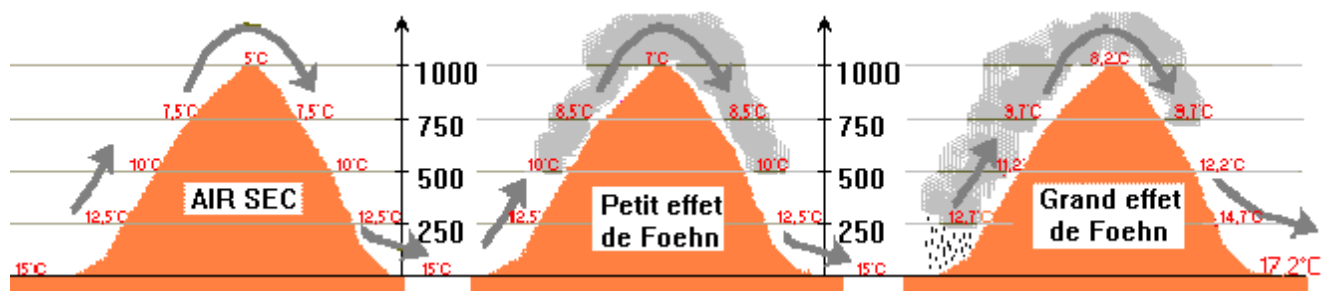
Étudions à présent ce qui se passe lorsqu'un vent rencontre une barrière montagneuse, disons de 1000m de *dénivelée*, qu'il lui est impossible de contourner. Si la température de l'air est de 15°C à la base et que nous avons affaire à de l'air sec, celle-ci va décroître en suivant le *gradient adiabatique sec* à la montée, passer le sommet de la crête à 5°C donc, puis se réchauffer à la descente pour retrouver ses 15°C à l'altitude initiale.

Petit effet de foehn :

Si, maintenant, nous avons affaire à de l'air humide, toujours à 15°C à la base de la montagne, celui-ci va suivre le *gradient adiabatique sec* en s'élevant, jusqu'à son *niveau de condensation*, altitude à laquelle il va rencontrer son *point de rosée*. Le dégagement de chaleur produit par la condensation va l'amener à suivre alors un *gradient humide*, disons de 1,5°C par tranche de 100m. Il passera cette fois-ci la crête à une température de 7°C, grâce à la formation nuageuse qui s'est produite. En redescendant de l'autre côté, si le niveau de condensation est le même, il retrouvera le *gradient adiabatique sec* à la même altitude et sera à nouveau à 15°C à son altitude initiale. C'est le **petit effet de foehn**.

Grand effet de foehn :

Même situation, mais cette fois se produit une *précipitation* du côté au vent. L'air redescendant sera cette fois plus sec (une partie de son *humidité absolue* s'est déchargée par la pluie), il retrouvera donc un niveau de condensation et le gradient sec beaucoup plus haut. Le résultat est un réchauffement de l'air de l'autre côté de la montagne, et une accélération du vent car l'air chaud occupe plus de place.



LE DECLENCHEMENT THERMIQUE

Quand on parle de *thermiques*, les yeux de tout parapentiste normalement constitué se mettent à briller, les oreilles se dressent et commence une longue discussion émaillée d'anecdotes plus ou moins valorisantes pour les pilotes. L'*ascendance thermique* est en effet un des principaux vecteurs de gain d'altitude pour le parapente, même s'il reste assez mystérieux pour de nombreux pilotes. Pour mieux le comprendre, nous l'étudierons en deux phases : le *déclenchement thermique* tout d'abord ou comment se forme un "thermique", puis ensuite nous suivrons son ascension en parlant *stabilité et instabilité*.

Un "thermique", c'est avant tout une zone où l'air est plus chaud que l'ensemble de la masse d'air environnante, ce qui lui permet par différence de densité de s'élever au sein de cette masse d'air. Si nous y plongeons un parapente, celui-ci continuera bien entendu à descendre au sein du thermique, mais si la vitesse ascendante de celui-ci est supérieure au taux de chute affiché, notre heureux parapentiste pourra gaiement s'élever par rapport au sol...

Les thermiques se présentent grossièrement sous deux formes : soit une *colonne* "à feu continu", soit une *bulle* dont le passage sera limité dans le temps.

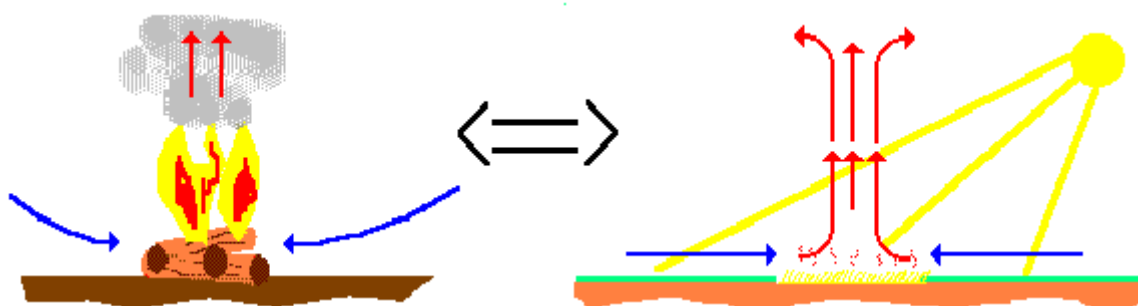
La colonne thermique :

On peut comparer le fonctionnement d'une colonne thermique avec celui d'un bon feu de bois : le feu en brûlant réchauffe l'air à son contact, celui-ci va donc s'élever en étant remplacé par de l'air frais autour du feu, qui va se réchauffer à son tour, etc. Une circulation d'air montant ayant pour base notre feu de bois va s'établir, nous obtenons une ascendance continue et à peu près constante, dont la taille et la force vont dépendre de la taille et de l'intensité du feu de bois.

Au niveau atmosphérique, cela se produit de la même manière, à la différence que le feu de bois va être remplacé par une zone du sol, réchauffée par **rayonnement solaire**, qui va communiquer sa chaleur à la couche d'air à son contact par **conduction**, puis s'élever par **convection**.

Les éléments nécessaires :

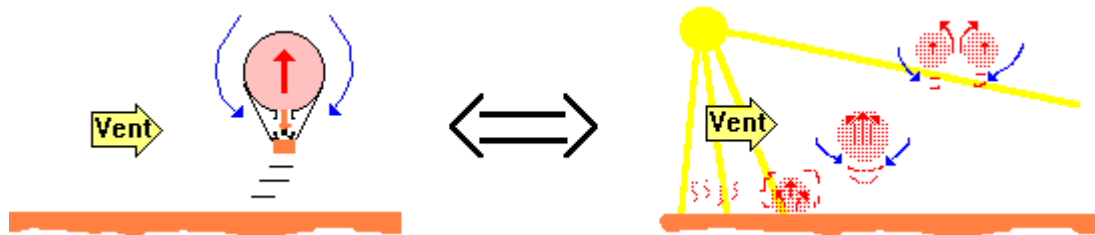
- Un bon ensoleillement, régulier et puissant en arrivant au sol (pas de voile nuageux),
- une bonne **source** thermique, capable de restituer à l'air la survolant une bonne partie de sa chaleur,
- un vent faible, pour permettre à la circulation d'air de trouver son "régime de croisière" toute seule,
- une bonne alimentation latérale en air de remplacement : pas de bon feu sans un bon tirage...



La bulle thermique :

Malheureusement, souvent, il existe un empêchement à l'établissement de ces colonnes thermiques, vers lesquelles il est si facile de converger avec la certitude de trouver une ascendance régulière dans le temps et dans l'espace (du moins pour une même journée). L'ensoleillement s'interrompt en raison de passages nuageux, la source n'a pas suffisamment de surface pour réchauffer directement tout le volume d'air de remplacement ou le vent est trop fort pour que l'air y stagne assez longtemps ou encore, phénomène souvent négligé par les "chasseurs de thermiques", l'alimentation latérale n'est pas assez bonne (cas de la clairière dans une forêt).

On a alors affaire à un déclenchement thermique *pulsant*, qui va de temps en temps libérer un certain volume d'air chauffé, une **bulle thermique**, avant de s'interrompre à nouveau pour "préparer le prochain service". Cette bulle va alors s'élever emportée par le vent, à la manière d'une montgolfière :



La source thermique :

Pour bien les exploiter, il ne suffit pas de savoir que les thermiques montent, ni même de déterminer s'ils sont du type "bulle" ou "colonne", encore faut-il savoir où en trouver ! Un des meilleurs moyens de chasse, à défaut de volatiles en l'air, consiste à recenser les **sources** capables de provoquer des déclenchements. Celles-ci sont des surfaces capables d'échauffer la couche d'air qui les recouvre à une température plus élevée que la masse d'air environnante. Il faut donc :

- Une bonne exposition au soleil, perpendiculaire aux rayons : **faces sud, été**
- Une bonne réflexion de l'énergie : **surfaces claires**
- Une bonne transmission à l'air et non interne : **rochers, terre sèche**
- Un contraste par rapport aux surfaces environnantes : **rochers/forêt, route/herbe, etc.**

Quelques exemples : Une falaise au soleil, un champ de blé entouré d'herbe, une route au milieu des prés, un atterrissage au milieu de bosquets ! Un cas particulier intéressant : la zone restée ensoleillée sous un ciel peuplé de cumulus projetant leur ombre...

STABILITE et INSTABILITE

Que se passe-t-il une fois notre bulle d'air détachée du sol ? Celle-ci va continuer de monter tant que sa différence de température avec la masse d'air environnante sera positive, c'est-à-dire tant que la température de l'air contenu dans la bulle (ou la colonne) sera supérieure à la température de l'atmosphère à la même altitude.

Elle montera suivant les paramètres suivants :

- Sa vitesse ascensionnelle (les +2, +3, etc. dont vous parlent les copains) sera proportionnelle à la différence de température avec l'air environnant : plus celle-ci sera élevée, plus la vitesse verticale de la bulle sera forte.
- S'il y a du vent, une bulle suivra le vent dans son parcours, une colonne sera ou non déviée suivant son volume et sa force.
- **Dans tous les cas**, en montant, l'air contenu dans le thermique subira le gradient de température, soit le **gradient adiabatique sec** s'il n'y a pas de condensation (nuage), soit le **gradient d'air humide** dans le cas contraire.

Voyons à présent les différents cas possibles :

Cas n°1 : Instabilité absolue :

Si la température décroît sans discontinuer avec l'altitude, en suivant le gradient adiabatique sec égal à 1°C par tranche de 100m, égal à celui de la bulle ; celle-ci étant partie du sol avec une température forcément plus élevée, elle continuera son ascension tant que durera la situation. On dit alors que l'atmosphère est très **instable**, car elle favorise les échanges d'air entre sa base et son sommet. Dans la réalité, l'air, même très sec, arrivera forcément à son niveau de condensation, formant alors un **cumulonimbus** et un orage.

Cas n°2 : Stabilité absolue :

Cette fois, notre bulle rencontre durant son ascension une **couche de blocage**, c'est-à-dire une zone où :

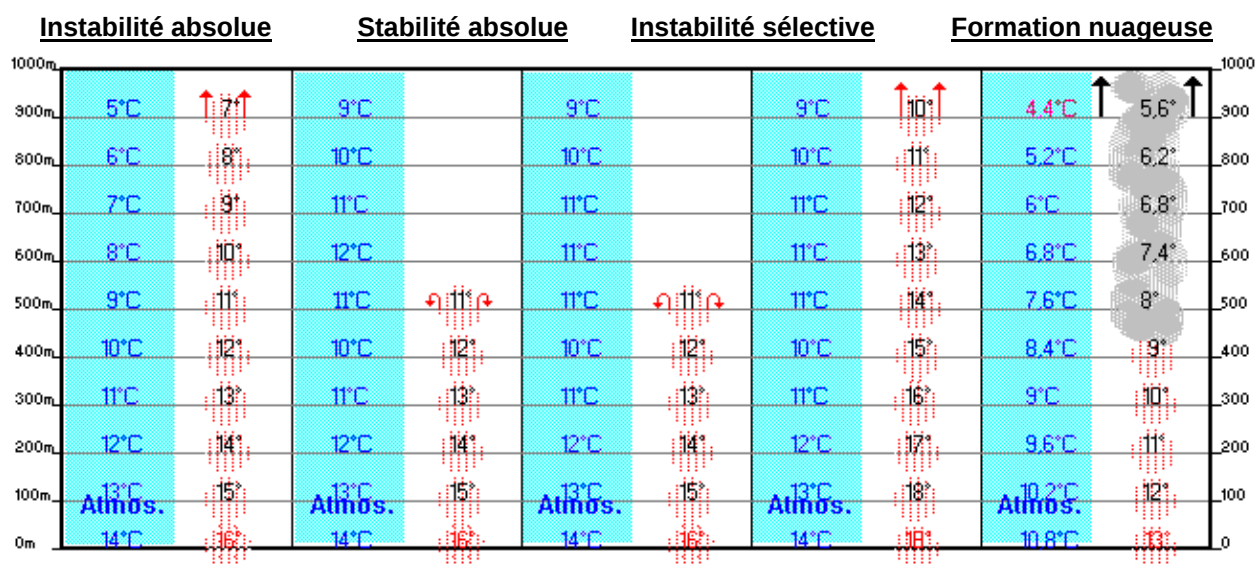
- Soit la température n'évolue pas sur quelques centaines de mètres d'altitude : **isothermie**,
- Soit la température croît sur quelques centaines de mètres d'altitude : **couche d'inversion**,

Cas n°3 : Instabilité sélective :

La couche de blocage est toujours présente, mais assez faible et sur quelques dizaines de mètres d'altitude seulement : les thermiques les plus puissants, qui sont partis du sol avec une forte différence de température avec le milieu extérieur, ont assez de force pour la traverser et poursuivre leur route vers le haut.

Cas n°4 : Formation nuageuse :

L'air arrive à son niveau de condensation. Des gouttelettes se forment, provoquant un dégagement de chaleur par condensation. La bulle thermique va alors bénéficier d'un bonus bien utile pour son ascension : elle va passer du **gradient adiabatique sec : 1°C par 100m**, au **gradient d'air humide : en moyenne 0,6°C par 100m**, en se déchargeant d'une partie de son *humidité absolue*, de la vapeur d'eau qu'elle contient. Attention : son *humidité relative* sera à ce moment là toujours égale à 100%. Il faudra donc une couche de blocage puissante, voire une inversion de température pour l'arrêter.



Cas typiques :

Instabilité absolue

Mois de mai, juin : atmosphère froide en altitude et réchauffée au sol. Mois de juillet, août : sol surchauffé et humide en basses couches (formations nuageuses).

Stabilité absolue

Temps anticyclonique de janvier, février, août, etc.

Instabilité sélective

Bonnes conditions de cross en avril, mai, juin avec ou sans formation nuageuse. Quelques journées similaires en juillet, août.

LE CUMULUS

Une ascendance est souvent *matérialisée* par un *cumulus*, du moins c'est ce que vous racontent les moniteurs... quand et comment cela se produit-il ? La formation de cumulus à partir d'une ascendance est due à un ou plusieurs des facteurs suivants :

- **forte humidité des basses couches :**

Lorsque l'air contenu dans l'ascendance monte, contenant une forte *humidité relative* (beaucoup de vapeur d'eau), il va assez rapidement obtenir une *humidité relative* de 100%, c'est-à-dire arriver à saturation de vapeur d'eau, à cause du refroidissement. A ce moment là, une partie de sa vapeur d'eau va se condenser en fines gouttelettes, provoquant l'apparition de barbules. Si l'ascendance se poursuit dans le temps, ces barbules vont s'étoffer par l'apport d'humidité des basses couches pour commencer à former un nuage par *accumulation*, un *cumulus*. C'est par exemple le cas après un orage survenu assez tôt dans la journée; si l'ensoleillement réactive la convection et l'évaporation, de beaux cumulus ne tardent pas à réapparaître.

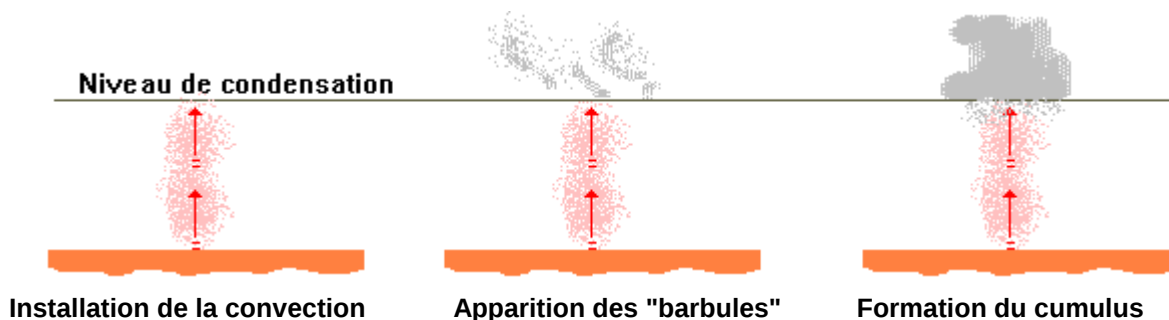
- **fraîcheur d'altitude :**

Lorsque c'est le cas, la bulle même normalement humide verra son niveau de condensation abaissé à basse altitude, donnant le même résultat que précédemment. C'est le cas en avril, mai et juin lors des belles journées thermiques, à condition que les ascendances montent suffisamment.

- **forte instabilité :**

Dans ce cas, les bulles continuant à monter très haut, trouveront tôt ou tard leur niveau de condensation et formeront un cumulus qui certainement n'en restera pas là... C'est le cas des journées orageuses, où rien ne vient freiner le développement nuageux.

On peut décomposer la formation du cumulus d'instabilité en 3 stades :

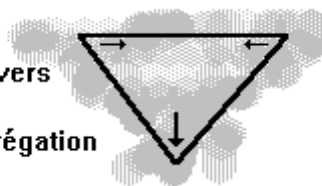


Malheureusement, souvent, pour diverses raisons, l'activité convective s'interrompt (parfois à cause de l'ombre du cumulus qui s'est formé !) et faute d'alimentation notre beau cumulus se désagrège par redescente de l'air et ré-évaporation. Il existe d'ailleurs un "truc" pour repérer si un cumulus est en phase de formation ou de désagrégation, en considérant que l'accumulation se produit là où "il se passe quelque chose" :

Triangle pointé vers le haut :
signe de formation

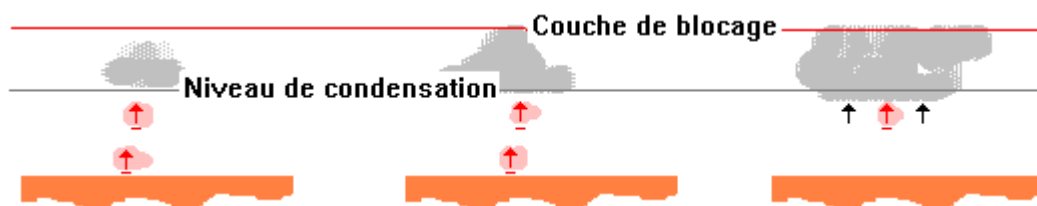


Triangle pointé vers le bas :
signe de désagrégation



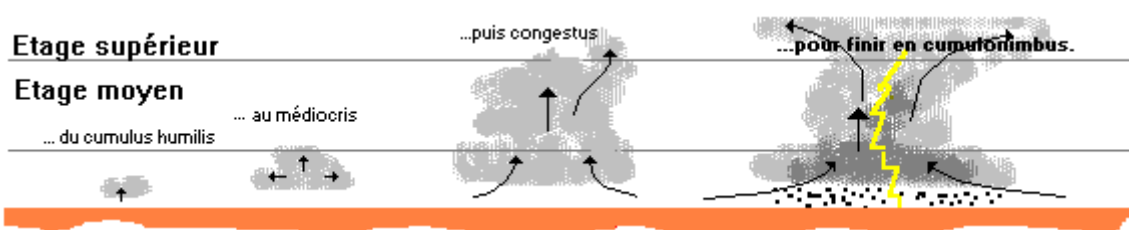
Si tout va bien...

... l'activité thermique se maintient cependant, et notre cumulus va devenir un individu autonome, développant son ascendance propre grâce à la chaleur dégagée par condensation. Comme de plus c'est un garçon raisonnable, il rencontrera une couche de blocage suffisamment tôt pour que son ascendance reste exploitable dans les limites de capacités de fuite de nos parapentes. Une fois arrivé dessous, on peut le travailler en choisissant selon son goût les zones sombres (nuage plus épais) pour monter plus haut, ou les zones claires pour redescendre ou stabiliser son altitude. Le cumulus est l'autobus du vol de plaine...



Si tout va mal...

... la couche de blocage est insuffisante pour empêcher le cumulus de poursuivre son ascension, et on passe :



Les voiles sont bien entendu dans leur sac au-delà du stade médiocris...

LES BRISES

Dans le langage courant, on confond généralement *vent* et *brise*. Pour le météorologue, il s'agit pourtant de circulations d'air tout à fait différentes :

- le vent se situe à l'échelle météorologique, il a pour moteur les anticyclones et les dépressions,
- la brise est un phénomène local, d'origine convective.

Nous allons décrire le fonctionnement des différentes *brises* : *brise de pente*, *brise de vallée* et *brise de mer*.

La brise de pente :

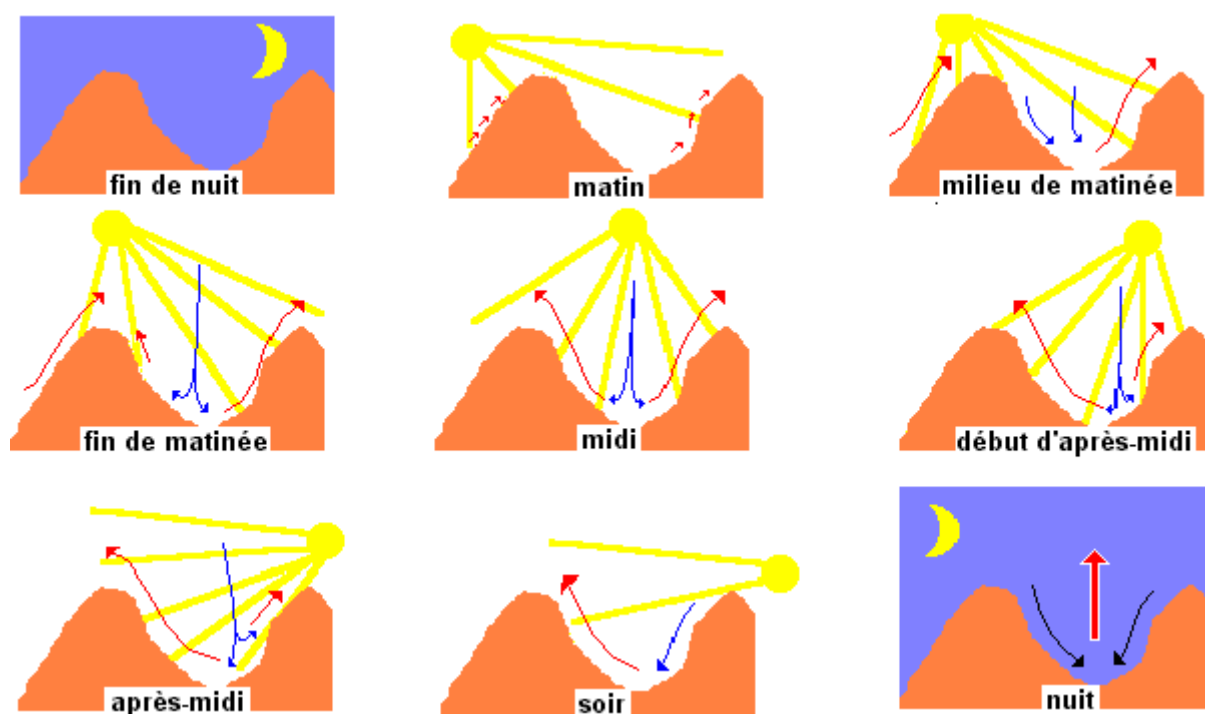
Lorsque le soleil, par *rayonnement*, chauffe le sol des versants qui lui sont exposés, ce sol va à son tour réchauffer la couche d'air qui est en contact avec lui. Cette couche d'air va se *dilater*, donc peser moins lourd pour un même volume que l'air environnant et va donc avoir tendance à monter. Si une petite surface, donc un faible volume d'air, est réchauffée fortement, nous obtiendrons un *thermique*. Cependant, le cas le plus courant correspond souvent à une grande surface de pente exposée à un rayonnement moyen. L'air, à ce moment-là, n'aura pas une concentration d'énergie suffisante pour se détacher du sol et monter dans l'atmosphère à la verticale. Il aura tendance à "coller" sur la pente par effet de *viscosité statique*, un petit peu comme un lainage sur du "velcro". Si tout un versant est ainsi exposé au soleil, à chaque endroit de la pente les particules d'air vont "couler" en remontant jusqu'à la crête, d'où elles devront effectivement se détacher du sol pour poursuivre leur ascension. A leur place initiale, elles seront remplacées par un appel d'air depuis le bas de la pente :



La **brise de pente** naît, et va se développer tant que l'ensoleillement de face va durer. Si le soleil "tourne" pour éclairer d'autres versants, une brise va naître sur ceux-ci alors qu'elle va s'éteindre sur le versant abandonné, puis s'inverser pour alimenter les versants mieux exposés. La brise de pente va donc suivre la rotation du soleil : le **matin**, elle sera présente sur les faces exposées à l'**est**, à **midi** sur les faces **sud** et le **soir** sur les faces **ouest**, et même sur les faces **nord-ouest** si l'on est proche du **solstice d'été**.

En plein midi solaire (14 heures en France en heure d'été), lorsque presque toutes les pentes sont éclairées, c'est le milieu de vallée qui assure l'alimentation en air frais, on a donc la situation suivante : brises montantes sur les versants et milieu de vallée en descendance.

Le soir, le fond de vallée se refroidit par contre moins vite que les crêtes : on se trouve dans la situation inverse, donc c'est une **brise descendante** qui s'installe sur les pentes pour alimenter le milieu de vallée ascendant : c'est l'**inversion de brise** tant redoutée par les derniers pilotes au décollage, impatients de vous voir décoller alors que vous démêlez votre voile. Si de plus les pentes sont arides et le fond de vallée occupé par la forêt, en été le phénomène sera accentué par la **restitution thermique** de la forêt qui a emmagasiné de la chaleur toute la journée : on ne pourra même pas en profiter après l'inversion si on n'est pas déjà en l'air, en raison de la brise arrière du décollage !



Les facteurs favorables à l'établissement

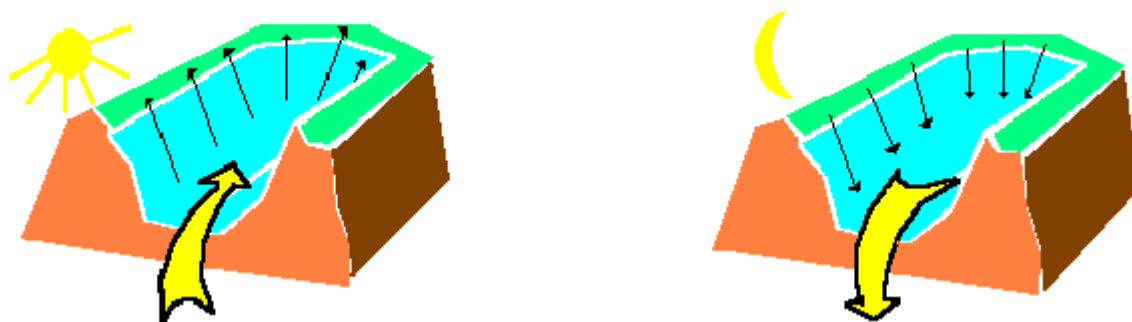
- atmosphère limpide
- instabilité atmosphérique
- pente aride
- pente large
- pente haute en dénivelée

Les facteurs défavorables

- ciel voilé ou nuageux
- pente isolée ou basse
- zone forestières
- vent météo fort, qui provoquera plutôt des thermiques en décrochant l'air de la pente

La brise de vallée :

Présente dans les vallées suffisamment longues, elle résulte de l'appel d'air des brises des pentes présentes tout le long de la vallée, qui ne peut plus être assuré par le seul milieu de vallée si celle-ci est étroite. L'appel d'air se communique donc de proche en proche jusqu'à l'embouchure de la vallée. Elle remonte la vallée le jour, pour en redescendre la nuit en suivant le sens des brises de pente :



Comme elle résulte de l'accumulation des brises de pente, elle sera maximale lorsque les deux versants de la vallée seront ensoleillés, donc à midi solaire (14 heures d'été).

En été, dans certaines vallées alpines très longues (vallée de l'Arve, Tarentaise, Maurienne, Durance,...), elle atteint couramment **40 à 50 km/h**, voire plus aux endroits où la vallée se resserre, par *effet Venturi*.

Attention : la brise sera montante dans la vallée principale le jour, mais elle peut tout à fait être descendante dans une vallée secondaire, qui servira à l'alimenter. On peut le constater par exemple à Vallouise, dans les Hautes-Alpes, où la vallée de l'Ailefroide menant aux hauts sommets du Pelvoux est alimentée entre autres par la vallée de l'Onde qui lui est un affluent : la brise y est *descendante le jour* à 30km/h environ...

La brise de mer ou de lac :

De façon analogue à la brise de pente, en raison des contrastes de températures entre surfaces importantes, se déclenche une brise de mer ou de lac s'il y a des surfaces d'eau suffisantes.

De jour, en été, la terre se réchauffe beaucoup plus rapidement que l'eau. Un phénomène d'ascendance généralisé s'établit sur la terre, compensé par un appel d'air maritime. La nuit, la terre se refroidit beaucoup plus rapidement car elle *rayonne* beaucoup plus que la mer qui reste chaude longtemps. Là encore, le phénomène s'inverse la nuit : on l'appelle alors la **brise de terre**.



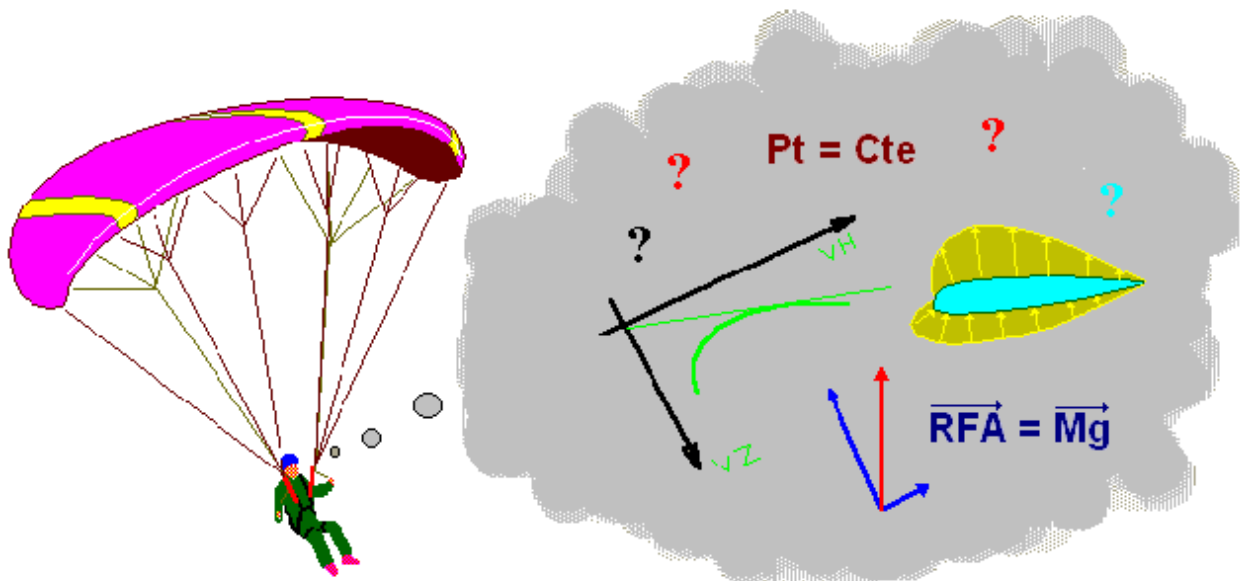
En hiver, en raison du faible réchauffement des terres en cours de journée, ce sont les brises de terre qui prédominent.

En ce qui concerne les brises de lac, étant donnée la grande surface nécessaire pour déclencher le phénomène, on considère qu'on ne rencontre une véritable brise de lac en France qu'au lac d'Annecy et au lac du Bourget.

Conclusions sur les brises...

- Inutile d'attendre une brise s'il n'y a pas de soleil ou sur un versant nord...
- S'il y a peu ou pas de vent météo, il faudra choisir son site d'envol en fonction de l'heure et de la saison pour qu'il bénéficie d'un ensoleillement, donc d'une brise, maximal : par exemple l'exposition nord-ouest le soir en été, sud à sud-ouest l'après-midi en hiver.
- Attention : brises et vent météo, ou brise de pente et de vallée peuvent se contrer : il vaudra mieux voler "sous le vent" du vent météo s'il est faible que sous le vent d'une brise forte.
- La brise de pente est maximale en début d'été, à midi, sur un versant orienté sud. Elle sera alors souvent trop forte pour décoller (supérieure à 30km/h).
- La brise de vallée est maximale lorsque les deux versants sont bien ensoleillés, cela dépend donc de l'orientation générale de la vallée, mais amène aussi un horaire de brise très régulier pour chaque saison : n'hésitez pas à vous renseigner auprès des locaux.
- Le fait d'avoir une brise de pente faible n'exclut absolument pas la possibilité d'une brise de vallée forte !

MECANIQUE DE VOL



INTRODUCTION

La **mécanique de vol**, rassurez-vous, ce n'est pas l'étude de la boulonnerie constitutive des maillons et divers systèmes d'attache du parapente. Au sens physique du terme, la mécanique, c'est l'étude scientifique des forces et des vitesses du sujet choisi, entre autres paramètres. La mécanique se divise en fait entre quatre disciplines fondamentales :

- **la statique** : c'est l'étude des états d'équilibre des forces, en l'absence de mouvements. La résistance des matériaux, par exemple la résistance d'une suspente à la traction, fait partie de la statique.
- **la cinématique** : c'est l'étude des corps en mouvement, en faisant abstraction des forces qui en sont la cause. L'étude des plages de vitesses et de taux de chute d'une voile fait partie de la cinématique.
- **la dynamique** : c'est l'étude des liaisons entre forces et mouvements d'un corps. C'est au travers de la dynamique que nous expliquerons pourquoi et comment une aile de parapente vole.
- **la cinétique** : c'est l'étude des transformations d'énergie dans le temps. Nous avons fait un peu de *cinétique* dans le cours d'aérogologie en parlant des *transferts d'énergie*.

Une nouvelle fois, je vous rassure, bien que l'on puisse parler du parapente sous ces quatre aspects, nous nous limiterons ici en scindant notre cours de *mécanique de vol* en seulement deux parties :

La dynamique du vol : donc, l'étude des différentes forces qui s'appliquent en vol à l'ensemble **aile+pilote**, dont nous parlerons en premier car c'est elle qui permettra de comprendre pourquoi "ça vole". Nous y parlerons de **forces**.

Cinématique du vol : après la partie ardue, nous aborderons cette partie un peu plus plaisante, qui nous permettra de comprendre comment "mieux voler" en toutes circonstances. Nous y parlerons de **vitesses**.

Représentation vectorielle :

Pour représenter successivement les forces et les vitesses sur un schéma (j'ai bien dit *successivement* car un *mécanicien* ne mêle jamais ces deux grandeurs sur un même schéma), nous aurons besoin d'un outil qui s'appelle le **vecteur**. Un vecteur permet de représenter, sous forme dessinée ou sous forme mathématique (nous nous contenterons de la forme dessinée), une grandeur physique à travers ses quatre paramètres :

ORIGINE ou *point d'application*, c'est l'endroit précis du corps où l'on étudie l'état d'une grandeur physique. Elle sera représentée sur notre schéma par un petit trait formant une petite croix avec la... **DIRECTION** : qui sera représentée par un axe, suivant lequel s'exerce la grandeur physique, complété par le... **SENS** : qui, lui, sera représenté par une petite flèche, d'un côté ou de l'autre de l'origine, à une distance correspondant à l'... **INTENSITE** : qui est la représentation de la valeur de cette grandeur physique, comparativement à une échelle de représentation ou aux autres vecteurs du même schéma.



ACTION, REACTION

Une **force** (ou une **action**) désigne en dynamique une **cause** capable de faire varier la vitesse d'un corps (= d'un objet) . En fait, le terme "capable" signifie qu'il y a variation de vitesse, à moins qu'une autre cause (une autre force) s'y oppose . Cette autre force s'appelle alors la **réaction** à la première force qui est l'action.

Exemple :

Une locomotive tire un wagon avec une **force de traction** appelée **T** . La résistance au roulement du wagon est symbolisée par **R**. Sur notre schéma, les deux forces sont surmontées par de petites flèches, qui signifient que l'on a affaire à des **vecteurs** . Ils auront donc :

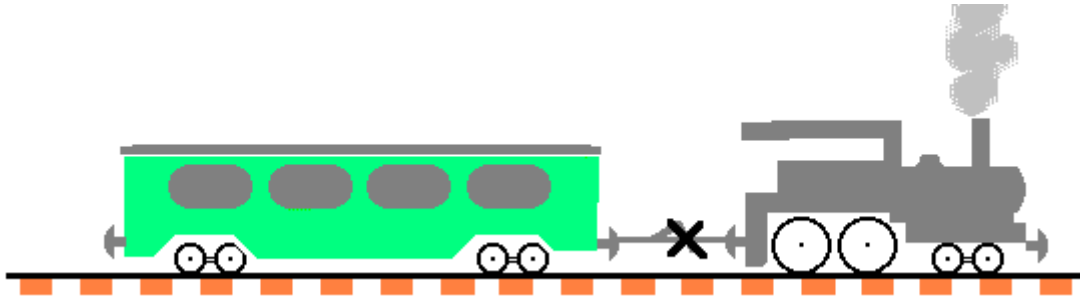
Une direction : parallèle à celle des rails car nous ne ferons pas voler le train !

Un sens : dans le sens de la traction pour **T**, dans le sens opposé pour **R**.

Une origine : toutes deux vont s'appliquer au crochet d'attelage.

Une intensité : dont la valeur sera exprimée pour chaque cas.

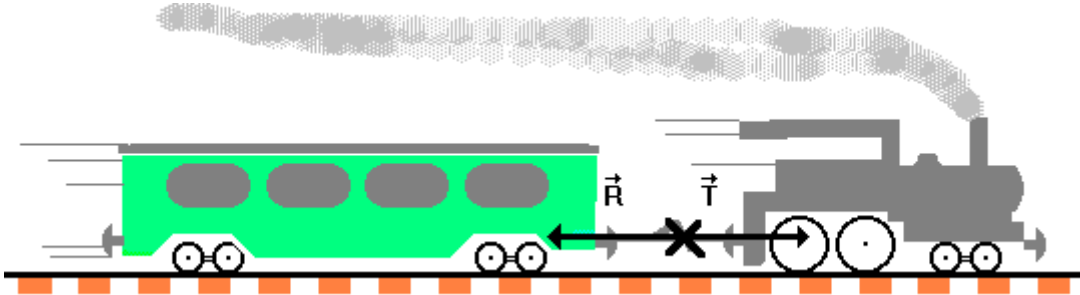
1er cas : la locomotive est à l'arrêt :



Les forces appliquées au crochet d'attelage sont **nulles**,

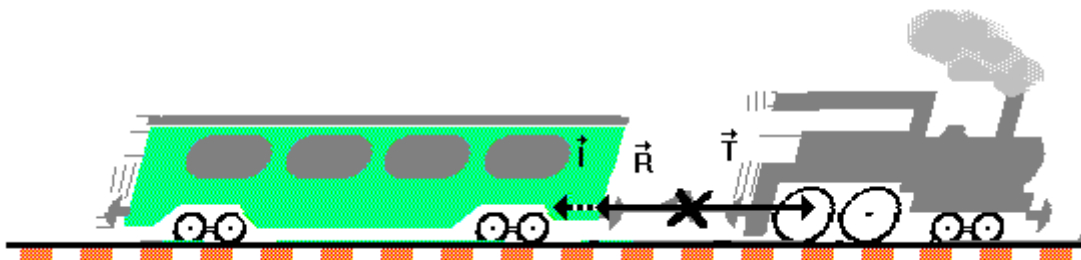
Leur somme est donc également **nulle** .

2ème cas : le train roule à vitesse stabilisée :



A la **traction T** de la locomotive est opposée la résistance au roulement de la locomotive et du wagon, **R**, d'**intensité égale** . C'est la description *mécanique* du phénomène qui impose d'opposer à **T**, l'**action**, une **réaction** qui sera égale à **-T**.

3ème cas : le train démarre et accélère :



La résistance au roulement, **R**, n'est pas encore suffisante pour s'opposer à **T** (entre autre parce que le frottement de l'air n'est pas suffisant à basse vitesse) . Elle est aidée dans sa tâche "de justesse sur le plan mécanique" par une force de réaction **I**, appelée **force d'inertie**, due à la **variation de vitesse** . Tout se passe comme si le train opposait une résistance à la variation de vitesse.

Dans les cas 1 et 2; on dit que le train est en **état d'équilibre**, même s'il est en mouvement en 2, parce qu'il n'y a **pas variation de la vitesse** .

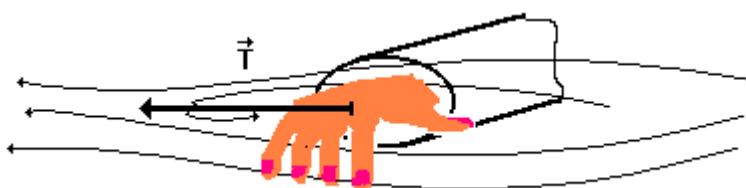
On peut aussi dire que l'état d'équilibre est lié à l'**absence de force d'inertie** .

LES FORCES AERODYNAMIQUES

LA TRAINEE : force parallèle et opposée à l'écoulement

Lorsqu'on met en mouvement un corps dans l'air, on s'aperçoit qu'il est nécessaire de faire un effort, non seulement lors de son accélération, mais aussi ensuite pour maintenir sa vitesse. L'air a tendance à freiner le corps pour le ramener à vitesse nulle. De la même manière, si j'étends un drap par jour de grand vent, je suis obligé de le retenir pour éviter de le voir "partir avec le vent". En fait, à différences de vitesses équivalentes, j'obtiendrais le même résultat en faisant circuler un corps dans l'air qu'en faisant circuler de l'air autour de ce corps. J'ai besoin d'une **action** pour maintenir cette différence de vitesse, cette action étant opposée à la **réaction des forces aérodynamiques**. Celles-ci naissent de l'**air** et du **mouvement**, d'où leur nom : **AERO...DYNAMIQUE**.

Amusons-nous à expérimenter les forces aérodynamiques de façon très simple :



En voiture, je passe le bras par la fenêtre et je place ma main à l'horizontale dans le filet d'air, dans le *vent relatif* : ma main est tirée vers l'arrière, je suis obligé de coincer le coude ou d'exercer un effort pour la maintenir. Elle subit une résistance au passage de l'air qu'on appelle la **traînée**. En variant un peu l'expérience, je constate que :

1°/ Si je vais plus vite, je sens que la **traînée** augmente beaucoup. Si je vais moins vite, je sens qu'elle diminue beaucoup.

La traînée est proportionnelle à la valeur au carré de la vitesse.

2°/ Si je place ma main à la verticale, la traînée augmente.

La traînée est proportionnelle à la surface exposée au vent. On appelle cette surface le **maître-couple**.

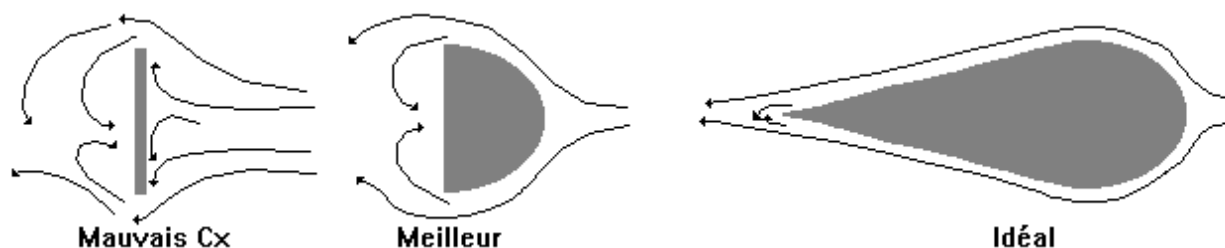
3°/ Si je fais mon expérience en bateau, en laissant ma main dans l'eau, pour une même vitesse la traînée sera beaucoup plus importante. C'est parce que l'eau est beaucoup plus lourde que l'air pour un même volume (1000 kg par m³ au lieu de 1,225 kg/m³ pour l'air au niveau de la mer).

La traînée est proportionnelle à la masse volumique du fluide traversé.

4°/ Enfin (ça marche, faites l'expérience !), si je ferme mon poing, la traînée est moins importante que main à l'horizontale, alors que le maître-couple est plus important et les autres facteurs constants. Je viens de *profiler* ma main, c'est-à-dire de lui donner une forme plus adaptée à la pénétration dans l'air.

La traînée est proportionnelle à un coefficient de profil de l'obstacle. (coefficient de traînée)

Lorsqu'on veut *profiler* un corps, il faut travailler sa face avant de manière à adoucir la pénétration dans l'air, et sa face arrière de manière à "recoller" proprement les filets d'air, sans perte d'énergie par turbulence. Les valeurs de *coefficient de traînée*, le fameux **C_x**, varient à peu près de la façon suivante :



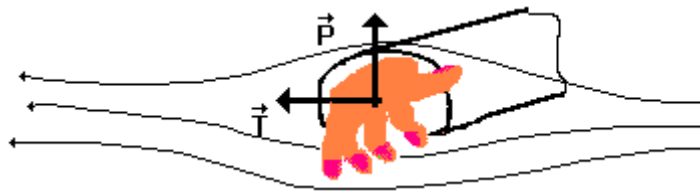
Pour ceux qui veulent s'amuser à la calculer (encore faudrait-il connaître le coefficient de traînée pour la forme choisie de la main), voici l'équation de la traînée aérodynamique :

$$T = C_x \times 1/2 \rho V^2 \times S$$

Avec : **T** : valeur de la traînée en N (Newtons)
C_x : coefficient de traînée -sans échelle-
ρ : masse volumique du fluide en kg/m³
V : vitesse relative en m/s
S : maître-couple en m²

LA PORTANCE : force perpendiculaire à l'écoulement

Si, maintenant, j'incline ma main dans le filet d'air sans la mettre ni verticale ni horizontale :



Une **autre force** apparaît en plus de la *traînée*, perpendiculaire à la direction du déplacement et qui a tendance à faire monter ma main : c'est la **portance**. Elle entraîne ma main vers le haut si sa position correspond à celle du schéma; si j'incline ma main dans l'autre sens, elle sera entraînée vers le bas.

On appelle l'angle que fait ma main avec l'écoulement l'**incidence**. Celle-ci sera comptée positivement si l'avant de ma main (côté pouce) est incliné vers le haut, négativement dans le sens contraire. Pour le schéma, j'ai choisi une incidence positive. On peut donc en conclure que :

- Une incidence positive amène une "portance vers le haut", soit une **portance** (tout simplement),
- Une incidence négative amène une "portance vers le bas", soit une **déportance**.

De plus, si je réédite les expérimentations faites au sujet de la traînée, je constate que la portance suit les mêmes lois de variation, c'est-à-dire :

1°/ La portance est proportionnelle à la valeur au carré de la vitesse.

2°/ La portance est proportionnelle à la surface. Cependant, cette proportionnalité n'intervient pas par rapport au maître-couple, mais plutôt par rapport à la surface de ma main inclinée projetée à l'horizontale.

3°/ La portance est proportionnelle à la masse volumique du fluide traversé.

4°/ La portance est proportionnelle à un coefficient de profil de l'obstacle. Mais là ce n'est pas le même coefficient que pour la traînée. Il s'agit du coefficient de portance. Pour chaque *profil* et pour chaque *incidence*, il va falloir calculer :

- Un **coefficient de traînée** : le C_x ,
- Un **coefficient de portance** : le C_z .

Pour nos lecteurs férus de mathématiques, voici en prime la formule fondamentale de la portance :

$$P = C_z \times 1/2 \rho V^2 \times S$$

Avec : **P** : valeur de la portance en N (Newtons)
C_z : coefficient de portance -sans échelle-
ρ : masse volumique du fluide en kg/m³
V : vitesse relative en m/s
S : surface projetée à l'horizontale en m²

Tout à l'heure, main parallèle à l'écoulement (donc incidence nulle) et main perpendiculaire à l'écoulement (angle d'incidence 90°) j'avais un **C_z = 0**, d'où l'absence de portance.

Mais d'où vient-elle, cette portance ?

Lorsque j'ai incliné ma main, j'ai amené les particules d'air qui frappent ma paume à se "tasser" en ralentissant leur course. La **pression statique** de l'air est augmentée sous ma paume.

Les particules qui contournent le dos de ma main, au contraire, ont vu leur parcours se rallonger et sont obligées "d'accélérer" en s'écartant l'une de l'autre. La **pression statique** est diminuée de ce côté :



C'est l'expérimentation du **théorème de Bernoulli** : la somme de la pression statique et de la pression cinétique (ou dynamique) due à la vitesse est une constante.. Ceci veut dire que si je **ralentis** le flux d'air, sa **pression statique augmente**, si je l'**accélère**, elle **diminue**.

$\text{Pression Totale} = \text{Pression statique} + \text{Pression dynamique} = \text{constante}$
--

J'ai transformé ma main en **aile**, en faisant apparaître une **surpression d'intrados** et une **dépression d'extrados**, qui agissent dans le même sens toutes deux : ici, vers le haut et vers l'arrière. Je peux les rassembler en :

- une **traînée**, de direction parallèle à la trajectoire
- et une **portance**, de direction perpendiculaire à la trajectoire.

LE SPECTRE AERODYNAMIQUE

Maintenant que nous avons découvert la traînée et la portance, et leur importance sur le plan aérodynamique, il est temps de révéler la vérité première : plus une aile placée dans un flux d'air produit de la portance et moins elle produit de traînée, plus elle mérite son titre d'aile !

Notre main est assez loin de l'aile idéale, car elle *traîne* de différentes manières, toutes préjudiciables à son bon rendement aérodynamique, à son rapport **portance/traînée**, qui s'appelle la **finesse** . En prenant l'exemple de la main, on peut observer les différents types de traînées :

TRAINEE DE FORME : Le profil de ma main, avec ses quatre doigts gras et boudinés, ne facilite pas tellement l'écoulement de l'air. Les filets sont obligés de contourner, non seulement la forme générale de ma main avec son incidence, mais aussi plus en détail le contour de chaque doigt. Je pourrais essayer d'améliorer ce paramètre en plaçant un bout de tissu autour pour affiner les contours.

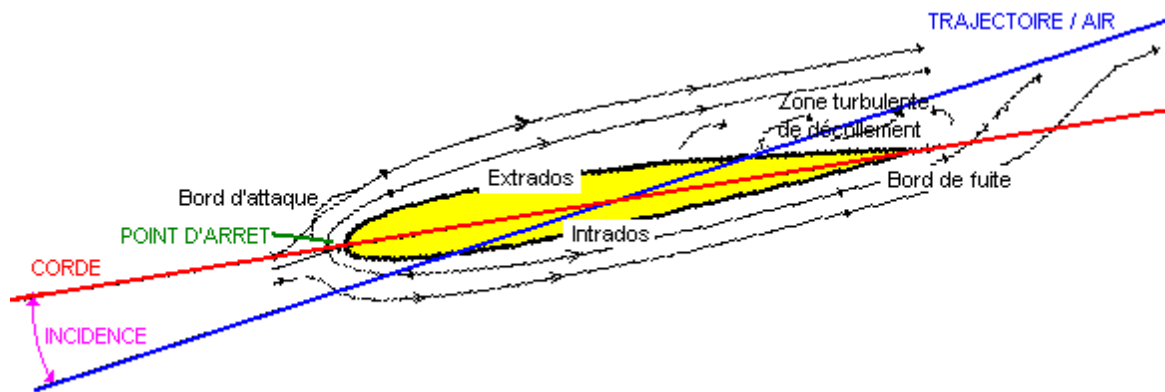
TRAINEE DE FROTTEMENT : Elle dépend de la viscosité de l'air et de la qualité de la surface.

TRAINEE INDUITE : C'est la plus compliquée à décrire. Elle est *induite*, c'est-à-dire provoquée, par le phénomène même de la portance : ayant une dépression d'extrados et une surpression d'intrados, à l'extrémité de mes doigts, l'air ne demande qu'à passer par le chemin le plus court, qui est le côté de la main. Je réduirai légèrement cette forme de traînée en ayant des doigts de pianiste, plus longs, ce qui donnerait à ma main un profil plus *allongé*.

Analysons ce qui se passe autour d'un profil. Pour simplifier le modèle, nous représenterons ce profil **fermé**. La **pression dynamique** permet de gonfler l'intérieur de la voile et de lui donner sa forme d'aile.

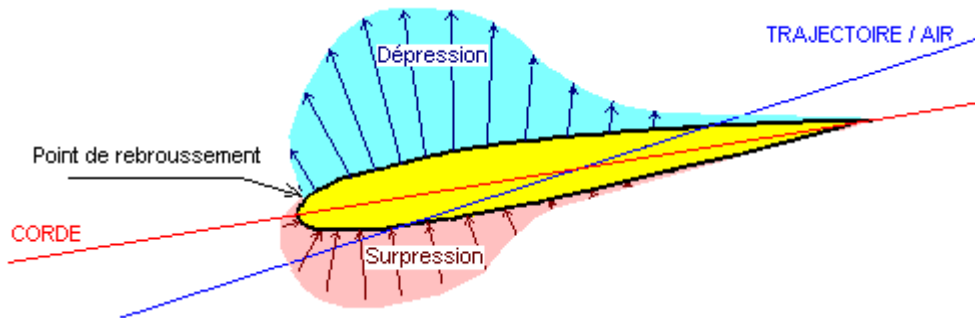
Spectre de l'écoulement :

Le *spectre* est une représentation de ce qui nous est invisible normalement, ici il s'agit de l'écoulement de l'air autour du profil.



Spectre des pressions

Etudions maintenant la répartition des pressions qui résultent de l'écoulement, en les représentant par de petites flèches qui partent du profil, en *dépression*, ou qui y arrivent, en *surpression* (par rapport à la pression statique de la masse d'air) :



On constate que :

- La pression est maximale aux alentours du *point d'arrêt*. Ceci est simplement la confirmation du théorème de Bernoulli :

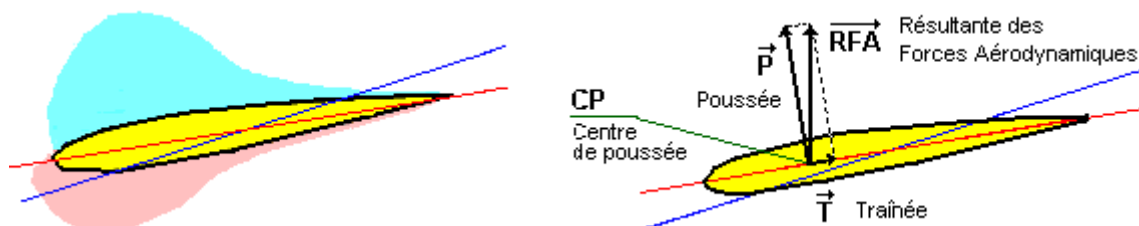
$$\text{Pression totale} = \text{Pression statique} + \text{Pression dynamique} = \text{constante}$$

- Attention cependant : si on change l'incidence, on constate une *migration* du point d'arrêt : vers le bas si l'incidence augmente, vers le haut si elle diminue. De même, la localisation du point de rebroussement change.
- Les valeurs de **dépression d'extrados** sont supérieures à celles de **surpression d'intrados** aux incidences normales : on considère que la portance est généralement due pour 3/4 à la dépression d'extrados. Ce fait participe lui aussi au maintien du gonflage de la voile, en "tirant sur l'extrados".
- L'aile est principalement "portée" par son tiers avant.

LA RESULTANTE DES FORCES AERODYNAMIQUES

Le *spectre des pressions* que nous avons illustré au paragraphe précédent correspond à la réalité, et permet de bien comprendre "comment ça porte", mais il est assez malaisé de l'utiliser en permanence dans la description mathématique des forces aérodynamiques. Le mécanicien (au sens "physicien spécialisé dans l'étude de la mécanique"), pour simplifier et manipuler les forces aérodynamiques à son aise, va les résumer en nos deux forces maintenant bien connues, la **portance** et la **traînée**, et va considérer que celles-ci s'appliquent au point où s'établit leur moyenne : le **centre de poussée**.

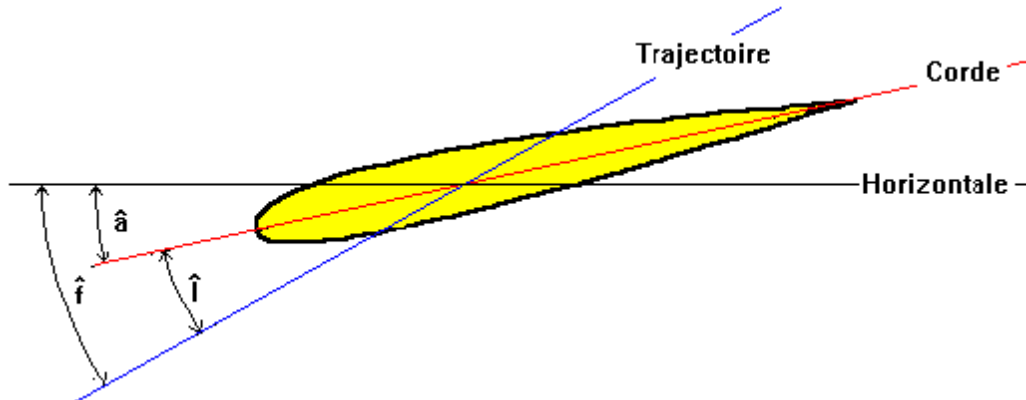
Comme elle s'appliquent toutes deux au même endroit, on peut également les additionner vectoriellement, pour obtenir la **Résultante des Forces Aérodynamiques**, la **R.F.A.** :



La **R.F.A.** est égale à l'**addition vectorielle de la portance et de la traînée** en vol *stabilisé*. Elle est d'*intensité égale* et de *sens opposé* au **poids**.

LES ANGLES CARACTERISTIQUES

En plus du nom de ces différentes forces, il vous faudra connaître (ce n'est pas uniquement pour vous embêter, c'est aussi pour parler le même langage) le nom des différents angles que peut prendre le profil.



Remarque : les valeurs d'angles sont volontairement exagérées pour une meilleure compréhension du schéma

- $\hat{\alpha}$** angle d'**assiette** du profil, entre la **corde** et l'**horizontale**, souvent appelé angle de calage (à tort !)
- $\hat{i}$** angle d'**incidence** du profil, entre la **corde** et la **trajectoire**. ATTENTION : l'angle d'incidence dépend du régime de vol.
- f** angle de **plané** du profil, entre l'**horizontale** et la **trajectoire**.

LA PLAGE D'INCIDENCES

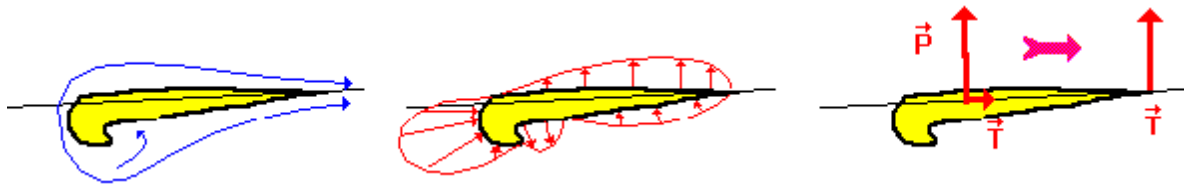
La plage d'incidences, c'est l'ensemble des incidences, d'une limite à l'autre, que peut prendre un parapente en vol équilibré. La limite basse (incidence la plus faible) correspond à la fermeture avant, mais le réglage d'assiette (ou **calage de la voile**) d'origine ne permet pas de l'atteindre normalement en vol calme. La limite haute d'incidence correspond au décrochage, qu'il est possible d'atteindre sous la plupart des voiles en vol calme, en enfonçant complètement les commandes.

Bien entendu, ces deux limites ne sont pas les seuls points intéressants du domaine de vol (on cherche même à les éviter...). Nous allons balayer la plage d'incidences et indiquer pour chaque cas caractéristique : la valeur de l'angle d'incidence, la position des commandes ou les conditions permettant d'obtenir cet angle et le régime de vol correspondant. De plus nous verrons les schémas de l'écoulement aérodynamique, des pressions et des forces. Dans les schémas suivants, vous noterez que l'horizontale est celle de la feuille.

Incidence nulle ou trop faible :

angle $\hat{i} \leq 0$ Accélérateur et/ou aérologie FERMETURE FRONTALE

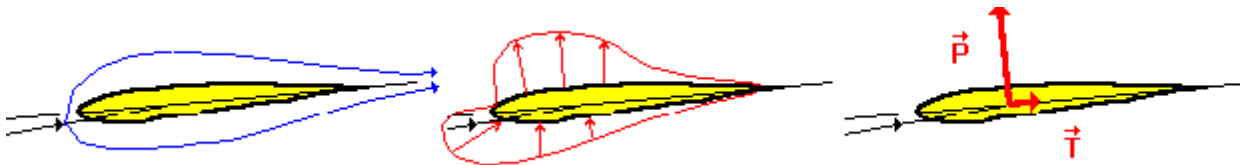
Comme nous l'avons expliqué plus haut, la fermeture ne se produit que par effet dû à l'aérodynamie, et non par rapport à une position de commandes en vol équilibré. On passe rapidement d'une situation correspondant au vol à vitesse maxi, à une situation où la coordination entre **couple piqueur** (visible sur le spectre des pressions) et position du point d'arrêt en dehors de l'alimentation des caissons fait que l'aile bascule sur l'avant en se dégonflant. On rattrape ceci en redonnant de l'incidence à la commande.



Incidence faible :

angle $\hat{i} \sim 4^\circ$ 0% commande VITESSE MAXI

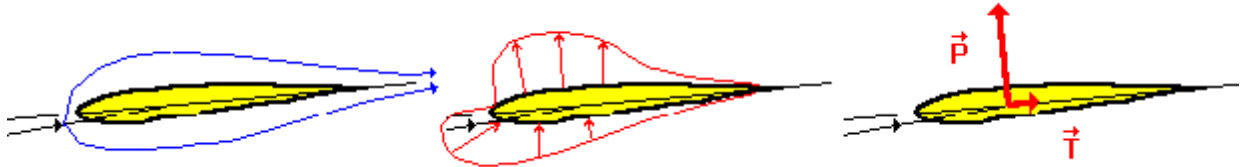
Le profil n'est pas déformé, la voile produit une traînée assez importante due à la vitesse, la pression au bord d'attaque est maximale. Le profil ne produit que peu de turbulence.



Incidence normale :

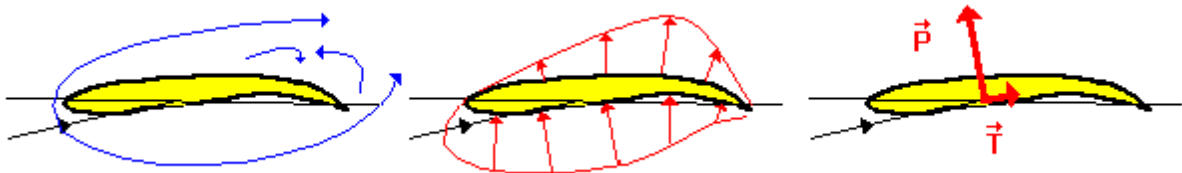
angle $\hat{i} \sim 8^\circ$ à 12° 10 à 30% commande FINESSE MAXI

Le profil est très légèrement déformé. La portance est maximale et donc la traînée minimale. La turbulence est faible.

**Incidence forte :**

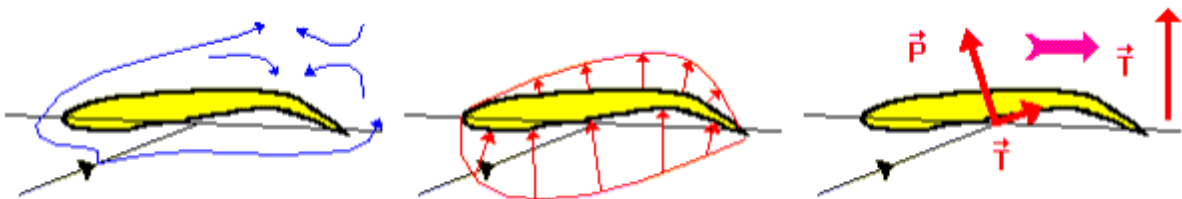
angle $\hat{i} \sim 15^\circ$ 30 à 60% commande TAUX DE CHUTE MINI

Le profil est déformé. La traînée devient importante, mais comparable à celle de la vitesse maxi, car sa production est limitée par la vitesse sur trajectoire plus lente. La turbulence derrière l'aile est importante.

**Incidence trop forte :**

angle $\hat{i} \geq 20^\circ$ à 25° 100% commande DECROCHAGE

Les filets d'air n'arrivent plus à suivre l'extrados de l'aile : ils **décrochent**. Comme pour la fermeture, on passe rapidement à une situation où n'existe plus que la traînée, la trajectoire devient progressivement verticale. La situation se récupère en relâchant les commandes et en se préparant à amortir l'abattée qui est inévitable.



LES FIGURES FONDAMENTALES

Parmi les différentes configurations de vol possibles, nous allons étudier plus précisément deux d'entre elles, car les autres font intervenir les forces d'inertie et n'ont donc lieu qu'en régime transitoire, durant un laps de temps court et avec d'innombrables possibilités de variantes. Ces deux situations sont :

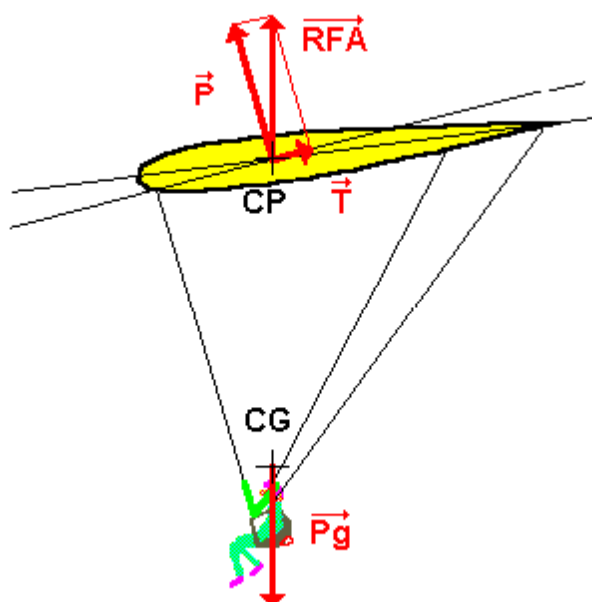
Le vol droit équilibré :

Dans cette situation, l'aile vole en ligne droite, sans modification de la position des commandes, en air calme. Il n'y a donc pas de variation de vitesse, ce qui nous autorise sur le plan mécanique à parler d'**équilibre**.

L'**action**, qui fait avancer l'aile dans la masse d'air (ou le *moteur* de son déplacement) est constitué par le **poids total** du pilote, de sa voile, de l'air contenu dedans et de tout l'équipement, qui est entraînée par **gravité** vers l'altitude plus basse. L'ensemble tend à se rapprocher du centre de gravité de la terre (et non directement vers le sol : il n'existe pas d'attraction vers une falaise par gravité...).

La **réaction** nécessaire à l'**équilibre des forces** provient des forces aérodynamiques sur l'ensemble aile + pilote.

On peut schématiser l'ensemble en reportant le **poids** au **centre de gravité** de l'ensemble, et la **Résultante des Forces Aérodynamiques** au **centre de poussée** de la voile.



P : Portance

T : Traînée de l'ensemble volant

**RFA : Résultante des Forces
Aérodynamiques**

Pg : Poids de l'ensemble volant
Pilote équipé + aile
+ air contenu dans l'aile

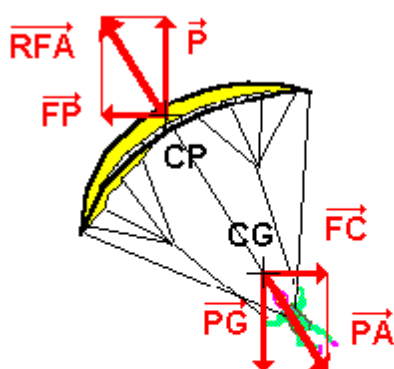
CP : Centre de Poussée

CG : Centre de Gravité
environ la tête du pilote

Notez que la finesse est égale à $\frac{P}{T}$

Le virage stabilisé :

Après avoir déclenché un virage, le pilote le *cadence* en maintenant une même position de commandes, sans chercher à incliner plus ni à revenir en vol droit :



$\vec{P}$: Partie "utile" de la portance, verticale
 $\vec{F}_P$: Force centripète due à l'effet latéral de la portance
 $\vec{P}_G$: Poids dû à la Gravité
 $\vec{F}_C$: Force Centrifuge, due au virage
 $\vec{P}_A$: Poids Apparent (bien réel pour les suspentes et la voile...)

$$\vec{RFA} = \vec{P}_A > \vec{P}_G \quad \text{Donc plus de vitesse sur trajectoire}$$

La **force centripète** est d'origine **aérodynamique** (c'est une composante de la portance), elle fait glisser l'aile vers l'intérieur du virage .

La **force centrifuge** est une force d'**inertie** (on ne peut donc pas parler de virage **équilibré**), d'origine mécanique, elle tend à projeter le pilote en ligne droite, vers l'extérieur du virage donc .

Plus le rayon de virage est court, donc l'aile inclinée, donc FP importante, donc PA importante : songez-y pour ménager vos suspentes fines !

LA POLAIRE DES VITESSES

Expliquer pourquoi une aile vole, ce qu'est le décrochage, pourquoi une aile est toujours inclinée en virage, etc... tout ça est très instructif, mais moi ce qui m'intéresse surtout c'est de savoir si je vais pouvoir "tenir" avec telle ascendance dynamique faible, comment faire pour minimiser ma perte d'altitude en traversant une descendance vent de face, ou encore quel point d'atterrissage éloigné je peux atteindre.

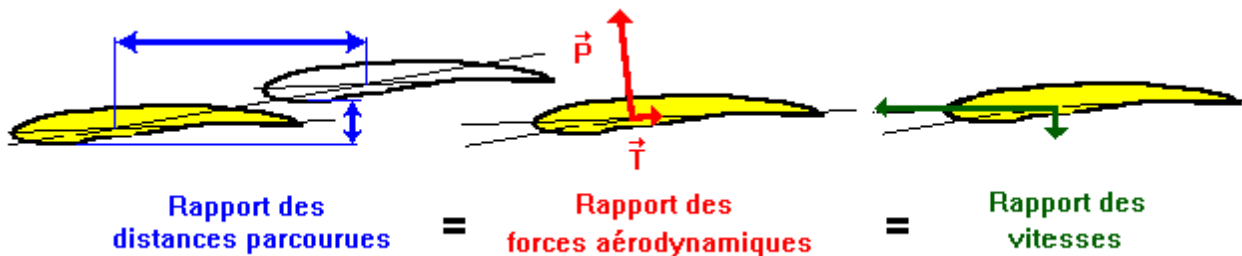
En bref, la discipline de la mécanique de vol qui intéresse au premier chef la plupart des pilotes est, non l'étude des forces, de la dynamique, mais celle des vitesses horizontales (vitesse de pénétration) et verticales (taux de chute) de leur aéronef, c'est la cinématique du vol. La finesse (c'est-à-dire la distance horizontale parcourue par rapport à la perte d'altitude dans la masse d'air) permet également d'alimenter les conversations de comptoir en superlatifs à propos de la voile que l'on a ou dont on rêve.

La réponse aux questions ci-dessus passe par l'étude chiffrée (c'est-à-dire sérieuse) des performances d'une voile et par la définition de sa **polaire des vitesses**.

Comment est définie cette courbe ? Elle n'est pas calculée, mais **mesurée** lors de vols d'essais pour chaque voile. Le pilote parcourt tous les régimes de vol de la voile, bras hauts jusqu'au décrochage, en laissant la vitesse se stabiliser à chaque fois, et mesure à chaque régime de vol les données qui lui permettent d'établir la **finesse/air** à ce régime. Il est bien entendu que tout ceci doit impérativement se dérouler en air calme, sans vent et sans ascendance.

Pour calculer la **finesse/air**, on dispose des relations suivantes :

$$F = \frac{\text{distance horizontale parcourue}}{\text{altitude perdue}} = \frac{\text{PORTANCE}}{\text{TRAINEE}} = \frac{\text{vitesse horizontale}}{\text{taux de chute}}$$



On utilisera les données les plus commodes à mesurer en vol et les plus précises : les **vitesses**.

Il faudra de plus veiller à maintenir les commandes suffisamment longtemps dans la même position et voler en air calme pour être à chaque mesure en régime **stabilisé** et ne pas faire intervenir de **force d'inertie**. Il s'agit en effet d'obtenir la meilleure précision de mesure pour deux paramètres : le **taux de chute** et la **vitesse sur trajectoire** (Pythagore nous calculera la vitesse horizontale).

Taux de chute :

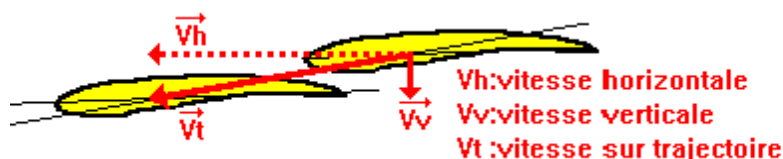
Il serait beaucoup trop imprécis de se fier aux indications d'un variomètre, qui est un instrument de pilotage mais n'a pas la fiabilité d'un instrument de mesure. On relèvera donc l'**altitude** au départ de la mesure, le **temps** de mesure et l'**altitude** à la fin de la mesure. Le **taux de chute** sera déduit en faisant le rapport **dénivelé / temps de mesure**.



TAUX DE CHUTE MOYEN = $\frac{A1 - A2}{t2 - t1}$
--

Vitesse horizontale :

L'anémomètre, lui, est suffisamment précis pour être utilisable en tant qu'instrument de mesure, à condition qu'il soit bien **étalonné** (par exemple par rapport à un chronomètre en voiture) et correctement orienté dans le lit du *vent relatif*. L'inconvénient est que, qu'il soit attaché à un élévateur devant le pilote ou suspendu à un système girouette sous le pilote (meilleure solution, à l'écart de la turbulence), il ne saura mesurer que la **vitesse sur trajectoire**. Heureusement, le compas (si on trace directement la courbe) ou **Pythagore** viendront à notre rescousse :



$V_t^2 = V_h^2 + V_v^2$ $\Rightarrow V_h = \sqrt{V_t^2 - V_v^2}$
--

Bien entendu, on ramènera les deux vitesses à la même échelle, en général en m/s. De plus, pour la représentation de la courbe, l'axe des taux de chute sera "à l'envers", vers le bas, de manière à visualiser directement la pente de descente et non une droite ascendante.

LA POLAIRE DES VITESSES : exemple de tracé

Pour illustrer ce chapitre, le mieux est d'utiliser un relevé effectué pour une voile réelle (source Vol Libre Magazine) et de représenter la polaire correspondante.

Pour cette voile "X", on obtient le relevé suivant (il s'agit d'une voile dont la conception date de 1990) :

- A 25 km/h, je perds 136m d'altitude en air calme en 90 secondes,
- A 33 km/h, je perds 169m en 90s (position bras hauts),
- A 21 km/h, je perds 147m en 90s (vitesse mini avant décrochage) .

1°/ Calcul des taux de chute :

- à 21 km/h : $147/90 = 1,63 \text{ m/s}$
- à 25 km/h : $136/90 = 1,51 \text{ m/s}$
- à 33 km/h : $169/90 = 1,88 \text{ m/s}$

2°/ Calcul des vitesses horizontales : ($3,6 \text{ km/h} = 1 \text{ m/s}$, donc) :

- $21/3,6 = 5,83 \text{ m/s} \Rightarrow V_h = \hat{U}(5,83^2 - 1,63^2) = 5,60 \text{ m/s} \quad (20,15 \text{ km/h})$
- $25/3,6 = 6,94 \text{ m/s} \Rightarrow V_h = \hat{U}(6,94^2 - 1,51^2) = 6,78 \text{ m/s} \quad (24,40 \text{ km/h})$
- $33/3,6 = 9,17 \text{ m/s} \Rightarrow V_h = \hat{U}(9,17^2 - 1,88^2) = 8,97 \text{ m/s} \quad (32,30 \text{ km/h})$

3°/ Calcul des finesses/air respectives :

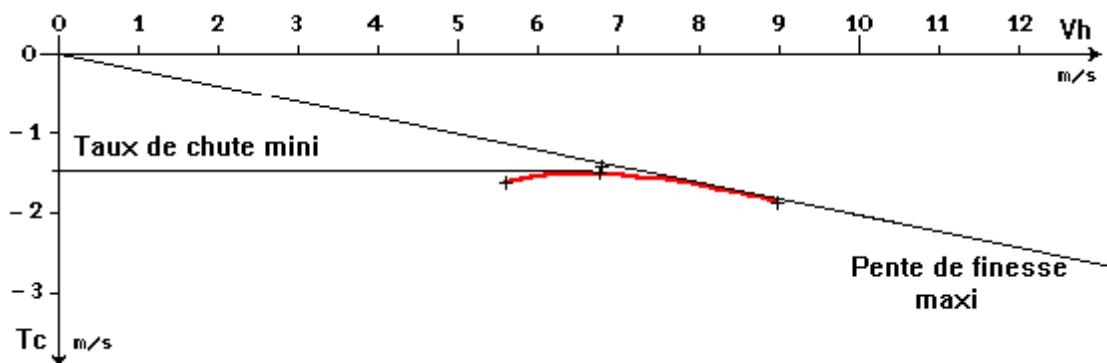
- à 21km/h sur trajectoire : $5,60/1,63 = 3,44$
- à 25km/h sur trajectoire : $6,78/1,51 = 4,49$
- à 33km/h sur trajectoire : $8,97/1,88 = 4,77$

Remarque : le constructeur annonçait dans sa documentation 40km/h et 6,2 de finesse maxi !

On observe que pour cette voile, la finesse/air maxi s'obtient à proximité de la vitesse maxi. Même si les valeurs propres de finesse ne sont pas très bonnes ici, ceci est une caractéristique commune à presque toutes les voiles actuelles.

4°/ Représentation :

Il ne nous reste plus qu'à tracer la courbe correspondante :



LA POLAIRE DES VITESSES : Exploitation

Connaître la polaire des vitesses de sa voile, c'est comme nous l'avons vu très intéressant pour optimiser l'usage en air calme. Mais la plupart du temps, ce qui est intéressant en vol, c'est de pouvoir optimiser non la finesse/air, mais la finesse/sol qui peut être très différente par conditions de vent ou de convection.

De plus, à moins de tracer soi-même la polaire correspondant à chaque situation de charge alaire sous sa propre voile, il est impératif de savoir comment elle varie en fonction de celle-ci.

Variation de poids :

On a vu précédemment que la R.F.A. est d'intensité égale et de sens opposée au poids total en vol. L'augmentation de celui-ci entraînera donc une augmentation de la R.F.A. : *portance* et *traînée* augmentent, toutes les deux dans la même proportion.

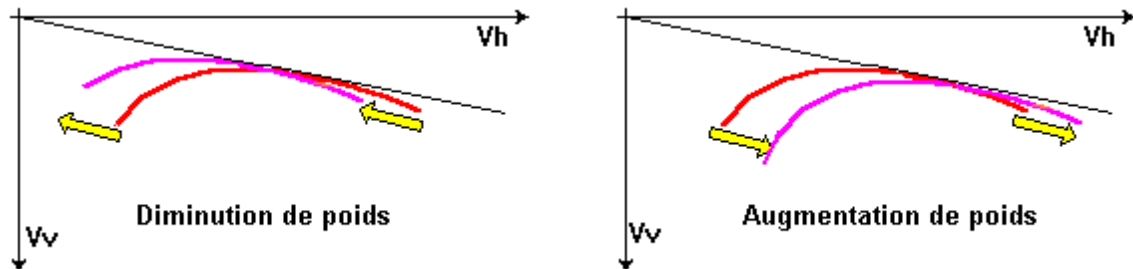
La vitesse horizontale et verticale augmentera donc de manière proportionnelle à la *racine carrée* de l'augmentation de poids (voir pourquoi en étudiant les formules de la portance et de la traînée). Leur rapport restant constant, la finesse/air ne change pas. Par contre, il est intéressant de noter les éléments suivants :

- **La vitesse maxi augmente si le poids augmente,**
- **Le taux de chute mini diminue si le poids diminue.**

Certains pilotes se servent d'ailleurs de ces caractéristiques pour se lester plus ou moins en fonction des conditions.

Quant à la polaire des vitesses/air, son allure générale ne change pas mais elle glisse le long de la pente de finesse maxi :

- vers le bas et la droite s'il y a augmentation de poids,
- vers le haut et la gauche s'il y a diminution de poids .



Variation de vent horizontal :

Lorsqu'on vole dans un vent horizontal, la finesse/sol diffère de la finesse/air de la manière suivante :

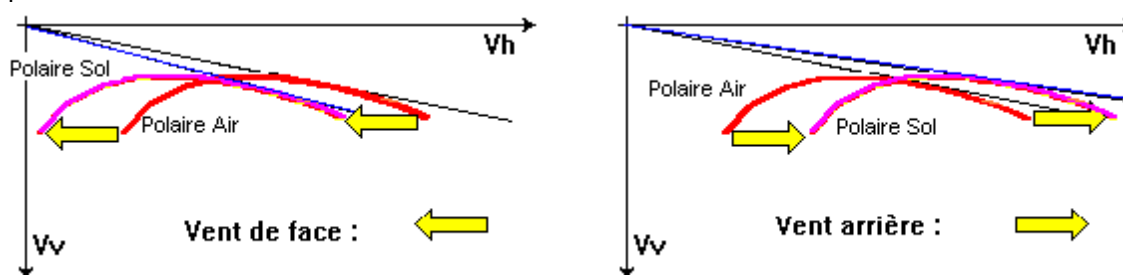
Par vent de face :

- La V_h de la polaire/sol est égale à la polaire/air diminuée de la valeur du vent.
- Les finessses/sol sont donc inférieures aux finessses/air.

Par vent arrière :

- La V_h de la polaire/sol est égale à la polaire/air augmentée de la valeur du vent.
- Les finessses/sol sont donc supérieures aux finessses/air.

Il est important de le savoir et de l'utiliser à bon escient si l'on veut réaliser une distance maxi !



De plus, il est intéressant de noter que les finessses/sol maxi ne s'obtiennent pas à la même vitesse/air.

Variation de vent vertical :

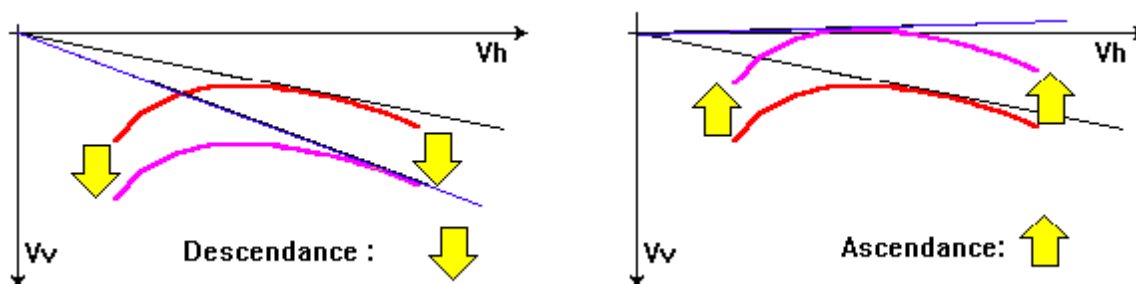
Lorsqu'on vole dans un vent vertical, la finesse/sol diffère de la finesse/air de la manière suivante :

En descentance :

- La V_v de la polaire/sol est égale à la polaire/air diminuée de la valeur du vent.
- Les finessses/sol sont donc inférieures aux finessses/air.

En ascendance :

- La V_v de la polaire/sol est égale à la polaire/air augmentée de la valeur du vent.
- Les finessses/sol sont donc supérieures aux finessses/air.



On constate que les ascendances et descentances ont une très grande importance pour la finesse/sol.

En résumé on peut noter les faits suivants :**Par vent de face ou en descentance :**

- La finesse/sol se dégrade, le meilleur résultat est obtenu en se rapprochant de la vitesse maxi.

Par vent arrière ou en ascendance :

- La finesse/sol s'améliore, le meilleur résultat est obtenu en se rapprochant du taux de chute mini.

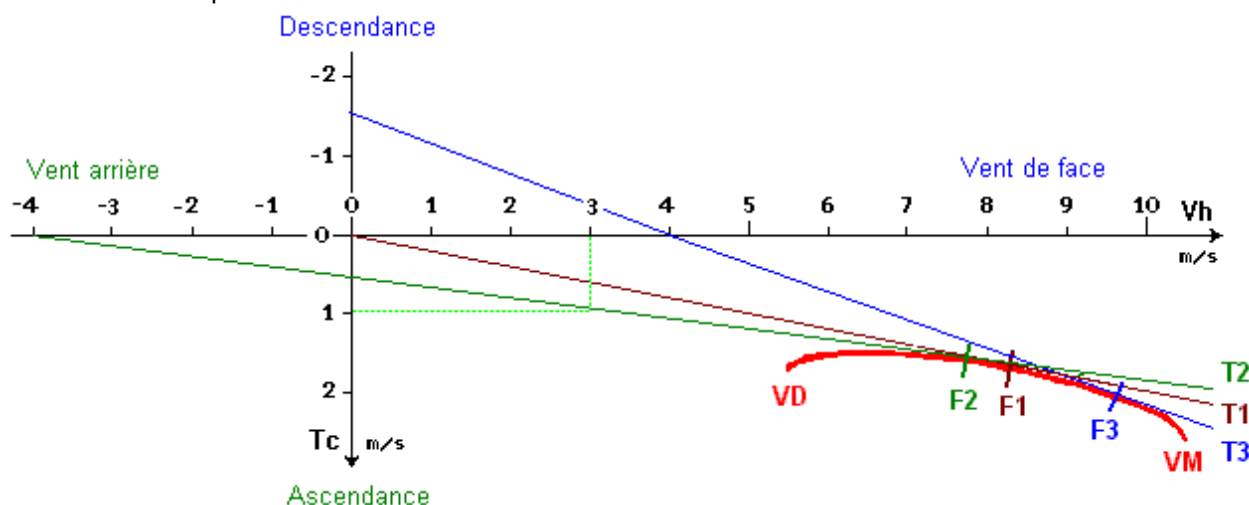
Détermination de la meilleure finesse sol :

Pour une aile donnée, dont on a tracé la polaire, il est possible de déterminer la meilleure finesse sol en traçant la tangente à la courbe à partir de l'origine. Cette ligne est la trajectoire. Le point de contact entre la polaire et la trajectoire détermine le régime de vol (vitesse) à adopter.

Tracé de la trajectoire

Dans des conditions aérologiques calmes, l'origine de la droite est au point 0. La finesse / sol est identique à la finesse / air. Pour tenir compte de la situation à étudier, il faut déplacer le point d'origine de la droite représentant la trajectoire :

- Vers la gauche pour un vent arrière
- Vers la droite pour un vent de face
- Vers le bas pour une ascendance
- Vers le haut pour une descendance.



**Régime de vol à adopter
pour obtenir la meilleure
finesse / sol**

- VD** : Vitesse de décrochage
- VM** : Bras hauts, vitesse maximum
- F1** : Finesse air
- F2** : Finesse / sol avec vent arrière de 4 m/s ou ascendance de 0,7 m/s
- F3** : Finesse / sol avec vent de face de 4 m/s ou descendance de 1,5 m/s
- T1** : Trajectoire air ou sol en aérologie calme
- T2** : Trajectoire sol avec vent arrière de 4 m/s
- T3** : Trajectoire sol avec vent de face de 4 m/s

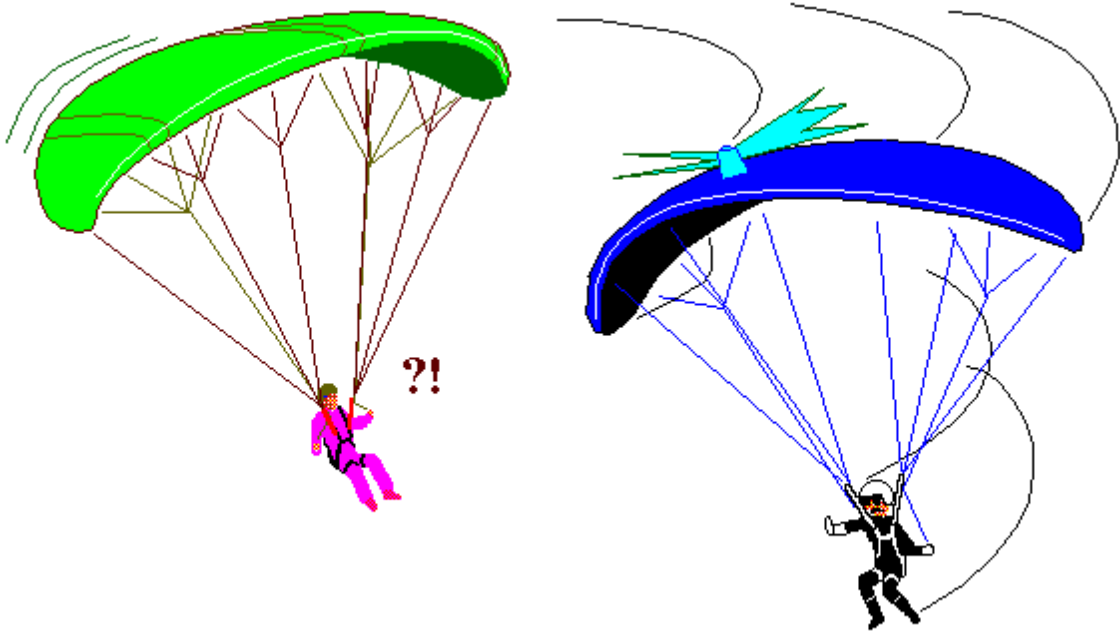
Une même trajectoire peut correspondre à plusieurs situations, par exemple la trajectoire T2 correspond :

- Soit à un vent arrière de 4 m/s (intersection avec l'axe des vitesses horizontales)
- Soit à une ascendance de 0,7 m/s (intersection avec l'axe des taux de chute)
- Soit à un vent de face de 3 m/s et une ascendance de 1 m/s

Pour s'échapper le plus vite possible des descendance en perdant le moins d'altitude possible, tracer la tangente à la polaire en partant de la valeur de la « dégueulante » sur l'axe des taux de chute.

Pour profiter au mieux des ascendance, il n'y a rien à tracer : il faut adopter le taux de chute minimum mais on se rapproche trop du décrochage, le bon compromis est entre le taux de chute minimum et la finesse / air maximum.

REGLEMENTATION



REGLEMENTATION AERONAUTIQUE

LES REGLES DE PRIORITE EN P.U.L.

Un P.U.L. est un Planeur Ultra Léger, défini par la réglementation aérienne comme un planeur (c'est-à-dire sans **aucune** motorisation) qui décolle et atterrit à l'aide de la force musculaire

De la même manière que sur la route, la fréquentation de plus en plus importante de l'espace aérien a amené la nécessité de définir des règles de priorités afin de gérer les situations de rencontre entre aéronefs. Cependant, comme l'évolution aérienne se fait dans un espace à trois dimensions, et de plus avec des appareils ayant des caractéristiques très différentes, celles-ci sont un peu plus complexes que sur la route.

Elles concernent :

La circulation générale :



- Les **avions motorisés** cèdent le passage aux **dirigeables**,
- les **dirigeables** cèdent le passage aux **planeurs**,
- les **planeurs** cèdent le passage aux **montgolfières** (ballons libres en général).

C'est une règle logique : on cède le passage au plus lent, au moins maniable et au plus fragile vis-à-vis de l'aérologie.

Attention toutefois : aucune règle de priorité n'existe entre les différents types de planeurs :

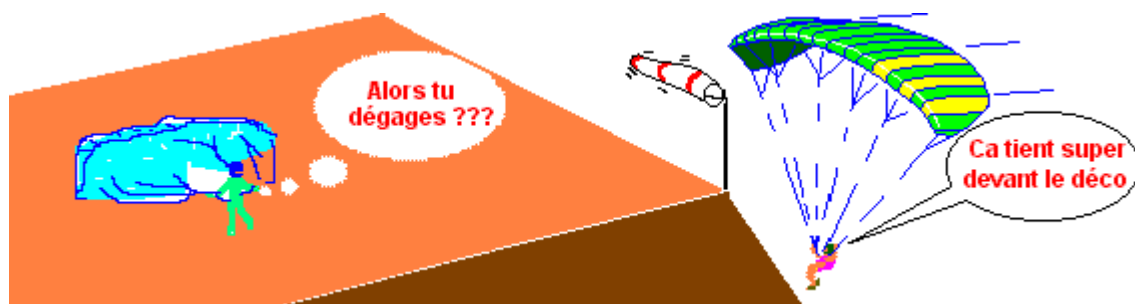
- ni entre planeurs et planeurs ultra légers,
- ni entre deltaplane et parapente,
- ni entre biplace et monoplace,
- ni entre pilote expérimenté et élève ...

La liberté est laissée aux pilotes eux-mêmes pour ne pas gêner les évolutions des confrères et donner la priorité suivant les règles dictées par le bon sens et la sécurité de tous...



Priorité entre sol et air :

L'aile **en vol** a la priorité sur celle qui est au sol, que ce soit au décollage ou à l'atterrissage. En effet, cette dernière est beaucoup plus *maniable* du fait qu'elle n'a pas à tenir compte des nécessités de maintenir une R.F.A. correcte...



Cependant ...

L'aile qui est **en train de décoller** a la priorité sur celle qui est en vol.

En approche d'atterrissage, l'aile qui est à l'altitude la plus basse a la priorité sur celle qui est plus haute. Attention toutefois aux différences de taux de chute entre matériels, de plus la plus basse devra dans la mesure du possible accélérer son atterrissage pour libérer au plus vite la zone d'approche (oreilles,...).

LES REGLES DE PRIORITE EN VOL

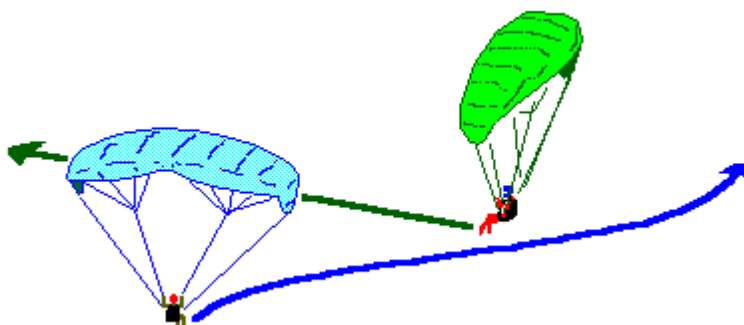
La première d'entre elles est générale et concerne toutes les situations de vol : **une distance raisonnable doit être maintenue avec les autres aéronefs**. Il est d'ailleurs particulièrement important d'en tenir compte lorsque l'on **suit** un autre aéronef, par exemple en décollant après lui, pour éviter *sa turbulence de sillage*.

Croisement :



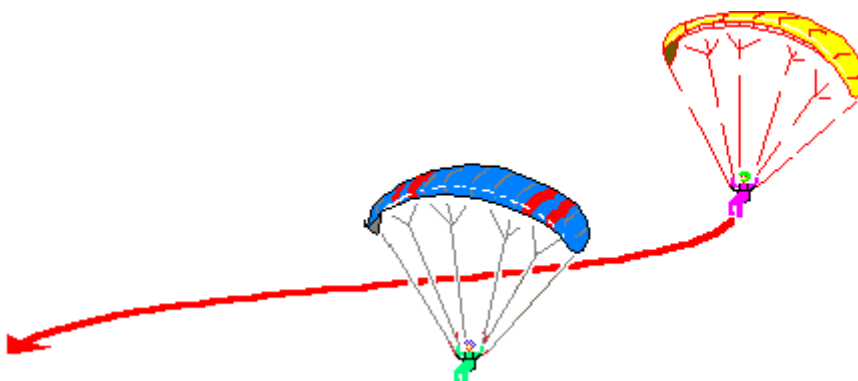
Chacun dévie sa trajectoire sur la droite.

Trajectoires convergentes :



Le parapentiste venant de droite a priorité.

Dépassement :



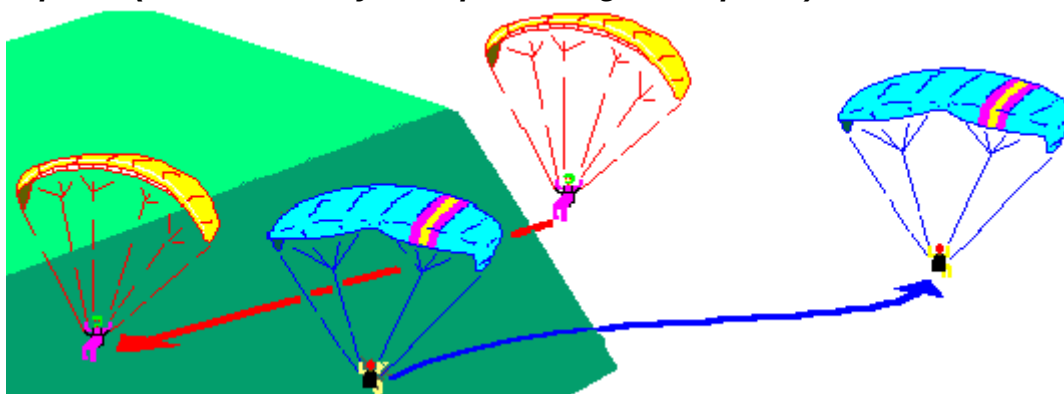
L'appareil **dépassé** a la priorité. L'autre doit le dépasser par la **droite**.

Ces règles de priorité sont applicables quel que soit l'aéronef. Si vous croisez un planeur en vol, vous constaterez qu'il suit (normalement...) exactement les mêmes règles que vous.

Bien entendu, dans certains cas, l'urgence ou la logique peuvent amener enfreindre ces règles dans l'intérêt commun des deux aéronefs. Prouvez dans ce cas qu'il y a un être pensant sous un parapente en montrant clairement vos intentions et ceci suffisamment tôt (pas de louvoiement ou de mouvements de tangage, mais une prise de cap franche !).

LES REGLES DE PRIORITE EN ASCENDANCE

En vol de pente (ascendance dynamique le long d'une pente) :



Lors d'un **croisement**, l'aile qui a la pente à sa droite est prioritaire. Seule l'autre dévie sa trajectoire, suffisamment tôt pour que sa turbulence de sillage ne constitue pas une gêne.

Le **dépassement** est proscrit en vol de pente à la même altitude : il faut faire demi-tour.

En exploitation thermique :



L'aile entrée en premier dans l'ascendance thermique détermine le sens de rotation qui devra être suivi par tous ceux arrivant ensuite, quelle que soit leur altitude par rapport à cette première aile.



Lorsque deux ailes évoluent à la même altitude dans une ascendance thermique, elles doivent se maintenir en vue, donc tourner en vis-à-vis, à 180° l'une de l'autre, en toute sécurité.

Conseils de bon sens...

Les lignes qui suivent ne sont pas inscrites dans la réglementation, mais elles ne peuvent qu'améliorer la bonne entente et la cohabitation des pratiquants de vol libre.

- Laissez passer les débutants
- Laissez passer les vols biplaces
- Essayez d'éviter les situations d'atterrissages simultanés en anticipant bien avant (oreilles, wing-overs si vous êtes le plus bas, attente en zone ascendante si vous êtes le plus haut).

LES REGLES DU VOL A VUE

Les règles du **vol à vue** (Visual Flight Rules en anglais) sont applicables à tous les aéronefs sans contrôle du vol au sol, donc évidemment aux P.U.L.s. Elles définissent le cadre légal à l'intérieur duquel peuvent être réalisés les vols de ce type. Elles tiennent compte :

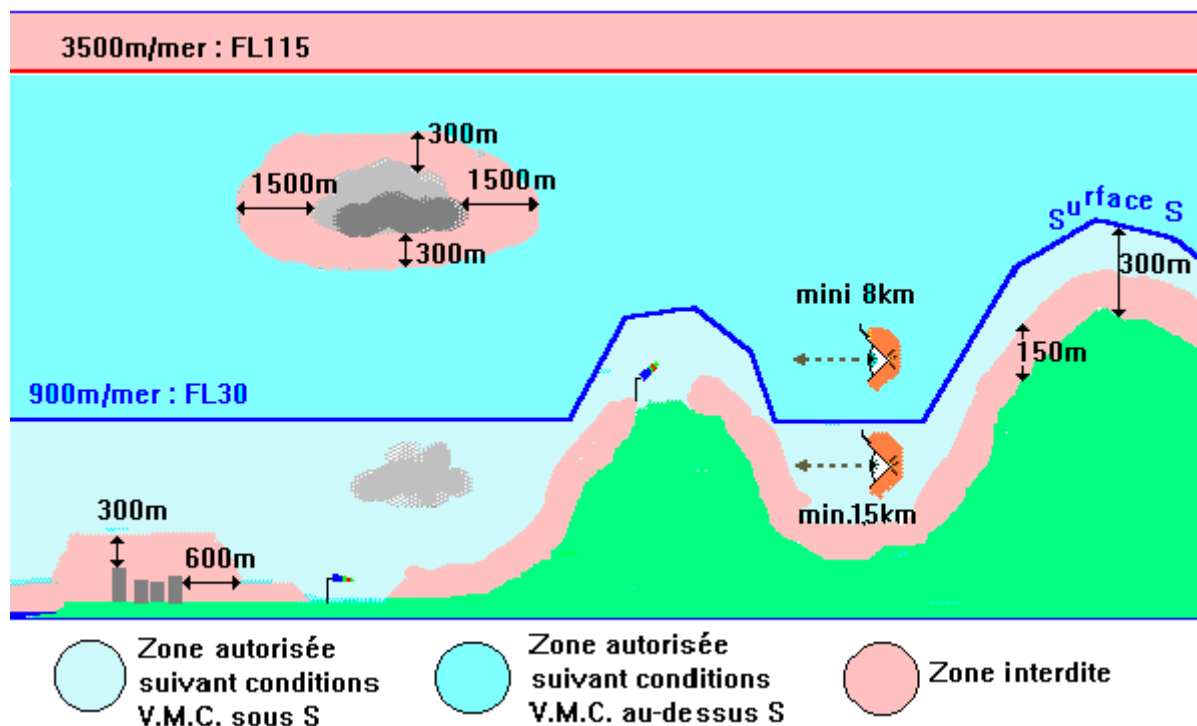
Des conditions de vol à vue (Visual Meteorological Conditions) :

1) Espace aérien non contrôlé :

- visibilité minimale de 1,5 km en dessous du FL30 ou 300m/sol (surface S),
- rester hors des nuages.
- visibilité minimale de 8 km au-dessus de la surface S, respecter une distance hors des nuages de 1500 m horizontalement et 300 m verticalement.

2) Espace aérien contrôlé :

- visibilité minimale de 5 km quelle que soit l'altitude, respecter une distance hors des nuages de 1500 m horizontalement et 300 m verticalement.
- De plus, en dehors des nécessités du décollage et de l'atterrissage, le survol doit s'effectuer à une distance minimale :
 - de 150 m horizontalement et verticalement pour des obstacles isolés,
 - de 300 m en vertical et 600 m en horizontal pour des rassemblements de personnes ou des zones urbanisées.



Du respect des zones aériennes :

Contrôlées : Elles sont classées en plusieurs catégories :

Classée A :	concerne l'espace aérien au-dessus du FL 195 (5600m) et les grands aéroports internationaux.	Interdite en V.F.R.
Classée B,C,D :	concerne l'espace aérien entre FL115 et FL195 et les zones de contrôle terminal (T.M.A.) des aéroports.	Interdite en V.F.R.
Classée E :	concerne les TMA d'aéroports de moindre importance.	Autorisée en V.F.R.
Classée G :	espace aérien non contrôlé	Autorisée en V.F.R.

A statut particulier :

Prohibited :	Interdites à tous aéronefs
Dangerous :	Dangereuses pour tous aéronefs, interdites aux heures d'activité
Restricted :	Réglémentées, interdites aux PULs sauf autorisation du district aéronautique

De plus, il est interdit par :

Le Ministère des Sports

- voler sans assurance Responsabilité Civile Aérienne
- voler en compétition sans Assurance Individuelle

Le Ministère de l'Intérieur

- décoller ou atterrir sans autorisation du propriétaire des terrains concernés (sauf urgence motivée)
- voler sans avis des maires des communes concernées

Le Ministère des Transports, par l'intermédiaire de la D.G.A.C.

- décoller après l'heure légale du coucher du soleil et
- d'atterrir plus de 30 mn après l'heure du coucher du soleil. (sauf autorisation préalable)

C'est tout, et déjà pas si mal puisque cela nous laisse une grande partie de l'espace aérien accessible...

REGLEMENTATION FEDERALE

LES BREVETS DE PARAPENTISTE

La Fédération Française de Parachutisme a défini des *paliers de progression*, plus couramment appelés *brevets*, dans une optique de :

- définition claire de l'état des connaissances et aptitudes des pratiquants (par exemple pour un pratiquant changeant de club ou d'école),
- clarification et preuve de la formation, ceci dans le but de faciliter la négociation des contrats d'assurances.

Ce n'est donc pas pour vous embêter et vous empêcher de voler tout seuls, mais dans le but d'obtenir une bonne couverture à un tarif raisonnable et d'assurer la sécurité pour toute la formation en école.

Chacun de ces brevets ou qualifications correspond à un **niveau minimal** et ouvre de nouvelles **prérogatives**, en étant couverts par l'assureur, dans le cadre du respect de toutes les réglementations fédérales, aéronautiques et civiles.

Parmi elles, seul le **Brevet d'Etat** permet de percevoir une **rénumération** pour des actes d'enseignement.

Brevet fédéral	Niveau requis	Prérogatives
A1	• aptitude aux grands vols sur site école agréée, sans assistance • maîtrise du décollage et de l'atterrissage	• aucune
A2	• niveau technique autorisant le changement de site de grand vol	• autorisation de pratiquer, dans le cadre d'une association affiliée avec présence de 2 moniteurs sur des sites autres que les sites école
B	Ce diplôme sanctionne : • des connaissances théoriques • une maîtrise technique permettant une autonomie totale	Brevet de pilote parapentiste : • aptitude à pratiquer, sous sa responsabilité, sur les sites de son choix. • aptitude aux techniques de loisir et de compétition
C	• Brevet B au minimum + appréciation du directeur technique	Majorité parapentiste : • aptitude aux vols spéciaux (nuit, sur plans d'eaux...) • aptitude aux vols de démonstration

Qualification	Niveau requis	Prérogatives
Moniteur Fédéral	• brevet B • avoir été déclaré « mis en formation » • stage technique national • examen national	• encadrement des séances école sous la responsabilité du Directeur Technique d'Ecole, dans le respect de la sécurité et de la réglementation. • peut être D.T.E. adjoint.
Pilote biplace	• Moniteur Fédéral ou déclaré mis en formation • proposé par un D.T.E. • preuves théoriques et pratiques	• permet de réaliser des vols pédagogiques non rémunérés, avec un passager, dans le respect de la sécurité et de la réglementation.

Brevet d'état	Niveau requis	Prérogatives
B.E.E.S Brevet d'Etat d'Educateur Sportif option parapente	• défini par le Ministère de la Jeunesse et des Sports	• les mêmes que le Moniteur Fédéral • percevoir une rémunération pour ses actes d'enseignement • peut être D.T. Ecole.

LE CLUB DE PARAPENTE

- C'est une Association Loi de 1901.
- Un adhérent au moins doit être titulaire du brevet B de parapentiste
 - Il assure le recrutement et délivre des licences, diffuse l'information fédérale,
 - La formation et la pratique des parapentistes non brevetés devra être assurée en école.

LE CLUB-ECOLE DE PARAPENTE

- C'est une Association Loi de 1901.
- Elle comporte un minimum de deux moniteurs (1 BEES et 1 Fédéral).
- Elle dispose de moyens matériels permettant de dispenser la formation en sécurité (voiles, casques, palettes, trousse de secours, radios...).
- Elle dispose, au moins, d'une pente-école et d'un site de grand vol.
- Elle a une responsabilité administrative vis-à-vis :
 - de la gestion des sites
 - des registres de vols
 - de la délivrance des licences
 - de la délivrance des brevets

LE DIRECTEUR TECHNIQUE D'ECOLE DE PARAPENTE

- Il est le gardien de la méthode prodiguée par la Fédération,
- Il est le responsable et le coordinateur technique de l'activité de ses sites école,
- Il délivre les carnets de progression,
- Il délivre les brevets,
- Il établit les demandes de mise en formation de Moniteurs Fédéraux et de Pilotes Tandem,
- Il renouvelle les qualifications de Moniteur Fédéral et de Pilote Tandem pour son école,
- Il établit la **Fiche d'Information Rapide** en cas d'accident ou d'incident,
- Il rédige les comptes-rendus d'activité,
- Il ouvre les livrets individuels de progression et atteste de la conformité des inscriptions qui y sont portées,
- Il est responsable du respect des règles de sécurité.

Conditions de nomination :

- Etre BEES/1 de parapente,
- Etre proposé par le Président de l'Association à la F.F.P.,
- Avoir un avis positif de la part du Directeur Technique National,
- Etre nommé par le Bureau Directeur de la F.F.P.

REGLEMENTATIONS DIVERSES

Le casque :

Il est obligatoire.

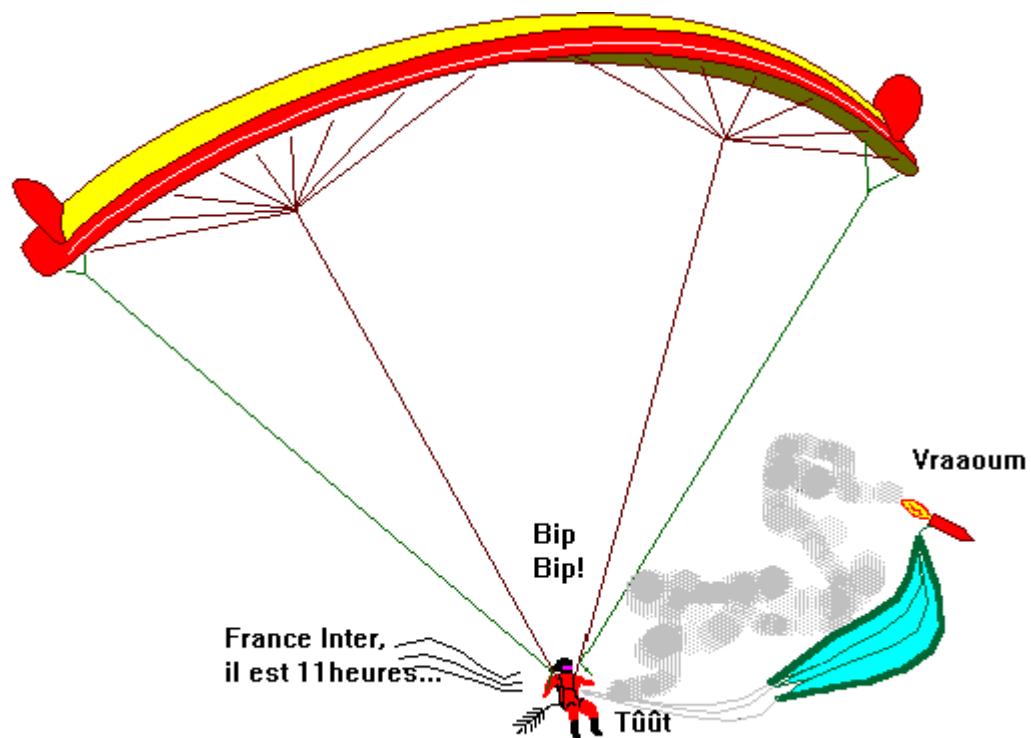
Les conditions d'accès à la pratique :

- avoir 12 ans révolus, 16 ans révolus pour l'obtention du brevet B.
- être en possession d'une autorisation parentale pour les mineurs
- être reconnu apte par un médecin agréé.
- être détenteur de la carte fédérale de l'année en cours (licence / assurance)

Prospection de sites :

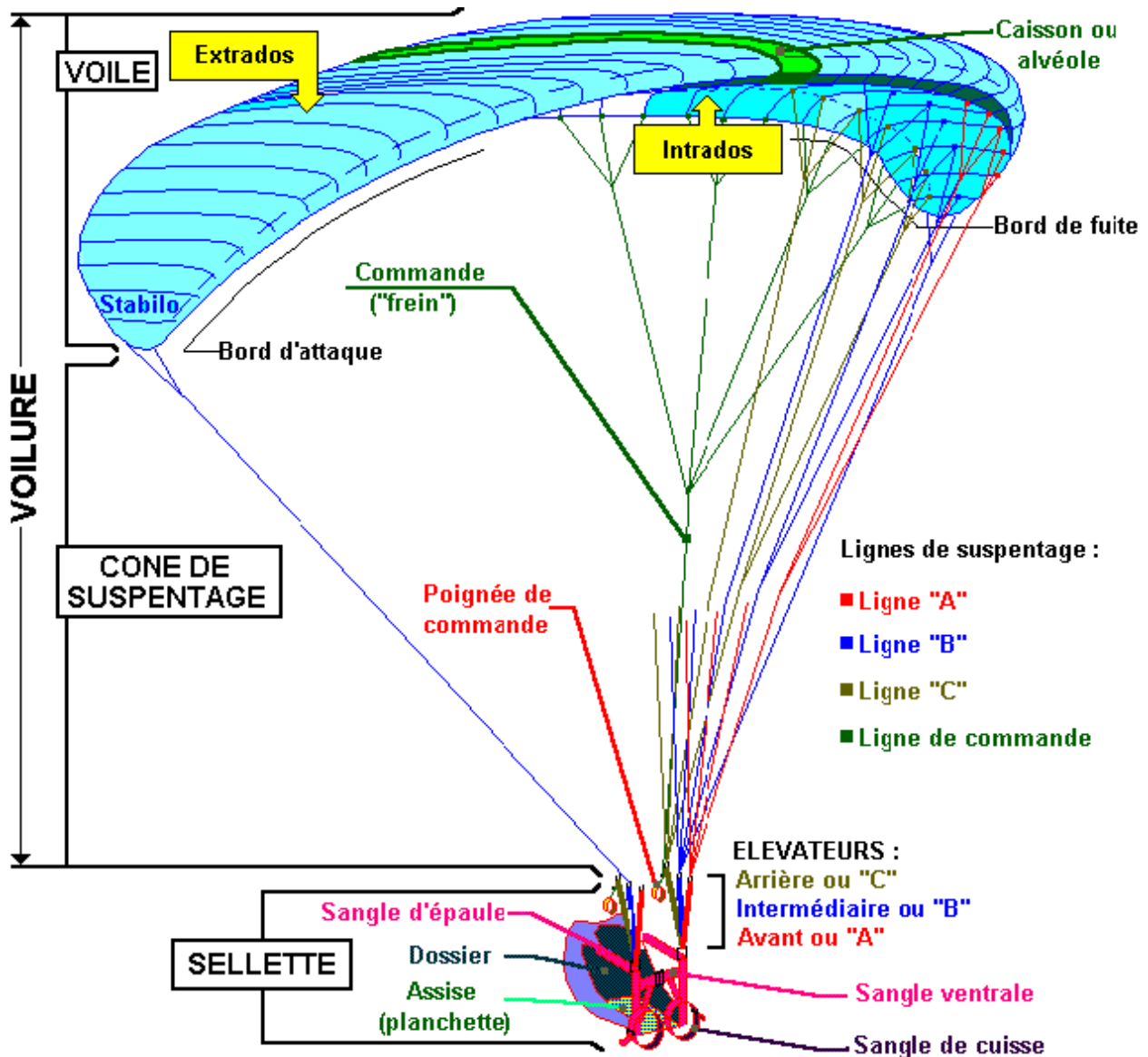
Seuls les moniteurs fédéraux ou BEES parapente pourront pratiquer la reconnaissance de sites pour les besoins des écoles.

MATERIEL



TERMINOLOGIE DU MATERIEL

La terminologie, c'est l'ensemble des termes techniques consacrés à la description d'un ensemble spécifique, ici la voile de parapente.



Quelques remarques à propos du matériel :

Suspentage :

- les élévateurs peuvent être au nombre de 2, 3 ou 4 par côté.
- les lignes de suspentage sont en général, hors commandes, au nombre de 4, 5 ou 6 : dans l'ordre avant vers arrière : A, B, C, D, etc.
- la plupart des voiles comprennent 3 niveaux de ramifications : haute, moyenne et basse en allant de la voile à la sellette.

Sellette :

- Différents types de sellettes peuvent équiper une voile. Une page spécifique y est consacrée plus loin.

Attaches :

- La liaison suspentes-élévateurs est assurée par des maillons rapides
- La liaison élévateurs-sellette est assurée par mousquetons rapides.

LES AXES DE MOUVEMENTS

On caractérise les mouvements de rotation d'un aéronef par la disposition de l'axe de rotation :

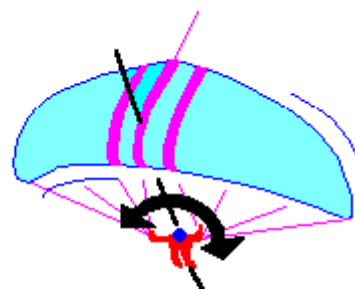
- La rotation autour d'un axe **horizontal avant-arrière** s'appelle le **roulis**.
- La rotation autour d'un axe **horizontal droite-gauche** s'appelle le **tangage**.
- La rotation autour d'un axe **vertical** s'appelle le **lacet**.



ROULIS



TANGAGE



LACET

Pour les mouvements de translation, c'est bien plus simple : horizontalement, on différencie la **pénétration**, vers l'avant, et le **dérapiage**, latéral (ce dernier ne peut intervenir que transitoirement sous un parapente) . La translation suivant un axe **vertical** s'appelle la **descente** (et jamais la montée dans la masse d'air, nous sommes en parapente !).

Enfin, on dit d'un mouvement **provoqué** qu'il est **induit**, et d'un mouvement **parasite** qu'il est **inverse**.

GEOMETRIE DE LA VOILE

La corde :

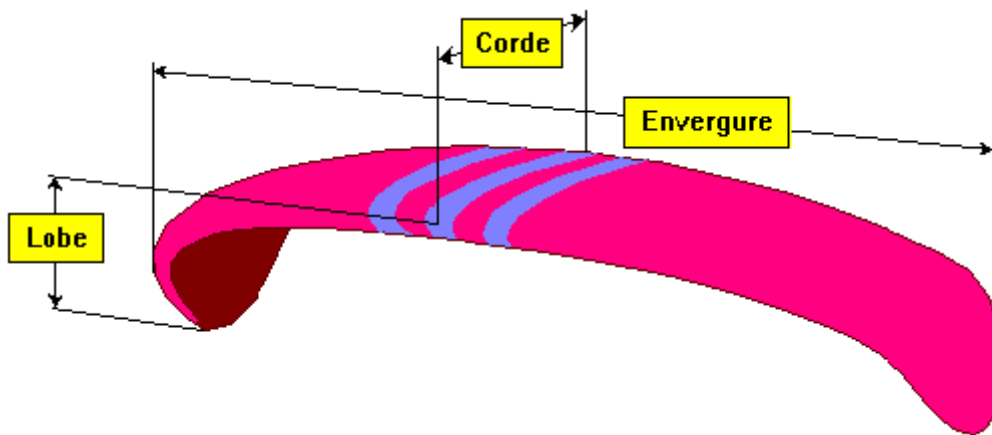
Distance entre le bord d'attaque et le bord de fuite, mesurée directement. La corde n'est pas constante sur toutes les nervures, entre le centre et les bouts d'aile. Aussi, on définit généralement pour une voile la **corde moyenne**, la **corde maxi** au centre de la voile, et la **corde mini**, sur la dernière nervure.

L'envergure :

Distance maximale entre les deux bouts d'aile ou plumes. Il y a en fait plusieurs façons de mesurer l'envergure : **à plat**, voile étalée sur le sol (on peut d'ailleurs de cette manière la mesurer soit à l'extrados, soit à l'intrados, soit à la corde du profil) ou **en projeté**, avec la voile gonflée normalement.

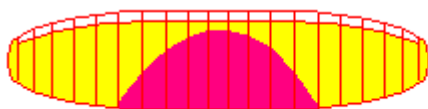
Le lobe :

C'est la différence de hauteur, à la corde, entre le centre et les plumes.



L'allongement :

Désigne le rapport :
$$\frac{\text{Envergure}}{\text{Corde moyenne}} = \frac{\text{Envergure au carré}}{\text{Surface à la corde moyenne}}$$



Allongement environ 3,5



Allongement environ 5,5

On peut, comme pour l'envergure, définir un **allongement à plat** ou un **allongement projeté**.

La surface :

Peut être mesurée à l'intrados, à l'extrados ou à la corde, à plat ou projetée : il faut le préciser.

LES TISSUS DE VOILE

Les premières voiles de parapente étaient des voiles utilisées pour le saut d'avion, dont une des caractéristiques spécifiques était la porosité. Celle-ci était en effet une nécessité afin de minimiser le choc à l'ouverture en chute libre, tant pour le parachutiste que pour la structure de la voile. En parapente cependant, la porosité présente l'inconvénient de faire baisser le rendement aérodynamique en créant de la traînée inutile.

De plus, avec les calages utilisés actuellement en parapente (assiette proche de l'horizontale), la porosité peut même provoquer des phénomènes indésirables, tels que le parachutage stabilisé.

C'est pourquoi les tissus de parapente sont de nature différente maintenant, et sont systématiquement enduits de manière à les rendre totalement étanches (du moins à l'état neuf...).

Ils peuvent être de deux natures :

	Avantages	Inconvénients
Polyamides :	- bonne tenue aux chocs (résilience) - bonne capacité de coloration et d'enduction.	tenue aux UltraViolets moyenne
Polyesters :	- bonne tenue aux U.V. - coût relativement faible.	difficulté de coloration et d'enduction

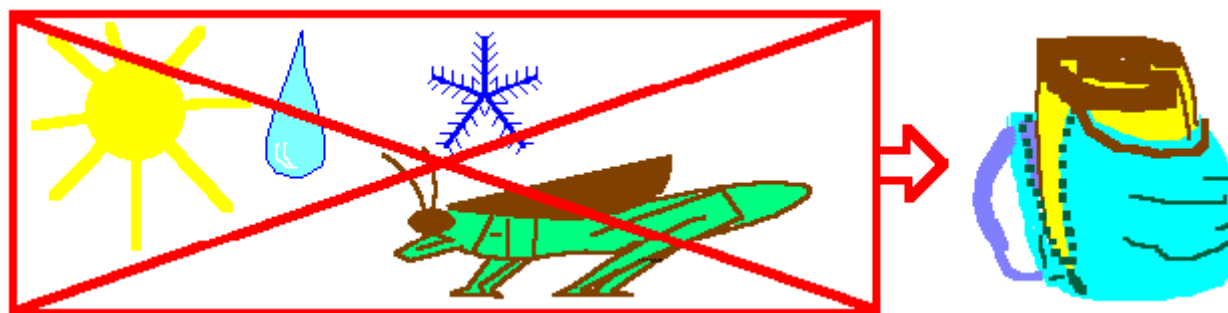
Les enductions :

On peut les classer en deux grandes catégories :

Les enductions souples, qui ne sont là que pour l'étanchéité et ne changent pas les caractéristiques mécaniques du tissu : elles sont généralement à base de **silicone** ou de **polyuréthane**.

Les enductions rigides, ou **laminés**, qui en plus de l'étanchéité assurent une rigidification, dans le but de mettre en forme (ouvertures d'alvéoles, bord de fuite) ou d'améliorer la résistance au déchirement et au vieillissement : elles sont généralement à base de **Mylar™**.

Soins à apporter à l'usage des tissus :



- Eviter les expositions prolongées aux U.V., facteur principal du vieillissement : déplier juste avant de décoller et replier juste après ... le vol.
- Faire sécher sa voile en l'aérant si elle est humide, même très légèrement . Ranger la voile dans un local ni trop chaud ni trop froid, à l'abri de la lumière et de l'humidité, le sac étant ouvert pour éviter les phénomènes de condensation
- Eviter les cycles gel/dégel trop fréquents.
- Eviter l'abrasion (sols gravillonneux, neige, glace, racines, épineux, ...).
- Eviter d'incorporer des corps étrangers à l'intérieur de la voile ou la vider aussitôt. Certains insectes sont capables de percer un trou ou d'attaquer les tissus de manière acide même après leur mort.

Contrôle du tissu :

Il est nécessaire de contrôler périodiquement les qualités du tissu. Cela peut servir également pour évaluer la validité d'une voile d'occasion que vous testez.

Aspect :

Un tissu vieilli aura souvent un toucher très souple, ses fibres semblent ramollies. La netteté d'ensemble des couleurs est un bon indicateur d'exposition également. Un tissu "qui flashe" est certainement très peu usagé.

Cas extrêmes : un tissu qui se déchire facilement, qui apparaît très délavé ou qui présente des différences de teinture très accentuées entre face intérieure et extérieure.

Enduction :

Silicone ou polyuréthane :

On peut souvent sentir un aspect soyeux lorsque l'enduction est récente. Le fait d'avoir l'impression de peu glisser ou de sentir la fibre elle-même est un mauvais signe.

Laminés :

Une séparation entre le tissu et son revêtement, un délaminage, se perçoit au regard par l'impression d'une bulle d'air sous l'enduction. Un aspect très froissé du film est significatif d'un nombre de pliages/déplisages important.

Etanchéité :

Elle peut s'évaluer (l'endroit le plus important étant le bord d'attaque) en tentant d'aspirer de l'air à travers le tissu tendu devant la bouche. Le tissu doit être lui-même aspiré dans la bouche comme une nappe de ballon de baudruche sans rien laisser passer.

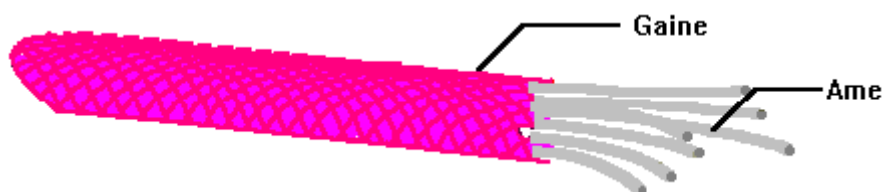
LES SUSPENTES

Les caractéristiques recherchées pour une suspente de parapente sont :

- une bonne **résistance à la rupture**, pour un diamètre réduit au maximum (cause de traînée),
- une faible **élasticité**, afin de maintenir la forme de la voile au plus proche de la forme voulue,
- une **inertie géométrique** vis-à-vis de l'humidité et de la température,
- enfin, une bonne tenue dans le temps de toutes ces caractéristiques, ainsi qu'un prix de revient le plus bas possible, étant données les quantités utilisées dans la fabrication des voiles actuelles (plusieurs centaines de mètres).

Malheureusement, ces caractéristiques sont quelque peu antagonistes, et le constructeur est toujours obligé de chercher un compromis. Il répartira par exemple des suspentes très fines et en grand nombre en ligne haute (près de la voile), pour un bon rapport de rigidité/résistance/traînée et un faible nombre de "grosses" (1,5mm en général...) suspentes pour la liaison aux élévateurs.

Structure :



Elles sont constituées d'une **gaine**, destinée à protéger de l'abrasion, de l'humidité et des rayonnements l'**âme**, qui est pratiquement seule à absorber les efforts de traction.

Matériaux :

Gaine :

Elle est en général en fibre polyester tressée et colorée. Sur certaines voiles de compétition, on peut trouver un suspentage non gainé, mais qui présente dans ce cas une fragilité extrême à l'abrasion et à l'humidité.

Ame :

On utilise l'un des deux matériaux suivants :

	Avantages	Inconvénients
Fibre aramide : (Kevlar™)	• Très bonne tenue à la traction pour un faible diamètre • bonne tenue en température	• Tenue en flexion faible • Sensible à l'humidité
Fibre polyester : (Dyneema™) (Spectra™)	• tenue en flexion correcte • élasticité relative, donc tenue aux chocs bonne	• sensible à la température à partir de 60°C ou 80°C

Soins à apporter aux suspentes :

- Eviter de marcher dessus, surtout sur sol caillouteux. On risque en effet d'affaiblir ou même de casser l'âme par écrasement ou flexion.
- Eviter de les mouiller, si c'est le cas les sécher au plus tôt, mais sans non plus les exposer à une température élevée. Le risque est de les voir s'allonger ou rétrécir par la suite, ce qui serait tout à fait préjudiciable au calage correct de la voile, même pour de faibles valeurs de déformations relatives.
- Eviter de les enrouler de manière trop serrée, voir de les plier en raison du rayon de courbure trop court pour ne pas solliciter la suspente en flexion. Soit dit en passant, ce rayon de giration court correspond d'ailleurs à la boucle de fixation à chaque extrémité, si bien qu'on est assez loin pour la résistance à la rupture des valeurs de charge d'une suspente "sortie d'usine" sur un parapente. On les divise environ par deux à la couture.
- Eviter de les solliciter trop souvent par des manoeuvres de descente (oreilles, "B", "360°",...)

Contrôle :

Comme on ne peut pas contrôler directement l'état de l'âme, on le déduit par l'observation de la gaine :

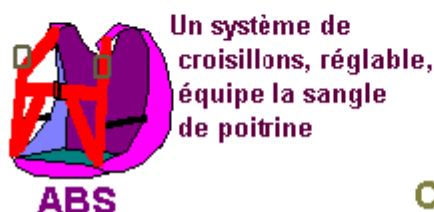


Dans l'un ou l'autre de ces cas, il faut bien évidemment changer les suspentes incriminées. De plus, si on constate tout comportement anormal de la voile (mauvais gonflage, parachutages intempestifs), il est nécessaire de faire contrôler les cotes du suspentage. Celui-ci peut avoir "bougé".

LES SELLETTES

La sellette est non seulement un élément de confort, mais aussi de pilotage dans la mesure où sa conception et son réglage influent fortement sur le comportement de la voile. En fait, il n'y a pas un seul type de sellettes, mais actuellement au moins 5 types différents. Chacun d'eux est plus particulièrement adapté, non seulement à un niveau de pilotage spécifique, mais souvent aussi à un caractère de voile précis. En effet, il faudra éviter le couple voile **et** sellette sensibles, de même que l'autre extrême. Les constructeurs de voiles indiquent à présent tous le type de sellette préconisé avec leur matériel, ainsi que souvent les cotes de réglages standard.

Les 5 types de sellettes :



Certains de ces types peuvent être combinés : par exemple beaucoup de sellettes actuelles sont à la fois des sellettes points bas et ABS, ce qui permet d'adapter le caractère du pilotage aux conditions de vol, en resserrant plus ou moins la sangle de poitrine.

Chacun de ces éléments présente des caractéristiques précises, que l'on peut exposer comme suit :

	Classique	Points bas	Pilotage	A B S	Croisillonnée
Tendance à la vrille	faible	faible	très peu	présente	présente
Mise en virage	facile	vive	vive	difficile	difficile
Rappel au neutre	peu	très peu	aucun	efficace	très efficace
Virage à la sellette	normal	efficace	très efficace	difficile	impossible
Risque d'autorotation	faible	oui	oui	faible	non
Roulis inverse	faible	oui	marqué	faible	non
Stabilité / turbulences	normale	faible	instable	bonne	très bonne
Débattement à la commande pour virer	moyen	faible	faible	moyen	Important
Sensation transmise depuis la voile	faible	bonne	très bonne	très faible	aucune

On voit donc que le compromis idéal, une fois de plus, n'existe pas en parapente. La solution des croisillons réglables en vol présente cependant l'avantage d'être en partie adaptable aux conditions rencontrées, ce qui n'est déjà pas si mal. L'idéal serait presque d'avoir un type de sellette pour chacune des conditions rencontrées : pilotage pour les soarings calmes, triangulée pour les thermiques à + 6 ...

Plus sérieusement, on s'en sortira bien à condition de respecter les points suivants :

- **utiliser le type de sellette préconisé par le constructeur de sa voile,**
- **apprendre à sentir sa voile et savoir utiliser les réglages permettant d'affiner celles-ci,**
- **apprendre à virer à la sellette (indispensable pour les oreilles) et à la régler en vol si sa conception le permet .**

LE PARACHUTE DE SECOURS

Est-ce utile en parapente ?

Actuellement encore, bon nombre de parapentistes se posent cette question et diffèrent l'achat d'un "secours" en y opposant deux arguments principalement :

- 1°/ Un parapente est lui-même un excellente voilure de parachute, donc inutile d'y rajouter de la complexité.
- 2°/ Je préfère consacrer le budget correspondant (environ 4500F) à l'achat d'une meilleure voile ou à de l'équipement de vol "utile en permanence" (vario, etc.).

Ces deux arguments sont tous deux complètement faussés par rapport à une réalité :

Un parapente est un excellent parachute : c'est vrai, à condition qu'il soit en état de vol, c'est-à-dire que l'on ne se trouve dans **aucun des cas suivants** :

- grosse fermeture suivie d'une cravate empêchant la réouverture de la voile,
- collision avec un autre aéronef et emmêlage des deux appareils (que celui qui n'est jamais passé à moins de 100m d'un collègue me jette la première pierre...),
- casse d'une partie du suspentage suite à un décollage scabreux ou à une manoeuvre un peu "appuyée" ou à une réouverture brutale (suspentes fines de 1mm sur toutes les voiles intermédiaires actuelles),
- oubli de prévol (tsstss...) et ouverture d'un maillon ou casse en cours de vol.

La liste n'est pas exhaustive, et il est vrai qu'il existe **un cas de figure** où même le parachute peut ne pas apporter de solution : la très forte abattée sans fermeture frontale amenant à une chute dans la voile. Mais pour tous les autres cas cités, on risque de passer un mauvais moment à regretter de ne pas en avoir...

4500F, c'est cher : à combien estimez-vous votre vie ?

La réponse est oui, sauf si vous ne décollez jamais entre le 1er janvier à midi et le 31 décembre 17heures.

Je suis convaincu, quel est le meilleur système disponible ?

Pour la voilure :

Actuellement, trois possibilités : parachute rond, parachute dirigeable, aile de secours.

Si le **parachute rond** présente le grave inconvénient de n'offrir qu'une possibilité de descente verticale **dans la masse d'air** (c'est à dire dérive s'il y a du vent), il évite les écueils des deux autres systèmes.

parachute dirigeable : après ouverture, la voile principale constitue une gêne, voire contre l'action d'une voile de secours. Si celle-ci n'est qu'un frein aérodynamique, cela peut se traduire par des balancements ou une arrivée au sol désaxée. Si celle-ci est dirigeable, on peut gaiement envisager par exemple une mise en rotation de l'ensemble...

aile de secours : elle nécessite du temps ou de la vitesse, pour s'ouvrir convenablement. De plus, une fois ouverte, elle ne sera utilisable que seule, ce qui implique une libération préalable ou postérieure de la voile de parapente. Donc, ce système est le meilleur si on est sûr de disposer d'environ 400 mètres de chute avant la nécessité d'ouverture, plus une centaine de mètres pour choisir son atterrissage (en effet, à quoi sert une voilure dirigeable à 20 mètres au-dessus de la forêt ?).

Réponse "1994" (ne désespérons pas pour la suite) : **la bonne vieille coupole.**

Pour l'extraction :

Trois possibilités : extraction manuelle, à ressort, pyrotechnique (fusée). Contrairement au précédent, dans ce domaine le choix est difficile, car chacun des systèmes présente des avantages et des inconvénients :

	Avantages	Inconvénients
Manuel	• simplicité d'entretien et de repliage • coût réduit	• faible effort d'extraction (pilote stressé) • gestuelle complexe (saisir-arracher-choisir une direction, élaner-jeter) donc longue
Ressort	• entretien réduit • extraction rapide • gestuelle simple	• Poids • pas de choix de la direction d'extraction
Pyrotechnique	• puissance (les fusées sont souvent capables de traverser la toile de la voile) • extraction directe • gestuelle très simple (presque trop...)	• Encombrement • entretien délicat (sensible à l'humidité et manipulation dangereuse) • pas de choix de la direction

Dans ce tableau de comparaison, j'ai volontairement omis le prix dans les inconvénients... Comme on peut le constater, chacun des systèmes a ses avantages, à vous de choisir maintenant.

Entretien :

Suivre la notice du fabricant. En règle générale, procéder à une aération et un pliage soigné au minimum tous les 4 à 6 mois, ou si le parachute a pu être mouillé.

Gestion :

Ce n'est pas tout d'être équipé, encore faut-il tenir compte de la présence de cet équipement supplémentaire :

- dans le soin apporté à l'installation de la voile : le secours ne doit en aucun cas être exposé à la boue, la neige, l'humidité.
- en incluant dans la visite prévol le contrôle de l'équipement de secours : sécurité bien en place, vérification visuelle du système de mise en oeuvre

Utilisation :

En vous souhaitant de ne jamais en arriver là, voici quelques points clés :

Décision :

Il s'agit d'un système de **secours**, donc pas forcément infaillible (aucun fabricant ne vous garantira l'absence de dommages), mais par contre son utilisation est **irréversible**. Il ne faudra donc arriver à la décision d'extraction qu'après analyse et jugement de l'impossibilité de s'en sortir autrement. Il vaudra souvent mieux descendre sous une voile pilotable, même abîmée, que sous un secours rendant tout choix de trajectoire impossible. De même, une fermeture simple, à bonne altitude, est normalement récupérable.

Choix du moment de l'extraction :

Cela peut paraître paradoxal, mais il peut être préférable de retarder le moment de l'extraction, en particulier dans les cas suivants : risque de dérive dans un obstacle dangereux (ligne HT) ou problème survenant à très grande altitude, mais avec une "chute confortable". Le risque est alors de ne pas pouvoir estimer son point de chute ou de subir une longue descente inconfortable, voire une remontée s'il y a une forte ascendance...

Choix de la direction d'extraction :

Afin d'éviter au mieux les interférences du secours et de la voile ou d'accélérer son ouverture (jet vers l'extérieur en cas de rotation, vers l'arrière du mouvement en ligne droite).

Stabilisation de l'ensemble :

On conseille de "faire les B" sur le parapente, pour éviter qu'il ne contre l'action du secours.

Préparation de la réception :

Ne vous attendez pas à un arrondi bien douillet, mais préparez-vous plutôt à rouler dans le sens de la pente (jambes fléchies, muscles détendus).

L'ANEMOMETRE

L'anémomètre fait partie des instruments de vol . Ceux-ci ne font mieux voler aucune voile ni aucun pilote, par contre ils fournissent des informations utiles pour optimiser le vol.

But :

Mesurer la vitesse du vent . Celui-ci sera le vent aérien (météo, brise, rafales thermiques, ...) si l'anémomètre est utilisé au sol, le vent relatif s'il est embarqué. Ceci permet de :

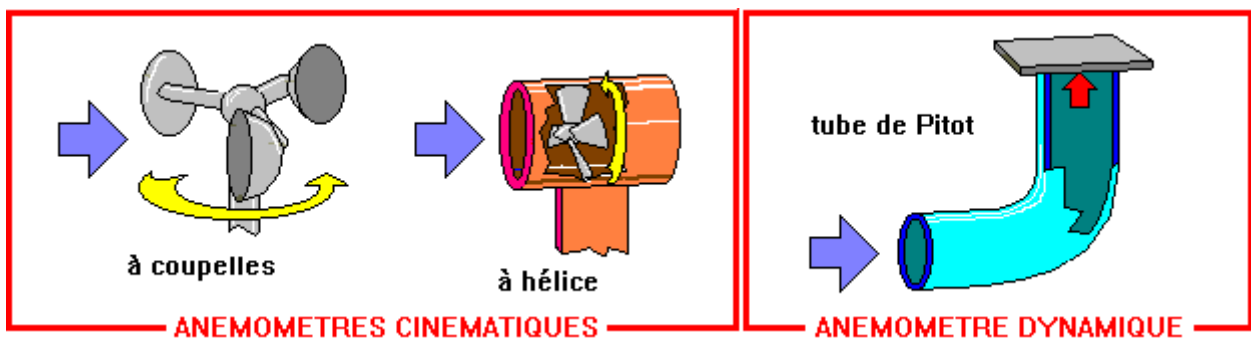
- tracer la polaire des vitesses d'une voile,
- déterminer l'allure optimale de vol,
- savoir au sol si la vitesse du vent permet le vol.

Principe :

Il existe deux systèmes bien distincts pour mesurer la vitesse du vent :

Les anémomètres cinématiques, du fait qu'il possèdent un ou des organes mobiles, poussés à la vitesse exacte du vent grâce à la réduction des frottements, indiquent cette vitesse de façon **exacte**. Ce sont l'anémomètre à coupole du météorologue, ou l'anémomètre à hélice (type Skywatch™).

L'anémomètre dynamique (Badin ou tube de Pitot) mesure, lui, la vitesse du vent de manière indirecte puisqu'il est constitué d'un capteur de pression qui va détecter le surcroît de **pression dynamique** par rapport à la pression statique de l'air ambiant. La véracité de sa mesure dépendra donc de la correspondance de la masse volumique de l'air traversé avec la valeur choisie pour l'étalonnage. Il ne donnera des valeurs **vraies** que s'il y a correspondance de celles-ci, donc à une valeur de pression atmosphérique bien déterminée. Pour toutes les autres valeurs, la mesure sera **fausse**.



Utilisation :

On aurait tendance à penser qu'il vaut mieux utiliser un instrument **exact**. Eh bien, cette exactitude n'apporte en aéronautique qu'une satisfaction intellectuelle, celle de pouvoir déterminer la vraie vitesse du vent. En effet, le renseignement réellement utile est bel et bien celui donné par l'anémomètre dynamique, car la vitesse de la voile dépend, elle aussi, de la masse volumique de l'air ! Donc seul un anémomètre dynamique va donner un renseignement invariablement correspondant aux différents régimes de vol de la voile, ceci quelles que soient la température et la pression atmosphérique du lieu de mesure.

Exemple :

En atmosphère standard au sommet du MtBlanc 26km/h de vent lus sur un "badin" correspondent à 33,5km/h de vent "vrai". Mais comme la vitesse de vol correspond aussi à 33,5km/h pour une vitesse vraie de 26km/h au niveau de la mer, on peut se fier à l'indication de l'anémomètre dynamique, alors que les 33,5km/h lus sur un anémomètre cinématique vont amener à se poser des questions sur la possibilité de vol...

L'ALTIMETRE

But :

Il permet de connaître son altitude instantanée, pour par exemple :

- connaître son gain d'altitude par rapport au décollage,
- connaître sa réserve d'altitude par rapport à l'atterrissage,
- savoir si l'on est dans une zone globalement ascendante ou descendante en le lisant chaque minute,
- évaluer la possibilité de passage d'une crête dont l'altitude est connue, etc.

Principe :

C'est un **baromètre** (il mesure la pression), dont l'échelle est graduée en mètres. Le coeur de l'altimètre est constitué d'une capsule anéroïde (vide) dont les déformations sont mesurées soit :

- par une transmission mécanique : étrier-aiguille-cadran,
- par une traduction électronique : jauge de contrainte-circuit de calcul-affichage .

Causes d'erreurs :

L'échelle, mécanique ou électronique, est établie selon l'**atmosphère-type OACI**, qui définit une loi de variation de la pression statique et de la température avec l'altitude (voir le cours météo).

L'erreur peut donc être due :

- à un mauvais calage de l'altitude par le pilote avant le vol,
- à l'erreur de l'appareil dans sa mesure de pression (généralement faible),
- à toute cause de non-correspondance avec l'atmosphère-type (dépression, température anormalement faible ou élevée, etc.).

Il faudra donc veiller à prendre des marges vis-à-vis des nécessités géographiques (crêtes, etc...) ! Heureusement la plupart des instruments peuvent se régler en indiquant l'altitude réelle d'un point connu, où l'opérateur se trouve.

Calage :

QFE : C'est la mise à zéro au point choisi : QFE décollage pour le gain, QFE atterrissage pour la réserve d'altitude.

QNH : C'est le calage en altitude/mer en un point où elle est connue. C'est le calage utilisé pour le vol de distance, car l'altitude servira de repère par rapport au terrains survolés.

LE VARIOMETRE

But :

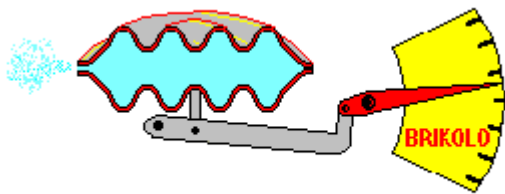
Il permet de connaître le sens et la vitesse de variation de l'altitude, pour :

- déterminer l'allure de vol à adopter (ralentissement, accélération, fuite...) vis-à-vis de la situation,
- centrer une ascendance thermique en cherchant son noyau, donc la zone où l'on obtient la plus forte vitesse de montée.

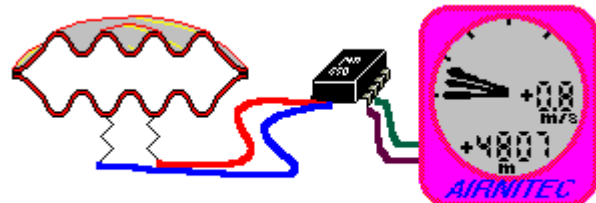
Principe :

Il utilise une capsule ressemblant à celle de l'altimètre, cependant celle-ci n'est pas vide d'air, mais percée d'un trou très petit, ce qui permet d'enregistrer les déformations dues au retard dans l'équilibre entre pression interne et pression externe (pression atmosphérique). La vitesse de variation de pression est ensuite traduite soit :

- par moyen mécanique analogue à celui de l'altimètre,
- par transducteur électronique. Dans ce cas, on peut aussi traduire les réactions d'une capsule anéroïde d'altimètre en mesurant sa vitesse de contraction ou de dilatation. Ce principe évite de doubler les capsules dans le cas d'un alti-variomètre électronique.



Principe du variomètre mécanique



Principe de l'alti-variomètre électronique

Causes d'erreurs, utilisation :

Le variomètre, quel que soit son principe de fonctionnement, détecte toujours la variation de vitesse en montée ou en descente avec un temps de retard. Donc, non seulement il n'indique pas si "ça **va** monter", mais de plus il n'est capable de dire que "ça **a** monté". Un pilote ne se fiant qu'à ses indications va invariablement descendre en petites conditions (ascendances étroites), car il ne fera que **suivre** une indication qui elle-même est délivrée avec un **retard** !

Il faut donc préciser que le variomètre est un instrument d'**évaluation** de l'ascendance, mais en aucun cas de **détection** de celle-ci. En effet, la détection de l'ascendance passe avant tout par les sensations du pilote en raison de l'inertie de mesure.

D'où l'utilité pour un pilote en progression de travailler ses premières ascendances thermiques sans être équipé d'un variomètre ou en coupant le son, afin de se concentrer sur les sensations en vol à l'entrée et à la sortie d'ascendance.

LA BOUSSOLE

But :

- se repérer par rapport à une carte, au sol ou en vol,
- s'orienter en cours de vol afin de bénéficier au mieux des effets dynamiques du vent météo.
- voler dans les nuages, ce qui ne peut bien sûr arriver **qu'involontairement** à un pilote respectueux de la réglementation aérienne et conscient sur le plan sécurité... Attention, il est souvent illusoire de se fier à la boussole dans cette situation, en effet l'instrument vous donnera votre orientation mais ne tiendra pas compte de la dérive liée au vent météo (vol en crabe).

Principe :

Je ne vous ferai pas l'affront de vous expliquer son fonctionnement (utilisation du magnétisme terrestre), mais cependant il faut citer les deux grandes catégories d'instruments :

La boussole est constitué d'une aiguille indiquant toujours le nord, **le compas** affiche la direction géographique (le **cap**) que l'on prend. La précision est importante, car la lecture est inversée d'un instrument à l'autre.

- pour lire une carte, la boussole est mieux adaptée,
- pour s'orienter et prendre un cap, le compas est mieux adapté.

Utilisation :

Plutôt que de faire un cours complet sur l'azimutage, nous nous contenterons de citer les précautions d'emploi à suivre pour obtenir un fonctionnement correct :

- près du pôle nord ou sud (à partir de 2000km environ...), toute boussole magnétique s'affole en raison de la trop grande proximité de la source magnétique terrestre. Seul un compas gyroscopique (utilisé en aviation civile) ou un système GPS pourront vous sauver dans ce cas...
- en raison de la faiblesse relative du magnétisme terrestre, il est primordial d'éviter la proximité de toute masse métallique : pas de visée sur le capot d'une voiture, si l'appareil est fixé sur la sangle ventrale des maillons en alliage léger sont préférables .
- veiller à éviter les frottements de l'aiguille sur une boussole plate en la tenant bien horizontale .
- dans le cas d'une utilisation en vol, et en raison de la remarque précédente, un compas ou une boussole à boule est préférable.

Remerciements tout particuliers à Monsieur **Daniel WOLFF** pour son travail de rédaction préliminaire de ce manuel.

Ont collaboré à la rédaction de ce manuel :

M. Romain ARAGON	D.T.E. de l'école GRAND VOL
M. Marcel BERTRAND	C.T.R. région PACA. (Ministère de la jeunesse et des sports)
M. Jean GARCIN	Membre de la Commission Parapente

Ainsi que toutes les personnes qui ont bien voulu en assurer la relecture.

Encore merci pour votre collaboration.

Jean-Claude FRANCOIS
C.T.R. Ministère de la jeunesse et des sports
C.T.N. de Parapente pour F.F.P.