

COURS THEORIQUE POUR PILOTES ULM Paramoteur (classe 1)

AEROLOGIE TURBULENCES

Philippe LHUILLIER

Moniteur diplômé d'Etat parapente
Instructeur ULM Paramoteur DGAC

SOMMAIRE

- 1) DEFINITION / OBJECTIF
- 2) ECOULEMENT DE L'AIR
 - 2.1) Laminaire
 - 2.2) Turbulent
- 3) ORIGINE DE LA TURBULENCE
 - 3.1) Turbulence mécanique
 - 3.2) Turbulence dynamique
 - 3.3) Turbulence thermique
- 4) LES VENTS SECONDAIRES
 - 4.1) Brise de mer et de terre
 - 4.2) Brise de vallée montantes et descendantes
- 5) LES VENTS LOCAUX
- 6) LE CUMULONIMBUS
- 7) EVALUATION

1) DÉFINITION

Étude du comportement de l'air et de ses mouvements.

OBJECTIF

Connaître l'aérodynamique et comprendre la turbulence afin d'optimiser le pilotage ULM.

Pour jouir d'un vol sans surprise et sécurisé, il est indispensable de connaître la situation aérodynamique d'un site de vol. Pour cela, il faut s'efforcer de détecter les éventuels pièges aérodynamiques, en visualisant l'écoulement de l'air en fonction :

- de la force du vent
- du relief
- des obstacles

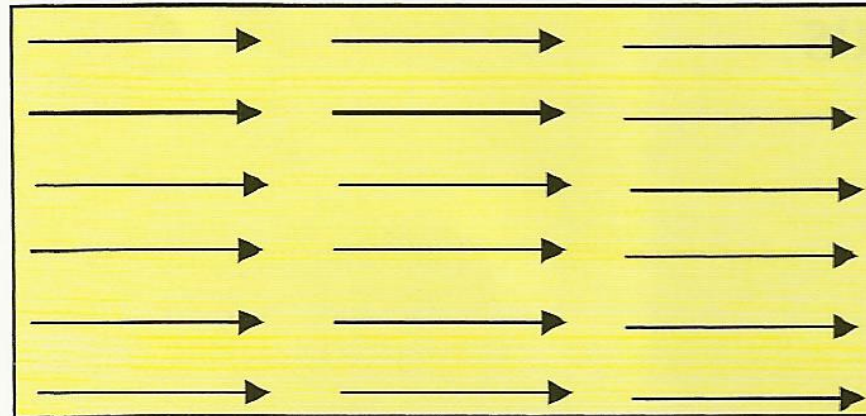
2) ÉCOULEMENT DE L'AIR

On distingue deux types d'écoulement très distincts :

2.1) ÉCOULEMENT LAMINAIRE

Si l'écoulement est régulier, on parle d'écoulement laminaire, c'est-à-dire stationnaire, stable et qui présente très peu de variations.

On peut comparer cet écoulement à un troupeau de particules d'air qui galopent sans bousculade, côte à côte, à la même allure et dans la même direction.



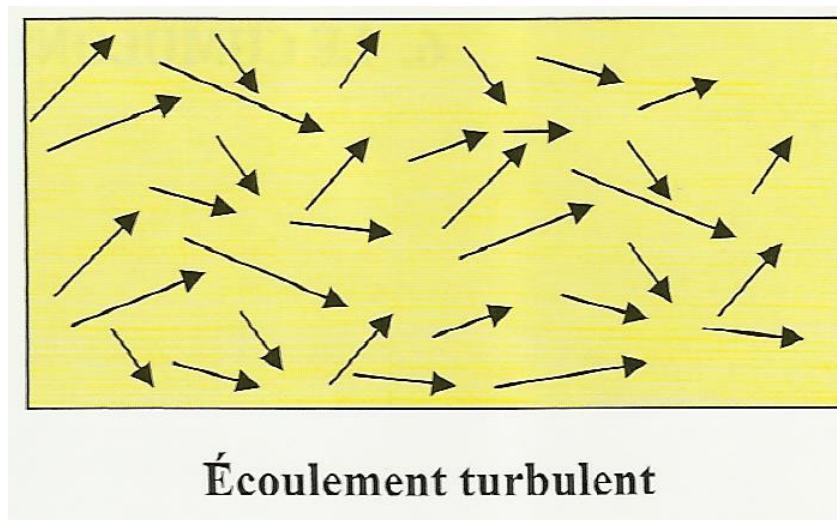
Écoulement laminaire

2.2) ECOULEMENT TURBULENT

Les particules ne se déplacent plus avec la même régularité. Le troupeau est désordonné et ça part dans tous les sens.

C'est l'affolement général et le vol va se ressentir par des variations plus ou moins violentes de vitesse air, d'incidence et de facteur de charge.

Pour des raisons évidentes de sécurité et pour préserver l'intégrité de l'ULM, il est indispensable de s'éloigner des limites haute et basse du domaine de vol de l'appareil lorsqu'on vole en air turbulent.

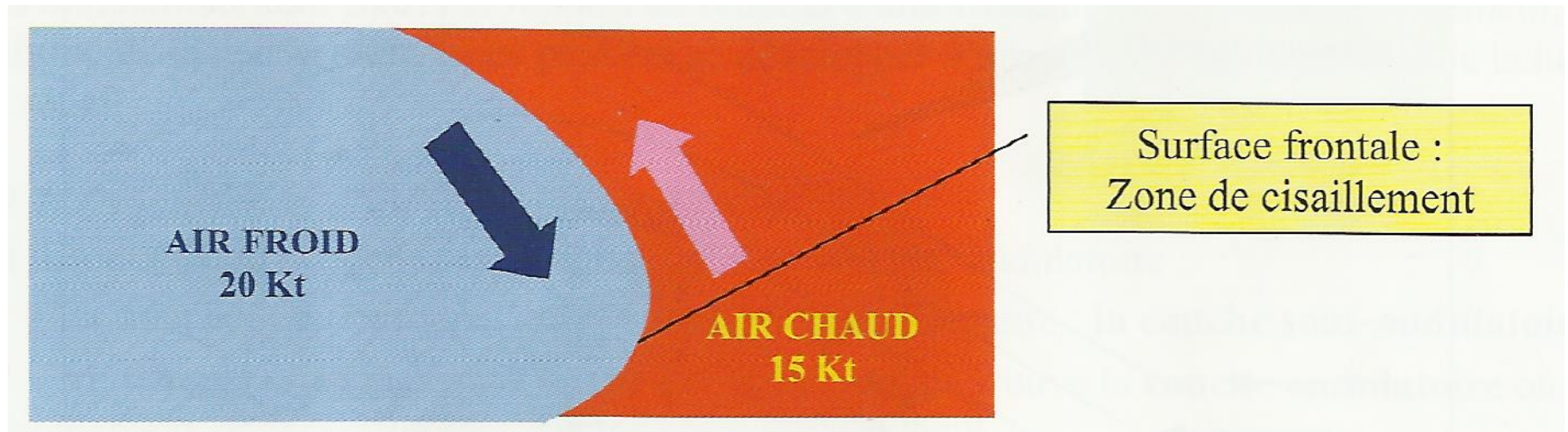


3) ORIGINE DE LA TURBULENCE

Un écoulement turbulent peut être d'origine **mécanique, dynamique ou thermique**.

3.1) TURBULENCE MECANIQUE

La rencontre de deux masses d'air d'origine et de vitesse différentes engendre une turbulence de **cisaillement** (ex: passage d'un front).

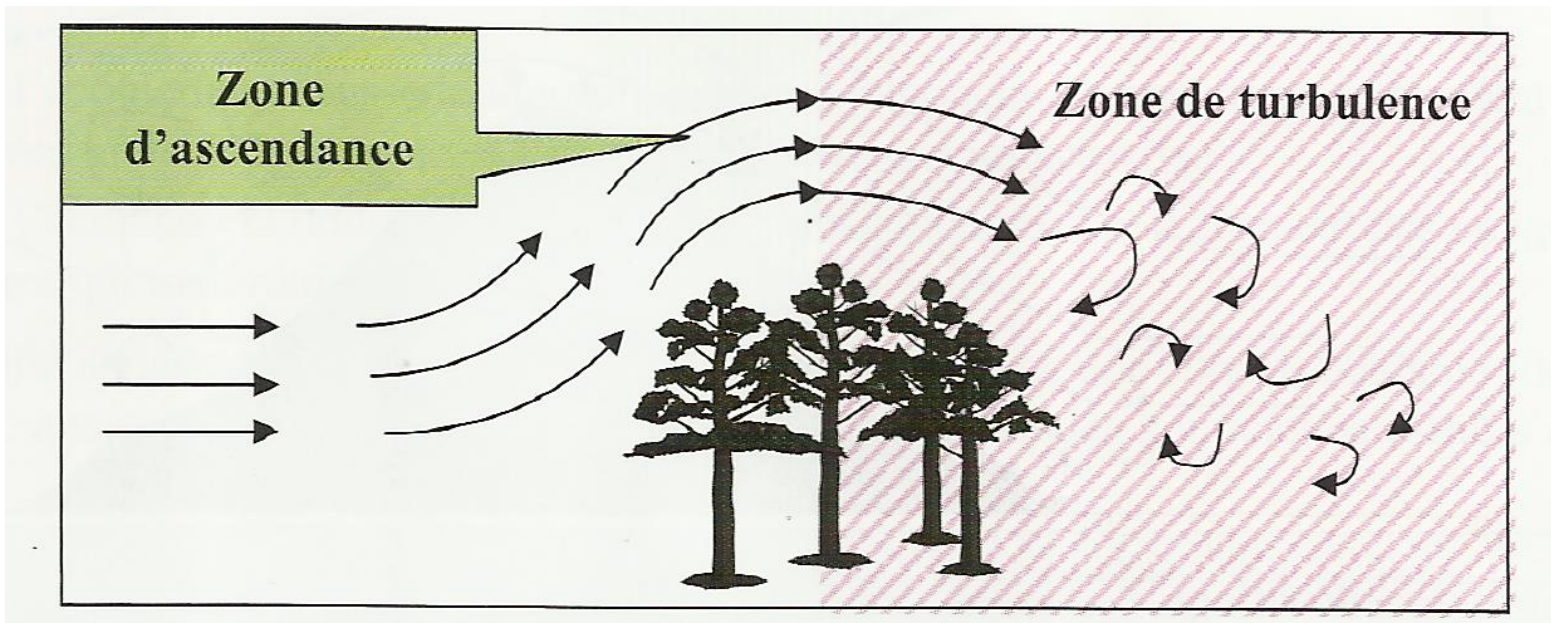


3.2) TURBULENCE DYNAMIQUE

La déviation ou l'accélération brutale des particules d'air va engendrer différents types de turbulences.

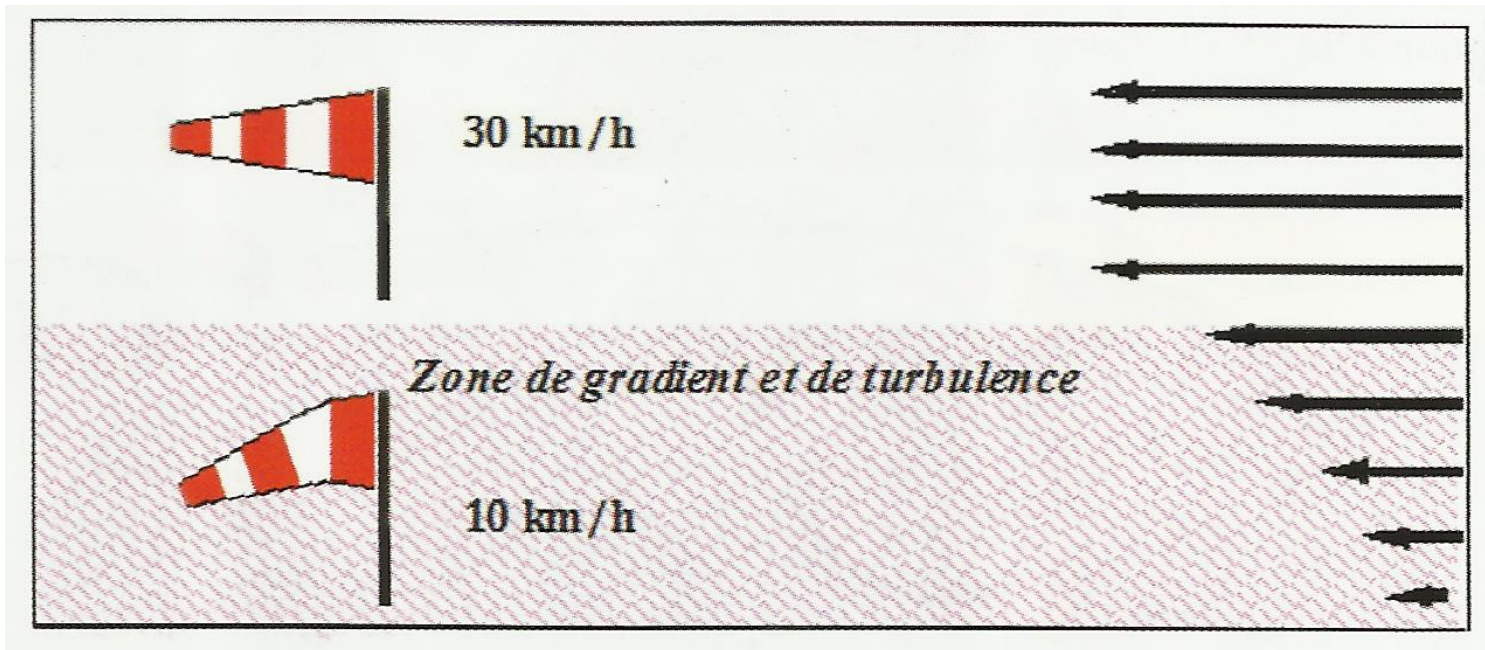
- **Turbulence d'obstacle (constructions, arbres...)**

Les zones « sous le vent » sont à éviter (rotors, rabattants).



- **Turbulence de frottement**

À proximité du sol, les frottements et les obstacles sur la surface terrestre associés à la viscosité de l'air ralentissent la translation des particules et engendrent une couche turbulente. Cette variation s'appelle le **gradient de vent**.

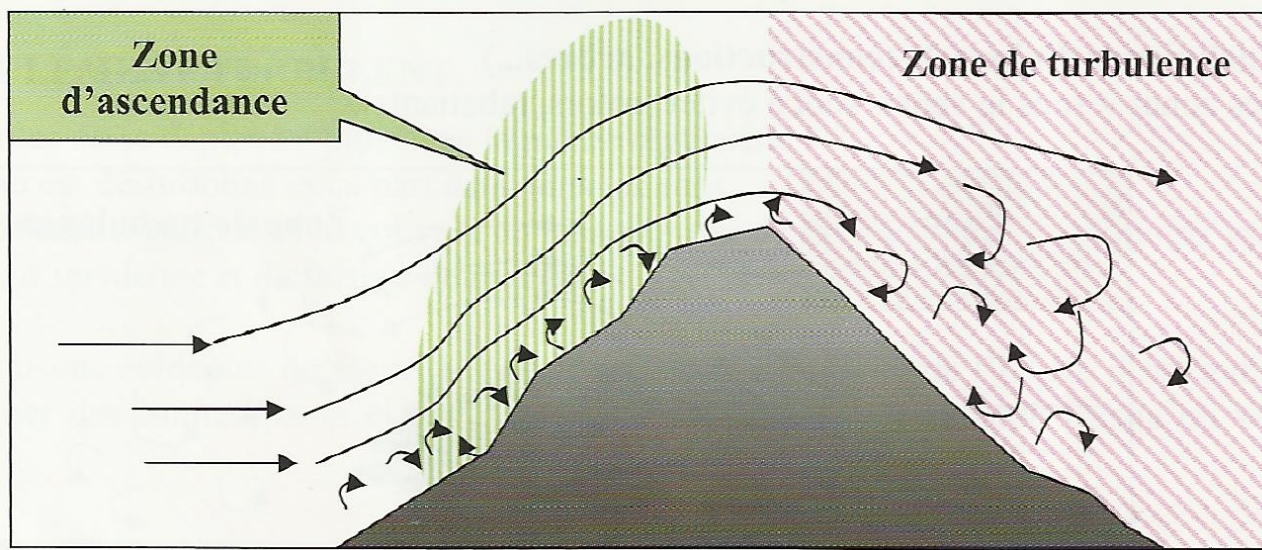


- **Turbulence de relief (orographique)**

Les filets d'air épousent plus ou moins le profil du relief créant ainsi une zone ascendante sur la face au vent et une zone de rabattants sur la face sous le vent.

La virulence de l'ascendance et de la turbulence dépend :

- **de la forme du relief**
- **de la vitesse du vent**

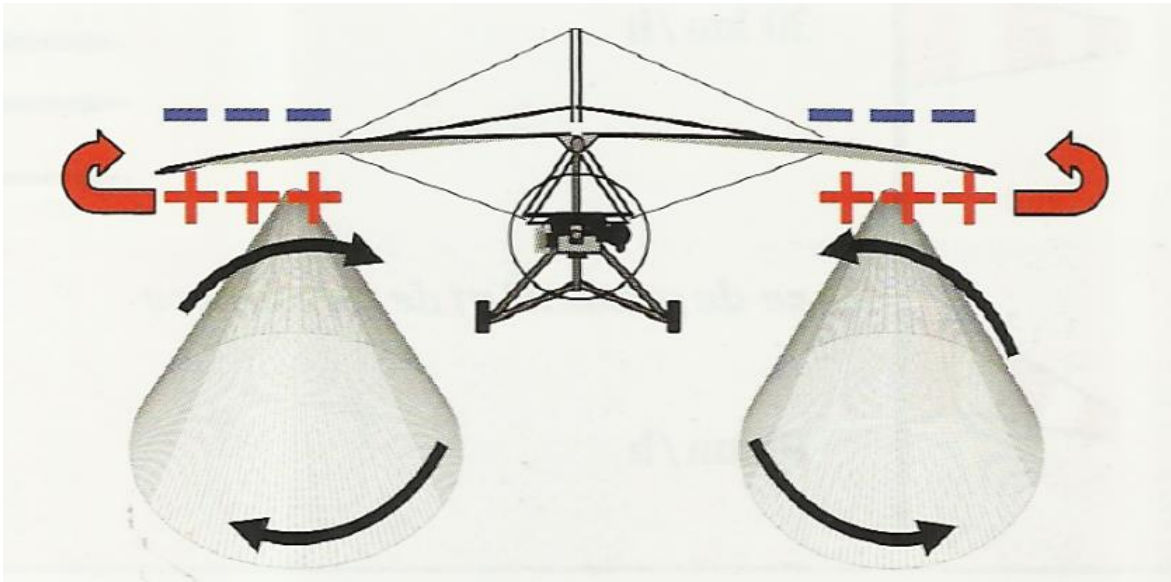


- **Turbulence de sillage**

La surpression sous l'intrados a tendance à venir combler la dépression d'extrados en contournant la voilure.

Comme un ULM avance, un mouvement de rotation (vortex) se crée à chaque extrémité de l'aile :

Il convient de les éviter, car ils peuvent conduire à la perte de contrôle de l'appareil. Cette turbulence est d'autant plus forte que l'appareil est lourd et lent.



- **Effet venturi**

***Loi de Bernoulli** : Si la canalisation de la vallée se rétrécit, le vent accélère et sa pression diminue, c'est l'**effet Venturi**.*

Appelé également « effet de couloir », le venturi est à l'origine des vents secondaires comme le Mistral, l'Autant ou la Tramontane.

Éviter les zones où le vent est accéléré (vallées étroites, cols).

- **L'onde d'obstacle**

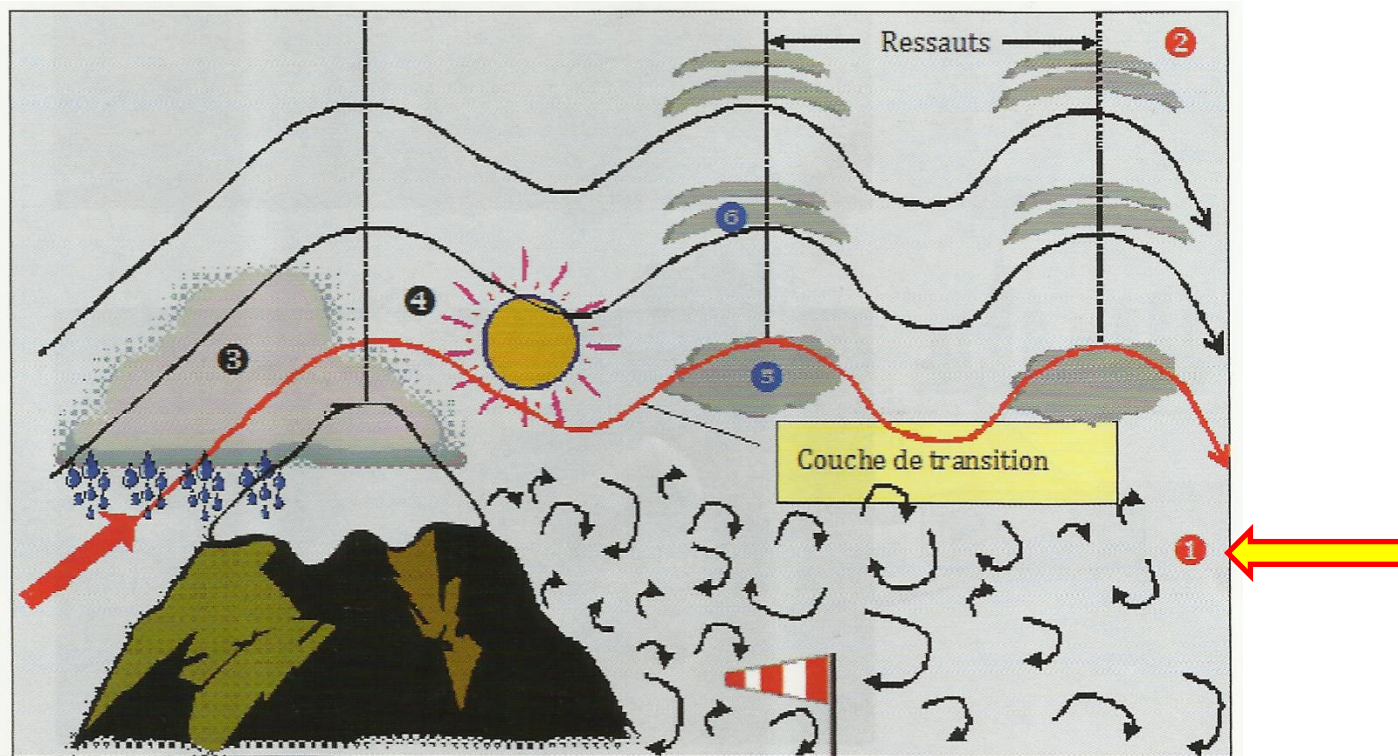
Ce terme désigne les mouvements sinusoïdaux de l'air après le franchissement d'un relief.

Les ondulations sont fixes par rapport au relief et s'amortissent plus ou moins rapidement, selon la stabilité de la masse d'air.

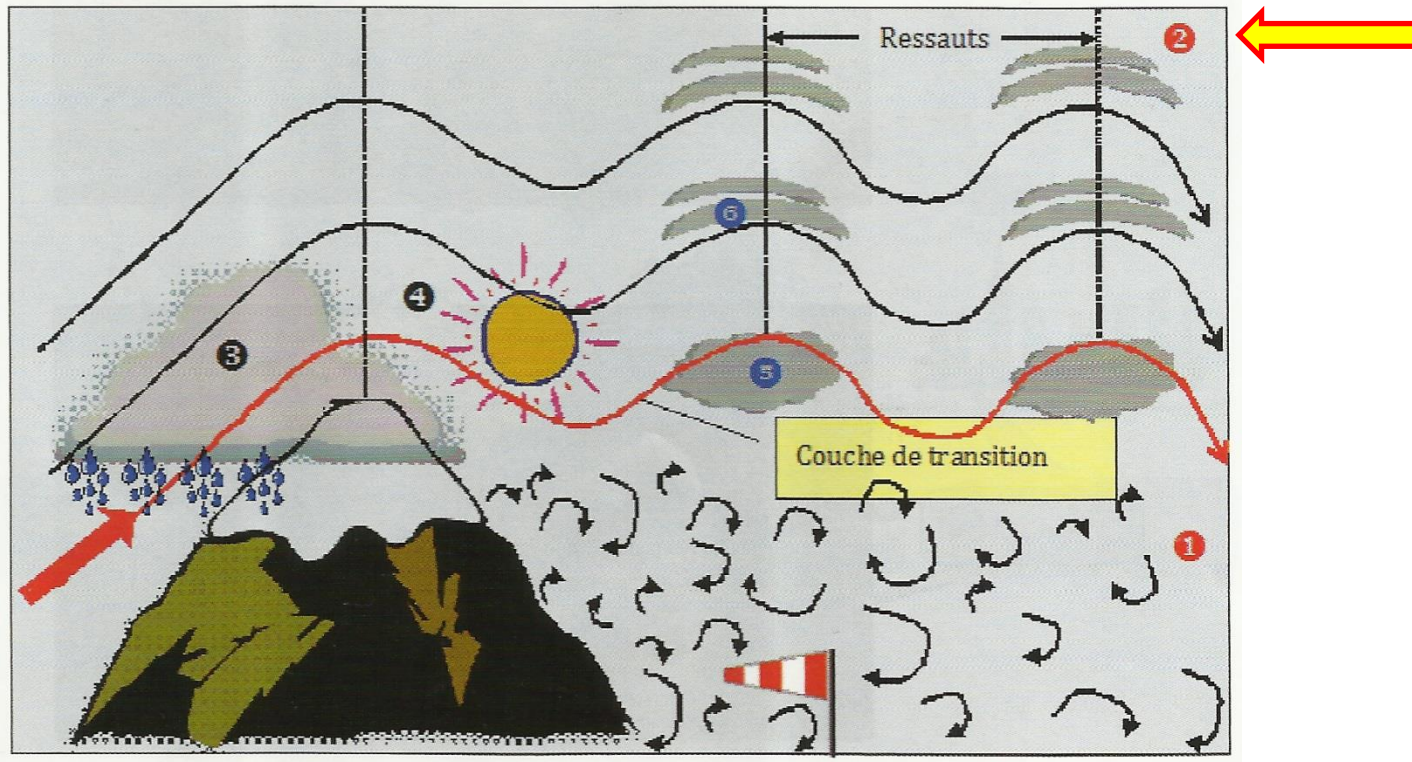
3.2.1. Organisation d'un système ondulatoire

On distingue deux couches spécifiques dans un système ondulatoire :

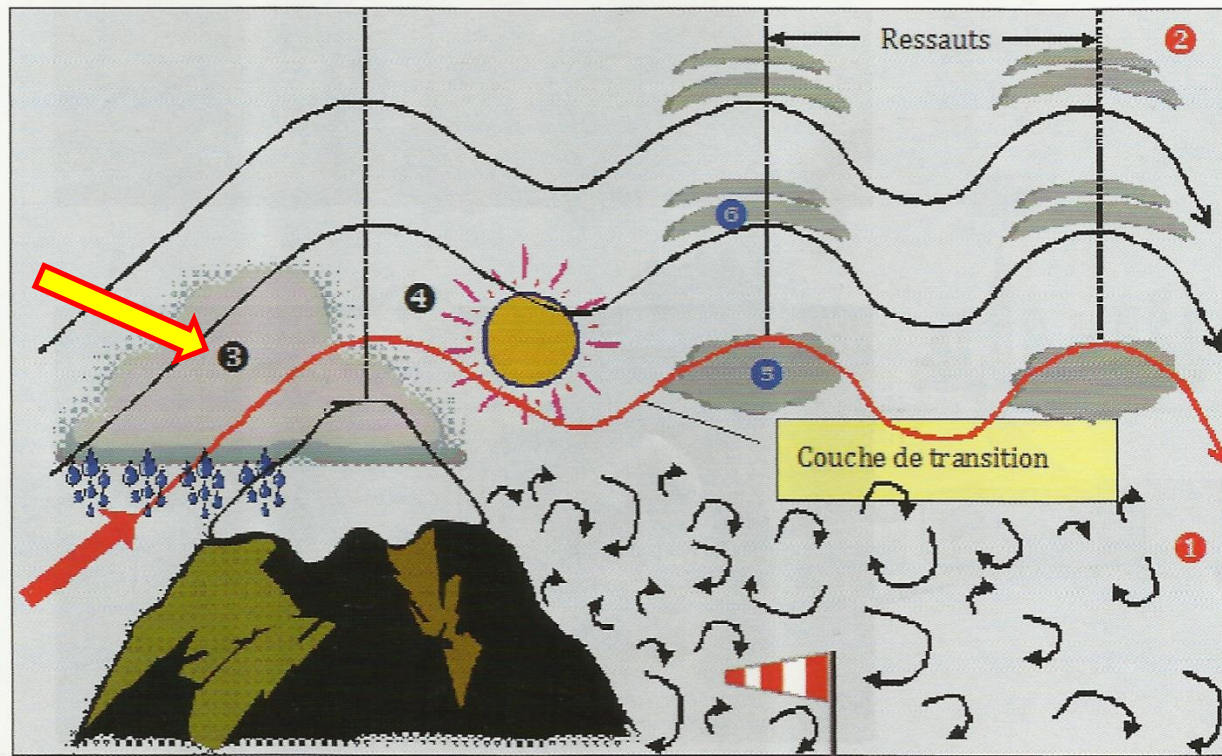
- 1 - La tranche inférieure où l'écoulement est tourbillonnaire : **la couche sous-ondulatoire.**



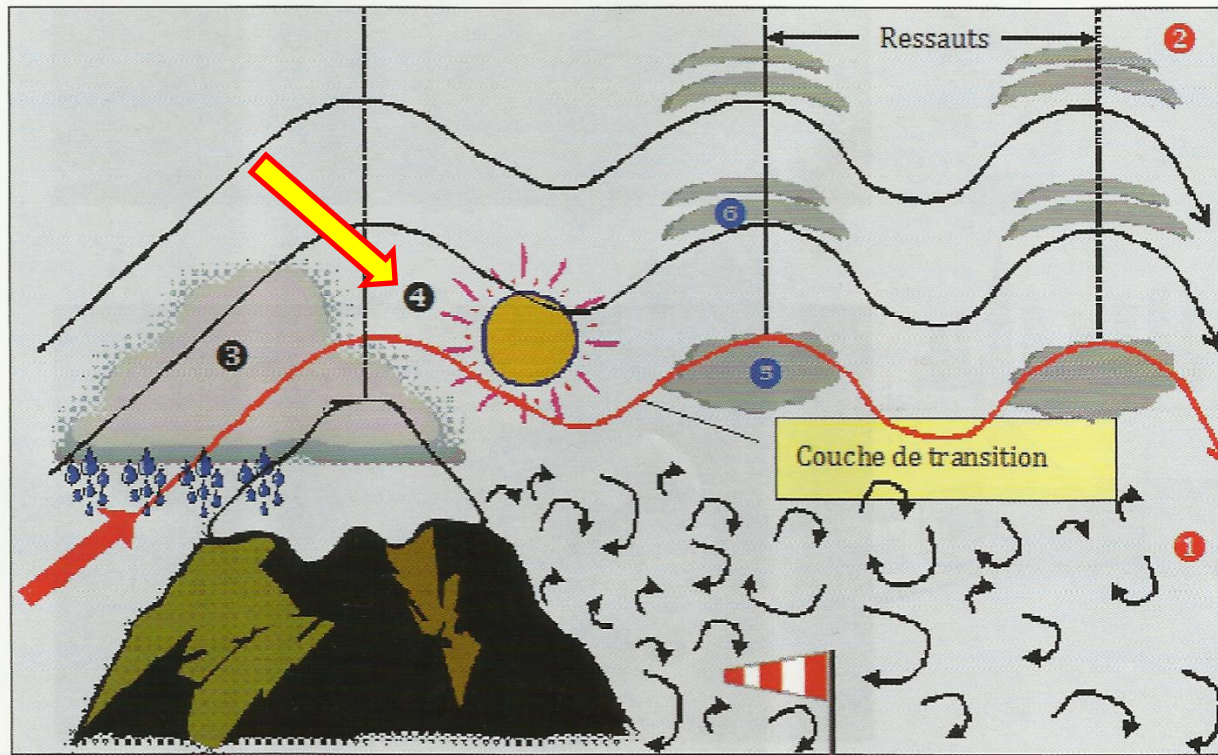
2 - Au-dessus, séparée par la **couche de transition**, on trouve la **couche ondulatoire** où l'écoulement est laminaire, mais le vent très fort.



3 - Par détente adiabatique, un nuage cumuliforme dit de « **chapeau** » se forme au vent du relief puis se désagrège sous le vent, d'où son immobilité apparente.



4 - La ligne de crête franchie, les filets d'air descendent le long du relief et subissent un réchauffement par compression qui évapore l'eau atmosphérique. Le ciel devient clair, c'est **l'effet de Foehn**.



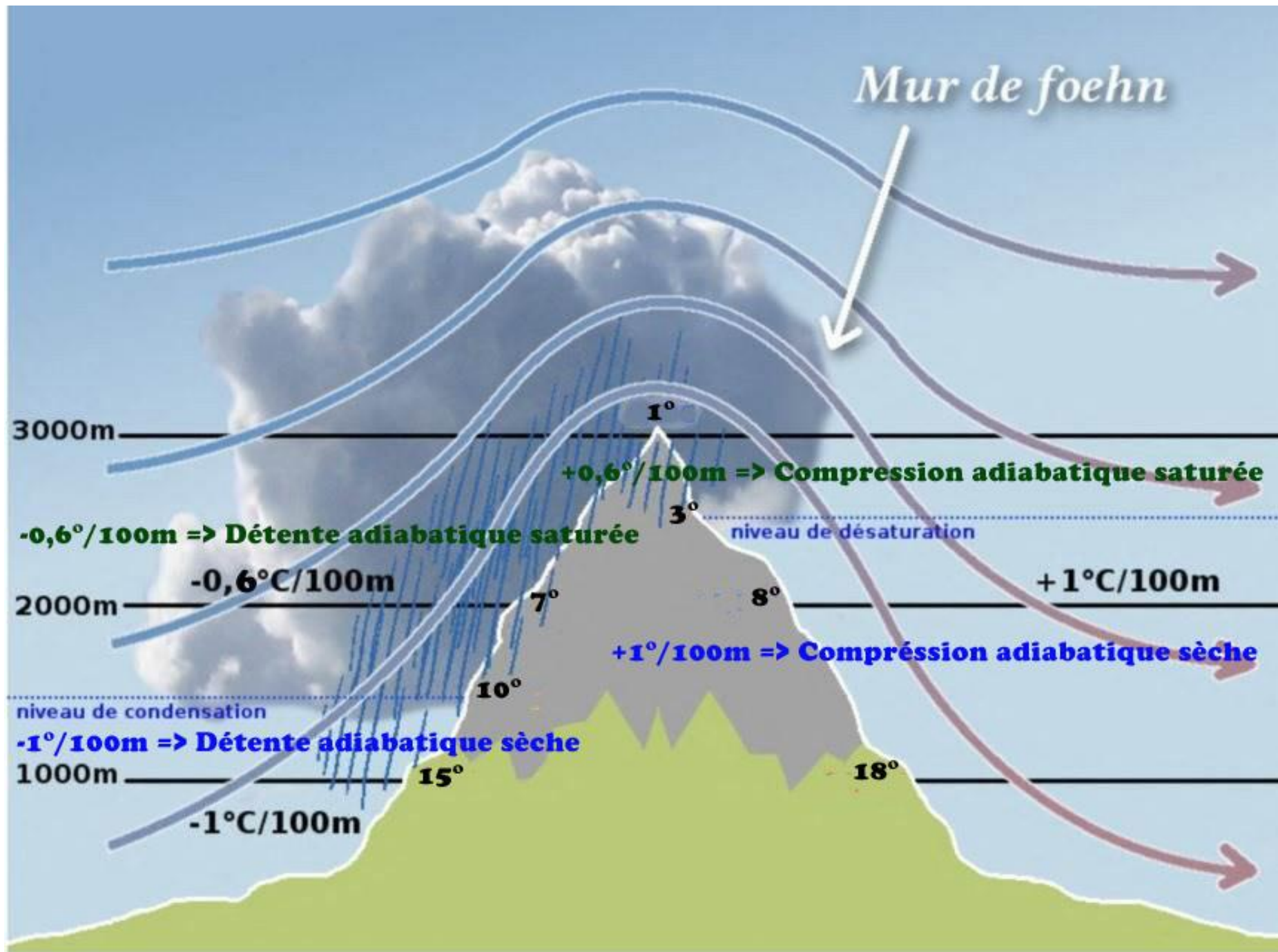
EFFET DE FOEHN

Adiabatique : se dit d'une transformation au cours de laquelle un système n'échange pas de chaleur avec le milieu environnant.

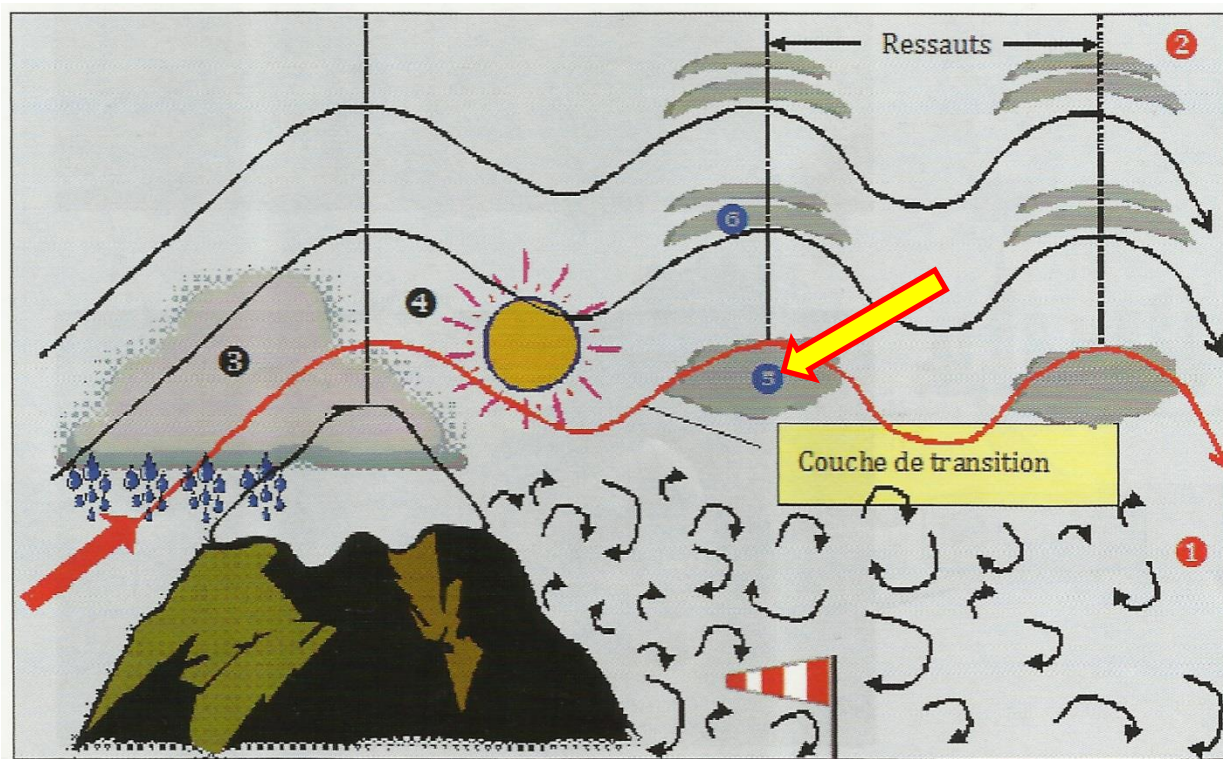
Quand il y a effet de foehn, au vent, une masse d'air humide à 1 000m et à 15 degré, va perdre 1 degré par 100 m et arriver à saturation à 1 500m. C'est la **détente adiabatique sèche**. Un nuage se forme, puis la masse d'air continue de monter en se refroidissant de 0,60 degré par 100 m, **c'est la détente adiabatique saturée**. Le nuage se décharge de son humidité lors de cette phase montante. A 3 000m, il fera 1 degré.

Lorsque l'air se met à descendre de l'autre côté, dans un premier temps, sa température va augmenter de 0,6° par 100m. C'est la **compression adiabatique saturée**. Ensuite, le seuil de saturation n'étant plus le même, l'air se réchauffe en gagnant 1 degré par 100m. On est dans une **compression adiabatique sèche**. En bas de la descente, la température passe à 18 degré. Sous le vent, l'air sera plus chaud de 3 degré.

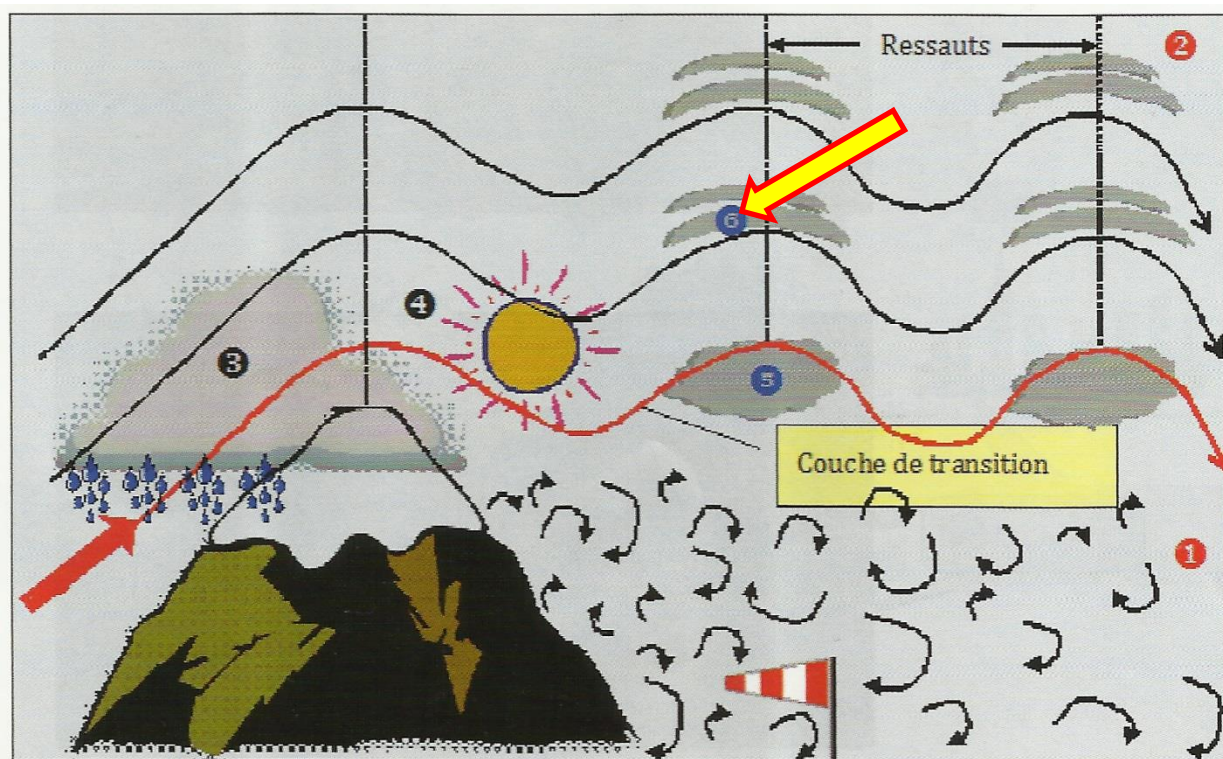
Le foehn est un vent chaud et sec imprévisible. Il forçit à mesure qu'il avance et il avance en ondulant. On a déjà vu des parapentistes voler en soaring tranquillement dans 15 km/h de vent puis se faire reculer dans un vent rafaleux à plus de 30 ou 35 km/h.



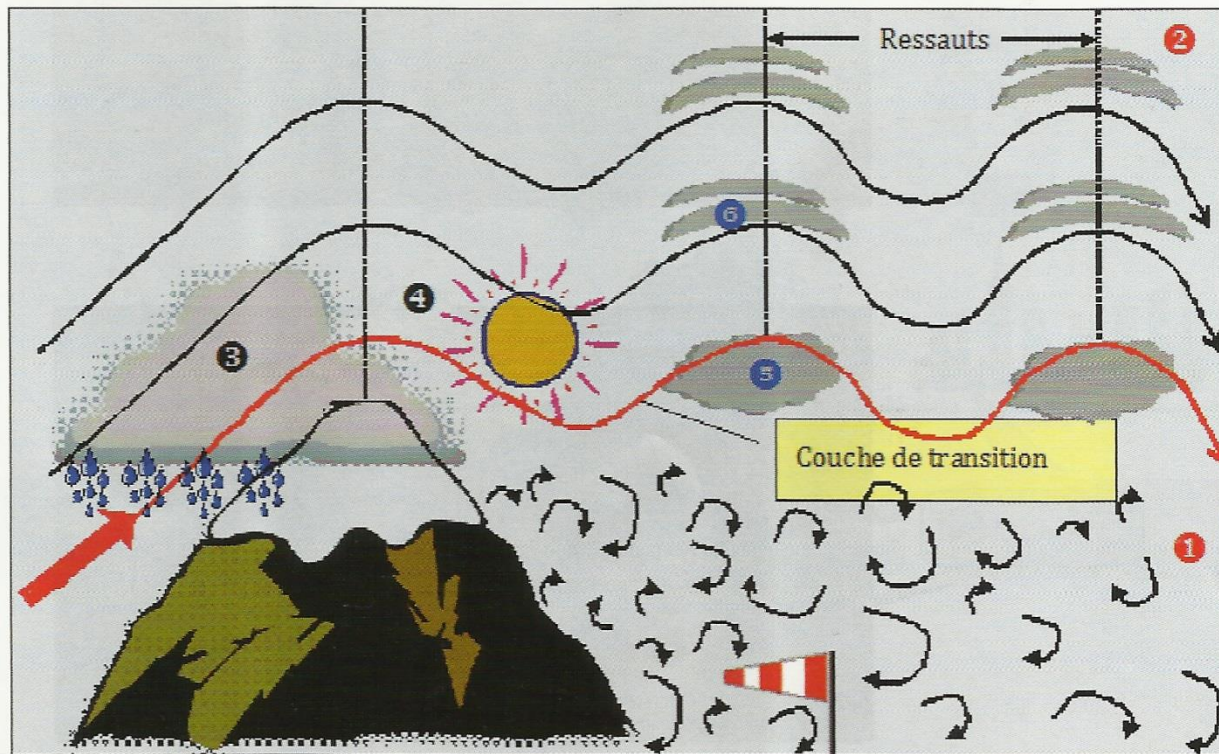
5 - Dans l'écoulement sous-ondulatoire, accolés à la couche de transition, se forment des nuages cumuliformes appelés **rotors**. Ils matérialisent les ressauts successifs..



6 - Dans l'écoulement ondulatoire, étagés sur plusieurs niveaux, se forment des nuages **lenticulaires** qui matérialisent les ressauts successifs.



L'immobilité apparente des rotors et des lenticulaires est due à une zone ascendante (détente) où se forme le nuage et à une zone descendante (compression) où les gouttelettes d'eau s'évaporent.



Un nuage lenticulaire est un altocumulus stationnaire qu'on retrouve en aval du sommet des montagnes sous le vent, signant la présence d'un ressaut ou d'une onde orographique.

En réalité, il se reforme en permanence du côté du vent et se dissout de l'autre côté, réalisant un nuage stationnaire avec le vent horizontal fort.

Les nuages lenticulaires indiquent la présence de turbulence. L'altocumulus est un cumulus de l'étage moyen (2 000 à 6 000 m)

Orographique : Lorsqu'un flux d'air se heurte à une montagne, il est contraint de s'élever. Ce phénomène est appelé soulèvement orographique.

3.3) TURBULENCE THERMIQUE

=> Rayonnement

Le soleil transmet son énergie à la terre sous forme de **rayonnement**. Celle-ci en absorbe une quantité plus ou moins importante, ce qui lui donne une certaine température.

=> Conduction

L'air en contact direct avec le sol s'échauffe par **conduction**, s'allège et s'élève. Il est remplacé par de l'air frais plus lourd, qui descend.

=> Convection

Il y a alors apparition d'un **courant convectif**. Mais ce courant ne se fait pas uniformément pour 2 raisons :

- La nature du sol
- La viscosité de l'air

La nature du sol

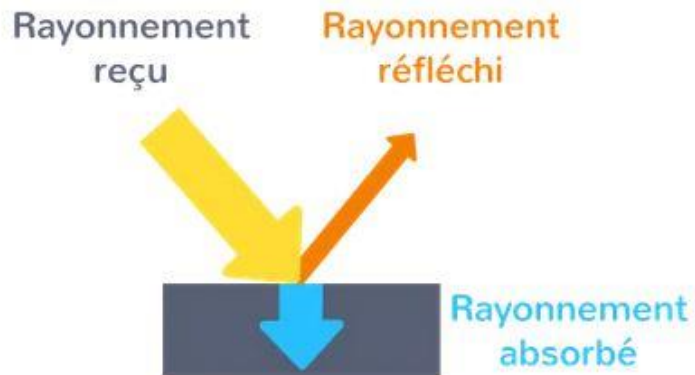
En fonction de sa constitution géologique (roche, terre eau) ou de son revêtement de surface (prés, sable, forêts, blé, villes), le sol va rayonner une quantité plus ou moins importante de chaleur. C'est ce que l'on appelle **L'indice Albédo**, qui s'exprime en pourcentage.

Par exemple

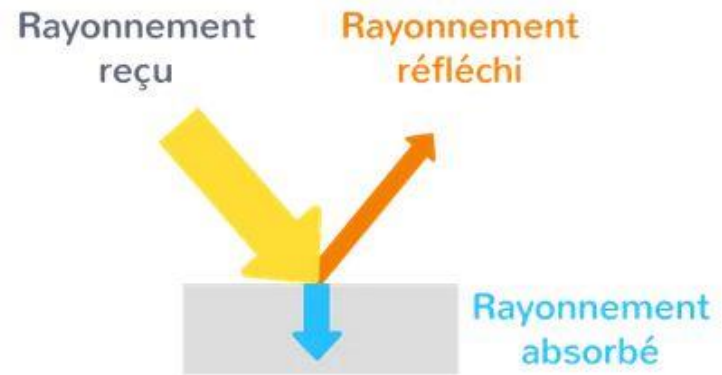
L'indice Albédo du sable ou **de la neige est pratiquement de 100 %**. Ils n'absorbent que peu de calories et rayonnent beaucoup. C'est pour cette raison que vous pouvez skier en maillot de bain lorsqu'il fait soleil sans que la neige ne fonde.

L'indice Albédo d'une forêt, d'un labour ou d'une étendue d'eau est faible, car ils accumulent beaucoup d'énergie solaire, en renvoyant que très peu.

Dans le cosmos, l'indice Albédo d'un « trou noir » est nul (il absorbe toute la matière).



Sol sombre donc albédo faible



Sol clair donc albédo élevé

Influence du sol sur l'albédo

EXEMPLE

Nature du sol	Albédo
Neige fraîche	0,87
Glace	0,4
Sol cultivé avec végétation	0,2
Surface de l'océan	0,1
Forêt dense	0,1

La viscosité de l'air

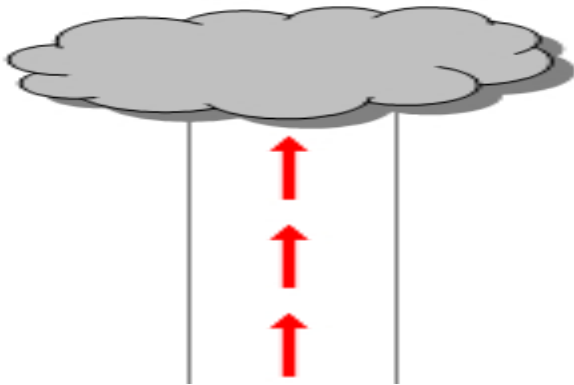
La viscosité de l'air retarde plus ou moins longtemps l'ascension de l'air chaud, en fonction de la nature et des aspérités du sol.

Par exemple :

Les épis de blé agissent comme un « velcro » en accrochant l'air surchauffé et visqueux en contact avec eux, et qui va s'arracher soudainement à la faveur d'une rafale quelconque, déclenchant ainsi un puissant thermique, courant ascendant si précieux aux rapaces et aux vélivoles.

Thermique de nuage

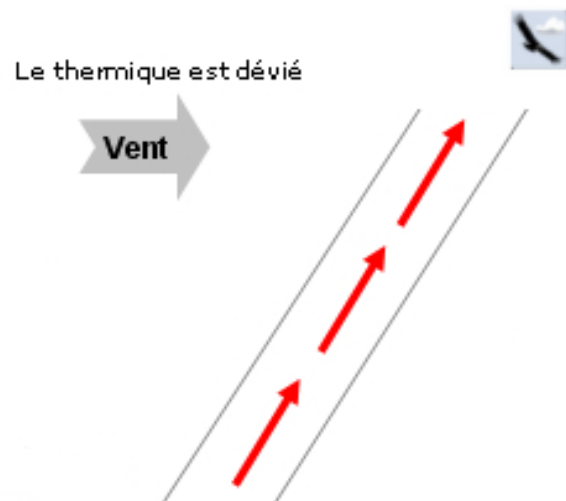
Si l'humidité de l'air est suffisante, il y a condensation lors du mouvement ascendant et donc formation d'un nuage cumuliforme au sommet de chaque colonne d'air chaud.



Thermique pur (ou bleu)

Les mouvements ascendants n'atteignent pas le niveau de condensation.

Dans ce cas, le repérage des thermiques se fera par rapport à la nature du sol et en tenant compte de la force et de la direction du vent. La présence de rapaces, qui utilisent ces courants ascendants aide également à leur localisation.



Restitution (ou thermique du soir).

Une forêt sombre et humide peut absorber une grande quantité de chaleur pendant la journée, car son Albédo est faible. Il faut attendre la fraîcheur du soir pour qu'elle la restitue.

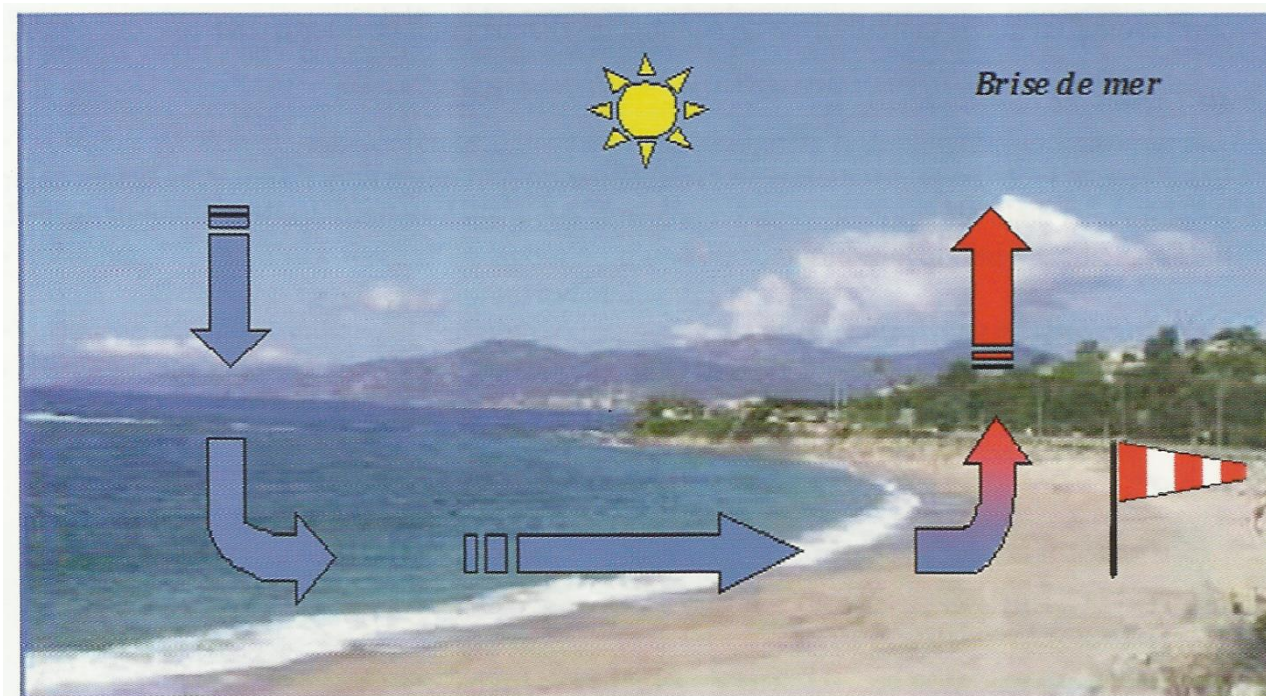


4) LES VENTS SECONDAIRES

4.1) BRISE DE MER ET DE TERRE

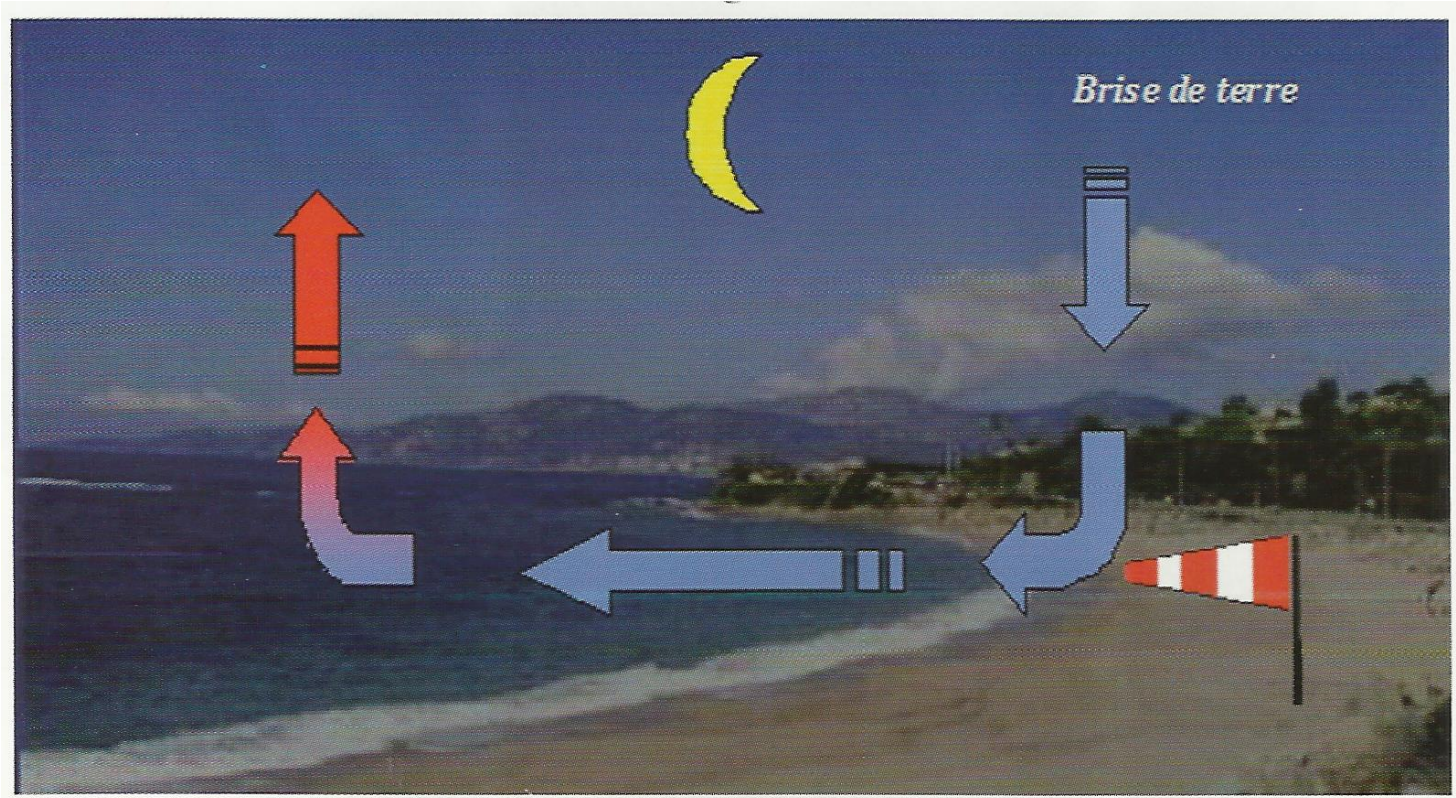
Brise de mer

De jour, par beau temps, la terre s'échauffe plus vite que la mer. Par convection un courant ascendant se développe et cet air léger est remplacé par de l'air plus froid venant de la mer. Pour que cette brise puisse s'exprimer, il faut que le vent météo soit faible.



Brise de terre

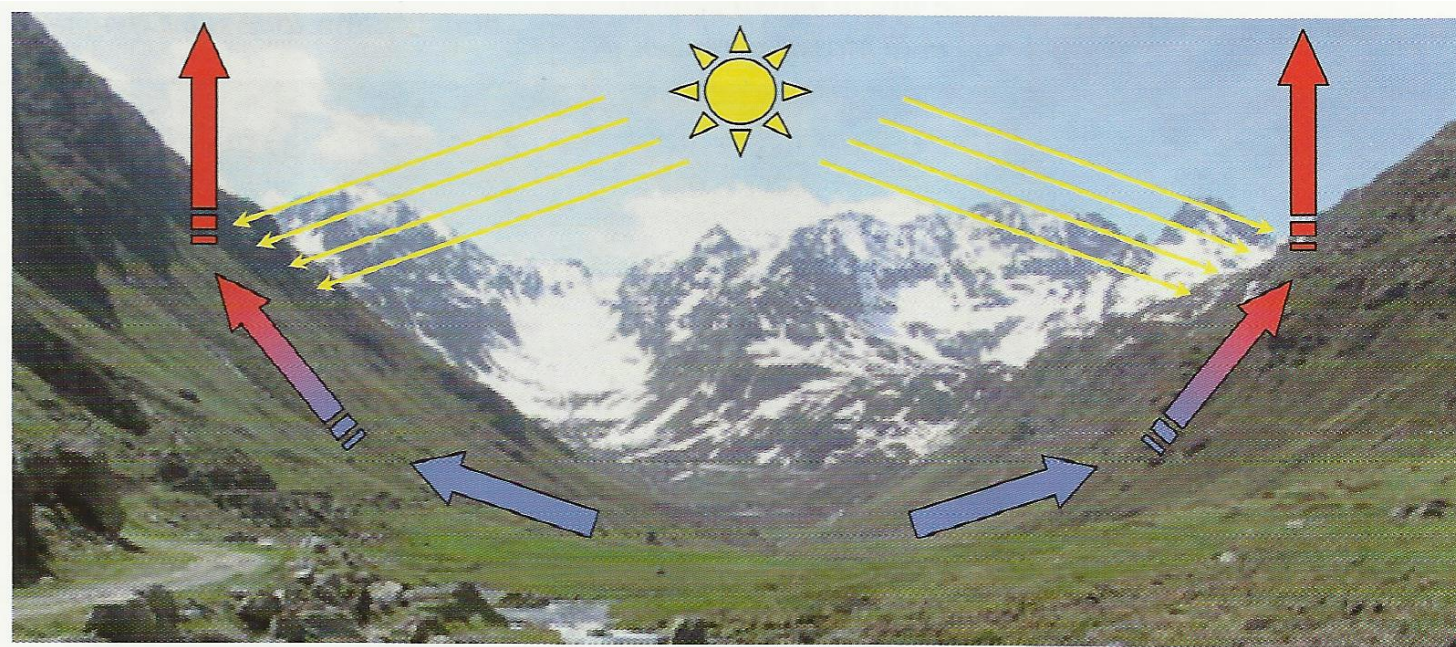
La nuit, le processus inverse se produit, car la terre perd sa chaleur plus rapidement que la mer.



4.2) BRISE DE VALLEE MONTANTES ET DECENDANTES

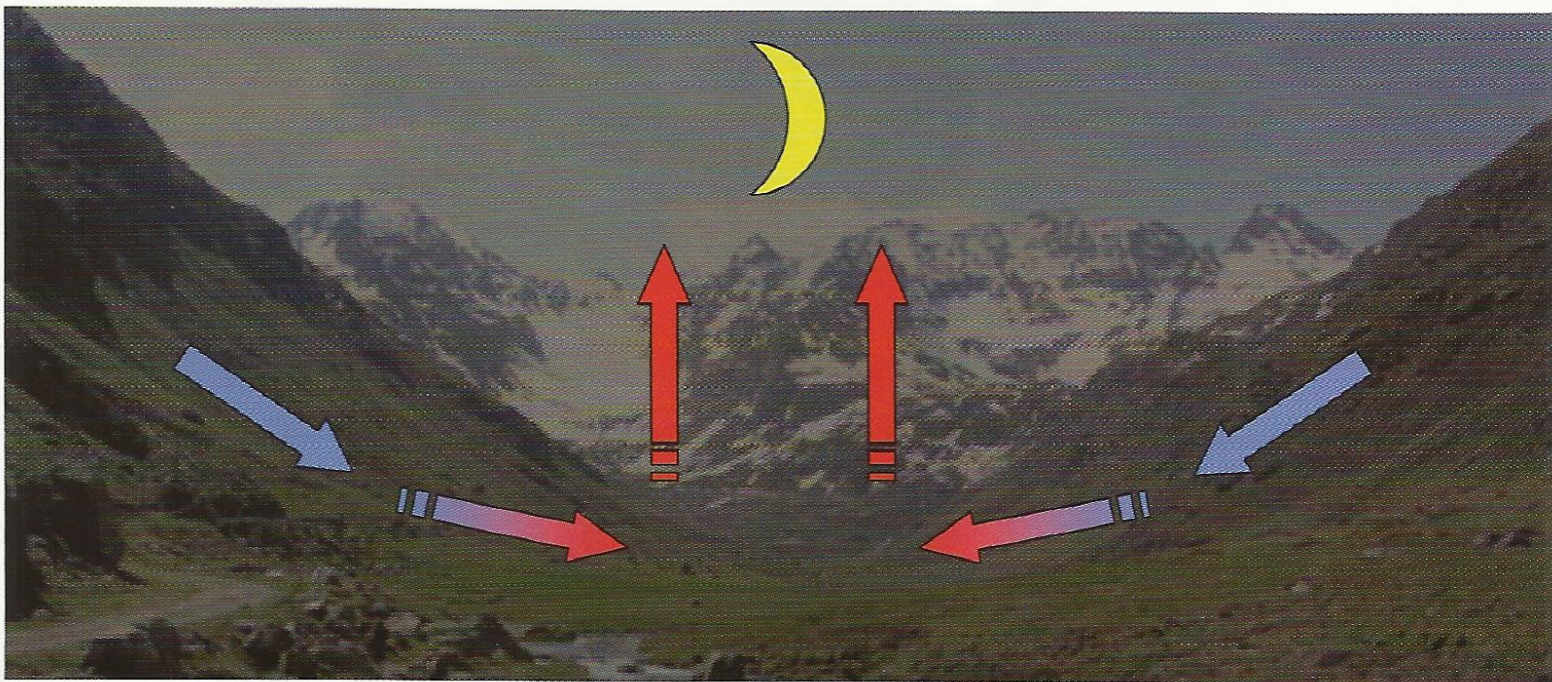
Brise de vallée montante

Le jour, les versants exposés au soleil s'échauffent plus vite que la vallée. L'air plus léger des pentes s'élève et est remplacé par l'air plus froid de la vallée.



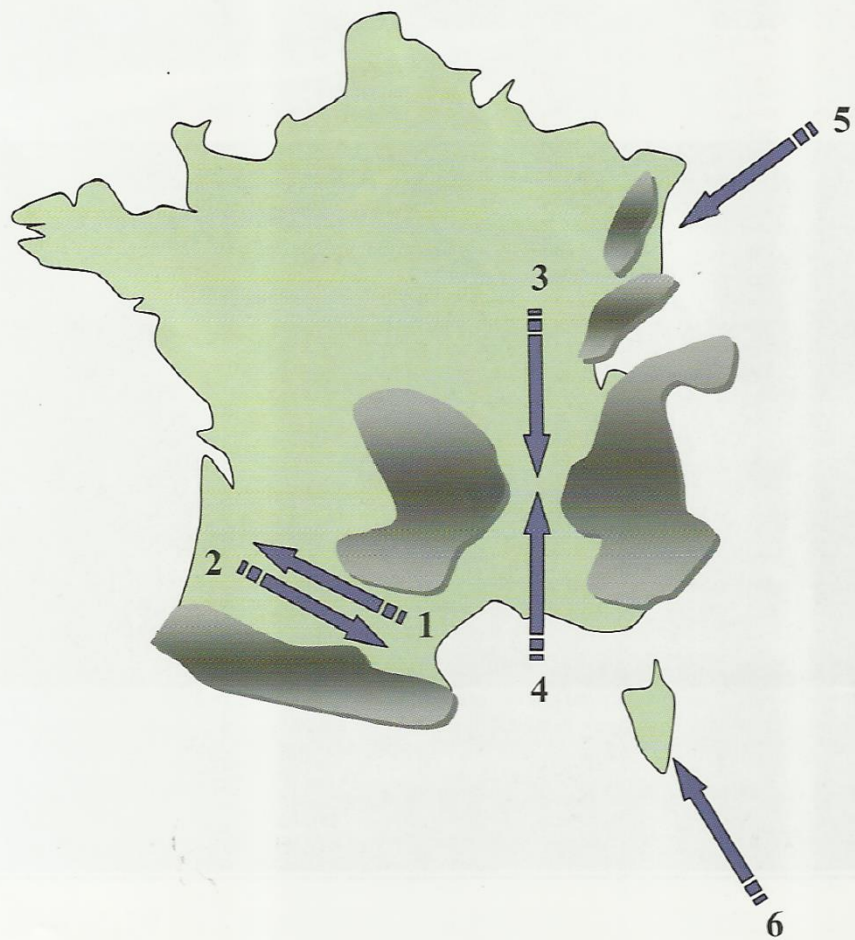
Brise de vallée descendante

Inversement, la nuit par ciel clair, les versants se refroidissent rapidement et l'air tend à s'écouler vers les vallées plus chaudes.



5) LES PRINCIPAUX VENTS LOCAUX

Appellation	Origine du vent	Situation météo
1 – AUTAN	<i>Sud-Est par effet venturi Entre le massif central et le Massif pyrénéen.</i>	<i>Dépression sur Espagne Anticyclone au Nord-Est</i>
2 – TRAMONTANE	<i>Nord-Ouest par effet venturi Entre le massif central et le Massif pyrénéen.</i>	<i>Dépression sur Allemagne Anticyclone sur Espagne</i>
3 – MISTRAL	<i>Nord par effet venturi Entre le massif central et le Massif alpin.</i>	<i>Dépression à l'est Anticyclone couvrant les 2/3 ouest du pays.</i>
4 – SUD	<i>Sud</i>	<i>Dépression à l'Ouest des côtes Anticyclone centré sur la moitié Est du pays.</i>
5 - BISE	<i>Est / Nord-Est</i>	<i>Anticyclone sur la moitié Nord Dépression sur Golfe de Gêne</i>
6 - SIROCCO	<i>Sud / Sud-Est</i>	<i>Dépression Sud-Est Espagne Anticyclone au Nord-Est Italie</i>



6) LE CUMULONIMBUS

Nuage à grande extension verticale ayant sa base à l'étage inférieur mais qui n'est pas considéré comme un nuage caractéristique de l'étage inférieur car son sommet s'étend souvent jusque dans l'étage moyen ou même supérieur.

Il peut s'élever à plus de 10 km. Il est aussi grand dispensateur d'orages, de pluies ou de grêle, mais aussi générateur de foudre.

L'intérieur de cette formation nuageuse est extrêmement dangereux pour l'aviation car on y rencontre des mouvements verticaux de l'air allant jusqu'à 20 m/s.

Sa présence se manifeste par :

- . Des phénomènes électriques (éclairs, foudre)
- . Des phénomènes acoustiques (tonnerre)
- . Un fort givrage et de la grêle
- . Des turbulences de cisaillement
- . De forts courants descendants qui « éclatent » à proximité du sol (**downburst**)
- . De très fortes ascendances
- . De très fortes précipitations



Le downburst ou rafale descendante

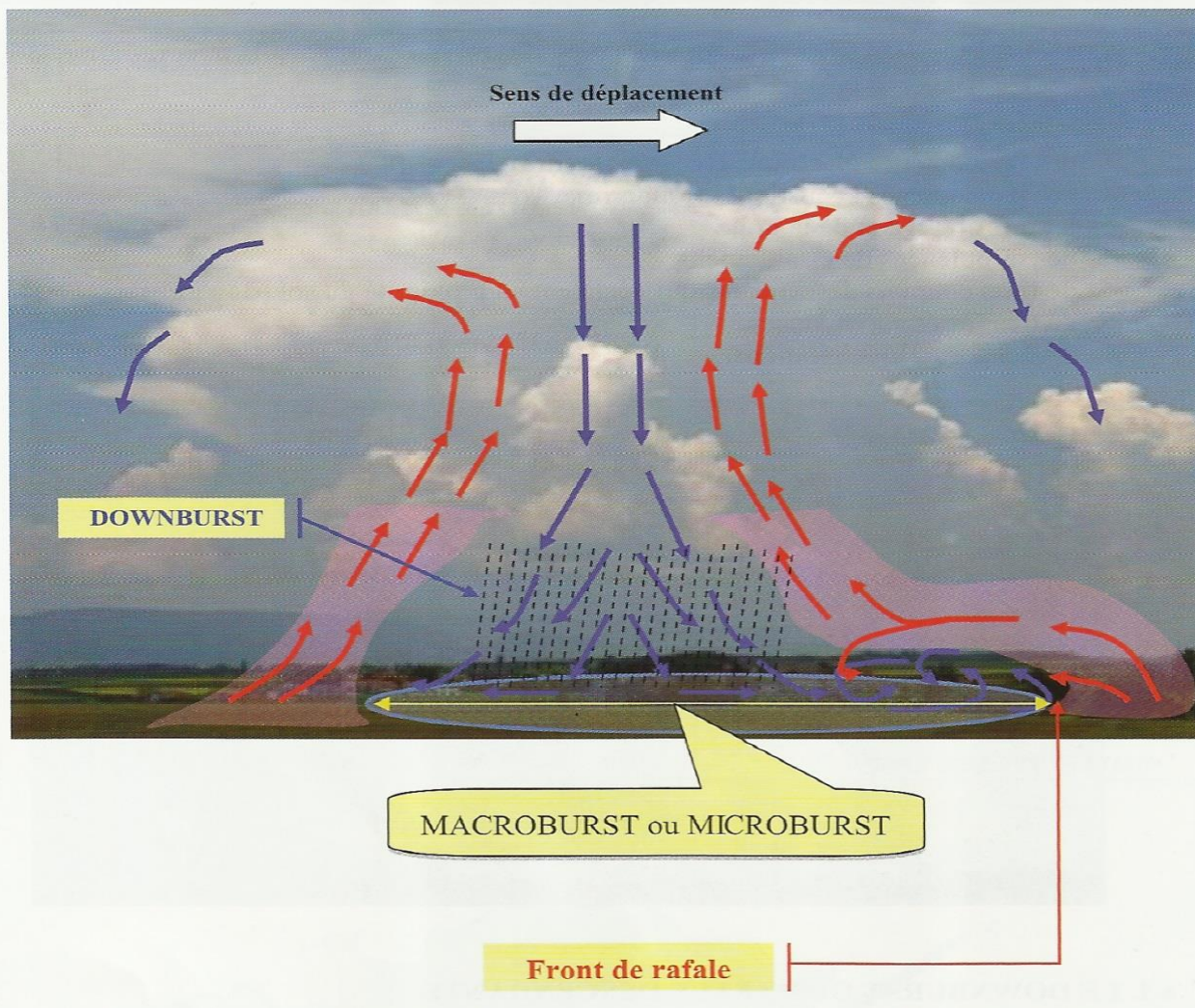
Au cœur d'une cellule orageuse se trouve le siège d'un fort courant descendant qui peut provoquer des vents dévastateurs à proximité du sol.

Ces rabattants sont nommés **downburst** ou rafale descendante et sont suffisamment puissants pour s'étaler à la surface du sol dans toutes les directions, sous forme d'un courant froid et lourd qui s'écoule sous l'air plus chaud et moins dense qui l'entoure. La taille des downbursts peut varier de plusieurs dizaines de kilomètres.

Le gust front ou front de rafale

La bordure extérieure de la rafale descendante, analogue à un front froid de faible épaisseur (quelques centaines de mètres), est appelée **gust front** ou front de rafale.

On y trouve de fortes turbulences de cisaillement tout le long de la surface de séparation entre l'air froid descendant et l'air chaud le surplombant ainsi qu'une rotation du vent de 180°. La vitesse des vents en rafales qui suivent le passage du front de rafale peut être supérieur à 50 kts.



7) EVALUATION

Entre les Pyrénées et le Massif Central, la tramontagne est un vent de secteur :

- A) Nord-Ouest qui souffle dans le Bas-Languedoc et le Roussillon
- B) Nord qui souffle dans la vallée du Rhône
- C) Sud-Est qui souffle dans le Haut-Languedoc
- D) Nord-Est qui souffle entre Genève et Marseille

L'effet de Foehn est un phénomène observé :

- A) lors de conditions de sécheresse climatique
- B) lors de l'inversion brise de mer -brise de terre
- C) lors du passage d'une masse d'air humide sur un relief montagneux
- D) en cas de turbulence atmosphérique sévères

Le soleil chauffe la Terre par rayonnement, la Terre chauffe les basses couches de l'atmosphère principalement par :

- A) isotherme et conduction
- B) conduction et convection
- C) rayonnement et convection
- D) sublimation et rayonnement