

# MANIFESTATIONS VISUELLES, DANS LA NATURE, DU PROFIL DES VITESSES DANS LA COUCHE LIMITE

Version du 15/04/08

Faites-nous part de vos remarques ;  
votre avis nous intéresse !

## 1° Manifestation de la Couche Limite Éolienne dans les rideaux de pluie

Il n'est pas rare d'observer sous les nuages des « rideaux de pluie », formés par le mouvement des gouttes qui descendent vers le sol.

Lorsque la densité de la pluie et les conditions d'éclairement le permettent, on peut remarquer que ces rideaux pluviaux forment des *fronces*.

Ces froncent adoptent souvent une forme « en virgule »<sup>1</sup> :



© Henri Buffetaut

Par l'amabilité de Henri Buffetaut  
Naturalia : <http://phototormenta.canalblog.com/>

Il nous est venu l'idée que cette forme « en virgule » était représentative du profil de la vitesse du vent météo entre le nuage et le sol.

---

<sup>1</sup> Nous verrons que cette dénomination est assez bien venue puisque qu'elle est de la même famille que *virga*, mot désignant un phénomène que nous évoquerons en fin de texte.

Certes, il faut se méfier car ces virgules ne sont que des photographies de l'ensemble des gouttes à un instant donné. On peut très bien imaginer que certaines parties du nuage venant de commencer ou d'achever leur production d'eau, c'est en quelque sorte les *rives* haute ou basse du rideau que l'on a photographié.

Ces extrémités (qui sont souvent être obliques) peuvent donc être prises à tort pour une fronce<sup>2</sup>. Cela pourrait être le cas au-dessus des flèches rouge et bleue ci-dessous :



Par l'amabilité de Henri Buffetaut  
 Naturalia : <http://phototormenta.canalblog.com/>

Il semble qu'il s'agisse ici de deux *fronts* de gouttes de pluie (les fronts des gouttes se ruant vers le sol, c-à-d la face avant d'un train de gouttes).

La flèche et la courbe vertes correspondent au deuxième cas : c'est la *queue* d'un train de gouttes qui doit dessiner ici cette concavité au-dessus d'un rideau d'eau.

Des photos prises quelques secondes après les précédentes auraient d'ailleurs levé le doute sur cette question (puisque les *fronts* haut ou bas des rideaux de pluie se seraient alors nettement rapproché du sol)...

---

<sup>2</sup> Une fronce étant définie ici comme une zone où la densité des gouttes est plus forte qu'ailleurs.

Voici une autre image, où les irrégularités visuelles du rideau de pluie peuvent être appréciées comme des fronts :



Williams Par Williams F.  
: <http://la.climatologie.free.fr>

Nous avons souligné en bleu ce qui semble être le tracé normal d'une virgule, et en vert fluo certains des fronts qui compliquent la lecture de l'image :



Williams Par Williams F. : <http://la.climatologie.free.fr>

En violet est souligné ce qui pourrait être un front haut (la queue d'un train de gouttes). Ce front se raccorde avec la partie basse d'un train de gouttes (en bleu) pour former une courbe très régulière.

Bien sûr, il ne s'agit pas ici pour nous de réfuter les formes de virgules qui ne nous conviennent pas. Il s'agit simplement de montrer que la lecture de la forme

instantanée d'une virgule peut être compliquée par les fronts marquant le début ou la fin de l'approvisionnement en gouttes par le nuage.

Dans cette réflexion sur l'approvisionnement en gouttes, il faut d'ailleurs songer que cet approvisionnement est lié à la densité du nuage : les parties du rideau de pluie situées sous le cœur du nuage en sont opacifiées, et cette opacification interfère sur la lecture de ce que nous avons nommé des virgules ; l'exemple en est la ligne violette ci-dessus, dont on peut penser qu'elle naît naturellement par le fait que le cœur d'un nuage produit plus longtemps des gouttes que ses bords...

Dans ce texte, nous passons également sous silence d'autres phénomènes affectant la forme ou la lisibilité des virgules de pluie : position de l'observateur par rapport au vent déplaçant le nuage, variation angulaire du vent avec l'altitude, etc. : Le phénomène admet évidemment une grande disparité statistique, aussi nous permettons-nous de le simplifier pour en faciliter l'analyse...

Ces simplifications admises, on peut chercher à tracer le jeu de compositions des vitesses qui conduit à la forme en virgule de ces fronces. C'est sur la photo d'Henri Buffetaut présentée plus haut que nous exercerons notre curiosité...

Parce que c'est le mode de réflexion qui nous est apparu le plus simple, nous allons nous livrer à cet exercice en nous appuyant, dans un premier temps, sur un repère lié au nuage.

Dans ce repère-nuage :

→ il n'y a pas de vent en altitude (dans le ciel, les nuages se déplacent à la vitesse du vent météo).

→ c'est le sol qui semble animé d'un mouvement de "tapis roulant" (ici vers la gauche de la photo). Ce mouvement tend à entraîner l'atmosphère dans ce sens et cet effet d'entraînement est d'autant plus efficace que les particules d'air se situent à plus faible altitude : au sol, l'air est ainsi parfaitement entraîné par le sol<sup>3</sup> ; à une plus grande hauteur, par contre, l'air n'est quasiment plus entraîné par le sol<sup>4</sup>...

---

<sup>3</sup> Nous devrions écrire «par les aspérités du sol», bien que même sans aspérité, une Couche Limite s'installe sur toute surface en mouvement relatif. Il n'est pas dans notre projet de revenir ici sur la théorie de la Couche Limite... Voir sur cette question notre texte [Le Cx des fusées](#), cité en fin de celui-ci.

<sup>4</sup> Au sommet de la Couche Limite l'air est animé, par définition, de 1 % de la vitesse de tapis roulant du sol...

Appelons  $U$  la Vitesse Limite de Chute des gouttes de pluie <sup>5</sup>  
 Appelons  $N$  la vitesse de tapis roulant du sol vers la gauche.

On peut alors effectuer la schématisation suivante des différentes compositions de vitesses des gouttes d'eau :



Par l'amabilité de Henri Buffetaut

Dans la partie supérieure de la virgule étudiée ici (et schématisée par une courbe rouge), c-à-d dans sa partie rectiligne verticale, chaque goutte n'est animée que de sa seule la Vitesse Limite verticale <sup>6</sup> : il n'y a pas, en effet, d'entraînement des gouttes par le mouvement du sol vers la gauche.

Arrêtons-nous sur ce point qui met à l'épreuve notre perception de la réalité quotidienne et livrons-nous à une *expérience mentale* :

Supposons qu'à l'occasion d'un voyage en montgolfière, nous décidions de jeter une série de boules les unes après les autres par-dessus le bord de la nacelle (ces boules symbolisant évidemment les gouttes d'eau).

Comme notre montgolfière est très près du plafond de nuage, elle est entraînée à la vitesse de ces nuages, c-à-d à la vitesse du vent ; autrement dit nous ne ressentons à bord de cet aérostat aucun vent relatif.

Remarquons d'ailleurs que, étant entraîné à la même vitesse que le nuage, nous sommes strictement en repère nuage : ce que nous percevons est exactement ce qui est pris en compte dans ce repère...

Après l'abandon à la gravité de la première boule, nous en abandonnons une autre, puis une autre encore.

Que voyons-nous lorsque nous regardons vers le bas ?

<sup>5</sup> Nous considérons ici que le mouvement de ces gouttes peut être caractérisé par un  $\rho SCx$  constant...

<sup>6</sup> Cette Vitesse Limite est une constante, pour autant que la Masse Volumique de l'air et le  $SCx$  de la goutte puissent être considérés comme constants...

Nous ne voyons que la dernière boule que nous avons laissé tomber ! : en effet, comme aucun vent ne se fait sentir autour de notre nacelle, les boules tombent, pour nous, à la verticale du point où nous les avons lâchées, c-à-d en suivant un fil à plomb imaginaire, même si ce fil à plomb avance (nous le savons par notre réflexion) à la vitesse du vent météo qui emporte l'ensemble de l'expérience (boules, montgolfière, fil à plomb et expérimentateur)...

Nous ne faisons d'ailleurs rien d'autre ici que de reproduire l'expérience consistant à faire tomber un objet dans un TGV : pour tous les passagers du train, cet objet tombe à la verticale, même si cette verticale avance à 350 Km/h. Par contre, pour la vache qui observe votre expérience depuis son pré, l'objet décrit une parabole assez proche d'une horizontale...

S'il nous prend de surcroît, toujours dans ce TGV, de laisser tomber plusieurs objets sans vitesse l'un après l'autre (en versant verticalement du sucre dans notre café, par exemple, ou en laissant couler l'eau du lavabo), chacun de nos compagnons de voyage pourra témoigner que les grains du sachet de sucre se sont suivis en dessinant une verticale. De la même façon, le filet d'eau qui tombe du robinet du lavabo a tracé également une verticale.

Pour un observateur extérieur au train, comme la vache déjà évoquée, il y a cependant une petite différence : ces deux verticales existent bien (sous la forme d'un segment de droite, par exemple, pour le filet d'eau), mais elles sont animées d'une vitesse horizontale de 350 Km/h...

Nous venons de démontrer par cette expérience mentale que, pour l'observateur extérieur au repère-nuage qui a pris la photo que nous étudions (cet observateur était en repère-sol), la partie verticale des virgules de pluie existe bien, même si elle est animée d'une vitesse égale au vent météo... <sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> La faible vitesse des nuages, relativement à leur distance et au temps de pose de la photo, fait que le mouvement horizontal de ces parties verticales n'apparaît pas sur les photos...

Reprenons à présent notre analyse de la photo d'Henri Buffetaut, mais en nous intéressant à la deuxième partie de la virgule rouge, la partie courbe qui commence en dessous de la Hauteur de la Couche Limite Terrestre :

Au haut de cette partie courbe, on note l'apparition de  $N_{(y)}$ , composante horizontale de la vitesse des gouttes : cette vitesse est due à l'entraînement des gouttes de pluie par le vent créé par le mouvement de *tapis roulant* du sol vers la gauche<sup>8</sup> : À l'altitude du haut de la Couche Limite, cet entraînement est presque insensible (par définition, l'atmosphère n'y est animée que d'une vitesse égale au centième de la vitesse du tapis roulant).



Par l'amabilité de Henri Buffetaut

Puis, à mesure que l'on descend, la composante  $N_{(y)}$  se fait plus forte ce qui incline peu à peu la résultante des vitesses (et donc la direction du mouvement observé en repère- nuage) vers la gauche.

Au contact avec le sol, la résultante des vitesses est formée à partir de la vitesse de Limite de Chute  $U$  et de la vitesse d'entraînement horizontale  $N_{(y)}$  qui est maximale et égale à la vitesse du *tapis roulant*, à savoir la vitesse des nuages et donc du vent météo...

Cet angle au sol des virgules est calculable d'après la dimension des gouttes de pluie et la force du vent météo.

Inversement, si l'on connaît le vent météo (à l'altitude des nuages), on peut estimer la dimension des gouttes d'après l'angle au sol des virgules : Plus cet angle est faible et plus fines sont les gouttes. C'est ce que l'on doit voir sur une scène d'épandage aérien de produit phytosanitaire...

Pour ce qui est de la vitesse de chute des gouttes d'après leur diamètre, on peut se référer au lien <http://www.astrosurf.com/luxorion/meteo-precipitations.htm> qui en fournit un tableau. Un ordre de grandeur de cette vitesse de chute est cependant

<sup>8</sup> Nous supposons ici que les gouttes réagissent instantanément aux modifications de la composante horizontale du vent. Si l'on affine la réflexion, une étude dynamique (en  $\frac{1}{2}\rho S C_x V^2 = M\gamma$ ) est nécessaire. Mais le résultat en sera peu modifié...

calculable en constatant l'égalité du Poids d'une goutte (supposée sphérique) :  $4/3\pi R^3 \rho_{\text{eau}} g$  avec sa Traînée aérodynamique :  $1/2 \pi R^2 \rho_{\text{air}} C_x V^2$ .

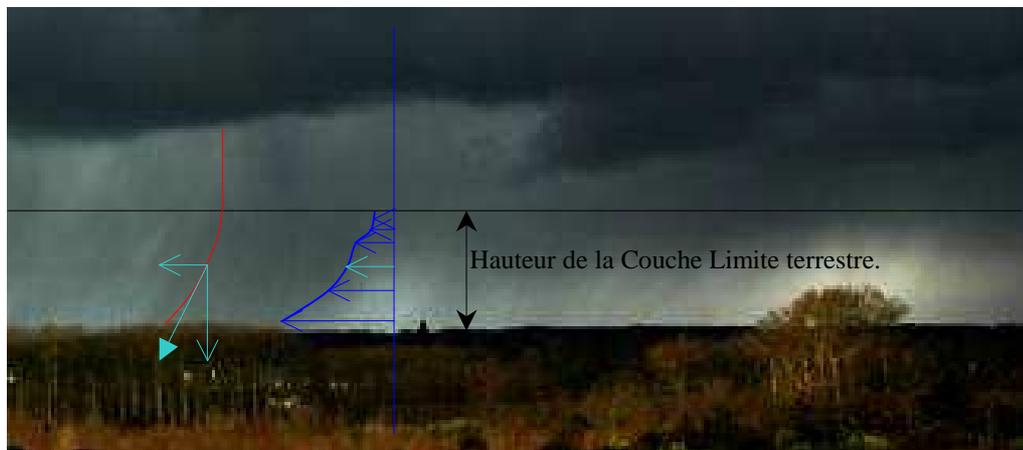
Cette égalité produit alors quelque chose comme  $V = 6,5 \sqrt{R}$ ,  $V$  étant exprimé en **m/s** et  $R$  en **mm**. Les vitesses pronostiquées par cette relation semblent cependant un peu trop rapides si l'on en croit le lien cité à l'instant, surtout pour les petites gouttes qui doivent tomber selon un autre régime que le régime quadratique<sup>9</sup> ou, au moins, en présentant un  $C_x$  plus fort (attaché aux faibles Reynolds)<sup>10</sup>.

### Profil des vitesses dans la Couche Limite Terrestre

Y-a-t'il moyen de passer de la courbe rouge (relatant les combinaisons de vitesses  $N_{(y)}$  et  $U$  des gouttes d'une fronce) au profil des vitesses horizontales dans la Couche Limite terrestre ?

La réponse est positive. Chaque tangente à la courbe rouge ne donnant qu'une seule vitesse horizontale  $N_{(y)}$  ( $U$ , la Vitesse Limite de Chute des gouttes, étant fixe), il est aisé d'en copier le vecteur et de le transporter sur une verticale (c'est le vecteur horizontal bleu clair ci-dessous), en faisant de même pour un certain nombre d'altitude.

Nous l'avons fait ici en utilisant les propriétés de dessin vectoriel de Word<sup>11</sup> :



À titre d'aveux, nous laissons même en évidence l'irrégularité de la courbe bleue. Cette irrégularité est causée par un excès de courbure de la courbe rouge à la même altitude : à sa jonction avec la partie verticale, la partie courbe de la courbe rouge doit évidemment posséder un rayon de courbure extrêmement grand...

<sup>9</sup> Nous voulons dire en  $1/2 \rho S C_x V^2$ ... Il existe en effet un régime linéaire, le régime de Stokes, où la Traînée est proportionnelle à la vitesse...

<sup>10</sup> D'ailleurs l'ordre de grandeur proposé à l'instant fonctionne mieux, pour les diamètres de gouttes de **1 à 5 mm**, si on le base sur un  $C_x$  de **1,2**...

<sup>11</sup> On peut en effet jouer sur la taille horizontale d'une composition type de vitesses.

## **2° Manifestation de la Couche Limite à la surface d'un courant d'eau**

La photo ci-dessous, montrant l'écoulement de l'eau de la Loire le long d'une cale, présente des indications fort intéressantes :



Les petites vaguelettes qui s'éloignent du quai dessinent une courbe qui demeure inchangée tout au long du jour. À l'occasion d'une promenade sur les bords de la Loire, il nous vient l'idée que cette courbe pourrait bien être une représentation du profil des vitesses dans la Couche Limite qui borde le fleuve.

L'image suivante donne les mêmes indices dans une rigole transportant l'eau dans un village des Alpes :



On note que la courbe dessinée par les vaguelettes se rattache à la berge avec un certain angle et que son rayon de courbure devient plus grand à mesure qu'on s'éloigne de la berge (c-à-d que la courbe se rapproche alors d'une droite)...

Est-il possible que nous puissions lire dans le tracé de ces vaguelettes une représentation de la vitesse dans la couche limite en fonction de la distance à la berge ?

Comment la Nature peut-elle révéler ainsi ouvertement un de ses secrets ?

Réfléchissons-y ensemble.

Les vaguelettes qui nous intéressent naissent évidemment des obstacles ou irrégularités de la berge. Elles en sont le *sillage*.

Mais au fait : qu'est-ce qu'un sillage ?

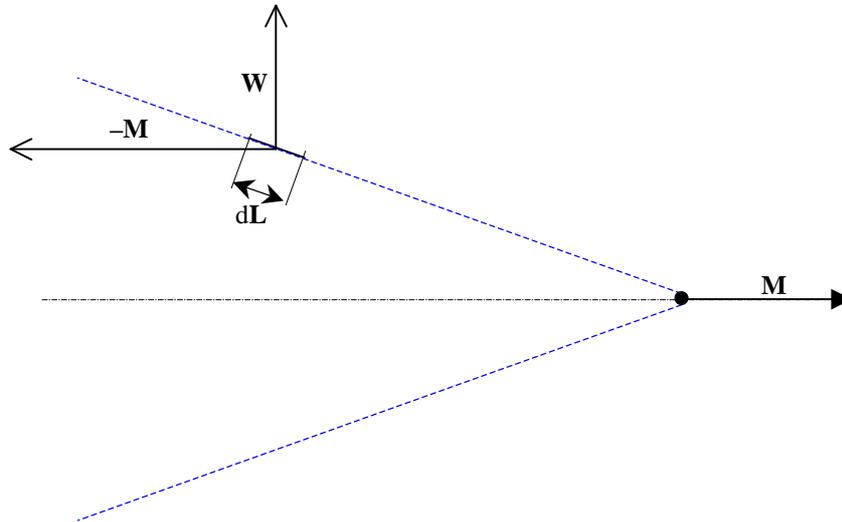
Sans rentrer dans les détails, on peut dire qu'un sillage est l'ensemble de vagues laissé par un navire dans l'eau du fait de son avancement.

Si l'on ne s'intéresse qu'au sillage d'étrave (il y a également un sillage de poupe), on peut remarquer qu'il est constitué de deux vagues symétriques formant un V.

Les physiciens nous assurent que ce V forme un angle au sommet de **39°**.

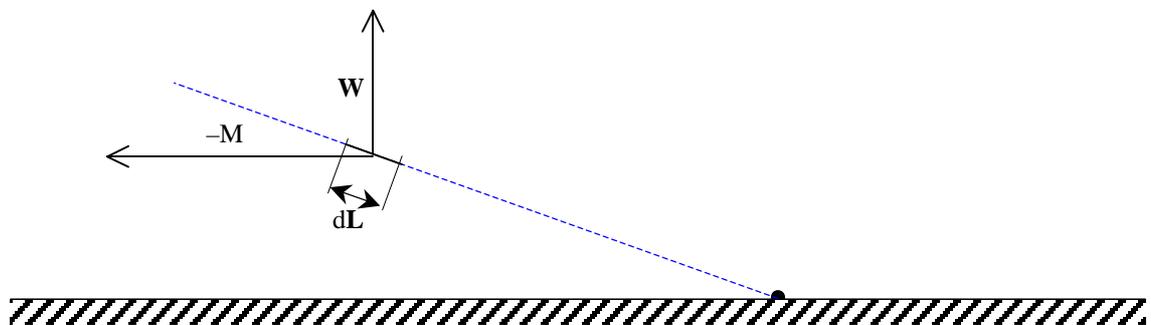
Ceci en pleine eau (au milieu d'un étang, par exemple) (voir à ce sujet l'article consacré aux [sillages](#) sur l'excellent site de sensibilisation à la Science : [Robert in Space](#) ).

De cette définition du sillage, on peut tirer la conclusion qu'une perturbation (celle créée par le périscope d'un sous-marin en plongée, par exemple) génère une vague dont chaque élément de longueur  $dL$  s'éloigne de l'axe du mouvement à une certaine vitesse  $W$  (en pleine eau).



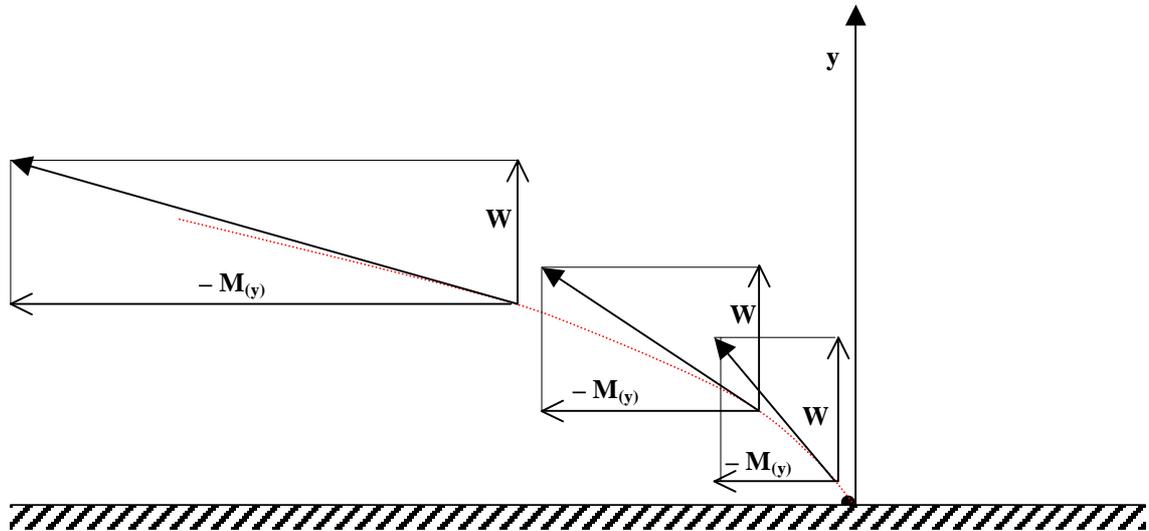
Le périscope avançant pendant ce temps-là à la vitesse  $M$ , le même élément de vague s'en éloigne à la vitesse  $-M$ .

Le même schéma peut être dressé pour une perturbation venant interrompre la continuité d'un quai :



... à ceci près que, si la vitesse d'écoulement de l'eau (la vitesse du courant) est de plus en plus faible à mesure qu'on s'approche du quai (du fait de l'existence de la Couche Limite), la vitesse  $-M$  de propagation de l'élément de vague dans le sens du courant devient variable : nous l'écrivons  $-M_{(y)}$ ,  $y$  étant la distance au quai...

La combinaison de  $-M_{(y)}$  et  $W$  à chaque distance  $y$  dessine alors le schéma suivant :



Il est alors possible de tracer de proche en proche la courbe rouge ci-dessus en s'appuyant sur sa tangente locale formée par la combinaison des vitesses. Si nos hypothèses sont bonnes, cette courbe doit épouser la forme des vaguelettes de nos photographies.

On devrait d'autre part pouvoir constater que, loin du quai, la vaguelette adopte la forme d'une droite, cette droite formant un angle de  $19,5^\circ$  avec la rive (la moitié de  $39^\circ$ ) : la vaguelette de perturbation de rive en cheminant vers le large, est sortie du domaine de la couche limite et la vitesse  $-M_{(y)}$  est alors égale en module à celle du courant (à 1 % près, par définition de la Couche Limite)...

Sur la photo du caniveau de montagne (qui a été prise bien verticalement), cet angle de  $19,5^\circ$  semble bien respecté...

Une deuxième implication de notre analyse est que, la vitesse  $-M_{(y)}$  étant nulle au contact du quai (la couche de fluide la plus proche de la paroi étant adhérente à cette paroi), la courbe rouge est perpendiculaire à ce quai en son origine...

### Manifestation secondaire de la Couche Limite

Virtuellement, on peut s'attendre à ce que la vaguelette née sur une berge prenne, quand elle arrive sur la berge opposée de la rigole, l'inflexion symétrique à celle qu'elle montre à sa naissance, dessinant ainsi la forme d'un **S** :



Nous n'avons pu observer la formation de ces **S** que sur des rigoles de très faible profondeur, comme celle représentée ci-dessus (le mégot donne l'échelle). À la surface de courants d'eau plus importants, il semble qu'en arrivant sur l'autre rive la vaguelette se perde dans les vaguelettes qui s'y forment...

### 3° D'autres manifestations visuelles de la Couche Limite ?

Est-il possible d'observer d'autres témoignages de l'existence de la Couche Limite dans les fluides qui nous environnent ?

Nous l'espérons. Les deux exemples que nous avons présenté ci-dessus sont des exemples de représentation *synoptique*, c-à-d que la représentation de la Couche Limite y est visible en temps réel, instantanément, sous la forme d'une courbe. D'autres révélations synoptiques de la Couche Limite sont sûrement possibles : par exemple, en symétrie avec les rideaux de pluie que nous avons étudiés, une fumée qui monterait dans l'atmosphère avec une vitesse constante dessinerait la courbe que nous avons relevé à la surface des courants d'eau.

Mais les fumées perdant souvent de leur vitesse ascensionnelle en gagnant de l'altitude, on peut songer à les remplacer par des ballons à hélium. Une série de ballons lancés à un rythme constant dessinerait en pointillé la courbe que nous venons de décrire.

Un ballon unique, cependant, s'il était photographié à intervalles réguliers, dessinerait (après montage des photos) les mêmes pointillés...<sup>12</sup>

Dans le but de recréer de façon artificielle l'expérience du rideau de pluie, on pourrait aussi laisser tomber d'une montgolfière une suite de boules de polystyrène, ou mieux de sphères fabriquées en matériaux biodégradables suffisamment légers (idéalement, il conviendrait qu'elles soient dotées de la même Vitesse Limite de Chute)...

La comparaison avec l'abandon à la gravité d'une bruine de farine pourrait être instructive...

Terminons par cette image de *cirrus virga* : Si dans les régions tempérées les virgules de pluie que nous avons étudiées atteignent généralement le sol, au-dessus de certains déserts chauds elles s'évaporent avant de toucher ce sol : elles prennent alors (internationalement) le nom de *virga*, ou plus exactement, au pluriel : *virgae*<sup>13</sup>.

---

<sup>12</sup> Que ce ballon soit unique ou non, il faudra songer à le (ou les) stabiliser aérodynamiquement car il est patent que les ballons piriformes courants font montre d'une grande instabilité aérodynamique, ce qui rend évidemment leur vitesse ascensionnelle très variable...

<sup>13</sup> *Virga* : nom féminin singulier : Traînée de précipitation d'eau liquide ou de glace tombant d'un nuage et s'évaporant avant d'atteindre le sol. Origine : latin signifiant *verge* (au sens de baguette longue et flexible, branche). *Virga* a donné *verge*, *vergue* chez les marins et la *virgule* (petite verge) dont on fait usage en écrivant. Au pluriel, *virga* devient *virgae*.



Par l'amabilité de Laurent Laveder  
Voir son très beau site : <http://www.pixheaven.net/>

Nous sommes ici dans le cas typique des *virgae* : précipitations qui se subliment ou s'évaporent avant d'atteindre le sol.

L'analyse de cette image nous incite à penser que les nuages de glace (cirrus) se déplacent juste au-dessus d'une couche d'air animée d'un mouvement horizontal différent : c'est ce qui fait que la partie verticale de chaque virga est courte et parfois presque absente (le mouvement de friction de la couche d'air sous-jacente aux nuages entraîne très vite les cristaux de glace (les flocons de neige).

Quant à la partie basse des virgae, elle semble acquérir assez vite la forme d'une droite : le quotient de la vitesse de chute des flocons et de la vitesse du vent pourrait en être estimé constant.

Cependant, si l'on retient l'hypothèse que dans cette épaisseur où les virgae présentent un aspect rectiligne la vitesse du vent est constante, on est conduit à penser que, quel que soit l'état de sublimation des flocons de neige, leur Vitesse Limite de Chute Stabilisée est la même : ceci ne laisse pas d'interroger et sur l'évolution des formes des cristaux et sur la validité de l'hypothèse du vent constant dans l'épaisseur de cette couche...

Bernard de [Go Mars !](#) !  
le 05/05/2008

(voir références et liens ci-dessous)

## **RÉFÉRENCES ET LIENS :**

Notre texte *Le Cx des Fusées* qui accorde une bonne place à la notion essentielle de Couche Limite :

[http://perso.numericable.fr/fbouquetbe63/gomars/cx\\_fusees.doc](http://perso.numericable.fr/fbouquetbe63/gomars/cx_fusees.doc)

Définition de la Couche Limite *Planétaire*<sup>14</sup> au lien :

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Couche\\_Limite](http://fr.wikipedia.org/wiki/Couche_Limite)

Voir également au lien :

[http://www.chumtl.qc.ca/userfiles/File/PUBLICATIONS/chum2010/ppp/15\\_rapportCHUM-GCL1610\\_final.pdf](http://www.chumtl.qc.ca/userfiles/File/PUBLICATIONS/chum2010/ppp/15_rapportCHUM-GCL1610_final.pdf)

et sur la vitesse de chute des gouttes de pluie :

<http://www.astrosurf.com/luxorion/meteo-precipitations.htm>

...ainsi que :

[http://www.cig.ensmp.fr/~iahs/hsj/300/hysj\\_30\\_03\\_0361.pdf](http://www.cig.ensmp.fr/~iahs/hsj/300/hysj_30_03_0361.pdf)

15

---

<sup>14</sup> À une époque où l'on découvre une planète extra solaire par jour, il serait préférable d'appeler *terrestre* cette couche limite, ceci afin de la différencier de toutes celles que l'humanité sera amenée à analyser dans le futur...

<sup>15</sup> Il semble cependant qu'il y ait ici disparition d'un facteur 2 du à l'escamotage (fréquent chez certains profs de physique) du  $\frac{1}{2}$  dans le produit  $\frac{1}{2} \rho V^2$ , le  $\frac{1}{2}$  étant alors intégré dans le Cx, ce que ne font jamais les aérodynamiciens dans les travaux desquels les mêmes professeurs de physique vont puiser leur Cx... À vérifier.