

Vent, courant, caps, vitesses et routes

Olivier Parodi
olivier.parodi@gmail.com

Démons et merveilles
Vents et marées

...

J. Prévert

1 Introduction

On trouve trop souvent, dans des articles ou dans des contributions à des forums dédiés à la navigation à voile, dans les notices d'instruments, ou même dans l'excellent fichier d'aide de ScanNav^[1], des confusions entre les différents caps et routes, entre la vitesse surface et la vitesse fond, entre le vent apparent, le vent surface et le vent réel. Avec la généralisation des calculs sur ordinateurs qui remplacent de plus en plus les diagrammes dessinés sur un coin de carte avec la règle de Cras et le compas, ces confusions peuvent donner lieu à des erreurs dans les algorithmes permettant de calculer les uns au moyen des autres. C'est pourquoi il m'a semblé utile de faire cette brève revue des diverses grandeurs utilisées dans ces calculs.

Je rappellerai donc dans un premier temps les définitions plus ou moins bien connues de ces différentes grandeurs^[2, 3], et les relations vectorielles les liant. Je donnerai ensuite, pour les lecteurs que cela intéresse, les expressions mathématiques permettant de calculer les unes à partir des autres, d'abord pour des calculs de navigation, où l'on dispose des données fournies par les instruments, puis pour des calculs de routage, où l'on travaille avec des données prévisionnelles.

2 Définitions générales

2.1 Les caps

Cap vrai. Le cap vrai, C_v , est l'angle entre le Nord géographique et la ligne de foi du navire, compté à partir du Nord vers l'Est, de 0° à 360° .

Cap magnétique. Le cap magnétique, C_m , est l'angle entre le Nord magnétique et la ligne de foi du navire, compté à partir du Nord vers l'Est

de 0° à 360° . Il est relié au cap vrai par la relation

$$C_v = C_m + D, \quad (1)$$

où D est la *déclinaison magnétique*, comptée positive vers l'Est, négative vers l'Ouest, du Nord géographique vers le Nord magnétique.

2.1.1 Cap compas.

Le cap compas, C_c , est l'angle entre le Nord du compas et la ligne de foi du navire, compté à partir du Nord vers l'Est, de 0° à 360° . Il est relié aux caps magnétique et vrai par les relations

$$C_m = C_c + d, \quad (2)$$

$$C_v = C_c + W, \quad (3)$$

où la variation W est la somme de la déclinaison D et de la déviation d , qui traduit, elle, l'influence des masses magnétiques du bateau sur le compas. On montre assez facilement que d est de la forme

$$d = d_{11} \cos C_c + d_{12} \sin C_c + d_{21} \cos 2C_c + d_{22} \sin 2C_c.$$

2.2 Routes et vitesses

En raison de la dérive et des courants, les routes suivies, sur la surface ou sur le fond, diffèrent des caps définis plus haut. Le plus simple est de considérer les vecteurs-vitesse, caractérisant la trajectoire du bateau, par rapport à un repère lié soit à la surface de l'eau, soit au fond. On parlera dans le premier cas de vecteur vitesse surface, \vec{U}_s , et dans le second de vecteur vitesse fond, \vec{U}_f . Les angles entre le Nord géographique et la direction de chacun de ces vecteurs (leurs azimuths), comptés toujours vers l'Est de 0 à 360° , définissent respectivement la **route surface**, R_s et la **route fond**, R_f , tandis que que les longueurs (normes) de ces vecteurs définissent la **vitesse surface**, V_s et la **vitesse fond**, V_f .

La route surface est reliée au cap vrai par la relation

$$R_s = C_v + \delta, \quad (4)$$

où la dérive δ est comptée positive (vers l'Est) pour un bateau bâbord amure, négative (vers l'Ouest) pour un bateau tribord amure.

La relation entre le vecteur vitesse fond et le vecteur vitesse surface fait intervenir le vecteur courant \vec{C} , caractérisé par la vitesse du courant, V_c et par son azimuth, Z_c :

$$\vec{U}_f = \vec{U}_s + \vec{C}. \quad (5)$$

Pour faciliter la compréhension de ce qui suit, il faut ajouter à ces définitions classiques celle d'une **vitesse apparente**, \vec{U}_a , de valeur V_s dirigée suivant l'axe du bateau. Elle se déduit de \vec{U}_s par une rotation d'angle δ (voir fig. 1).

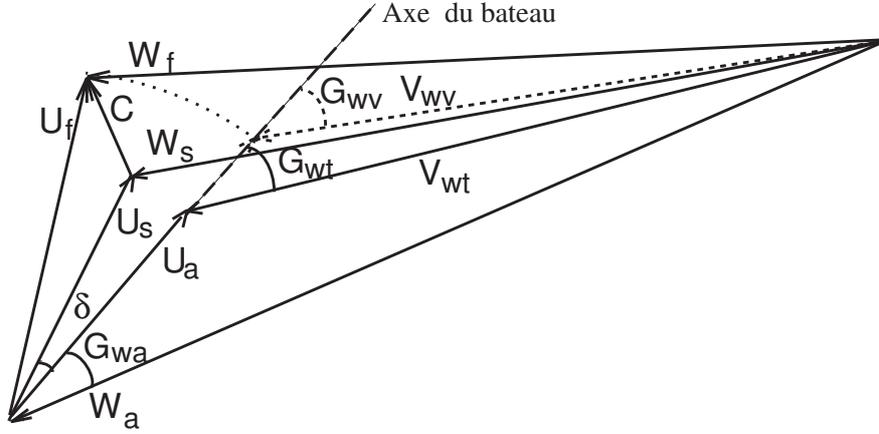


FIG. 1 – Les différents vecteurs vent. On voit que sous l’effet de la dérive et du courant un vent apparent très pointu peut correspondre à un vent réel beaucoup moins serré, et à une faible remontée par rapport au vent réel. L’autre bord donnerait une vitesse fond plus faible, mais finalement une meilleure remontée. La construction en pointillé donne le gisement et la vitesse du “vent vrai” W_v de ScanNav.

2.3 Les vents

Pour le vent, il va falloir travailler avec trois repères distincts, liés au fond, à la surface et au bateau. Par rapport au fond, on aura un **vent réel** caractérisé par un vecteur **vent fond** \vec{W}_f d’azimuth Z_{wf} et de longueur V_{wf} . On définira de même un **vent surface** $\vec{W}_s(Z_{ws}, V_{ws})$ et un **vent apparent** $C(Z_{wa}, V_{wa})$ (notons que Z_w , azimuth d’un vecteur vent, diffère de 180° de D_w , direction d’où vient ce vent).

Le vent réel est celui de la météo, indépendant du courant, celui que pourrait mesurer un gardien de phare. Le vent surface est celui dont il faut tenir compte pour calculer ses virements de bord, et le vent apparent est celui que l’on peut mesurer à bord. On ne mesure d’ailleurs pas directement son azimuth, Z_{wa} , mais son gisement G_{wa} , angle (compris entre -180° et 180°) entre l’axe du bateau et la direction d’où provient le vent. G_{wa} est relié à Z_{wa} par la relation

$$G_{wa} = D_{wa} - C_v = Z_{wa} - C_v \pm 180^\circ. \quad (6)$$

Les différents vecteurs vent sont reliés entre eux par les relations suivantes :

$$\vec{W}_f = \vec{W}_s + \vec{C}, \quad (7)$$

$$\vec{W}_f = \vec{W}_a + \vec{U}_f, \quad (8)$$

$$\vec{W}_s = \vec{W}_a + \vec{U}_s. \quad (9)$$

Il faut encore ajouter pour être complet, un **vent vrai**. Ce terme est en fait utilisé pour deux vecteurs différents :

1. Le vecteur $\vec{W}_t(G_{wt}, V_{wt})$, celui donné par une girouette-anémomètre interfacée à un speedomètre, et qui est relié au vent apparent par la relation

$$\vec{W}_t = \vec{W}_a + \vec{U}_a, \quad (10)$$

est utilisé par ScanNav^[1], sous le nom de “vent surface”, et ne coïnciderait avec le vent surface que si la dérive était nulle (voir fig. 1).

2. le vecteur $\vec{W}_v(G_{wv}, V_{wv})$ obtenu à partir de la vitesse fond :

$$\vec{W}_v = \vec{W}_a + (V_f/V_s)\vec{U}_a. \quad (11)$$

utilisé par ScanNav sous les nom de “vent vrai” ou de “vent réel”.

La considération du vent surface n’est pas indifférente. En Manche, où le courant de marée porte alternativement à l’Ouest et à l’Est, si on doit remonter un vent de Sud-Ouest, le courant fera adonner le vent surface pour un bord vers l’Ouest quand il porte à l’Est, et pour un bord vers le Sud quand il porte à l’Ouest, ce qui peut être important quand on court Cowes-Dinard, par exemple. Il peut aussi gonfler les voiles par vent faible et déterminer le sens dans lequel on fera une balade de la journée. Il diffère facilement d’une force de vent du vent réel et permet au courant d’aplatir la mer ou au contraire de la renforcer dans les raz.

3 Calculs de navigation

3.1 Relations mathématiques

Elles sont basées sur les relations suivantes, dans un triangle ABC de côtés a, b, c (Fig. 2)

$$A + B + C = 180^\circ, \quad (12)$$

$$\frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C}, \quad (13)$$

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos A, \quad (14)$$

et sur les deux relations déduites de l’équation (14) par permutation circulaire des côtés et des angles. Une troisième équation se déduit des équations (13) :

$$\frac{a-b}{a+b} = \frac{\tan\left(\frac{A-B}{2}\right)}{\tan\left(\frac{A+B}{2}\right)}. \quad (15)$$

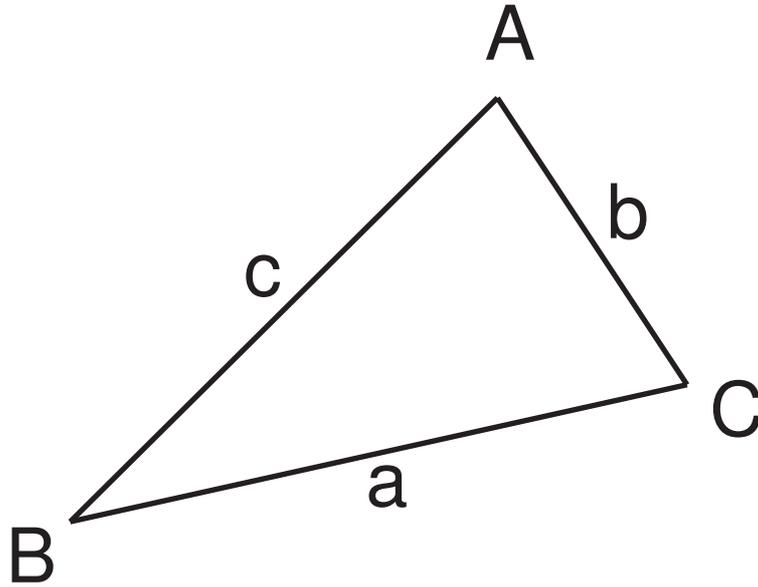


FIG. 2 – Triangle ABC et notations utilisées.

Finalement, à partir des équations (12) et (15), on obtient facilement

$$A = 90^\circ - \frac{C}{2} + \arctan \left(\frac{a-b}{a+b} \cot \frac{C}{2} \right), \quad (16)$$

où la fonction arc-tangente varie de -90° à $+90^\circ$, ce qui peut conduire à des discontinuités si son argument varie autour de $\pm 90^\circ$. Il faut alors, comme nous le ferons plus loin, utiliser la fonction échelon ou fonction de Heaviside

$$H(x) = \frac{1 + \text{Signe}(x)}{2} = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0, \\ 0.5 & \text{si } x = 0, \\ 1 & \text{si } x > 0, \end{cases} \quad (17)$$

et poser que par définition,

$$\arctan(\lambda \tan(\pm 90^\circ)) = \arctan(\lambda \cot(0^\circ)) = 0,$$

où λ est un nombre réel quelconque, positif, négatif ou nul.

3.2 Calculs de vitesse

3.2.1 Calcul de la vitesse fond

Avant la mesure directe de la vitesse fond par les GPS, il était important de pouvoir calculer la vitesse fond, connaissant la vitesse surface, le cap vrai, la dérive et le courant. Cette détermination a maintenant perdu de son intérêt. On trouvera néanmoins ci-dessous les relations correspondantes, déduites de l'équation (5) :

$$V_f = \sqrt{V_s^2 + V_c^2 + 2V_sV_c \cos(R_s - Z_c)}, \quad (18)$$

$$R_f = \frac{R_s + Z_c}{2} + \arctan\left(\frac{V_s - V_c}{V_s + V_c} \tan\left(\frac{R_s - Z_c}{2}\right)\right) + \text{Signe}((V_s - V_c)(R_s - Z_c))H(|R_s - Z_c| - 180^\circ) \times 180^\circ, \quad (19)$$

formule qui a l'avantage de ne pas nécessiter le calcul préalable de V_f , et dont le résultat est compris entre 0 et 360°.

3.2.2 Calcul du cap à suivre

On a souvent besoin, connaissant la vitesse surface et le courant, de calculer le cap à prendre pour suivre une route fond déterminée, soit pour les routages, soit, en navigation, pour prévoir le cap à donner au barreur après le waypoint qui s'approche. On calculera en même temps la vitesse fond correspondant à ce cap. L'équation (5) n'a une solution que si

$$V_s > V_c \sin(|R_f - Z_c|). \quad (20)$$

On obtient alors

$$R_s = R_f + \arcsin\left(\frac{V_c}{V_s} \sin(R_f - Z_c)\right). \quad (21)$$

Notons ici que le problème géométrique admet deux solutions, mais que la bonne, celle qui ne tourne pas le dos au but, est celle pour laquelle \vec{U}_s fait un angle aigu avec \vec{U}_f . La définition de l'arc-sinus, entre -90° et $+90^\circ$ assure que l'on a bien cette solution. Le cap compas est donné par

$$C_c = \left\{ R_f - \delta - W + \arcsin\left(\frac{V_c}{V_s} \sin(R_f - Z_c)\right) \right\} \bmod 360^\circ, \quad (22)$$

où $\bmod 360^\circ$ signifie que l'on ajoute ou retranche 360° jusqu'à ce que C_c soit compris entre 0 et 360° , et la vitesse fond par

$$V_f = V_c \cos(R_f - Z_c) + \sqrt{V_s^2 - V_c^2 \sin^2(R_f - Z_c)}. \quad (23)$$

3.2.3 Calcul de la dérive

L'équation (22) permet également de calculer la dérive à partir du cap compas si on connaît le courant, la vitesse fond, la route fond et la vitesse surface, ce que permettent facilement maintenant GPS et centrales de navigation :

$$\delta = R_f - C_c - W + \arcsin\left(\frac{V_c}{V_s} \sin(R_f - Z_c)\right). \quad (24)$$

3.2.4 Calcul du courant

Si au contraire on connaît la dérive, on peut calculer le courant à partir des équations (4) et (5) :

$$R_s = C_c - W - \delta, \quad (25)$$

$$V_c = \sqrt{V_s^2 + V_f^2 - 2V_f V_s \cos(R_s - R_f)}, \quad (26)$$

$$Z_c = \frac{R_s + R_f}{2} - \text{Signe}(R_s - R_f) \times 90^\circ - \arctan\left(\frac{V_s - V_f}{V_s + V_f} \cot\left(\frac{R_s - R_f}{2}\right)\right). \quad (27)$$

3.3 Calculs de vents

3.3.1 Vents vrais.

Nous avons vu plus haut (paragraphe 2.3) que cette appellation désigne, suivant les auteurs, deux vecteurs différents :

1. Celui donné par les centrales de navigation ou obtenu en interfaçant la girouette avec le speedomètre (equ. (10)). C'est également celui utilisé par ScanNav^[1] sous l'appellation de "vent surface" :

$$V_{wv} = \sqrt{V_s^2 + V_{wa}^2 - 2V_s V_{wa} \cos G_{wa}}, \quad (28)$$

$$G_{wv} = \frac{G_{wa}}{2} + \text{Signe}(G_{wa}) \times 90^\circ - \arctan\left(\frac{V_{wa} - V_s}{V_{wa} + V_s} \cot\left(\frac{G_{wa}}{2}\right)\right). \quad (29)$$

2. Celui utilisé par ScanNav sous l'appellation de "vent vrai" (equ. (11)) :

$$V_{wv} = \sqrt{V_f^2 + V_{wa}^2 - 2V_f V_{wa} \cos G_{wa}}, \quad (30)$$

$$G_{wv} = \frac{G_{wa}}{2} + \text{Signe}(G_{wa}) \times 90^\circ - \arctan\left(\frac{V_{wa} - V_f}{V_{wa} + V_f} \cot\left(\frac{G_{wa}}{2}\right)\right). \quad (31)$$

Ce vecteur ne coïncide avec le vecteur vent fond que si le courant et la dérive sont nuls (voir fig.(1)).

3.3.2 Vent surface.

Le calcul est analogue, mais à partir de la route surface, R_s (équation (9)) :

$$V_{ws} = \sqrt{V_s^2 + V_{wa}^2 - 2V_sV_{wa} \cos(G_{wa} + \delta)} \quad , \quad (32)$$

$$G_{ws} = \frac{G_{wa} - \delta}{2} + \text{Signe}(G_{wa} - \delta) \times 90^\circ - \arctan\left(\frac{V_{wa} - V_s}{V_{wa} + V_s} \cot\left(\frac{G_{wa} - \delta}{2}\right)\right) \quad , \quad (33)$$

$$D_{ws} = (C_v + \delta + G_{ws}) \bmod 360^\circ \quad . \quad (34)$$

La comparaison entre les équations (29) et (33) fait bien apparaître le rôle de la dérive. G_{wa} et δ ont toujours des signes opposés, si bien que l'angle réel de remontée par rapport au vent surface est moins bon que celui donné par le "vent vrai".

3.3.3 Vent fond.

Cette fois-ci, il faut faire le calcul à partir de la route-fond (équation (8)). Introduisons l'angle φ entre la route fond et la direction du vent apparent. On obtient :

$$\varphi = R_s - R_f - \delta + G_{wa} \quad , \quad (35)$$

$$V_{wf} = \sqrt{V_f^2 + V_{wa}^2 - 2V_fV_{wa} \cos \varphi} \quad , \quad (36)$$

$$G_{wf} = \frac{\varphi}{2} + \text{Signe}(\varphi) \times 90^\circ - \arctan\left(\frac{V_{wa} - V_f}{V_{wa} + V_f} \cot\left(\frac{\varphi}{2}\right)\right) \quad , \quad (37)$$

$$D_{wf} = (R_f + G_{wf}) \bmod 360^\circ \quad . \quad (38)$$

4 Calculs de routage

4.1 Vent surface

C'est la première chose à calculer. On connaît (ou du moins on le prévoit) le vent réel, \vec{W}_f et le courant \vec{C} et il nous faut calculer \vec{V}_s à partir de l'équation (7). Le calcul est analogue à celui du paragraphe 3.2.1 :

$$V_{ws} = \sqrt{V_{wf}^2 + V_c^2 + 2V_{wf}V_c \cos(D_{wf} - Z_c)} \quad , \quad (39)$$

$$D_{ws} = \frac{D_{wf} + Z_c}{2} + \arctan\left(\frac{V_{wf} - V_c}{V_{wf} + V_c} \tan\left(\frac{D_{wf} - Z_c}{2}\right)\right) + \\ + \text{Signe}((V_{wf} - V_c)(D_{wf} - Z_c))H(|D_{wf} - Z_c| - 180^\circ) \times 180^\circ \quad (40)$$

où D_{wf} et D_{ws} sont les directions d'où viennent respectivement le vent réel et le vent surface, comptées comme d'habitude de 0° à 360° à partir du Nord géographique.

4.2 Route surface

Connaissant le vent surface, on peut en déduire, en première approximation, une vitesse surface, puis, à partir de la route fond désirée, une route surface (voir paragraphe 3.2.2). On calculera ensuite, à partir de ces éléments, une première estimation du vent apparent (voir paragraphe 4.3). Les polaires de vitesse et de dérive permettront de raffiner le calcul précédent par une seconde itération. Une troisième itération devrait amener à un résultat satisfaisant.

4.3 Vent apparent

Le calcul est tout à fait analogue à celui du paragraphe 4.1. On trouve, à partir de l'équation (9) :

$$V_{wa} = \sqrt{V_{ws}^2 + V_s^2 + 2V_{ws}V_s \cos(D_{ws} - R_s)} \quad , \quad (41)$$

$$D_{wa} = \frac{D_{ws} + R_s}{2} + \arctan\left(\frac{V_{ws} - V_s}{V_{ws} + V_s} \tan\left(\frac{D_{ws} - R_s}{2}\right)\right) + \\ + \text{Signe}((V_{ws} - V_s)(D_{ws} - R_s))H(|D_{ws} - R_s| - 180^\circ) \times 180^\circ \quad (42)$$

$$G_{wa} = D_{wa} - R_s - \delta \quad (43)$$

5 En guise de conclusion

On voit que le calcul complet du vent réel demande la connaissance de deux des trois éléments suivants : courant, cap vrai et dérive. Le courant peut être donné avec une bonne approximation par des atlas ou des fichiers de courants, et le cap compas par un compas électronique. Encore faut-il connaître la courbe de déviation. ScanNav^[1] ne permet pas encore d'en entrer les éléments, de même qu'il ne permet pas à ceux qui ne disposent pas

d'un compas électronique d'entrer à la main le cap compas où le cap vrai. Mieux vaut pour le moment un logiciel séparé, avec un système de ports virtuels, par exemple GPSGate^[4], permettant de bénéficier, en même temps que ScanNav, des informations en provenance des instruments.

Remarquons que les choses se simplifient un peu en l'absence de courant : vent fond et vent surface, route fond et route surface se confondent. Au portant, où la dérive est nulle, le "vent vrai" des instruments se confond avec le vent réel, mais par contre, au près, il faut toujours tenir compte de la dérive, qui entache d'optimisme les indications des instruments. On comprend alors pourquoi les traces GPS donnent des angles entre bords moins aigus que ce que faisaient prévoir les instruments, et à quel point il est illusoire de vouloir trop serrer le vent : la portance de la quille, qui limite la dérive, croît comme le carré de la vitesse, et le gain en cap obtenu est vite compensé par l'augmentation de la dérive due à la diminution de la vitesse.

Il est néanmoins bon de garder à l'esprit que l'informatique, si précieuse par ailleurs, ne peut traiter que les informations dont elle dispose, et que des données incomplètes ne peuvent mener qu'à des résultats imparfaits. Comme disent nos amis d'Outre-Manche, *when you ask a silly question, you get a silly answer*. Gardons donc un œil critique sur les réponses de nos instruments.

Une dernière remarque : dans les sections 3.2, 3.3 et 4, j'ai donné les expressions explicites pour les vitesses et pour les gisements, routes et caps. Dans tous les cas, à l'exception de celui du paragraphe 3.2.2, le résultat s'obtient très facilement à partir des équations vectorielles (5) et (7–10). Ces équations s'implémentent facilement dans un programme, par exemple, en C++, en définissant une classe de vecteurs à 2 dimensions – définis par leurs coordonnées cartésiennes – dotée des opérations usuelles des espaces vectoriels (addition, soustraction, multiplication par un scalaire), et des fonctions permettant le calcul de leur valeur (norme) et de leur azimuth. On évite ainsi les problèmes liés aux discontinuités dans la définition de l'arc-tangente.

Références

- [1] Marc LOMBARD, *ScanNav*, <http://www.scannav.com>
- [2] *Code Vagon de la Mer – Permis hauturier*, Les Editions du Plaisancier, 2002
- [3] *Le Cours des Glénans*, Seuil, 1990
- [4] Franson *GPSGate* <http://franson.com>