

The Closest Point of Approach (CPA). De la théorie à la pratique.

Annaig Labornez¹

Le marché de l'AIS est considérable pour les bateaux de moins de 300 t pour lesquels l'équipement selon la norme A n'est pas obligatoire. L'usage de l'AIS B, aux normes moins contraignantes, se généralise et touche la plaisance. Les prix des récepteurs-émetteurs AIS chutent rapidement, ils intègrent le plus souvent un dispositif anticollision. Cette dissémination de l'équipement AIS ne devrait pas s'accompagner d'une perte chez les plaisanciers de notions fondamentales de navigation. Parmi celles ci, le CPA, *the closest point of approach*, est la notion centrale des dispositifs anticollision. Un peu de théorie vous permettra peut-être de ne pas paniquer si les circonstances ne s'accordent pas avec les prévisions. Un fil récent sur le site *parlons-bateau* montre que cette démarche est partagée; aussi j'espère que le lecteur sera sensible à l'effort didactique de la note et qu'il voudra bien pardonner ses imperfections..

Wikipedia donne comme définition du CPA²: *point estimé où la distance entre deux mobiles (dont au moins l'un est en mouvement) atteindra sa valeur minimale sera appelé CPA. Cette estimation est utilisé pour évaluer le risque de collision de deux navires.*
[remarquons que cette définition précise bien qu'il s'agit d'un point estimé]

Notations, unités hors système. Les vecteurs sont notés en caractères gras. Le mile nautique, une unité hors système, sera noté nM et non pas nm pour éviter la confusion avec le nanomètre. Les vitesses seront exprimées en nM.h⁻¹ (mile nautique par heure, nautical mile per hour).

Les bases de l'algorithme

Soit \mathbf{PA}_0 et \mathbf{PB}_0 les positions des mobiles des navires A et B au temps zéro, $\mathbf{W}_0(\rho_0, \theta)$ le vecteur distance entre A et B, \mathbf{U} et \mathbf{V} les vecteurs vitesse de A et de B; $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$, les vecteurs unitaires sur les trois axes (voir figure 1) tel que $\mathbf{W}_0 = \rho_0 \mathbf{i}$; $\mathbf{U} = U \mathbf{j}$; $\mathbf{V} = V \mathbf{k}$

Au temps t, on aura

$$\begin{aligned}\mathbf{PA}(t) &= \mathbf{PA}_0 + \mathbf{U} . t \\ \mathbf{PB}(t) &= \mathbf{PB}_0 + \mathbf{V} . t\end{aligned}$$

La distance entre les navires $\mathbf{W} = \mathbf{PA}(t) - \mathbf{PB}(t) = \rho_0 \mathbf{i} + (\mathbf{U} - \mathbf{V}) t$

Pour chercher le minimum, on prendra la fonction quadratique car $\mathbf{W}^2 = W^2$
Le carré du module s'écrira

$$W^2 = (\mathbf{U} - \mathbf{V})^2 . t^2 + 2 \mathbf{W}_0 . (\mathbf{U} - \mathbf{V}) . t + \mathbf{W}_0^2$$

Le minimum sera obtenu quand la dérivée s'annule³:

soit $(d W^2 / dt)_{t_{cpa}} = 0$ ou encore $(\mathbf{U} - \mathbf{V})^2 . 2t + 2 \mathbf{W}_0 (\mathbf{U} - \mathbf{V}) = 0$

on obtient le temps $t_{cpa} = - \mathbf{W}_0 (\mathbf{U} - \mathbf{V}) / (\mathbf{U} - \mathbf{V})^2$ (1)

Si $\mathbf{U} - \mathbf{V} \rightarrow 0$, alors $t \rightarrow \infty$. A et B se déplacent parallèlement à la même vitesse; ils ne se rejoindront jamais.

¹ Amicale des plaisanciers de Clocher-les-Bécasses. 29 001; annaig.labornez@orange.fr

² Une traduction de CPA par point de cheminement le plus proche semble s'imposer.

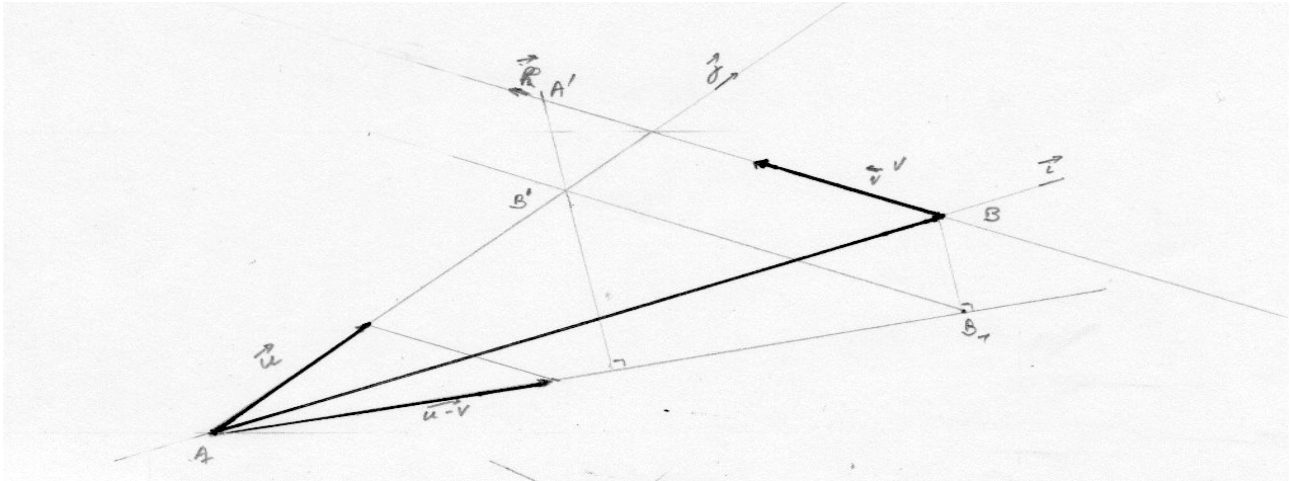
³ NB. Dans la dérivation du CPA, on notera que $\mathbf{U} - \mathbf{V}$ est supposé être indépendant du temps, c'est à dire que vitesses et caps suivis restent constants. (Voir plus loin) C'est la situation rencontrée pour le croisement de navires, mais on rencontre des situations où l'on cherche à établir la position du CPA pour des déplacements non rectilignes comme ceux des tempêtes tropicales. On sait que la trajectoire sera infléchiée sur sa droite (hémisphère nord) par les forces de Coriolis. La prévision du CPA est essentielle pour la sécurité des îles antillaises ou pour dérouter un navire de l'œil du cyclone.

$(dW^2/dt)_{cpa} = 0$ peut aussi être dérivée autrement soit $2 \mathbf{W} \cdot \mathbf{W}' = 0$ ou $\mathbf{W}_{cpa} \cdot (\mathbf{U} - \mathbf{V}) = 0$ (2)

Ce produit scalaire s'annulera au CPA, le vecteur \mathbf{W} sera alors perpendiculaire à $\mathbf{U} - \mathbf{V}$. Ceci constitue une propriété remarquable du point de cheminement le plus proche. Un cas particulier bien connu est quand A croise un amer (fixe, donc $\mathbf{V} = 0$), alors le produit scalaire $\mathbf{W}_{cpa} \cdot \mathbf{U} = 0$. Le point de cheminement le plus proche de l'amer sera obtenu en abaissant la perpendiculaire de la position de l'amer sur la route suivie.

Une construction géométrique simple.

Fig 1 Le système des trois vecteurs;



La remarque précédente permet d'introduire le mouvement relatif des mobiles A et B. Dans le référentiel B, B sera immobile et A se déplacera à une vitesse $\mathbf{U} - \mathbf{V}$. La construction géométrique est alors:

calculer la position de B en coordonnées polaires, la reporter, tracer les vecteurs \mathbf{AB} , \mathbf{U} , \mathbf{V}
tracer la droite orientée support du vecteur $\mathbf{U} - \mathbf{V}$
abaissier la perpendiculaire du point B sur cette droite. Soit B_1 le pied
déduire la position réelle par translation de BB_1 . Pour ceci, mener une parallèle à Bk passant par B_1 ; elle coupe Aj en A' , position du navire A au CPA. Compte tenu de la condition d'orthogonalité énoncée antérieurement, la position B' du navire B au CPA sera obtenue en menant la droite perpendiculaire à $\mathbf{U} - \mathbf{V}$ passant par A' , l'intersection (B') avec Bk positionne le navire B au point de CPA.

Le segment $A'B'$ représente la distance entre les navires A et B au CPA.

Travaux pratiques

Vous allez sur le site marinetraffic.com où apparaissent, en temps réel, les données AIS des navires en transit et vous prenez le commandement du ferry allant de Cherbourg à Portsmouth qui traverse le rail montant et le rail descendant. Vous avez la matière, d'après les données de la Préfecture Maritime de la Manche, ce sont 250 navires qui transitent en moyenne par jour dans le Pas de Calais Si vous réussissez ce test en moins de 5 minutes, par mer forte et non pas dans le cocon de votre bureau, bravo !, vous êtes un virtuose de la règle de Cras et bon pour postuler à un poste de « plotter-fitter » à la passerelle d'un bateau gris de la Marine Nationale.

Si vous êtes un plaisancier moyen, incapable de soutenir la cadence, il vous reste la consolation de disposer ainsi d'une construction géométrique satisfaisante pour l'esprit et vous vous en remettez au calculateur pour faire le job.

Variations sur le thème.

A partir de l'algorithme, on va calculer la distance entre A et B au CPA, c'est ce que nous venons de faire graphiquement, puis introduire une alarme qui nous avertira si cette distance est inférieure ou égale à un périmètre de sécurité prédéfini par l'utilisateur..

Les informaticiens, il faut bien gagner sa croute, vont compliquer les choses pour en faire une usine à gaz en introduisant un facteur de risque, une fonction linéaire de divers paramètres pondérés tenant compte de la manœuvrabilité, de l'énergie cinétique des navires, de la nature de la cargaison selon l'IMO et de paramètres extrinsèques tels que densité du trafic, état de la mer, visibilité, etc.. On peut ainsi obtenir une image plus réaliste où le périmètre de sécurité n'est plus limité par un cercle mais par une ellipse paramétrable dont le navire occupe l'un des foyers.

Pour faire bon poids, il faudrait introduire l'âge du capitaine ou un indice de tempérance⁴ dans le facteur de risque. (L' *Officer of Watch* pourrait être victime d'un accident cardio-vasculaire).

Le dispositif anticollision avec AIS n'est pas un simulateur

On insistera lourdement sur cette notion. Les équations (1) et (2) montrent que vitesse et cap des mobiles A et B ne doivent pas changer (*steady course*), les positions A' et B' au temps CPA sont des positions estimées obtenues par extrapolation linéaire des données disponibles sur les cheminements de A et de B. En aucun cas, on ne doit entreprendre des opérations du type IF (action 1) THEN (action 2) pour rechercher une route ayant un détournement minimum permettant de passer au raz des moustaches de B ou dans son sillage immédiat

Ce qui ne pourrait relever que du bon sens est stipulé par la règle 8 alinéa b du RIPAM:

Tout changement de cap ou de vitesse ou les deux à la fois visant à éviter un abordage doit, si les circonstances le permettent, être assez important pour être perçu par tout navire qui l'observe visuellement ou au radar; une succession de changements peu importants de cap ou de vitesse ou les deux à la fois est à éviter.

Cette règle, édictée pour l'usage du RADAR et de l' ARPA, reste particulièrement pertinente lors de l'utilisation de l'AIS comme dispositif anti collision.

On notera qu'un cargo engagé dans un rail où il y a une circulation dense, hésitera à se dérouter par crainte d'un sur-accident avec un navire « dans sa roue », il préférera réduire sa vitesse significativement. Sur la fig 2 alors que A et B sont en route de collision (fig. 2-A) , le navire A diminue sensiblement sa vitesse de 7 à 6 nM h⁻¹ pour laisser B à la limite extérieure du périmètre de sécurité et croiser sur son arrière (fig. 2-B). Si un ajustement du cap suivi s'impose dans la phase finale du croisement des routes, le navire A modifiera son cap franchement pour que ses intentions soient comprises par B.

Des armes de la critique à la critique des armes.

Le sentiment trompeur de sécurité (*seduction of safety*) apporté par l'électronique est une idée qui revient fréquemment dans les échanges sur les forums francophones ou anglophones. C'est un sentiment diffus, d'autant plus fantasmé que la technique, devenue affaire de spécialiste, échappe en grande partie à l'entendement du navigateur.

Classiquement, les cours de navigation apprennent à faire la critique de la mesure. Un exemple connu est celui que les *Cours des Glénans* apportaient dans la critique de la position par relèvement de trois amers et du chapeau formé par les intersections des trois LOP.⁵ *A contrario*, les dispositifs GPS et AIS semblent se soustraire, du moins pour l'utilisateur qui les voit comme deux boîtes noires, à la critique raisonnée de la mesure telle qu'on la conçoit dans les sciences

4 L'avis du Captain Haddock fait autorité: « ...for the sailor's worst enemy is not the raging storm; it is not the foaming wave which pounds upon the bridge, sweeping all before it; it is not the treacherous reef lurking beneath the sea, ready to rend the keel asunder; the sailor's worst enemy is drink » [... car, le pire ennemi du marin n'est pas la tempête qui fait rage, ce n'est pas la vague écumante qui s'abat sur le pont, balayant tout sur son passage, ce n'est pas le récif perfide, tapi sous l'eau, prêt à déchirer la coque, le pire ennemi du marin, c'est la boisson] in Hergé. *The crab with the golden claws*. Methuen London 1958.

5 Nouveau cours de navigation des Glenans . 2^{ème} édition. p 659, Le Seuil 1972. Remarquons qu'en procédant ainsi, le cours se situe dans la tradition hydrographique.

expérimentales.

On tentera néanmoins une évaluation critique de certains points qui concernent le CPA. Dans ce qui suit A un voilier équipé d'un transpondeur AIS de classe B, B est un porte-container. Les positions de A et de B sont connues précisément par le GPS et ne semblent pas critiques. Par contre, les vecteurs vitesse U et V sont sensibles; peu pour le porte-container qui maintient cap et vitesse à peu près constants, beaucoup plus pour le voilier. En effet, l'expérience que nous avons acquise dès notre première sortie sur Optimist nous montre que U est rarement constant car le voilier subit des accélérations dans les risées, car son comportement est plus ou moins ardent ou mou selon le bon vouloir du vent ou des courants. Ceci se traduira par une suite de lacets sur la route suivie, plus ou moins marqués selon l'habileté du barreur à tenir le cap ou selon la finesse des réglages du pilote automatique. Il en résulte, pour ce qui nous concerne, une incertitude sur l'angle entre W_0 et $U - V$. Comme cet angle (β) est petit en situation pouvant faire craindre un risque de collision, l'erreur relative $d\beta/\beta$ est considérable. En d'autres termes, si A marche au près, une risée pourrait le faire lofer et situer le CPA dans le périmètre de sécurité de B; inversement A en abattant de trop mettrait le CPA loin du périmètre de sécurité de B. Un comportement erratique, incompréhensible du point de vue de l'électronique embarquée; comment temporiser l'alarme de collision?

L'idée qui vient immédiatement à l'esprit pour amortir les fluctuations de vitesse et de cap est de filtrer en moyennant V sur un intervalle de temps variable. Les concepteurs de l'AIS ont prévu que les navires qui sont ancrés ou qui se déplacent lentement transmettent moins fréquemment que ceux qui se déplacent rapidement ou manœuvrent⁶.

Cette disposition répond-elle aux besoins de la Voile? Peut-être...bien que, ni trop naïve ni trop présomptueuse, je doute que la norme ait été optimisée pour répondre aux aspirations de la plaisance à voile plutôt qu'à celles des milieux professionnels de la pêche. A suivre.....

Références

<http://www.parlons-bateau.fr/question-ais-pour-matheux-message-36791371.html>

On manque de recul pour évaluer l'impact de l'AIS. On trouvera plus généralement une analyse des abordages en mer sur les deux sites suivant:

http://www.maib.gov.uk/publications/investigation_reports/reports_by_incident/collision_contact.cfm et

<http://www.beamer-france.org/publications-enquete.php>

Sur les spécifications de l'AIS B

<http://read.pudn.com/downloads145/doc/comm/633510/Documents/CSTDMA--IEC%2062287-1%20Ed.1%28Final%20Draft%20Standard%29.pdf>

Acronymes

AIS	Automatic Identificatin System
ARPA	Automatic Radar Plotting Aid
CPA	Closest Point of Approach. Point de cheminement le plus proche
LOP	Line Of Position+
IMO	International Maritime Organisation
RIPAM	Règlement International pour Prévenir les Abordages en Mer.

6 Les spécifications de l'AIS B ont été finalisées dans la note IEC 62 287-1 en 2006, suivie d'une édition 2 en 2010. La fréquence de transmission des paquets de données est de un toute les trente secondes si la vitesse est supérieure à 2 nm.h⁻¹, elle passe à 1 toute les 3 minutes si la vitesse est inférieure à 2nm.h⁻¹, pour l'AIS A, la période entre les rafraichissements des données transmises varie de trois minutes à 2 secondes selon la vitesse et le statut:

au mouillage	3 mn
0 < V < 14	10 s
0 < V < 14 et altération de la course	3,3 s
14 < V < 23	6 s
14 < V < 23 et altération de la course	2 s
V > 23	2s
V > 23 et altération de la course	2s

Ces dispositions visant à moduler la transmission en fonction de la vitesse répondent à un souci d'optimiser l'occupation des deux fréquences partagées par l'AIS A et le B en procédant à une «filtration des moins dangereux». Ces moins dangereux sont, *ipso facto*, « les plus exposés », question de point de vue selon que l'on est le pot de terre ou le pot de fer.

Fig 2 Exemple de construction géométrique permettant de calculer le CPA

2-a Données: $U_A(7.0, 45)$; $V_B(5.0, 300)$; A (49 40.0 , -003 10.0) , B (49 43.16 , -002 52.1) à 10,25 h

Le périmètre de sécurité de A délimite un cercle de rayon 0,5 nM

Éléments du calcul

$$\delta \text{ lat} = 3,16 \text{ nM}$$

$$\delta \text{ Long} = 17,9 \cos(49,67) = 11,585 \text{ nM}$$

$$\rho = [3,16^2 + 11,585^2]^{1/2} = 12 \text{ nM}$$

$$\theta = \arctan(11,585/3,16) = 74,74^\circ \text{ est l'azimut de B}$$

B aura comme coordonnées polaires (12 , 75) avec le N G comme origine

sur la figure, on lit $|u - v| = 6,05 - (-3,55) = 9,6 \text{ nM h}^{-1}$

on déduit

$$t_{\text{CPA}} = 12 / 9,6 = 1,25 \text{ h}$$

$$AA' = 1,25 \times 7,0 = 8,75 \text{ nM} \quad BB' = 1,25 \times 5,0 = 6,25 \text{ nM}$$

Les points B et B₁ sont confondus; les navires A et B sont sur une route de collision.

2-b Même données, mais le navire A a diminué significativement sa vitesse d'1 nM h⁻¹

Éléments du calcul

U - V en coordonnées polaires

a) l'angle

$$\text{tg}(U - V) = \Delta x / \Delta y = 6,0 \sin 45 - 5,0 \sin 300 / 6,0 \cos 45 - 5,0 \cos 300$$

$$\text{tg}(U - V) = 4,92 \rightarrow U - V = 78,51^\circ$$

b) le module. Se calcule comme en 2-a, mais il est plus simple de prendre sa valeur sur la fig 2b

l'angle $\beta = (u-v) - \theta$; (θ a été calculé en 2 a), vaut $78,51 - 74,74 = 3,77^\circ$

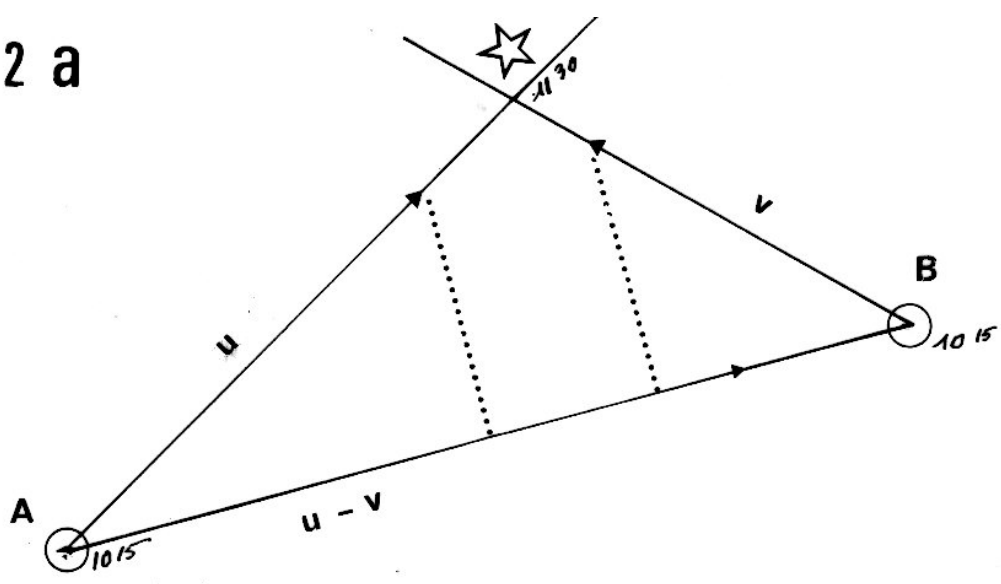
La distance $BB_1 = 12 \sin 3,77 = 0,79 \text{ nM}$

A se positionne au CPA un peu peu au delà du périmètre de sécurité de rayon 0,5 nM

Bien entendu, il est plus facile de se contenter de la construction, le canevas du calcul n'est là que pour montrer qu'une simple calculette est suffisante.

b

2 a



2 b

