



Quand atteindre l'angle de chavirage relève d'une autre causalité

L'Énergie Cinétique frappe à la porte...

L'énergie cinétique correspond à l'énergie que possède un corps du fait de son mouvement par rapport à un référentiel donné (pour faire simple, son environnement immédiat). Cette énergie s'exprime en Joules.

Une image de l'énergie cinétique : votre voiture est stoppée sur terrain plat. Vous devez la déplacer de 4 mètres. Avec votre passager, vous la poussez sur 4 m, c'est un peu difficile au départ, puis la voiture roule ... Sauf qu'au lieu des 4m à parcourir, elle continue toute seule au-delà des 4 m ... Elle restitue tout simplement l'énergie cinétique qu'elle a emmagasinée jusqu'à ce que les frottements dus au roulage, à la mécanique interne de la voiture, à sa trainée dans l'air, consomment entièrement cette énergie emmagasinée. A ce moment la voiture s'arrête de rouler.

L'énergie cinétique est une notion fondamentale en physique et notamment dans le domaine de la dynamique qui traite des solides en mouvements.

L'énergie cinétique d'un système en mouvement s'exprime par la somme des énergies cinétiques des éléments qui le composent.

On distingue deux formes d'énergie cinétique :

⇒ **L'énergie cinétique de translation.**

⇒ **L'énergie cinétique de rotation.**

Concrètement, un objet de masse m (pour un bateau cela correspond à son déplacement) en mouvement de translation à une vitesse V sensiblement uniforme produit de l'énergie cinétique, dont l'expression est :

$E_{c-trans} = 0.5 * m * V^2$ (la masse m est exprimée en kg et la vitesse V en m/s).

Sur un bateau, lorsque la trajectoire est linéaire et le comportement archimédien du bateau contrôlé, l'énergie emmagasinée ne constitue pas un réel problème. Elle est même intéressante puisqu'elle produit une sorte de régulation de la vitesse (V Speedo).

Les ennuis arrivent lorsque la trajectoire du bateau effectue de manière incontrôlée une rotation par rapport au cap à suivre.

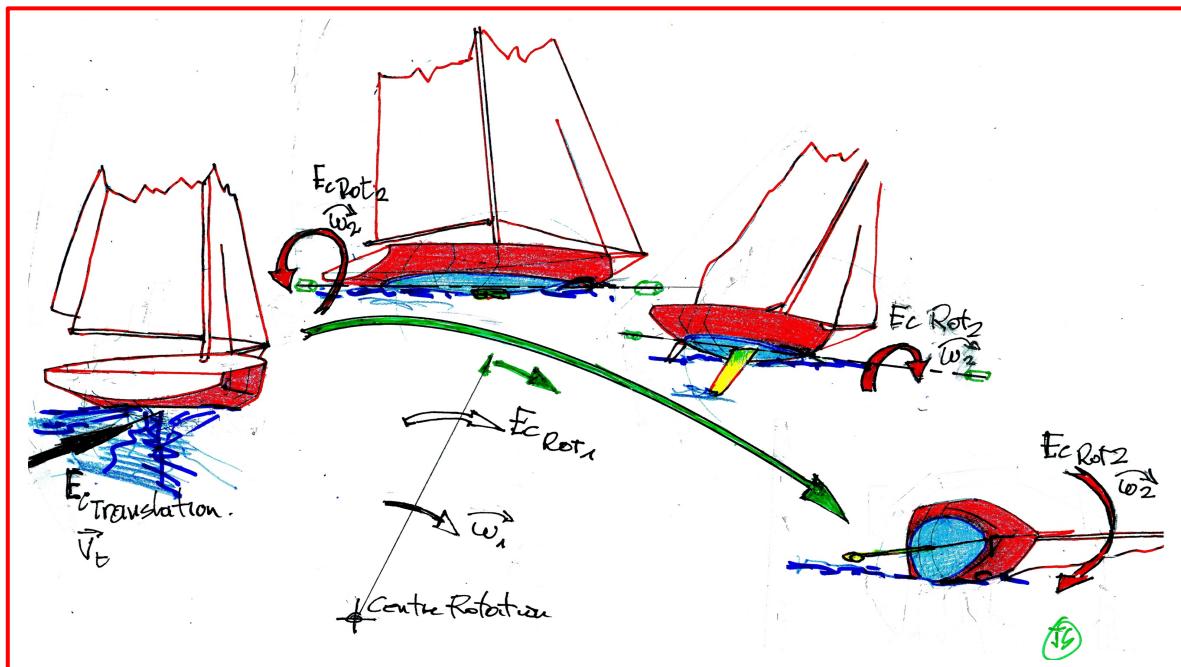
Ce virage brutal transforme le mouvement de translation linéaire en un double mouvement circulaire autour :

- D'un point situé sur le plan d'eau (lacet en vert)
- ET simultanément
- Autour de l'axe du bateau (gîte en rouge), phénomène archimédien.

L'énergie cinétique d'un solide en rotation s'exprime différemment :

$$E_{c\text{-rot}} = 0.5 * I * \omega^2$$

I étant l'Inertie de l'objet en rotation autour d'un axe ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) et ω = vitesse angulaire (rad/s).



L'examen de l'expression « l'Energie Cinétique en Rotation », montre que dans les mouvements conjugués de rotations aux vitesses ω_1 et ω_2 , le moment d'Inertie (I) reste constant pendant chacun de ces mouvements.

Seules les vitesses de rotations évoluent suivant les conditions des mouvements.

Toutefois, le plus important se trouve dans le fait que dans les deux formes d'énergie, les vitesses s'expriment au carré.

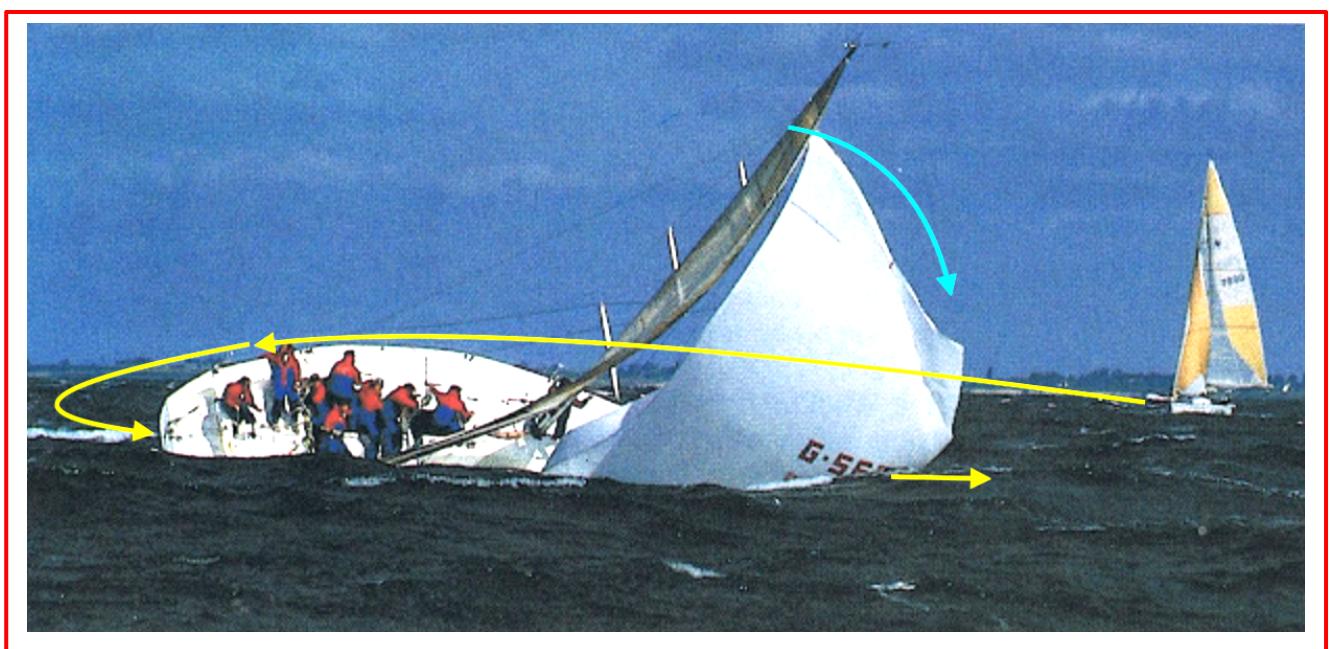
Appliqué à l'expression de l'énergie cinétique en translation, et rapporté à un bateau de 9 000 kg, le doublement de la vitesse de 12 nœuds (6.17 m/s) à 24 nœuds (12.35 m/s) représente, avec une inertie identique, le quadruplement l'énergie cinétique (X4).

La vitesse double, l'énergie cinétique emmagasinée est multipliée par 4...

La vitesse triple, l'énergie cinétique emmagasinée est multipliée par 9...

La photo ci-dessus ainsi que la représentation phase par phase des trajectoires et mouvements de rotations permettent d'identifier comment l'énergie cinétique en translation se scinde en deux mouvements lorsque la trajectoire linéaire échappe au contrôle de l'équipage ou du pilote automatique :

- ⇒ Une rotation autour d'un point du plan d'eau (le bateau décrit plus ou moins un cercle).
- ⇒ Une rotation autour de l'axe longitudinal du bateau qui génère la gîte du bateau.



Conclusion

Le déplacement normal d'un bateau, au sens de mouvement de translation rectiligne (cap à suivre) intègre trois paramètres physiques :

- La vitesse issue de la poussée vélique.
- L'énergie cinétique en translation produite et emmagasinée durant ce déplacement linéaire.
- Les écoulements de fluides autour des profils aérodynamiques de la coque et de ses appendices (voile de quille et safran) et leurs portances résultantes.

⇒ La vitesse représente l'essence même de la régate, mais la vitesse possède son corollaire qui se nomme « Énergie Cinétique » où la vitesse intervient au carré dans le calcul de cette énergie.

⇒ Comme on vient de le voir, il existe deux formes d'énergie cinétique :

- L'énergie cinétique de translation emmagasinée lorsque le bateau suit sa route (rectiligne).
- L'énergie cinétique de rotation qui résulte d'une sortie de route.

⇒ La portance résulte des écoulements de l'eau autour du safran (et du voile de quille).

Donc, tout repose sur les propriétés du safran (courbe de portance en fonction de l'angle d'incidence) qui dépendent de sa forme (allongement), de son profil aérodynamique, de la rugosité de sa surface (il suffit de poncer !).

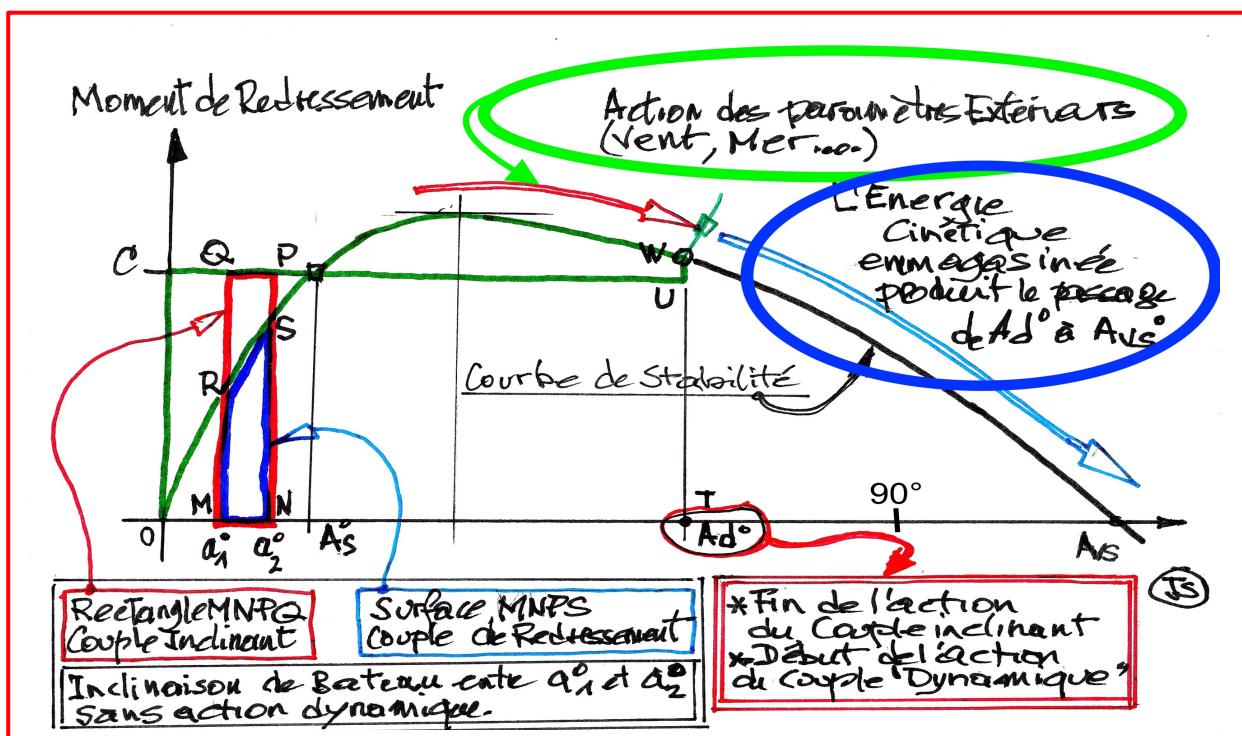
La gîte du bateau dépasse l'angle Avs...

La perte de contrôle du bateau se traduit par le passage instantané de la trajectoire rectiligne à celle d'une giration violente autour d'un point. Toute l'énergie cinétique emmagasinée en translation se transforme alors en énergie cinétique en rotations.

A partir du moment où le bateau quitte sa trajectoire linéaire, la composante vitesse de la force vélique (parallèle à l'axe du bateau) diminue très rapidement pour devenir nulle. A cet instant, il n'existe plus d'énergie vélique (le bateau est à 70°/80° de gîte). Les deux rotations continuent quand même sous l'effet de l'énergie cinétique emmagasinée, mais elles s'essoufflent progressivement à cause des frottements (eau/carène), de la trainée des voiles qui faseyent et du moment de redressement qui s'oppose à la rotation (gîte).

C'est dans cette dernière phase, consommation de l'énergie cinétique emmagasinée appliquée à la rotation autour de l'axe longitudinal du bateau, que le risque de chavirage existe avec un dépassement de l'angle Avs.

On comprend alors pourquoi les bateaux des générations RORC ou IOR, ou même ceux du début des courses Open, du fait de leurs vitesses relativement faibles aux allures portantes, n'emmagaissaient pas, durant leur trajectoire linéaire, assez d'énergie cinétique pour franchir lorsqu'ils subissent un violent départ au lof, cette zone située entre 70 à 90° de gîte et l'angle fatidique Avs.



En fait la prescription « Self Righting (auto-redressable) » ne signifie rien, si on ne précise pas conjointement la capacité à résister au chavirage en imposant un minima d'énergie positive qui s'oppose au franchissement de l'angle Avs.

Interprétations sur la courbe de stabilité positive

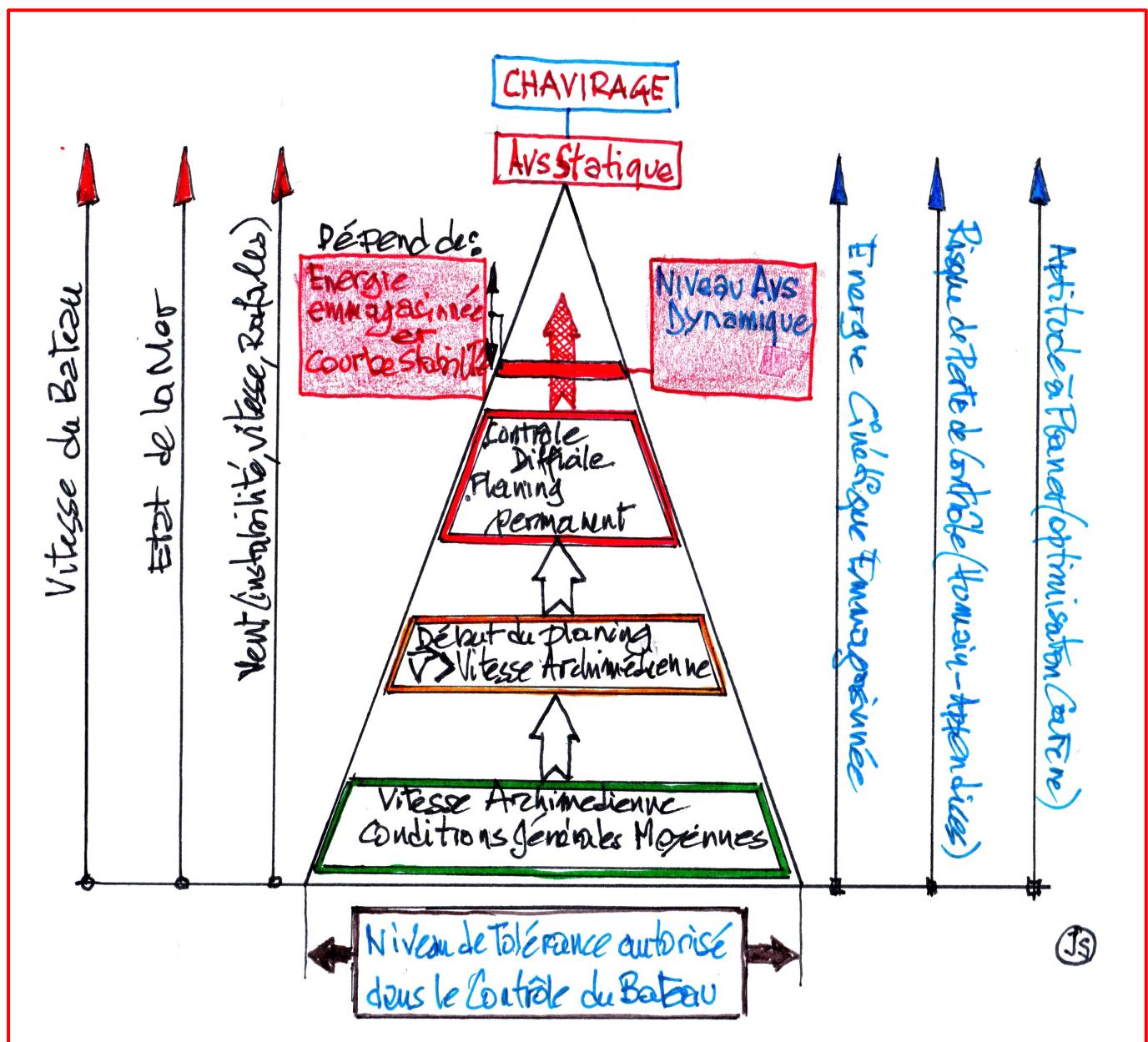
Dans ce dessin ci-dessus qui retrace la partie positive de la courbe de stabilité, il y a deux lectures.

1 / La gîte du bateau augmente lentement, par exemple en utilisant une drisse. On peut l'amener ainsi jusqu'à 90° de gîte. Dans cette méthode d'inclinaison, il n'y a pas d'énergie cinétique emmagasinée pendant la rotation

du bateau, puisque la vitesse de rotation peut être considérée comme nulle. On est en pure analyse statique. C'est l'équivalent de ce qui est réalisé lorsqu'un logiciel calcule et trace la courbe de stabilité du bateau.

2/ Lorsque le bateau se déplace en suivant son cap (translation).

Comme nous l'avons expliqué ci-dessus, le bateau avance dans un mode uniformément accéléré-décéléré (l'accélération pouvant être >0 ou <0). Toutefois, les accélérations sont relativement modérées une fois que le bateau trouve sa route. Du fait de sa vitesse de déplacement V et de sa masse m , il produit de l'énergie cinétique en translation. Si, par exemple, on enlevait les voiles (donc plus de propulsion), le bateau continuerait sa route, à son cap, en consommant l'énergie cinétique emmagasinée jusqu'à ce que la trainée de la



coque dans l'eau et celle du mât dans l'air aient consommé toute cette énergie cinétique.

Dans ce deuxième schéma, on introduit progressivement l'environnement dynamique. Cela permet de représenter le domaine d'utilisation d'un voilier sous la forme d'un triangle où le sommet matérialise l'angle de chavirage (Avs).

La base du triangle diminue au fur et à mesure que les paramètres croissent (flèches verticales rouges et bleues situées à gauche et à droite du triangle représentant le domaine de navigation).

La longueur de cette base matérialise le niveau de contrôle de la trajectoire acceptable (en fait le niveau des erreurs).

Lorsque ***la base du triangle diminue***, le risque de sortie de route s'accroît.

Lorsque la vitesse augmente, le pilotage (Manuel ou Auto) demande de plus en plus de compétence, d'attention et de réactivité.

Conclusion : Vers la fin des années 90, les prescriptions mises en place pour les courses open, en termes de stabilité calculée et imposée aux voiliers (courses au large ou plaisance¹), se révèlent largement supérieures à celles des années IOR et évidemment à celles de la jauge RORC et même à celles imposées après l'évènement Poupon.

La vitesse et le pilotage représentent le facteur déterminant dans la causalité d'un chavirage.

D'autre part, les bateaux deviennent de plus en plus rapides aux allures portantes, bien que leurs dimensions diminuent.

Ce dernier binôme (vitesse/volume du bateau) interroge, car plus ce ratio augmente à volume de bateau égal, plus le bateau devient sensible à l'environnement. Ce qui amplifie aussi les risques de pertes de contrôle.

J. SANS (Octobre 2023)

¹ On reviendra dans un prochain document sur l'importance pour l'évaluation de la stabilité, de l'introduction de la Directive CE (en 1996) destinée aux navires de plaisance.