



Le 25 /08/2022

### EXTRAITS d'un MEMOIRE sur les RISQUES de CHAVIRAGE

**Préambule** **Le premier Vendée-globe (1989). Après l'évènement « Ph. Poupon », en seulement 3 éditions, le système diverge**

Après la première édition de 1973, durant les 16 années à venir, jusqu'en 1989, cinq « **Whitbread** » s'enchaînent avec le même succès international, et toujours sous la règle IOR.

Aucune des éditions ne connaît de réels problèmes liés à la stabilité. Les seuls évènements tragiques sont des équipiers qui tombent l'eau et ne peuvent pas être récupérés.

Pourtant la technique des fichiers « Grib », des « standard C », des liaisons internet n'existent pas en 1973/74, ni même les GPS (diffusion vers le grand-public en 1992) (les « SatNav », navigateurs par satellites à défilements apparaissent vers 1980), ni la position de la banquise. La calculatrice « Tamaya » dispense d'embarquer les tables de calculs, types HO249 ou Dieumegard/Bataille nécessaire à la navigation astronomique.

Les navigateurs du bord, décodent les cartes météorologiques à partir des liaisons radios en morse, puis à partir de 1980 sur le « NAGRA » du bord quand les moyens financiers du bord le permettaient.

Imaginé et créé en 1989, Philippe Jeantot lance le premier VENDEE CHALLENGE (qui deviendra VENDEE GLOBE). Il présente la particularité d'être sans escale et sans assistance en laissant l'Antarctique à tribord, mais toujours sans être contraint par une règle de jauge à l'exception du tirant d'eau (4.5m à cause du port départ de Port Olonna) et d'un angle de gîte maximal de 10° sous l'effet des ballasts, mais sans limitation de volume.

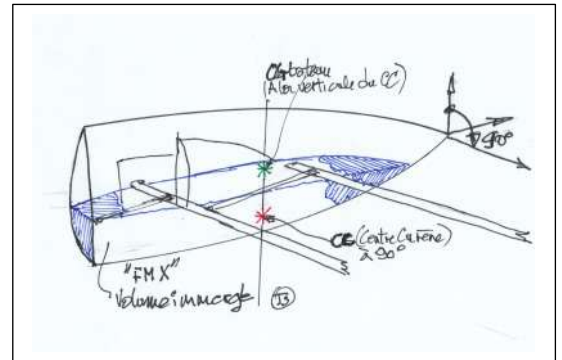
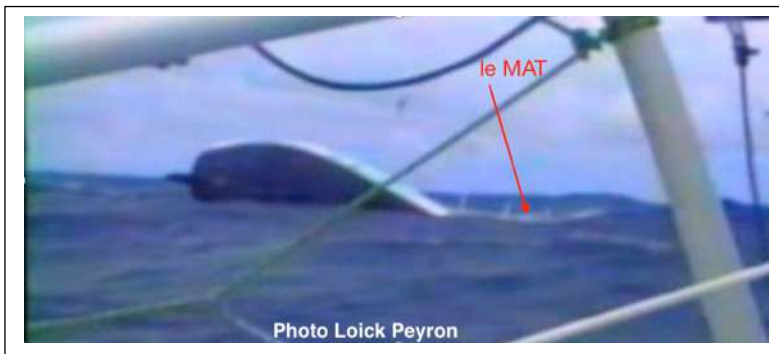
Se côtoient les bateaux issus du BOC mais aussi de nouveaux dessins dans le même esprit mais théoriquement plus performants. Un bourlingueur des mers, Pen Duick III skippé par Jean-François Coste prend part à la course et la termine.

C'est un dessin du duo Luc Bouvet & Olivier Petit, skippé par Titouan Lamazou qui remporte le premier VENDÉE en 109 jours et 8 heures sur « Écureuil d'Aquitaine II » soit une moyenne qui flirte avec les 10 nœuds.

Le bateau d'Alain Gautier (plan Finot-Conq) préfigure le plus, par son design - pont plat, roof minimal, tableau arrière droit et large (95% du BMAX), francs-bords bas, grande largeur (5,80m), l'image des futurs IMOCA de la première génération 91/96.

Toutefois on reste encore sur des déplacements qui, certes diminuent, mais frôlent encore les 13/14 tonnes.

Pourtant, dès le premier VENDÉE GLOBE en 1989, la stabilité, mais surtout le chavirage apparait sur la scène, sans prévenir.



Pour des raisons diverses, dont le passage du gréement sloop au gréement ketch, et pour la première fois sur une course offshore, un bateau se retrouve couché à 90° dans les 40<sup>ème</sup>, au sud du cap de Bonne Espérance, et surtout reste, phénomène exceptionnel, dans cette position !!!

Ramon Carlin, skipper de « Sayula » (Swan 65, Vainqueur de la 1<sup>ière</sup> Whitbread) raconte dans une interview, avoir vécu dans le Pacifique sud, un évènement assez proche de celui de Ph. Poupon. Suite à une perte de contrôle, « Sayula » par au lof et reste couché un certain temps, qui lui est apparu très long, mais revient naturellement en position normale (0° de gîte).

Durant l'épopée Whitbread, beaucoup de bateaux, suite à des pertes de contrôles se retrouvent gîtés à 80/85° en travers du vent. Mais tous, reviendrons à la position normale, avec des dommages matériels pour certains.

Beaucoup de choses seront écrites sur le « chavirage » de Philippe Poupon ». Il apparait que l'incident s'est produit avec les ballasts au vent remplis, ce qui diminue l'Avs de quelques 10 à 12°.

Dans cette configuration, alors que l'Avs d'origine (sans le gréement d'artimon) est prévu vers 110°/115°, la stabilité se retrouve très dégradée lorsque l'artimon est ajouté.

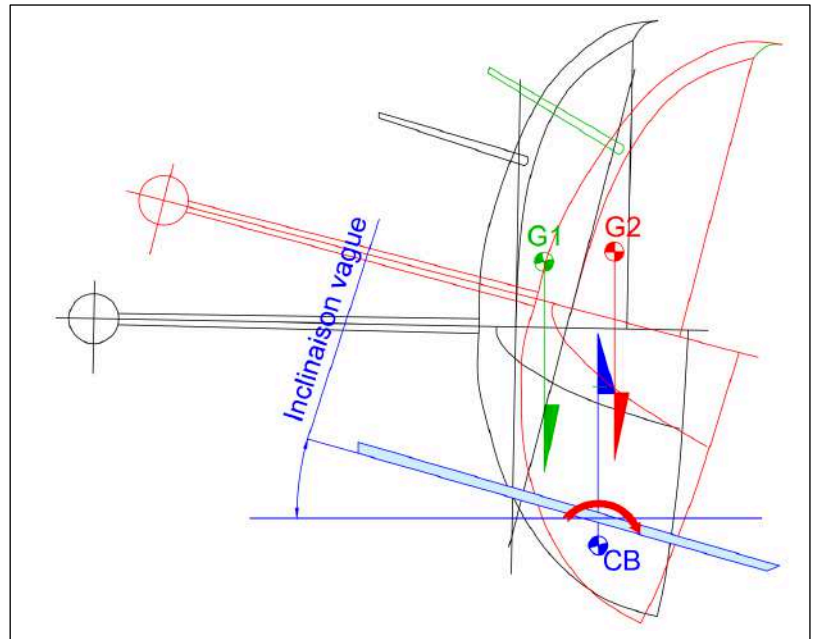
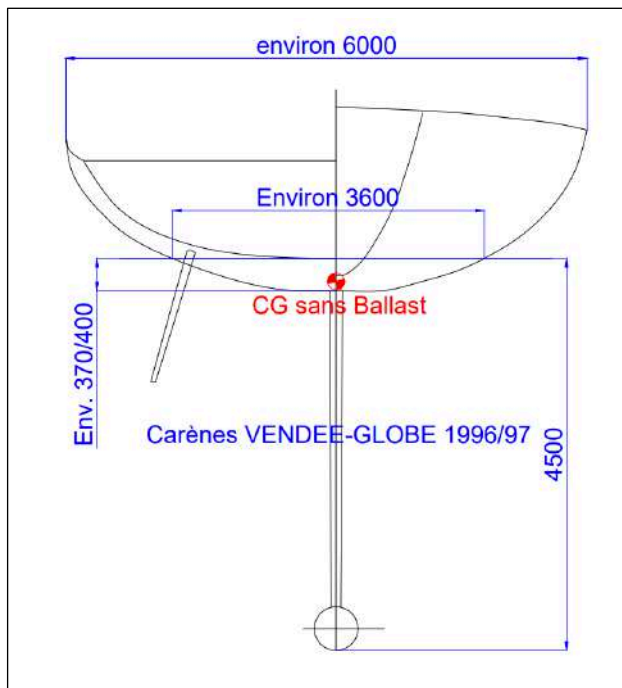
L'évaluation de l'Avs, avec les ballasts au vent remplis et le gréement en ketch, se situe aux alentours de 100/105°. Ce que confirment les photos (Prises par Loïc Peyron) du bateau couché ou on distingue très bien que le mat pose sur l'eau, alors que le safran se trouve au-dessus du plan médian du bateau.

En fait, la dégradation de la stabilité du bateau de Ph. Poupon depuis l'étude d'origine (Avs 110°/115°) a progressé insidieusement. Le CG remonte cm après cm au fur et à mesure du chargement du bateau et des modifications, sachant que tout ce qui ajouté se trouve à 90% au-dessus de la flottaison (artimon, bôme, gréement, vivre, etc.) ...

Dans la réalité, la stabilité comme paramètre sécuritaire n'est pas réellement prise en compte par les architectes, les skippers et les organisateurs. Ce manque d'appétence pour l'expression de la stabilité réside dans le fait que le calcul théorique et le tracé de la courbe de stabilité (A l'époque, sur la table à dessin puisque qu'elle est la conjonction de calculs et

de constructions géométriques) et très long et fastidieux, mais surtout au fait que ce type d'évènement ne s'est jamais produit en course au large.

Ajoutons que pour des raisons de complexités de dessins, les architectes réalisent des stabilités iso-aïres (des couples) et non isocarènes (volume constant de la carène à tous les angles de gîte). Cela revient à faire pivoter perpendiculairement le bateau autour du maitre-couple, ce qui n'est pas la réalité, et évidemment moins précis.



*Les positions G1 et G2 (ci-dessus) correspondent à celles du Centre de Gravité avec le ballast au vent rempli (puissance maximale).*

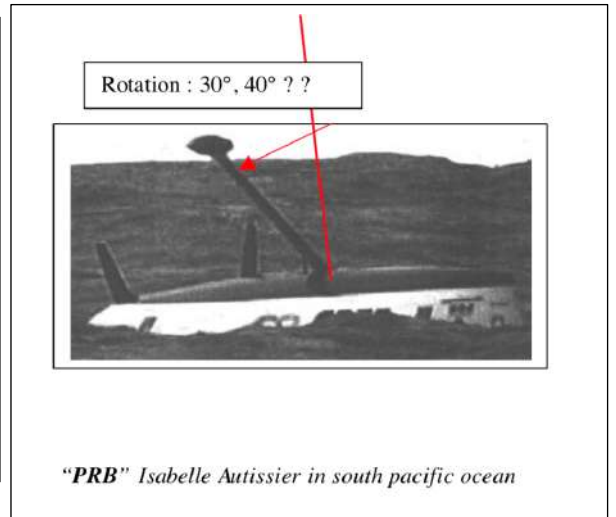
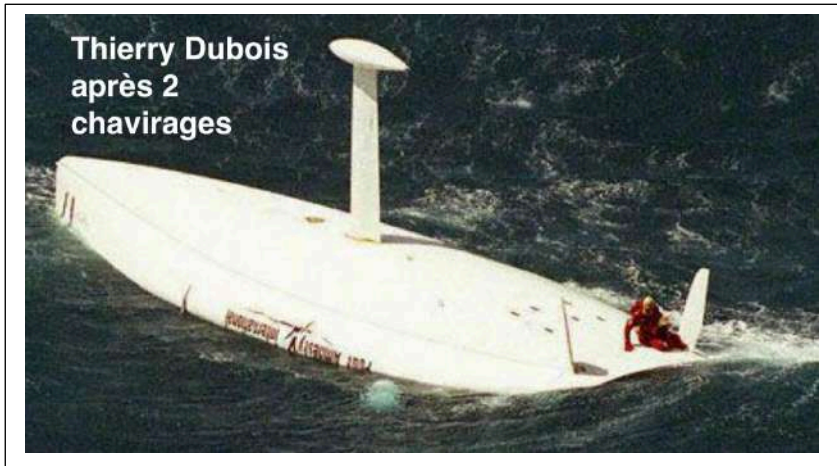
*On distingue nettement que suivant l'inclinaison de la vague (et la carène suit sensiblement cette inclinaison), le CG passe du mauvais côté du Centre de Carène (CB) et le chavirage se produit.*

Les organisateurs, comme les architectes tirent de l'incident de Ph. Poupon, des enseignements (Un Gz minimal à 90° de gîte est alors imposé) très parcellaires et cela faute de moyens de calculs et d'analyses (les architectes travaillent en 2D) et surtout de contrôles réels sur les bateaux. Utiliser la méthode de mesures de la stabilité de l'IOR, sous-entendait de mesurer localement les carènes et de lancer des calculs issus d'une formule de Jauge... ce qui s'opposait à l'esprit du VG.

Lors de l'édition suivante du VG, plus clémente au niveau MTO, aucun incident lié à un défaut de stabilité n'est signalé. La pression se relâche, et l'architecture reprend alors ses droits et son évolution vers des carènes plus performantes en vitesse au portant.

Ce type de performances devient l'obsession des skippers.

Le choc se produit lors de l'édition de 1996/97 avec 2 chavirages dont un tragique et des multiples avaries résultantes de défaillance de construction ou de conception (Dont des ruptures de voiles de quille).



La Course au Large prend alors un coup sévère sur la tête. On s'aperçoit alors que le dessin des carènes dérive vers une configuration absurde guidée exclusivement vers le gain de vitesse au portant.

La voile est un sport mécanique et dans tous ces sports ou la technique entre pour une part très importante dans le résultat, le risque d'excès et de dérive existe.

Les ingénieurs (mais c'est dans la nature humaine) recherchant d'abord la vitesse là où c'est facile et peu onéreux.



Les exemples les plus frappants de dérives dans un sport mécanique se sont produits en F1 avec les « jupes » installées tout autour de la caisse de la voiture. Ces jupes génèrent un effet de sol (aspiration) qui plaque la voiture au sol et permettent de descendre les chronos de manière spectaculaire et cela pour un prix dérisoire. Le problème devient surprenant et incontrôlable lorsque la coque de la voiture se trouve en ascension et atteint la butée mécanique de la suspension... à cet instant la voiture décolle de quelques centimètres, la jupe ne touche la route et la voiture s'envole... comme une feuille dans un courant d'air d'automne. Après plusieurs accidents mortels, les jupes ont été interdites.

En ces fins d'années 90, les dessins d'IMOCA paraissent « drogués » aux surfs dans le grand sud. Ce qui nécessitaient :

- Des carènes hyper planantes.
- Une quille pendulaire (les ballasts latéraux ayant l'inconvénient d'augmenter le déplacement) qui déporte le CG du bateau au vent, sans augmenter le déplacement. Ainsi la puissance disponible augmente, ce qui se traduit immédiatement en surface de voile supplémentaire, sachant que la somme des dépassements avant plus arrière (bôme et bout dehors) ne doit pas excéder 1.82m.

- Des francs-bords faibles, un pont plat, un roof minuscule, afin de limiter le poids dans les hauts et descendre le Centre de Gravité (CG) de quelques centimètres et de nouveau augmenter le moment de redressement, donc la puissance disponible.
  - Un mat rotatif pour améliorer l'aérodynamisme Mat / Grand-voile.
- Et au diable l'Avs pourvu qu'on ait la vitesse.

En cette fin de siècle, l'informatique envahit les bureaux d'études et permet d'optimiser simultanément les dessins de plusieurs carènes (les VPP<sup>1</sup> existent alors grâce à l'IMS<sup>2</sup>). On dispose alors de tous les ingrédients pour que l'environnement technologique se retrouve hors contrôle.

La Whitbread existe de 1973 à 1990, le Vendée Globe débute en 1989 (les problèmes majeurs de chavirages se produisent lors de l'édition 96/97), sur les bases du BOC challenge qui débute en 1983/84. Pour ces trois courses le parcours est identique, aux escales près. Les conditions générales d'aides à la navigation et de communications restent assez sommaires durant ces 25 années de fin du siècle, bien qu'elles s'améliorent vers 1998.

On peut se poser la question suivante : ***Pourquoi les chavirages affectent les bateaux du VG (Période de 89 à 96) et pas ceux du BOC entre 83 et 90, mais frappent deux fois Isabelle Autissier lors des BOC Challenge de 94 et 98 ?***

Mais on pourrait amplifier cette question : ***Pourquoi aucun bateau participant aux 5 éditions de la Whitbread de 1973 à 90 n'est victime d'un chavirage ?***

Une grande partie du parcours des Courses autour du Monde se déroule au portant, les architectes recherchent donc des dessins de carènes les plus adaptées au planing dans la mesure où les règles de jauge autorisent ces orientations architecturales.

Ainsi, pour le BOC puis pour le VG, ils insufflent progressivement plus de stabilité de forme dès que le bateau gîte, moins de creux de carène, moins de francs-bords, un pont plat, etc... L'objectif étant, à déplacement identique, d'améliorer le moment de redressement aux angles de gîte pratiqués en navigation, afin de porter le maximum de surface de voilure et ainsi d'accroître la puissance.

Caractéristiques usuelles d'un bateau du Vendée-Globe de la fin des années 90 :

LHT 18.28 m LWL 18.20 m Bmax 5.50 m BWL 3.80 m Creux 0.35 m  
Déplacement : 9500 kg

Notons que la « jauge » utilisée au BOC et au VG ne limite pas le tirant d'air. La seule contrainte dimensionnelle porte sur la base du plan de voilure qui ne doit pas dépasser 18.28m + 1.82m.

L'architecture de ces types de voiliers aboutit à des bateaux de plus en plus larges au niveau du pont et progressivement plus légers pour la longueur imposée de 18,28m.

Toute cette démarche intellectuelle (chaque bateau est « amélioré » et gagne en vitesse au portant) se traduit par une augmentation de moment de redressement (RM) et de par les lois de l'hydrostatique, une diminution de l'angle Avs (Chavirement). Ce qui diminue

<sup>1</sup> VPP : programme informatique (Velocity Prediction Program) qui simule un bassin de carène.

<sup>2</sup> IMS : Système de jauge qui se base sur les VPP de chaque bateau et qui devait remplacer l'IOR.

la fourchette (les anglo-saxons parle de « range ») de stabilité positive entre 0° et l'angle Avs.

Les chavirages survenus lors du VENDEE-GLOBE de 1996/97, puis celui d'Isabelle Autissier en 1998 durant le 4<sup>ième</sup> BOC Challenge interrogent. Le chavirage d'I. Autissier se produit alors que le bateau navigue au maximum de ses capacités véliques (polaires de vitesse), sur une mer très formée qui amplifie de manière irrégulière le potentiel de vitesse.

Une fois en position capsized, son bateau reste à l'envers et cela malgré de basculement de la quille pendulaire qui déporte le CG latéralement. Mais la « route » pour atteindre l'angle qui permettrait de revenir à l'endroit (180°-Avs) paraît diablement trop longue.

Tout cela conduit à durcir les critères de stabilité et à imposer une épreuve réelle de stabilité afin de vérifier si ces prescriptions (Avs et ratio des surfaces >0 et <0 de la courbe de stabilité) sont respectées.

Mais imposer un Avs de 125° et un ratio de 5/1 ne supprime pas les risque de chavirage, tout au plus ces deux critères permettent au modèle archimédien de chaque bateau de résister au chavirage.

Paradoxalement les premières applications informatiques (vers 1978) relatives aux études de la stabilité, se calquent sur les process utilisés lors du travail en 2D. En fait, l'outil informatique détermine la courbe de stabilité en copiant les process de tracés et de calculs manuels. Rapidement, les modules de calculs matriciels apparaissent sur le marché et permettent alors, de ne plus traiter la carène comme une succession de courbes (travail en 2D), mais comme une surface gauche et puis « quelques processeurs Intel ou Motorola plus loin » comme un volume à part entière.

Les intégrations des outils de calculs mathématiques dans les algorithmes ne posent pas de réelles difficultés. Restent qu'ils occupent encore plus de place mémoire et demandent des vitesses de processeurs de plus en plus importantes qui dépendent du développement des ordinateurs individuels (PC).

Depuis 1978, l'outil informatique s'est plus que décuplé. Les jeunes architectes d'aujourd'hui n'imaginent pas l'admiration de leurs aînés devant un PC (sans écran plat et équipé de disquettes) qui « crachait » des calculs de stabilité, d'échantillonnages, des dessins, des tableaux, des jauges... sur des « km » de feuilles de listing en accordéon, etc.

Mais revenons à ces d'années 1980/90. Que ce soit pour les courses IOR ou les courses Open, les règlements de sécurité en vigueur sont ceux des OSR<sup>3</sup>.

Ces règlements remaniés à la marge suite au Fastnet de 1979, stipulent que « **les bateaux doivent être auto-redressant** », « **Self-Righting** » en anglais.

L'ambiguïté porte sur cette notion « **d'auto-redressabilité** » appliquée à un voilier. L'auto-redressabilité demandée par les OSR, ne se réfère à aucun critère de technique propre à la stabilité (Avs, déplacement, RM, etc...).

Les OSR s'en remettent aux Architectes, aux Classes, aux réglementations nationales.

Dans l'esprit de l'époque, « auto-redressant » signifie que le bateau se redresse systématiquement suite d'une « mise au tapis » (« Knock Down »).

---

<sup>3</sup> OSR : Offshore Special Régulations : Règles de sécurité internationales publiées à l'époque par l'ORC

Dans cette position, certes inconfortable pour l'équipage, la gîte peut atteindre 75 à 80°. Il existe des cas où on s'approchera des 90°... Mais à chaque fois les lois archimédiennes sortent les bateaux de cette situation scabreuse, même lorsque le bateau reste couché plusieurs minutes.

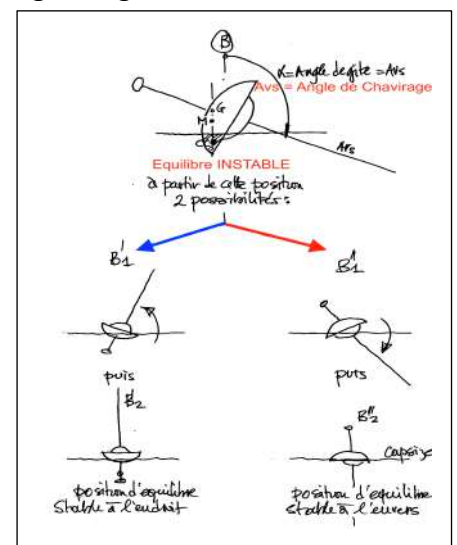
Les bateaux IOR, mais paradoxalement aussi les bateaux Open respectent cette prescription « auto-redressant », mais uniquement lorsque l'angle de gîte reste dans l'intervalle 0° /  $A_{vs}$  (propre à chaque bateau). Au-delà de son angle  $A_{vs}$  le bateau chavire (comme tous les bateaux) et se trouve en position « Capsized » (180°).



Comme le montre la photo ci-contre, avec environ 70° d'angle de gîte l'action du vent dans les voiles ne crée plus de couple de chavirage (les voiles faseillent). C'est encore plus vrai avec 90° de gîte.

Mais à partir de 90°, pour atteindre l'angle  $A_{vs}$  fatidique, il reste encore 35° à parcourir, sachant que l' $A_{vs}$  imposé aux bateaux du VG est de 125°.

Force est de constater que les conditions qui provoquent le chavirage ne résultent pas exclusivement du couple de gîte généré par la force vélique. Certes, l'état de la mer contribue, non pas à amplifier la gîte directement, mais à modifier la position spatiale du bateau (voir dessin page 63) et ainsi rapprocher le moment ou le CG passe du mauvais côté par rapport au CB (Le bras de levier du RM s'inverse). Mais dans ces conditions on ne devrait pas chavirer par mer calme ou peu formée.



**Les lois de la « Dynamique » interviennent alors dans les processus qui conduisent au chavirage...** (Se souvenir de Isaac NEWTON qui, observant la chute verticale d'une pomme, en déduisit la notion de gravité universelle)

Par contre lorsqu'il se retrouve en position capsized, un voilier à quille fixe se trouve dans une position hyper stable et possède peu (pour ne pas dire aucun) de moyen pour revenir en position « upright » (Gîte 0°). Seul, dans des conditions très exceptionnelles, l'état de la mer peut éventuellement le ramener en position « Upright 0° ».

D'ailleurs en position « Capsized », beaucoup de voiliers de cette époque (IOR principalement) couleraient assez rapidement, puisque qu'ils sont pratiquement dépourvus de cloisonnements étanches.

**Acte 32 : Finalement, 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 pousser de 4m. Avec votre passager, vous la poussez, c'est un peu difficile au départ, puis la voiture roule ... sauf qu'au lieu des 4 m 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 traînée 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 s'intéresse aux 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 pour un objet de masse « m » (pour un bateau cela correspond à son déplacement) en mouvement de translation à une vitesse « v » produit de l'énergie cinétique, dont l'expression est :

$$E_{c-trans} = 0.5 * m * v^2 \text{ (la masse « m » en kg et la vitesse « v » en m/s).}$$

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 régulation de la vitesse (V Speedo).

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

Ce « virage » transforme le mouvement linéaire en double mouvement circulaire autour d'un point situé sur le plan d'eau (lacet en jaune) et autour de l'axe du bateau (gîte en bleu).

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

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

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

Si on regarde ces deux formules, on constate qu'elles se composent de deux termes qui pour chaque bateau restent constant pendant tous leurs mouvements. Ce sont le déplacement (la masse) et le moment d'Inertie. Seules les vitesses linéaires et en rotation peuvent varier suivant les conditions de navigation. Mais le plus important se trouve dans le fait que ces vitesses s'expriment au carré dans les deux formules.

Rapporté à un bateau de 9000 kg le passage de 12 nœuds (6.17 m/s) à 24 nœuds (12.35 m/s) représente une augmentation de l'énergie cinétique de 25%.

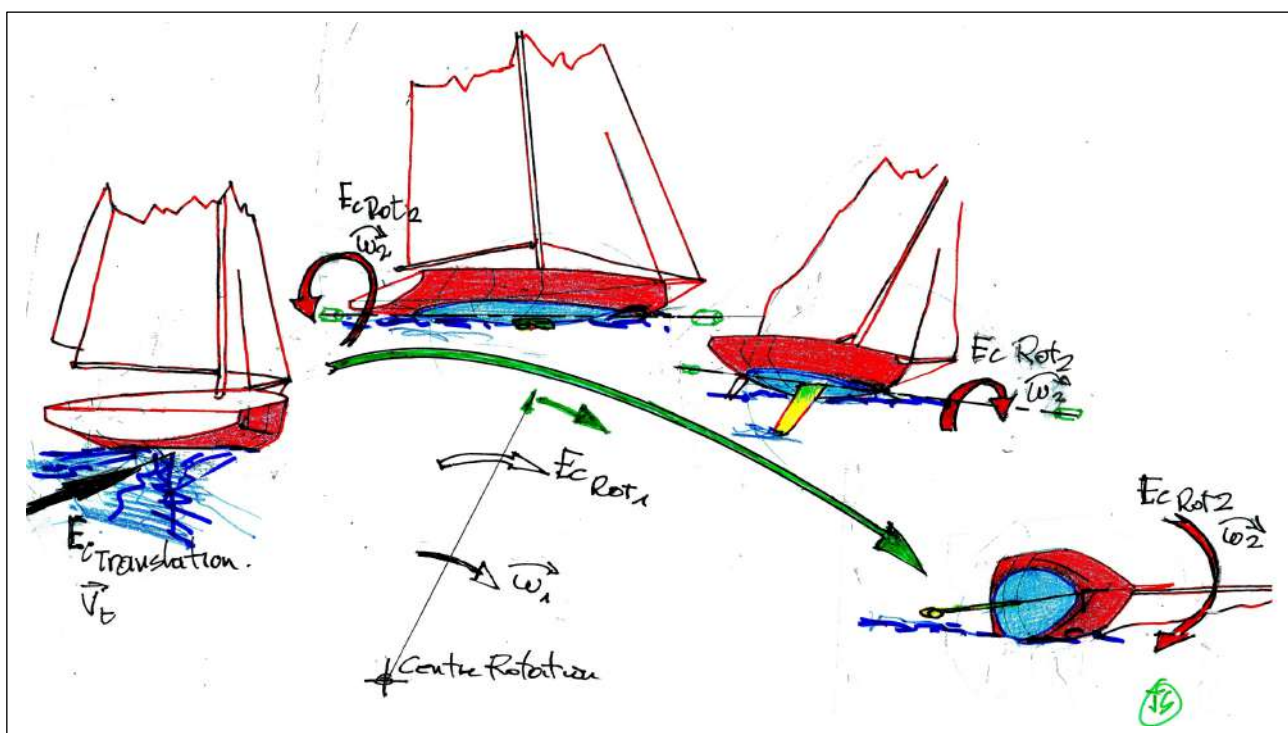
Donc lorsque **la vitesse double, l'énergie cinétique est multipliée par 4...**



La photo ci-contre 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 :



- ⇒ **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 correspond à la gîte du bateau.



L'analyse présentée dans l'Acte 14, montre qu'en l'espace d'une vingtaine d'années (1980 à 2000) le potentiel de vitesse au portant des bateaux offshore est multiplié par 2, voire 3. L'idée d'aller régater dans les mers australes (régime majoritaire de vent forts portants) contribue aussi à cette augmentation.

Cette évolution résulte de l'abandon, à la fois, des contraintes architecturales imposées par les règles de jauge (dont l'IOR) et du classicisme qui imprégnait l'architecture navale en course offshore depuis quelques six décennies.

### Conclusion

La marche d'un bateau génère 3 paramètres physiques :

- *La vitesse.*
- *L'énergie cinétique produite et emmagasinée.*

- Les écoulements de fluides autour d'un profil « aérodynamique » et la portance du profil.

⇒ **La vitesse représente** l'essence même de la régale, on dit souvent : « la vitesse rend intelligent » ... Mais la vitesse possède son corollaire qui se nomme « Énergie Cinétique » ou la vitesse intervient au carré dans le calcul de cette énergie.

⇒ On distingue **deux formes d'énergie cinétique** :

- L'énergie **Cinétique de Translation**

Comme nous l'avons vu précédemment, c'est celle emmagasinée lorsque le bateau suit sa route (rectiligne).

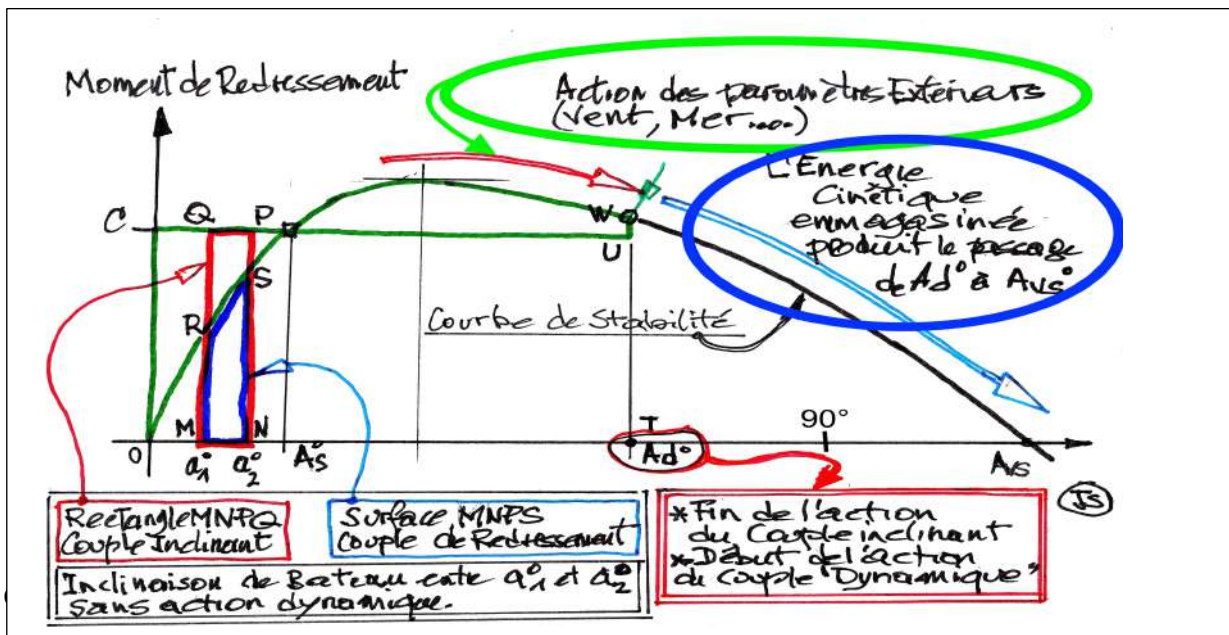
- L'énergie **Cinétique de Rotation**

Cette forme de l'énergie cinétique, est la conséquence d'une « sortie de route ».

⇒ **La portance dépend** des écoulements (Ventilation, Cavitation) des fluides autour du safran, donc de l'état de surface du profil (il suffit de poncer), de la vitesse, de la forme du profil. L'angle d'incidence du profil par rapport à la route suivie génère la portance. Trop d'angle et la portance devient nulle et le safran décroche.

Au final, on revient à la stabilité latérale du bateau, c'est-à-dire sa rotation autour de son axe longitudinal mais avec la prise en compte de l'énergie cinétique en rotation que l'on introduit en plus du calcul de stabilité en statique.

Cette stabilité dynamique intègre 4 paramètres : **Vitesse / Énergie Cinétique / Portance du safran / pilotage.**



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 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). Il est dans un mode « uniformément accéléré » (l'accélération pouvant être  $>0$  ou  $<0$ ). Toutefois les accélérations sont modérées. Du fait de sa vitesse de déplacement «  $v$  » et de sa masse

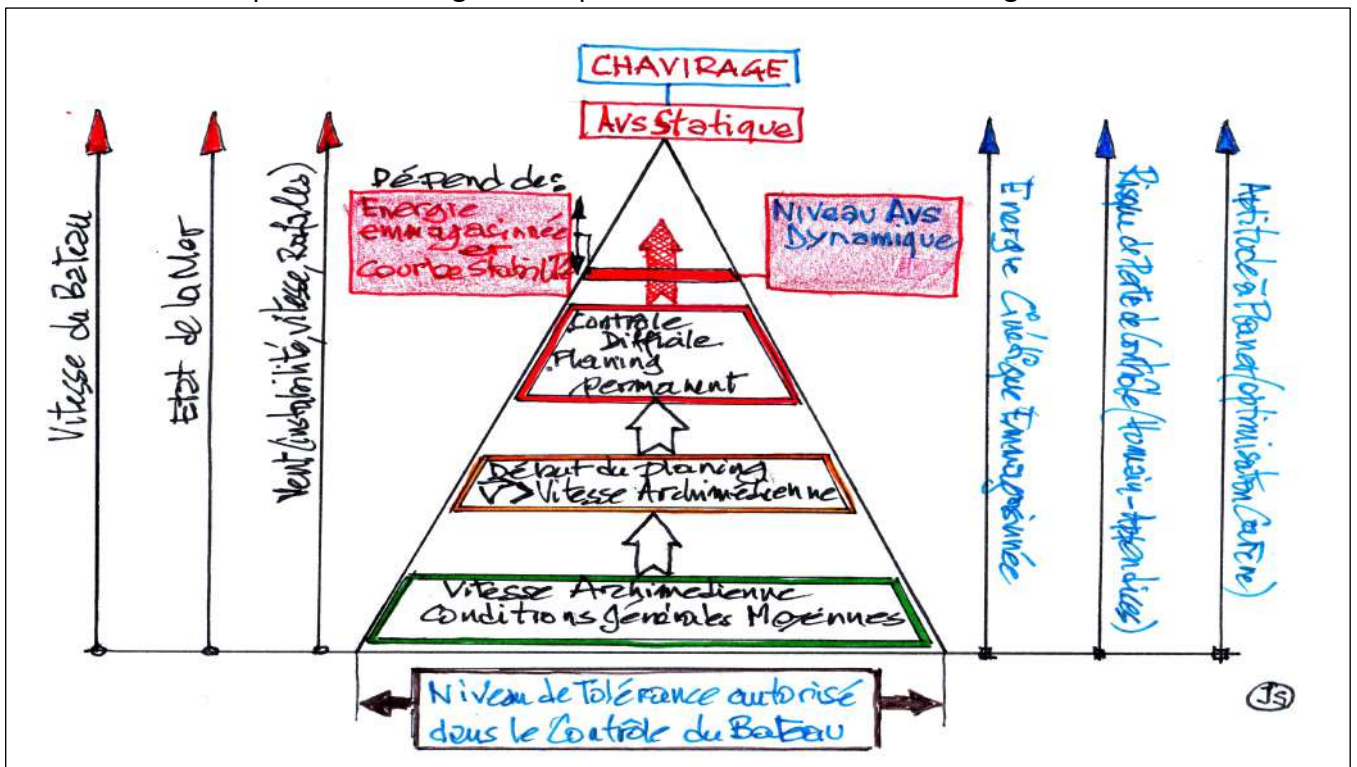
« m », il produit de l'énergie cinétique en translation. Si, par exemple, on enlevait les voiles (donc plus de « moteur »), le bateau continuerait sa route, à son cap, en consommant l'énergie cinétique emmagasiné jusqu'à ce que la trainée de la coque dans l'eau ait consommée toute cette énergie cinétique.

On introduit alors l'environnement « dynamique ».

Lorsque le bateau, lancé à pleine vitesse en ligne droite, se trouve dans une giration (rotation) incontrôlée plus ou moins brutale. Les éléments extérieurs (vent, état de la mer, décrochage du safran...), génère un couple de chavirement important. Le bateau gîte, les voiles battent violemment. Il suit alors degré après degré la courbe de stabilité statique jusqu'à l'angle  $A_d^\circ$ .

A ce moment les paramètres extérieurs ne produisent plus de gîte (le mat se trouve assez proche de l'horizontale, les voiles ne portent plus), par contre une partie de l'énergie cinétique emmagasinée pendant la route linéaire, se transforme en énergie cinétique de rotation autour de l'axe du bateau et continue à accentuer la gîte (à partir du point W de la courbe) ... en espérant que l'angle de gîte n'atteindra pas l'angle  $A_{vs}$  (chavirage).

L'autre partie de l'énergie cinétique de translation termine le virage du bateau.



Lorsque toute l'énergie cinétique est consommée, tout s'arrête. Si la barrière de l'angle  $A_{vs}$  n'est pas franchie, le bateau revient en Gîte  $0^\circ$ . **Dans l'autre cas, il chavire irrémédiablement.**

Finalement, on peut représenter le domaine d'utilisation d'un voilier sous la forme d'un triangle ou le sommet matérialise l'angle de chavirage ( $A_{vs}$ ).

La base du triangle diminue au fur et à mesure que les paramètres croissent (flèches verticales rouges et bleues). **La longueur de cette base matérialise le niveau de contrôle de la trajectoire acceptable** (en fait le niveau des erreurs). **Plus la vitesse augmente, plus le pilotage demande de la compétence d'attention et de réactivité.**

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

&

C52:-46#52M)%&#"#)%>#+"./+0%&-)&%. (G+ '+., &>'(>6',)%&). &+\*" /%,)%&-)"6+%&'(&J+0&-)&(00,) %&2V  
(6N&9/'++)#%&R>/6#%)%&(6&'(#B)/6&'&'&#B)\*0.&%6",#+)6#)%&8&>)"%&-)%&(00,) %&  
?&CDE&F&H&I&J&K&L&M&N&O&P&Q&R&S&T&U&V&W&X&Y&Z&[&]\&]^&\_&`&{&}|&~&?&@&#&\$&%&^&\_&`&{&}|&~&?&@&#&\$&%&^&\_&`&{&}|&~&?  
;6<60&>@(9+#(B)&%)"#/-6+%&F&H)%&G(.) (6N&-)9+)00)0.&-)"6%&)0&"6%&#"(+)"%&(6N&'6#)%  
"/#.(0.)%5&G+)0&;6)&'6#%&-+\*)0%+ /0%&-+\*+06)0.F&M)&-)#0#)#&G\*F065&&4\*  
%(\$ (4 &0.)##/B)&>(#&'<)09+#/00)\*0.&)N.,#+)6#&R., (&-)&'(&\*)#U&(\*"+J+)&)%&#+%;6)%&-)&  
")#.)%&-)&>/0.#c'F

!

-?@#|AB!"#!CY7Y0I`#!0#!81-2@07#66YJEBE@F

M/\*\*)&>)'(&(&.,&-,\*0.#,5&./6%&' )%&G(.) (6N&%/0.&8&6-#)%% (0.&)0.#)&Wb&). &!9%b&-)&Ba.)F&  
M<)%&. &60)&' /+&(#>@+\*, -)00)F&H(&%>6#+. &-)%&G(.) (6N&%/6@(+.)&;6)&>). &+0.)#9(")&%/  
'&"6%&B#(0-&' /%+%&G')F&m(+%&%/Y/0%&#, ('+%)5&'(&9')6#&-)&8&805\*!&9%88,%6'. )  
)0.#)&'&#+%;6)&-)&>@(9+#(B)&). &'(&;6A.)&-)&9+.)%&)%&#>@)#>@,&'(#&' )%&(#>@+.)>.)%F&H</G  
. /6.&( #>@+.)>)&>/0%+%.)&8&-)%%+0)#&60&G(.) (6&"6%&#"(+)"&;6)&'(&>/0>6##)0>)F&M<)%&'<)%  
\*A\*)&-)&'(&#B.)F&

M<)%&. (6%&+&'</G:)>+J#95&8%&6+&' )%&>/0-6+. &8&./6:/6#%&0(9+B6)#&(9)&>'(&  
"6+%&%(0>)&9,+;6)&\*(N+\*(')&)0&J/0>+ /0&-)%&>/0-+./0%&-6&\*/')0.&>)&;6+&' )%&)0.#(+0)&  
%/69)0.&- (0%& (80)&#/6B)&F&

H)&J(+.&;6)&' )%&>(\$0)%&-)9+)00)0.&-)"6%&)0&"6%&)"#J/#'(0.)%&)0&.)#\* )%&-)&  
9+.)%&)%&>/0-+./0%&-)&"(0+0B5&(\*"+J+)&' )%&)&8&8(6)8&)&-)&#/(6)8&

&

H)%&G(.) (6N&-6&^09)/G)&%6G+%&%)0.&' )%&#"\*)#%&>)%&>@(9&#(B)%&%,#+)%'F&  
!J+0&-)&#, -6+&#)&#+%;6)" /6#&>)%&G(9)610%&.#/'&+\*"(>.)#&' )%&J/#\* )%&-)&>(\$0)%&  
)&'<,9/6.+ /0&-)%&)"#/(0>)%5&'(&M'(%&)%&CmDM!&(\*"+&688)%&#526\*(:\$886

≠! M/0%&)9)#&'<(0B')&!9%&-)&1T'b&). &' )%&#.(+&/-)& O1&-)%&%6#J(>)%&"/%+.)&.&  
0,B(+9)5&\*(+&%&>#),#86082q/#%&. &M&8&8&11Wb&;6+&&/##)%&"/0-&(6N&  
>/0-+./0%&-)&>@(#B)\*0.&-6&G(.) (6&' )%&"6%&)&G,J/0&#/6#&'(&%&. (G+'+.,F&  
M)'(&>/##)%&"/0-&8&8'(&;6+)"&G(%>6')&(6&9)0.&( +0%+&;6)&' )%&G(" (%.%&)" +0%F&I/6  
60&G(.) (6&' /%&,-(0.&60)&;6+)"&J+N)5&%&)6'%&' )%&G(" (%.%&)&(6&9)0.&%/0.&+0.,B#,%  
-(0%&' )%&>'>8%F

&

C'&)%&. (6%&+&&-,>+&-,&-<(57#4&8#57&-(66&8&+\*"/% (0.&(6N&(#>@+.)>.)%&-)&  
-)%&+0)#&60&##/J5&60&"/0.&R(9)&>-6&G/6B)U5&-)%&k69#)%&\*/#.)%&;6+&)"#)..)0.5&' /#%;6)&' )&  
G(.) (6&%&#).#/69)&7")&)0&'<(&5&#"(&)'&G(%>6')\*0.&-)&'(&;6+)"%&6#&60&&>c.,5&-  
#)-#)%&)%&#(6./(\*.+;6)\*0.&). &( +0%+&' )%&#(\*)0)#&8&&<)&#/+F&

&

m(+%&(..)0.+ /05&C'&0)&J(6.&" (%&+-)0.+J+)&#&'<)0%&)\*G')&-)&'(&J'/..)&+0.)#0(.+ /0(')&;6+&  
#"(.+;6)&' )%&>/6#%)%&/JJ% @/#)%&(6N&9/'++)#%&CmDM!&;6+&%/0.&./6%&.,6+",&%&-<60)&;6+)"&  
")0-6'(+&#)&). &-<60&#F&

&

N4:42\*)'6\*(4\$&'6\*%(\$ (4A\*07;4#=#\*)342\*';4#--\* .#A'P\*%#2\*;48)4856(%-'\*2\$&\*  
QR\*\$\*N86\*2'&'&8#2)&(\*)342'\*#28'&6#52\*S\*TUQR\*OC(=6#V'PJ

\*

! "\$%&'(%\$)#(")\*#+#,\$A)"#0.1%2#\*+\$#34'5,-\$1)".%#,-+\$#346&(3+)1'-#(%#3)#\*1)7'3'162#(%#34"1\$-(+1'-#(%#3)#  
8'\$%.1&%#9:#;%#<==>?(%\*1"6%#)+@#)"&\$%\*#(%#3)\*").%A

V\&.#/69)&)"#%/00)")\*0.&;6)&'(&#"#)%>#+" .+0&-)%&DQE&R#&\$B')&+0.)#0(+/0(')&  
(""+;6,)&-(0%&')%&>/6#%)%&(6&#&B)&+\*" /%&;6<(\$715&#\*Q\*O=(&:54&6\*\$X-&)\*EYP  
G.)(&6&-/+&.A.#)&?&

!L&)%.&60&#,) '&  
)6" @, \*+%)5&>(#&%&(6V%&\$\*)&-)&%&, >6#+. ,& "(%"+9)&-6&\*A\*)&B)0#)&;6)&>)'6&-)%&CmDM!5&  
(6>60&G.)(&60)&)"6.&%&<N.#(+&#)&-<60)&"/%&86+/'0&)&0&'<(&#&

H)&M/\*+.,&>@(#B,&-)&'(&#,-(>.+/0&-)&>)%&#&\$B')\*0.%&%&(+.&)"#.+0)\*\*0.&;6)&'&  
0/\*G#)&-)&G.)(&6N&.,6+,"&-)&6+)"&)"0-6'(+&#)&89,"(%%)0.&"(#&=W&60+.,%&-&(0%&')&\* /0-)&  
-)&'(&>/6#%)&(6&'&#B)F

&

& X/6.&%&)&.#/69)&-(0%&'(&;6'(+J+>(.+/0&-)&B(#?)&W&-)&0(9+B(+/0F&!>.6)")\*0.&  
>..) &>(. ,B/#+)&%&<(""+;6)&+\*" +>+.)\*0.&(6N&i/0)%&(6%#(')%5&)0&,.,&)&-&(0%&'&)%&0%&-)%&  
>/0-+./0%&-)&09%&' /#. (0.%F&M)'(& /6##(+.&(6%"+&A.#)&'<!. '(0.+;6)&V/#-&)&0&@+9)#&-&(0%&'&)%&0  
D6)%\_%.5&\* (+%&(6>60)&# ,B.)&0<N+%.)&8&>..) & , /;6)&-)&'<(00,)&-&(0%&&>..) &i/0)F&

&

H(&0/#\*)&RCQD&19TU8%<("6+)&%&6#&-)%&"#&+0>+)"%&8&8%&0#&60&9N",#&+0>)&  
-)&%&(G+'+.,&#,) " &

1/6#&' )&5<(#2\*' )'6\* C54&6'6\* Z..6"5&'5&-)&%&#+. \$#)%& %.(G+'+(%%)i& %,9\$#)%  
(""(#+%%)0&0.&' )%&# /+&#&+0>+"(6N&%&0.  
&

¥ I,HB*[*N1V&&13TW&W R[QIH&&["(>)*0.&*+0+*('& ).&Bi&~&%6#J(>)&"/%+. +9)&%/6%&'(&>/6#G)88)& ¥ N8&&R14W&•&V[5WV8*(+%&./6:/6#%&•&1WWb& ¥ ,D)]*^` *2*:( \$715&#*N*O5..6"5&'P !
--

&

H)&QX&#)"#,%&0.)&60&C0-)N&-)&Q.(G&#&F.&>('&8&#.#+&#&-)%&"(#(\*\$.#)#&8@(;6)&  
G.)(&6(J+0&-)&- ,J+0+&#&806(.+/0&-)&'(&("(>+.,&<60&\*/0/> /;6)& 8#,%&+%.)#&8&8&  
#)-#)%&#&' /#%;6<+&'& /&6> @82W8&0/>e&[/p0U&8' /#%;6<%&8&.#/69)&"# /> @)&-)&'(&  
"/%+. +/0&-)&> @ (9+&#(B)&8&9%UF&

&

"#!\$%&&\$

!

\_\_\_\_\_!

%!9%\$1)""#(\*%"1#B+%#3%\*#.-('1'-""#(%#5%\$#B+ #-"1#./)&\$6#3%#7)1%)+#3%#\$%5%11\$-"1#C#34%"(\$-'1D#.%3)#\$\*E  
(4E1\$%#+"#&F+#,%&+@A  
&!(G+8!A)3+1&8!8B)%%3,01+-!/F!3)4)/E(8&4B+8!6,&+!+-!/@E'&#1!+8!3+8!\*+&8!6+!3)!#3)!J!&  
'!>M<N\$!O\*9&+!8)-8!1-./E