

Ecole de Chasse C6

Instruments et unités du vol

Version 1.0, d' avril 2017.

Sommaire

Introduction.....	3
Le cap	5
Principe	5
Instruments.....	6
Cap magnétique et cap vrai.....	9
La vitesse	10
Instruments.....	10
Principe de la vitesse corrigée.....	12
Le Mach.....	13
L'altitude	16
Instruments.....	16
Caler l'altimètre au QNH.....	18
Caler... et recaler !.....	20
... ou pas.....	20
La hauteur	22
La radiosonde.....	22
Le calage au QFE.....	23
La trajectoire et l'attitude	24
Le FPM.....	24
La pente	25
L'assiette	27
L'inclinaison.....	29
L'incidence.....	30
Le facteur de charge.....	35
Réglages du HUD.....	39
Contrôle de l'intensité	39
Affichage des échelles.....	40
Affichage de la vitesse.....	41
Affiche de l'altitude ou de la hauteur.....	42

Introduction

Un avion, même un petit avion très simple, ne se pilote pas vraiment comme une voiture, et c'est encore moins vrai d'un avion de chasse. Même en simulation, le vol simple exige la compréhension de quelques notions, qui ne sont pas tout à fait aussi évidentes que le non-initié le pense souvent.

Ainsi, sans jamais s'être jusqu'ici soucié d'aviation, on peut avoir eu besoin de manipuler vitesse, cap et altitude... mais ces notions en aviation sont un peu plus complexes que pour un gentil randonneur. Qui plus est, le pilotage implique de savoir lire quelques données supplémentaires que personne n'est habitué à utiliser dans la vie de tous les jours.

Rassurez-vous, il n'est absolument pas besoin d'être ingénieur pour comprendre l'essentiel de tout cela. C'est le but de ce document que de vous le démontrer.

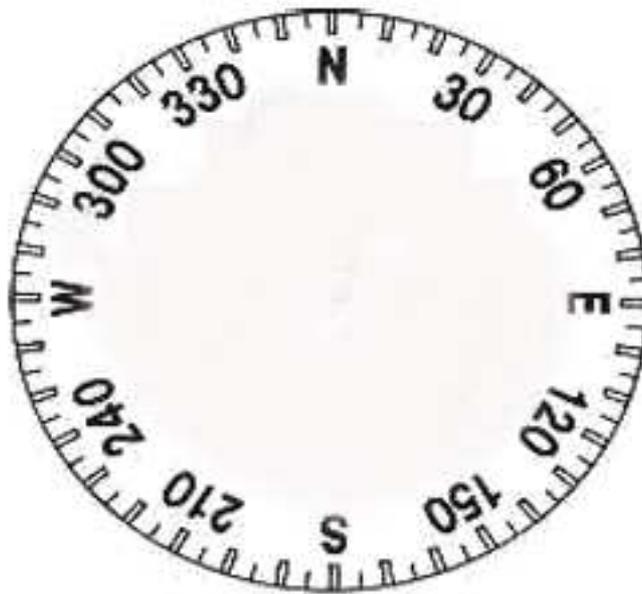


Le cap

Principe

Le cap est sans doute le paramètre le plus facile à saisir. Il s'agit simplement de la direction vers laquelle pointe le nez de l'avion par rapport au nord.

Prenons ainsi une rose des vents :



Son pourtour est gradué en degrés, de 1° à 360°.

Par convention, on décide que si l'avion pointe vers le nord, il est au cap 360 (on ne dit jamais qu'on est au cap 000 ou « zéro »).

S'il pointe vers l'est, il est au cap 090.

Vers le sud, il est au 180.

Vers l'ouest, il est au 270.

Cela signifie, par exemple, pour prendre le problème à l'envers, que si l'avion est au cap 040, son nez pointe grosso-modo au nord-est (à 5° près).

On comprend aussi que lorsque l'avion vire vers la droite, le cap augmente, et que lorsque l'avion vire vers la gauche le cap diminue.

Si vous avez déjà une idée de ce qu'est le cap sur un navire, c'est exactement la même chose sur un avion.

Instruments

Ce cap peut être lu à trois endroits dans le cockpit.

D'abord, dans le HUD (*head-up display*, c'est-à-dire le collimateur). Une échelle horizontale défile lorsque l'avion vire. On lit au milieu de l'échelle le cap de l'avion.



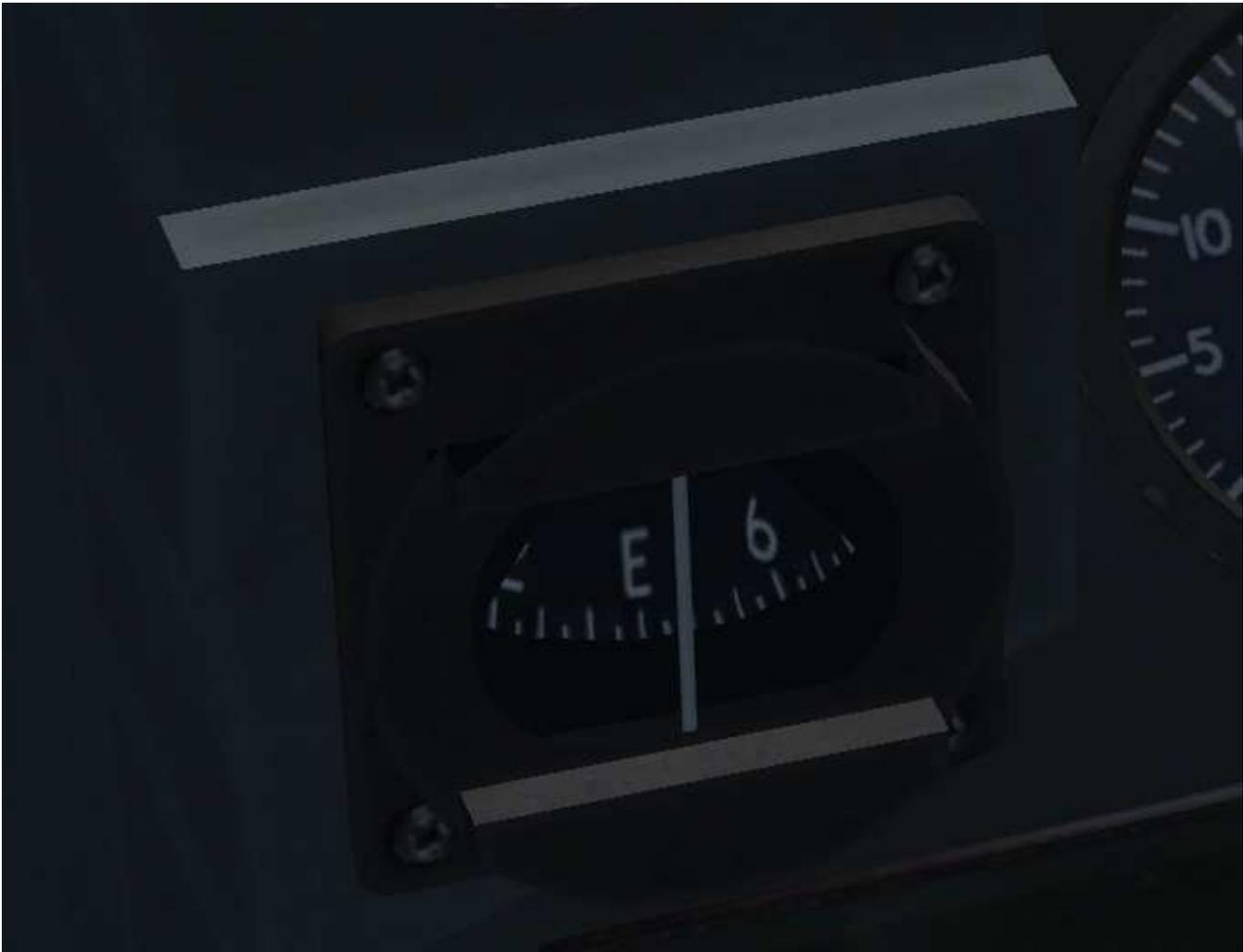
L'échelle de cap se lit très directement : ici le cap est au 082 (soit presque à l'est).

Ensuite, entre les jambes du pilote se trouve le HSI (*horizontal situation indicator*, appelé aussi plateau de route, en français). Il ressemble à la rose des vents vue plus haut. Le plateau tourne au fur et à mesure que l'avion vire, et le cap se lit au long du petit trait fixe en haut du HSI.



L'affichage est un peu moins précis que dans le HUD : ici on voit que le cap suivi est entre la graduation 080 et la graduation 085 (donc approximativement au 082, comme l'indique le HUD dans l'image précédente). La graduation 090, correspondant à l'est, est simplement indiquée par un E, comme les graduations 360, 180 et 270 sont indiquées par les initiales N, S et W (pour *North*, *South* et *West*).

Enfin se trouve également dans le cockpit un compas de secours. Il est assez imprécis, mais retenez tout de même qu'il existe. En effet, contrairement au HUD et au HSI, il fonctionne indépendamment du reste de l'avionique et sans électricité. Ce n'est jamais qu'une boussole un peu élaborée, mais qui pourra peut-être vous permettre un jour de ramener à la base un avion endommagé !



L'affichage du cap est encore un peu moins précis, mais il peut vous sauver la vie !

Ici le cap est compris entre la graduation 080 et la graduation 085 : le cap est bien approximativement au 082, comme dans les deux images précédentes.

Cap magnétique et cap vrai

Vous pouvez enfin noter, pour votre culture aéronautique, que ces trois instruments affichent votre cap dit « cap magnétique », c'est-à-dire qu'ils affichent votre cap par rapport au nord magnétique, comme une boussole.

Or le pôle nord magnétique ne se trouve en réalité pas sur le pôle nord géographique des cartes de navigation, et qui plus est sa position n'est même pas tout à fait fixe au fil des ans. Elle dérive quelque peu.

Quand le cap est donné par rapport au nord géographique plutôt que par rapport au nord magnétique, on dit alors qu'il s'agit du « cap vrai ».

Cela a une certaine importance dans la réalité, en particulier sur les vols longs ou à proximité du pôle.

Dans Falcon 4.0 BMS, cela n'en a toutefois aucune : les deux caps, cap magnétique et cap vrai, sont strictement confondus. Il n'y a pas de correction à effectuer pour passer de l'un à l'autre.

La vitesse

La vitesse est exprimée en nœuds (*knot*, en anglais), un nœud valant un mille international par heure, soit 1,852 km/h.

Le signe qui permet de noter les nœuds est « kts ». Ainsi, « cent-soixante nœuds » se note « 160 kts ».

Instruments

La vitesse peut être lue en deux endroits du cockpit.
D'abord dans le HUD, sur l'échelle verticale de gauche.



Ici, la vitesse est de 437 nœuds. Elle se lit de manière tout à fait directe.

Elle peut ensuite être également lue sur l'anémomètre (souvent appelé « badin », du nom d'un ingénieur français) : la vitesse est simplement indiquée par l'aiguille sur le pourtour extérieur du cadran, exactement comme sur un cadran de voiture ou de moto.



L'aiguille donne une information cohérente avec celle du HUD : comme dans l'image précédente on a bien 437 nœuds.

Notez que les graduations sont plus précises aux basses vitesses : c'est bien en effet aux basses vitesses qu'il est le plus important de connaître très précisément sa vitesse !

Principe de la vitesse corrigée

Notez le petit « C » situé juste à droite de l'échelle de vitesse. Il a son importance. En effet, il signifie que la vitesse affichée est la Vitesse Corrigée, appelée *Calibrated Airspeed* en anglais (abrégé en Vc en français, et CAS ou parfois KCAS en anglais)

Cela veut dire que ce n'est pas la vitesse réelle de votre avion qui est affichée, ou du moins ce que la plupart des gens comprennent quand ils parlent de « vitesse ». Il s'agit bien de mesurer comment avance l'avion, mais d'une manière différente de ce qu'on mesure dans une voiture ou sur une moto.

Explication :

Les capteurs de l'avion ne mesurent pas directement la vitesse, mais plutôt la « force » d'impact du vent sur votre appareil, et de cette mesure de la « force » d'impact est ensuite déduite une vitesse.

Si vous volez au niveau de la mer, c'est très simple : le système vous donne tout simplement la vitesse de l'air qui passe sur l'appareil (en conditions atmosphériques standards). En clair, il vous donne la vitesse de votre appareil à laquelle s'ajoute la vitesse du vent (algébrique, selon le sens du vent : quand il vient vers vous, elle s'ajoute, et quand il vient de votre dos, elle s'ôte du total).

Seulement, plus on monte dans l'atmosphère, et plus la densité de l'air diminue, ce qui veut dire que plus on monte et plus l'air doit aller vite pour fournir une même « force » sur le capteur.

La conséquence, c'est que, pour avoir 400 kts affichés au niveau de la mer, par exemple, il suffit que l'air sur votre avion ait une vitesse de 400 kts, mais à 25,000 pieds, là où l'air est beaucoup moins dense, pour avoir 400 kts affichés il faudra que l'air sur votre avion atteigne en réalité une vitesse bien supérieure (autour des 600 kts, en réalité).

Arrivé à ce point, vous vous demandez sans doute pourquoi l'on n'affiche pas plutôt la vitesse recalculée en tenant compte de la densité de l'air, plutôt que d'afficher cette Vitesse Corrigée bien compliquée.

Eh bien, c'est tout simplement parce que la façon dont votre appareil se comporte en vol ne dépend pas de sa vitesse réelle, mais de la Vitesse Corrigée.

En effet, puisque c'est le passage de l'air sur les surfaces portantes de votre avion qui lui permet de voler, il est logique que la façon dont il vole dépende de la « force » de l'air sur l'avion.

Ainsi, quelle que soit l'altitude, votre appareil décrochera (c'est-à-dire que ses ailes cesseront de le porter) à la même Vitesse Corrigée. De même, tout son comportement général dépendra de sa Vitesse Corrigée, et non pas de sa vitesse réelle (tant qu'on échappe aux phénomènes transsoniques et supersoniques, mais pour ce qui vous concerne actuellement, c'est un point de détail pour ingénieur, pas pour pilote).

Donc, à chaque fois que souhaitez faire effectuer une manœuvre à votre appareil, c'est sa Vitesse Corrigée qui vous intéresse, puisque c'est elle qui conditionne ce que vous pouvez faire faire à votre avion, et conditionne dans quelle partie de son domaine de vol il se trouve.

Le Mach

La vitesse de l'avion peut également être exprimée en fonction de celle du son. L'unité utilisée est alors le nombre de Mach (prononcé « mac »). Ainsi, si l'avion vole à la vitesse du son, on dit qu'il vole « à Mach 1 », tandis que s'il vole à 0,8 fois la vitesse du son, on dit qu'il vole « à Mach 0,8 ».

Le Mach n'est que peu utilisé pour piloter l'avion, en particulier au niveau 1. En revanche, il est très utile pour sauvegarder l'avion parce que certaines des limites de l'avion ou de ses emports sont définies par rapport à la vitesse du son (c'est pas mal aussi de ne pas casser toutes les vitres dans un rayon de plusieurs kilomètres autour de vous pour rien, vous serez gentils).

Le nombre de Mach peut être lu en deux endroits différents du cockpit.

D'abord, dans le HUD.



Ici l'avion vole à 0,67 fois la vitesse du son (celle-ci valant environ 660 kts au niveau de la mer).

Ensuite sur le machmètre intégré à l'anémomètre : il s'agit de la valeur qui défile à l'intérieur du cadran.



Le corps de l'aiguille passe sur le cadran intérieur entre la graduation 0,65 et la graduation 0,7 : l'avion file bien à 0,67 fois la vitesse du son.

L'altitude

L'altitude est toujours exprimée en pieds (*feet* en anglais), un pied valant 30,48 cm. Le signe qui permet de noter les pieds est « ft ». Ainsi, « mille pieds » se note « 1 000 ft ».

Le capteur d'altitude est en fait un baromètre un peu élaboré, qui mesure la pression de l'air autour de votre avion, exactement comme la pression du bulletin météorologique à la télévision.

Le principe global est simple : on sait que la pression atmosphérique diminue au fur et à mesure qu'on monte. En conséquence, plus la pression mesurée baisse, et plus une altitude élevée est affichée. Inversement, plus la pression mesurée est importante, et plus une altitude basse est affichée.

Instruments

L'altitude peut être lue en deux endroits différents. D'abord dans le HUD :



Rien à comprendre ici : l'altitude se lit directement. Elle est de 620 pieds.

Elle peut ensuite être également lue sur l'altimètre située entre les jambes du pilote.



On lit les milliers et les centaines de pieds sur le gros affichage digital. L'aiguille sur le pourtour permet d'affiner la lecture, en indiquant les dizaines de pieds. Notez que l'aiguille n'affiche jamais les milliers de pieds, elle fait simplement un tour tous les mille pieds. Elle pointera ainsi exactement dans la même direction que vous volez à 200 pieds, à 3 200 pieds ou à 25 200 pieds. Ici, l'altitude est bien de 6200 pieds, comme dans le HUD.

Caler l'altimètre au QNH

Ça n'est donc pas bien compliqué l'altitude, êtes-vous sûrement en train de vous dire : l'instrument affiche tout simplement votre altitude par rapport au niveau de la mer, il n'y a rien à comprendre.

Et vous avez un peu raison... sauf que, comme avec la vitesse, c'est tout de même un tantinet plus compliqué (reconnaissez que ce ne serait pas drôle autrement).

En effet, l'instrument affiche une altitude selon que la pression extérieure, autour de l'avion, est plus ou moins grande par rapport à celle qui règne au niveau de la mer... mais encore faut-il connaître cette pression du niveau de la mer. Et l'ennui, c'est que cette pression au niveau de la mer change selon le temps qu'il fait !

C'est bien d'ailleurs ce que vous dit le bulletin météorologique, ou ce que vous indique votre baromètre de maison : lorsque le temps change, la pression extérieure change.

Si cette pression au niveau de la mer change selon le moment où l'endroit, cela signifie que pour que l'altimètre continue d'afficher l'altitude par rapport au niveau de la mer alors il faut lui indiquer quelle est cette pression au niveau de la mer à l'endroit et au moment où l'on se trouve.

Dit autrement, il faut indiquer à l'instrument pour quelle valeur de pression il doit afficher zéro.

Pour ce faire, on utilise la petite molette qui se trouve dans le coin gauche de l'altimètre, et on la fait tourner jusqu'à ce que la petite fenêtre de calage indique la pression désirée, qui est donc la « pression de calage ».

La valeur de la pression (calculée) régnant au niveau de la mer est appelée QNH. On dit donc qu'on « cale au QNH » : on règle l'altimètre pour qu'il affiche l'altitude par rapport au niveau de la mer.

La pression peut être exprimée soit en pouces de mercures (InHg), utilisés par les forces américaines, ou en hectopascals (hPa) ou millibars (mb, qui ont exactement la même valeur qu'un hectopascal), utilisés par la plupart des forces occidentales (le choix se fait dans l'outil de configuration de Falcon).

En conditions dites « standards », le QNH vaut 1 013 hPa, ou 29,92 InHg.

Noter que ce calage fait de l'altimètre entre les jambes du pilote est valable tant pour l'altimètre que pour l'altitude affichée dans le HUD. L'altitude affichée sera toujours la même sur les deux instruments (à moins que l'un des deux soit en panne).



On se trouve au sol, avant le départ.

Ici, la pression de calage entrée est de 1 042 hPa. L'altitude affichée est de 620 pieds.

On appelle la tour, ou on demande au moniteur, qui nous informe que le QNH ne vaut pas en réalité 1 042, mais 1 036. L'altitude affichée n'est donc pas bonne. De fait, on sait que l'altitude du terrain sur lequel on se trouve est en réalité de 460 pieds.

On tourne alors la mollette jusqu'à qu'à obtenir une pression de calage de 1 036 :



Le QNH est cette fois bien entré : l'altitude affichée est de 460 pieds. Il s'agit bien de l'altitude du terrain. L'altitude est juste.

Caler... et recaler !

Rappelez-vous cependant que si le temps change, le QNH change aussi. Il n'est pas statique.

Ainsi, si vous revenez sur votre base de départ et que le temps y a changé depuis votre décollage, le QNH ne sera plus le même. Si vous n'avez pas modifié la pression de calage, l'altitude affichée sur votre altimètre est donc devenue fautive, puisque la valeur entrée pour définir le zéro de l'altimètre est devenue fautive.

De même, si vous voyagez vers un point où le temps est différent de votre point de départ, le QNH sur ce point d'arrivée ne sera pas le même qu'à votre point de départ.

Il faut donc bien comprendre qu'un QNH donne une information d'altitude qui n'est juste seulement que pour un endroit donné et un moment donné. C'est pour cette raison qu'on dit que le QNH est local.

En conséquence, dès que vous avez besoin que votre altitude soit précise (typiquement lorsque vous approchez d'une base sur laquelle vous souhaitez atterrir, ou bien lorsque vous passez à proximité du relief), il vous faut tâcher d'obtenir le QNH local pour recalibrer votre altimètre.

N'oubliez donc pas au minimum de demander à la tour le QNH avant chaque décollage et avant chaque atterrissage, en particulier si vous volez aux instruments.

... ou pas

Lorsqu'on ne se trouve pas à proximité du relief, en route, il devient moins important que l'altimètre permette de se situer très précisément par rapport au niveau de la mer.

En revanche, si vous croisez des avions qui ont tous décollé d'endroits différents, et dont les altimètres ont été calés avec des QNH différents, vous aurez un problème de référence : deux avions croyant être à la même altitude pourront en réalité être à des altitudes différentes de plusieurs centaines de pieds. Ce qui est embêtant... mais ce qui est encore plus embêtant c'est que vous pouvez croire être à une altitude différente d'un autre avion et en fait être exactement à la même altitude que lui, parce que vos altimètres respectifs sont calés de façon différente. Autrement dit, vous risquez la collision parce que vous n'avez pas le même réglage.

Pour pallier ce problème, au-dessus d'une certaine altitude, à distance suffisante du sol, tous les avions calent leur altimètre à la même pression de calage, en général 1 013 (pour une pression en hPa) ou 29,92 (pour une pression en InHg).

Cela assure que chacun vole avec la même référence, et donc que deux avions volant selon des altitudes affichées différentes ne risquent pas d'entrer en collision.

La hauteur

Nous venons de voir comment lire l'altitude.

Il s'agit à présent de savoir comment connaître éventuellement sa hauteur, c'est-à-dire la distance entre l'avion et le sol, ou un point particulier au sol. Comme l'altitude, celle-ci est toujours indiquée en pieds.

La radiosonde

La hauteur instantanée est aisée à connaître sur le F-16 : l'appareil dispose en effet d'une radiosonde, c'est-à-dire un télémètre radar situé sous l'appareil qui mesure continûment la hauteur de l'avion.

Cette mesure effectuée par la radiosonde s'affiche dans une petite fenêtre du HUD, juste en dessous de l'échelle d'altitude. La mesure, toujours indiquée en pieds, est toujours précédée d'un petit « R » pour éviter toute confusion avec l'altitude.

Dans certains cas, selon le réglage choisi par le pilote, le HUD n'affiche plus à la fois l'altitude barométrique et la hauteur donnée par la radiosonde, mais seulement cette dernière. Dans ce cas-là, la hauteur est affichée à la place de l'altitude, mais toujours précédée d'un petit « R ».



Ici la hauteur se lit très directement : l'avion se trouve à 1 360 pieds au-dessus du sol qu'il survole.

Le calage au QFE

Il est également possible de connaître la hauteur de l'avion par rapport à un point au sol, en calant l'altimètre pour ce faire.

Prenons l'exemple de l'approche d'un terrain. Mettons que vous avez calé votre altimètre au QNH, c'est-à-dire que vous l'avez réglé de telle sorte qu'il affiche l'altitude de l'avion par rapport au niveau de la mer.

Si vous connaissez l'altitude de la base aérienne, une petite soustraction vous permet alors de connaître votre hauteur par rapport au terrain.

Ainsi, si votre altimètre affiche 1 500 pieds, et que le terrain est situé à 300 pieds d'altitude, alors vous êtes 1 200 pieds au-dessus du terrain.

C'est ainsi qu'on procèdera la plupart du temps.

Il est cependant possible de « tricher un peu », c'est-à-dire qu'on peut caler l'altimètre pour qu'il indique zéro pour l'altitude du terrain, si bien que l'altimètre n'affiche plus alors l'altitude par rapport au niveau de la mer, mais la hauteur de votre appareil par rapport au terrain.

Pour ce faire, on entre dans la fenêtre de calage de l'altimètre la pression qui règne à l'altitude du terrain. Cette pression est appelée « QFE ». On dit donc qu'on « cale au QFE ». Ce QFE, comme le QNH, peut être obtenu de la tour de contrôle du terrain.

Il est cependant déconseillé d'utiliser le QFE, du fait qu'il peut rapidement mener à des confusions, en particulier si tous les aéronefs autour de vous ne sont pas calés au QFE ou si le relief (dont l'altitude est toujours donnée pour un QNH) est important autour du terrain.

La trajectoire et l'attitude

Le FPM

Le FPM, ou *Flight Path Marker* (littéralement « marqueur de trajectoire de vol »), également appelé « maquette », « busard » ou simplement « vecteur-vitesse » en français, vous permet de visualiser très simplement la trajectoire suivie par l'avion.

Concrètement, ce repère mobile dans le HUD, à partir du moment où vous ne vous trouvez pas en évolution, vous indique précisément vers où se dirige votre appareil. Ainsi, si vous superposez le FPM sur un point au sol, votre appareil ira très précisément sur ce point au sol. C'est donc un outil précieux pour l'atterrissage en particulier, ou pour le vol à basse altitude.

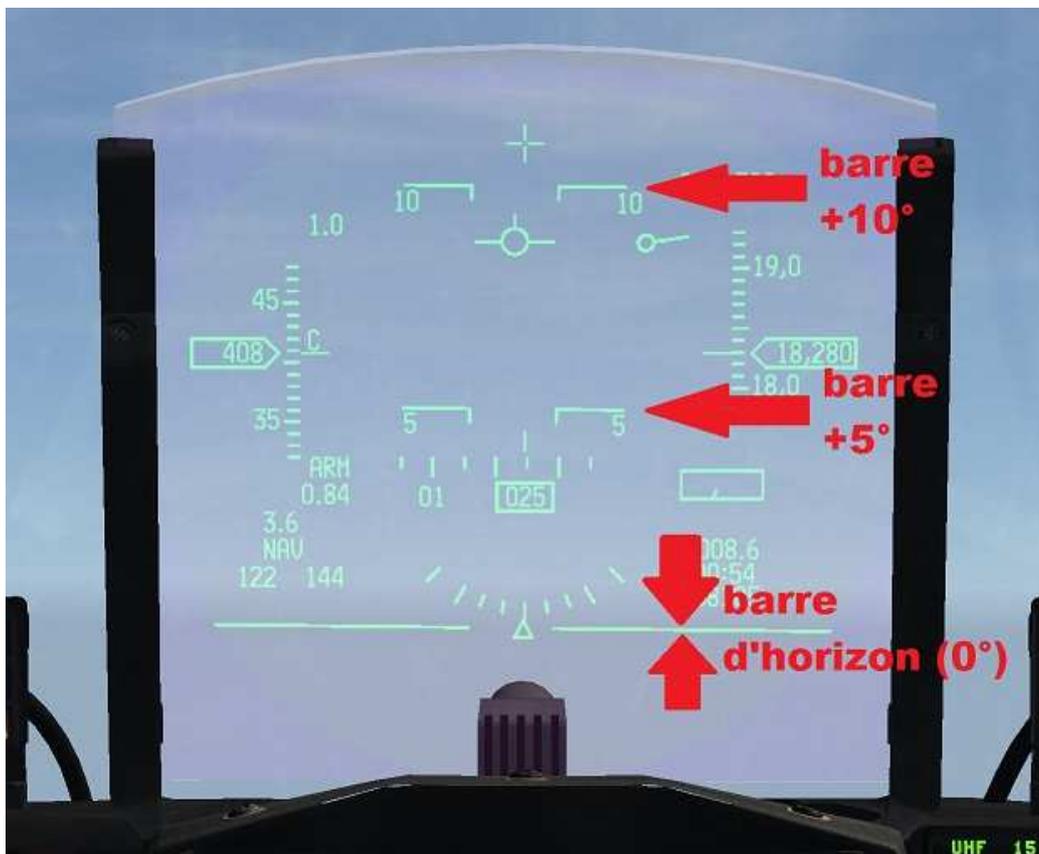


Le FPM donne très visuellement la trajectoire de l'appareil. Ainsi ici si le pilote laisse l'avion filer sur sa trajectoire actuelle, il terminera très précisément dans la rivière qu'on voit au loin, sur laquelle le FPM semble superposé.

La pente

Par ailleurs, dans le HUD s'affichent également des barres d'attitudes, graduées de 5° en 5° , et qui restent toujours orientées pour rester parallèles au sol.

La position du FPM vis-à-vis de ces barres d'attitude vous donne la pente suivie par l'avion, c'est-à-dire l'angle que forme sa trajectoire avec l'horizon. Ainsi, si le FPM se trouve sur la barre $+5^\circ$, votre avion à une pente de $+5^\circ$ (il grimpe), tandis que si le FPM est, par exemple, placé entre les barres -5° et -10° , votre avion suite une pente de $-7,5^\circ$ environ. Cela signifie aussi que si le FPM est sur la barre d'horizon (barre 0°) qui s'étend sur toute la largeur du HUD, alors votre avion est en palier : il ne monte ni ne descend.



Ici, l'avion est en train de grimper. On peut lire sa trajectoire en comparant la position du FPM par rapport aux barres d'attitude. Ici, le FPM se trouve approximativement aux trois-quarts de la distance entre la barre $+5^\circ$ et la barre $+10^\circ$: on en déduit que la pente suivie par l'avion est d'environ $+8^\circ$.

Il faut cependant veiller à ne pas piloter le FPM, mais l'avion. Rappelez-vous d'abord bien que le FPM ne vous indique pas où vous allez si vous êtes en virage ou en évolution. Par ailleurs il ne vous dit pas non plus si la manœuvre que vous entreprenez est possible. Enfin le FPM bouge toujours avec un léger retard. C'est important : c'est pourquoi vous devez d'abord donner une trajectoire à votre appareil, et seulement ensuite l'affiner ou la vérifier avec le FPM. Le FPM est un outil précieux, mais ne pilotez pas le FPM au lieu de l'avion !

Notez que le FPM tient compte du vent : si jamais le vent déporte votre appareil sur le côté, le FPM sera lui-même déporté sur le côté dans le HUD, puisqu'il indique toujours, lorsque vous volez en ligne droite, où va vraiment votre appareil.



Ici l'avion est au cap 264, et le vent provient du 170, c'est-à-dire de la gauche presque perpendiculairement. Le FPM se trouve décalé vers la droite, il est « poussé » sur le côté par le vent. Notez que les barres d'attitude suivent également le FPM.

Dans certains cas ce décalage horizontal du FPM provoqué par le vent peut être gênant, en particulier lorsqu'il est tellement important que le FPM devrait en réalité être affiché hors du HUD. On peut alors choisir d'annuler tout déplacement horizontal du FPM en passant le commutateur situé sous le HUD sur la position Drift C/O (pour *drift cut-out* : « annulation de la dérive », traduit mot à mot). Le FPM ne se déplacera alors plus que verticalement.



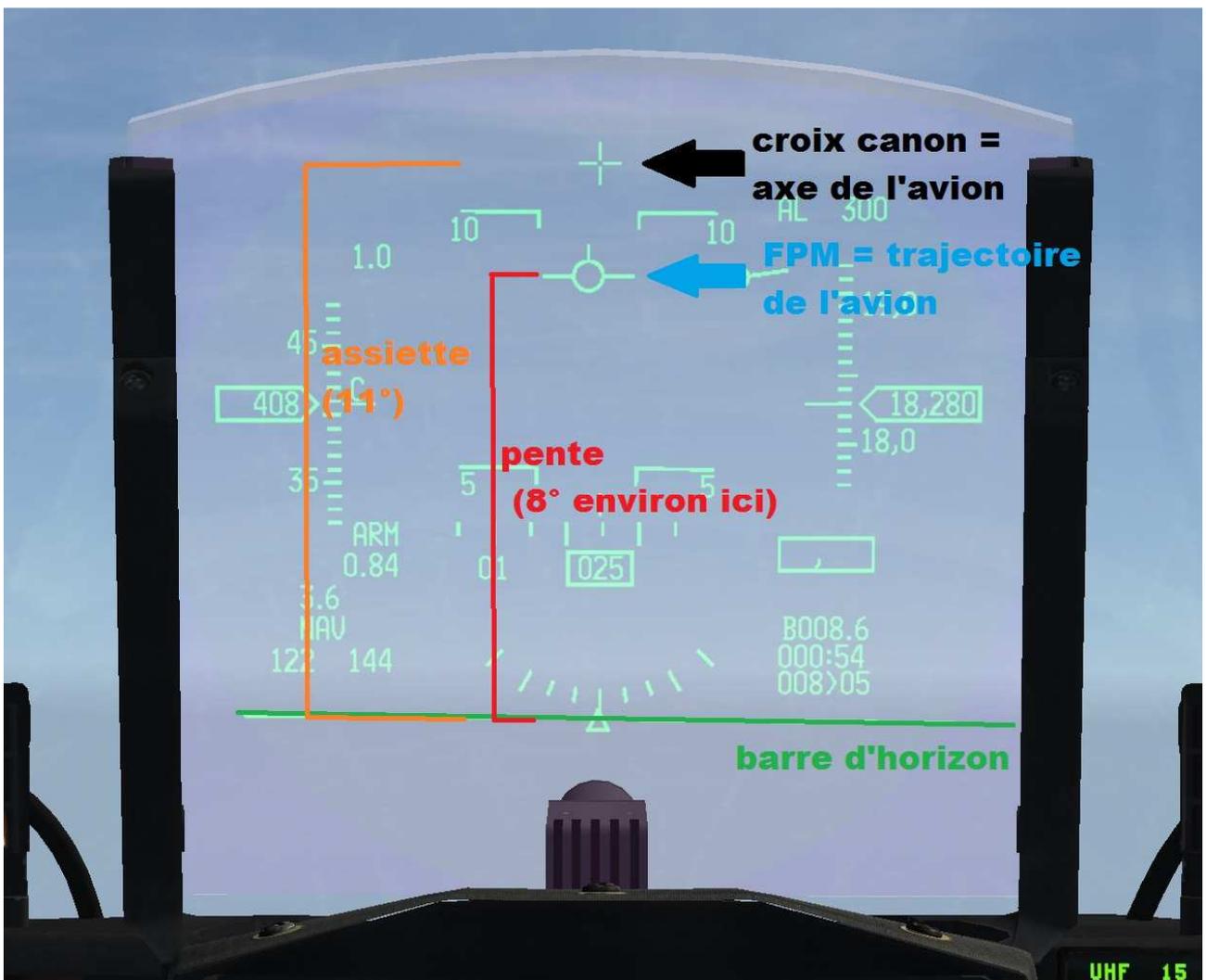
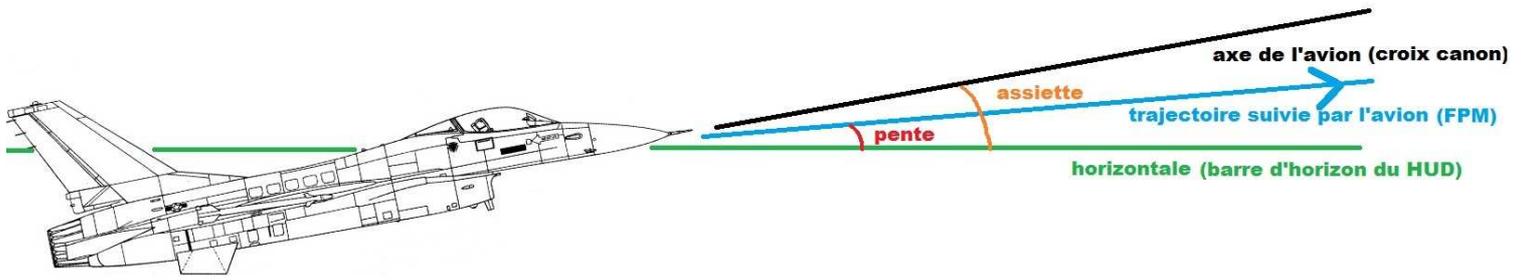
L'assiette

En plus de la pente de l'appareil, le HUD vous permet de contrôler son attitude, c'est-à-dire son assiette et son inclinaison.

L'assiette, c'est tout simplement l'angle que fait le nez de l'appareil par rapport à l'horizon. Il est en général différent de la pente.

Il est facile à lire dans le HUD : en haut du HUD se trouve une petite croix, qui correspond au réticule du canon. Mais comme le canon sur le F-16 est calé à 0°, c'est-à-dire qu'il est parfaitement orienté dans l'axe longitudinal de l'appareil, cette croix indique aussi la direction de son axe, donc du nez.

Vous pouvez donc lire l'assiette directement en observant la position de cette croix vis-à-vis des barres d'attitude, comme vous lisiez la pente avec le FPM : si la croix se trouve sur la barre + 5°, alors votre avion a une assiette de + 5° (ce qui ne signifie pas forcément qu'il grimpe, cela signifie simplement que le nez pointe légèrement vers le haut), tandis que si la croix se trouve placée entre la barre d'horizon et la barre - 5°, l'avion a une assiette de - 2,5° environ (attention là aussi, ça ne signifie pas là non plus que l'avion descend, mais simplement que son nez pointe légèrement vers le bas).



L'inclinaison

L'inclinaison c'est simplement l'angle que forment l'horizon et le plan moyen des ailes, c'est-à-dire l'angle qui varie selon qu'elles sont plus ou moins « penchées » à gauche ou à droite, si on veut.

Elle peut se lire grossièrement en observant l'orientation des barres d'attitude dans le HUD : puisque ces barres sont toujours parallèles au sol, plus on incline l'avion est plus elles semblent elles-mêmes « penchées ».

Elle peut également se lire dans certains modes d'affichage du HUD grâce à l'échelle de roulis qui se trouve au bas du HUD, jusqu'à une inclinaison de 45°. Les graduations valent 10°, 20°, 30° et 45°.



L'avion est incliné à gauche. Sur l'échelle de roulis on lit l'inclinaison grâce à la position du triangle sur l'échelle. Ici l'inclinaison est d'un peu plus de 30°.

L'inclinaison peut se lire plus précisément, ainsi que l'assiette, sur l'horizon artificiel situé en les jambes du pilote (ADI, pour *Attitude Direction Indicator*) ou sur l'horizon de secours situé à droite du HUD.

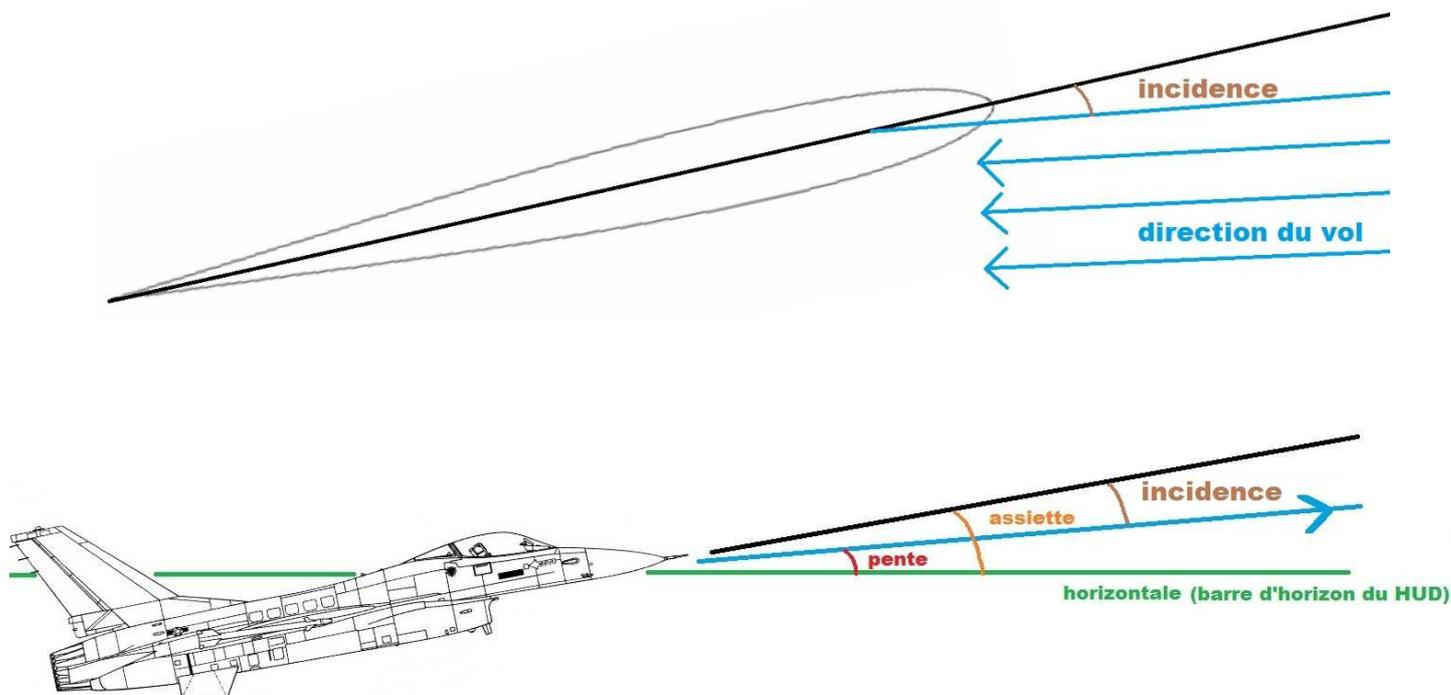
L'incidence

On a vu que pente et assiette sont bien deux choses différentes : la plupart du temps, le nez de l'avion n'est pas orienté dans la même direction que la trajectoire suivie par l'avion. On comprend bien dès lors que l'aile de l'avion non plus.

Il y a une différence entre la direction moyenne de l'aile et la trajectoire qu'elle a vraiment dans l'air. L'angle ainsi formé, habituellement mesuré en degrés, est appelé « incidence ».

Autrement dit, l'incidence est l'angle que forme l'axe moyen de l'aile avec la direction du vol.

Ainsi, si l'aile a, par exemple, une incidence de 5° , cela signifie qu'au lieu de suivre parfaitement la direction du vol l'aile pointe en réalité 5° plus « haut » que la trajectoire qu'elle a dans l'air.



Nota bene : En anglais, « incidence » se dit *Angle of Attack* (abrégé en AoA). Par un mauvais calque, certains pilotes virtuels parlent donc de « l'angle d'attaque » quand ils veulent en réalité parler de l'incidence. Le terme est impropre et ne doit pas être utilisé en français.

Bon, pente, assiette, et incidence... tout ça ressemble sans doute un peu pour le débutant à un discours pour ingénieur, mais pas pour pilote.

L'incidence est néanmoins une donnée importante, parce qu'elle a un impact sur la contrôlabilité de l'appareil. Retenez à ce stade simplement que plus l'incidence augmente, et plus le contrôle de l'appareil peut devenir compliqué, jusqu'au décrochage, avec des conséquences plus ou moins violentes.

Vous n'aurez cependant guère à vous préoccuper de cette incidence en croisière ou au combat, car le FLCS (FLight Control System, le système qui contrôle les commandes de vol) limite automatiquement l'incidence de sorte que l'appareil ne puisse atteindre des valeurs d'incidence trop grandes, qui mettraient en danger le contrôle de l'appareil.

En revanche, comprendre et connaître votre incidence sera essentiel pour l'atterrissage, dans la mesure où l'atterrissage, sur le F-16, comme sur beaucoup d'autres chasseurs, doit s'accomplir dans des paramètres d'incidence précis, un problème que ne connaissent pas les appareils légers de tourisme.

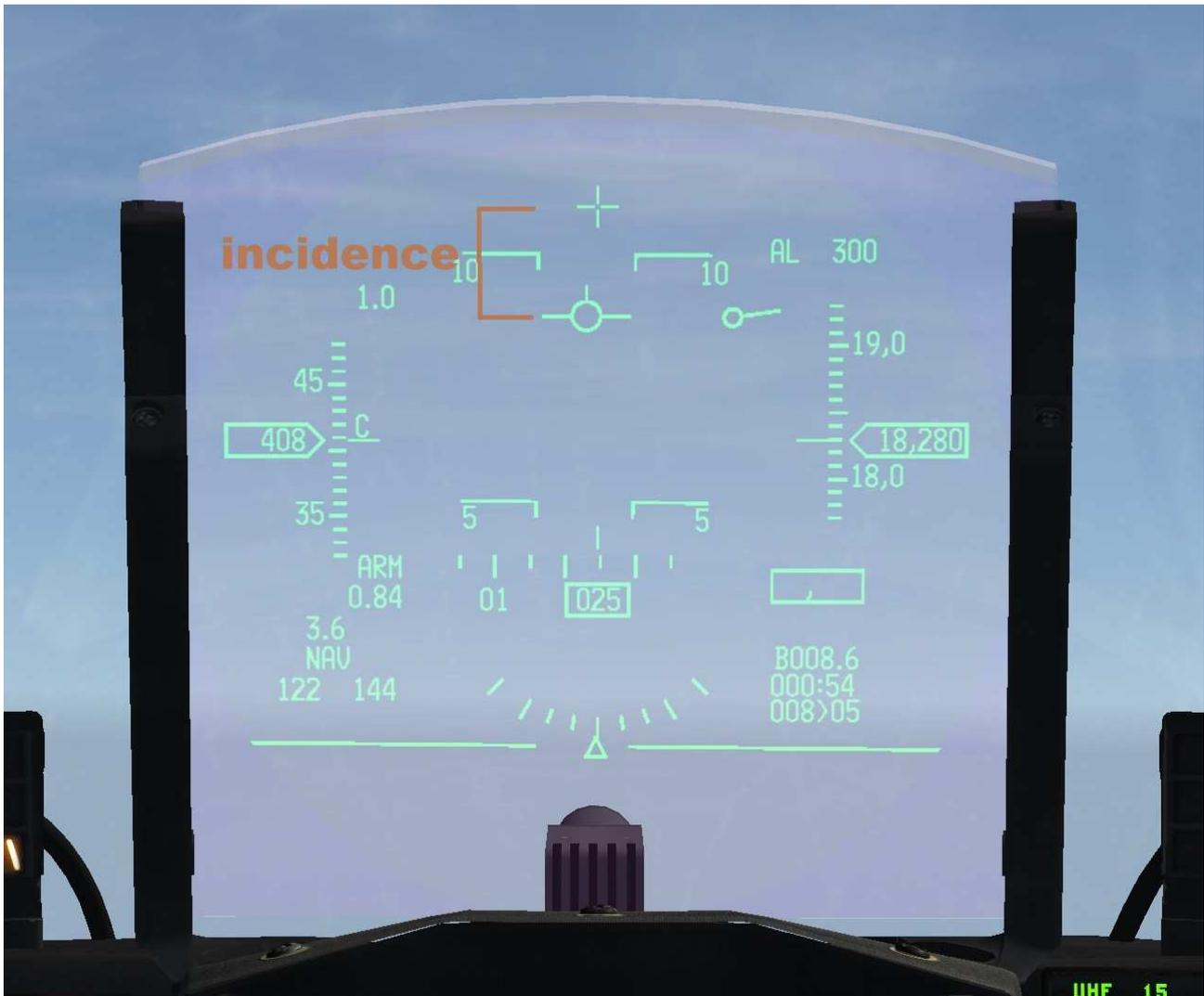
Vous pouvez connaître votre incidence grâce à trois instruments différents. Vous noterez d'ailleurs que le nombre des moyens de connaître votre incidence souligne d'autant plus son importance.

L'indication la plus précise est donnée par le ruban situé à gauche de l'horizon artificiel, entre les jambes du pilote.



On lit simplement la valeur sur l'instrument : ici l'incidence est de 3,5°.

L'indication la plus directe est, comme toujours, donnée dans le HUD.
Il se trouve que l'axe moyens des ailes est à peu de choses près celui du nez sur le F-16. Or, dans le HUD, la position du nez est donnée par celle du réticule canon, et la trajectoire par la position du FPM. La différence d'angle entre le réticule et le FPM donne donc l'incidence.

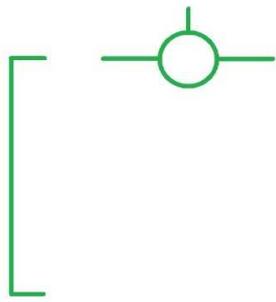


La lecture est moins précise, mais plus directe : le FPM est à environ $+8^\circ$ (valeur de la pente), et la croix du canon est à 11° environ (valeur de l'assiette). L'incidence est donc d'environ $3-4^\circ$. C'est moins précis que la valeur donnée par le ruban, mais c'est naturellement cohérent.

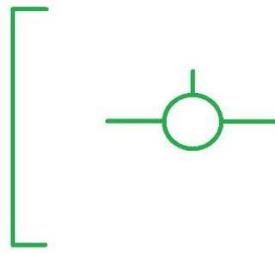
Lorsque le train d'atterrissage descend, le HUD fournit encore davantage d'information : s'affichent alors en plus les crochets d'incidence (*Angle of Attack brackets*, en anglais), le long desquels le FPM montera ou descendra, selon que votre incidence évolue.

Lorsque le FPM se au-dessus des crochets, l'incidence est inférieure à 11 degrés. Lorsqu'il se trouve exactement sur le haut des crochets, l'incidence est de 11 degrés. Au milieu des crochets l'incidence est de 13 degrés, au bas des crochets l'incidence est de quinze degrés, et enfin lorsqu'il passe en dessous des crochets l'incidence est supérieure à 15 degrés.

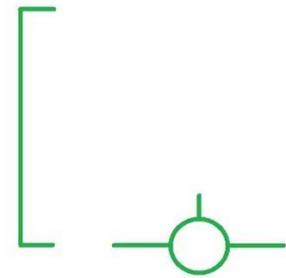




FPM en haut : 11°



FPM au milieu : 13°



FPM au bas : 15°

Au côté du HUD, à gauche, se trouve enfin une très simple rampe lumineuse, faite de trois témoins lumineux.

Lorsque c'est le témoin du bas, le chevron orange, qui est allumé, votre incidence est inférieure à 11 degrés. Lorsque c'est le rond vert qui s'allume, au centre, votre incidence est alors comprise entre 11 et 15 degrés, et enfin lorsque c'est le chevron rouge qui s'allume, en haut, votre incidence est supérieure à 15 degrés.

Notez que cette rampe est davantage un moyen d'alerte qu'un moyen de pilotage. Il ne sera en effet pas assez précis pour un pilotage fin.



Ambre : moins de 11°.



Vert : de 11° à 15°.



Rouge : plus de 15°

Le facteur de charge

Vous l'avez déjà vécu en voiture : si vous prenez un virage avec beaucoup de vitesse, vous vous trouverez déporté, poussé, sur le côté. C'est l'effet de la force centrifuge.

Vous pouvez vivre la même chose dans un manège de fête foraine : si vous accélérez très rapidement, ou tournez très vite, vous vous trouvez comme « écrasé » sur votre siège.

Cet effet existe naturellement dans un avion de chasse. Seulement, un avion de chasse est un appareil très rapide, et très agile. En conséquence, la force centrifuge qui peut agir sur le pilote et l'avion atteint des valeurs très élevées, sans commune mesure avec celles qui peuvent être en jeu dans une attraction ou une voiture.

Cette force, appelée « facteur de charge », est mesurée en nombre de G, c'est-à-dire en nombre de fois l'accélération due à la gravité terrestre, ou, si l'on veut, en nombre de fois la force que l'attraction terrestre exerce « en temps normal ».

Si l'avion vole en palier, le pilote subit un facteur de charge de 1G. La force qui s'exerce sur lui est simplement celle de la gravité, donc par convention 1G. Tout est normal, le pilote est simplement calé dans son siège, plus ou moins confortablement.

Mais si le pilote tire sur le manche à fond à vitesse élevée, sur le F-16 il peut subir un facteur de charge allant jusqu'à environ 9G, ce qui signifie alors que la force qui s'exerce sur le pilote a pour effet apparent de multiplier son poids par 9. On dit que le pilote « tire 9G ». La respiration devient difficile, tout mouvement exige un très grand effort, la perte de conscience peut intervenir rapidement (et même instantanément pour toute personne non entraînée). Le pilote est écrasé au fond de son siège.

Par convention, lorsque le pilote pousse le manche de sorte qu'au lieu de l'écraser sur son siège l'accélération le soulève, on note cette accélération négativement.

Ainsi, si le pilote tire sur le manche il obtient des G positifs, et des G négatifs s'il pousse sur le manche.

Ce facteur de charge est important pour plusieurs raisons :

- Le pilote doit veiller à ne pas dépasser un certain facteur de charge selon ce que l'avion emporte sous les ailes, donc doit veiller à ne pas tirer trop fort sur le manche. Par exemple, avec la plupart des munitions air-sol le pilote doit veiller à ne pas tirer plus de 5,5G, sous peine d'endommager les munitions et même éventuellement l'avion.
- La fatigue du pilote vis-à-vis du facteur de charge est simulée dans Falcon 4.0 BMS. Si vous tirez trop de G trop longtemps, vous verrez un voile noir se créer sur les contours de votre champ de vision, puis s'étendre peu à peu jusqu'à la perte de conscience (l'écran devient noir et vous ne pouvez plus contrôler l'avion).
- À l'inverse, si vous poussez sur le manche pour obtenir des G négatifs importants, le sang reflue vers le cerveau. Le pilote risque cette fois le voile rouge. Notez qu'en vol tactique on évite absolument les manœuvres qui impliquent des G négatifs, qui sont douloureux et dangereux pour le pilote.
- Pour une vitesse donnée, le nombre de G tirés en virage est proportionnel au taux de virage. Connaître et maîtriser son facteur de charge est donc primordial en combat aérien, ce que vous verrez au niveau 2 de l'EDC.

Le facteur de charge instantané ne peut être lu qu'à un seul endroit : la valeur donnée par l'accéléromètre s'affiche en haut à gauche du HUD.



Avion en palier (FPM sur la barre d'horizon), ailes à plat : le facteur de charge est de 1G.



Avion incliné en virage stabilisé, le pilote tire gentiment sur le manche. Il subit déjà 2,5G. C'est faible pour un avion de chasse, mais ce serait déjà beaucoup dans n'importe quelle autre circonstance.



Avion incliné en virage descendant. Le pilote tire un peu plus, 4,1G. C'est un facteur de charge typique pour un virage tactique avec des charges air-sol. On est là au maximum de ce que vous ferait subir la plus violente des attractions de fête foraine, mais c'est toujours plus de 2 fois moins que ce que le pilote peut avoir à encaisser en combat aérien.

Notez qu'en virage stabilisé (à altitude constante) le facteur de charge dépend directement de l'inclinaison de l'avion. Retenez ainsi déjà par cœur qu'en virage stabilisé une inclinaison de 60° correspond à 2G. Dans ce cas-là, aucun besoin de regarder l'accéléromètre : si l'avion est incliné à 60° en virage stabilisé, il subit nécessairement 2G.

Affichage des échelles

Le sélecteur VV/VAH/OFF du même panneau vous permet de choisir les échelles affichées dans le HUD :

- en position VV/VAH les échelles de vitesse, altitude et cap sont affichées, ainsi que l'échelle de vitesse verticale (graduée en milliers de pieds par minutes, comme le variomètre situé entre les jambes du pilote)
- en position VAH l'échelle de vitesse verticale disparaît
- en position OFF, les échelles disparaissent. La vitesse et l'altitude restent affichées de manière digitale.



Affichage de la vitesse

Par défaut, la vitesse affichée dans le HUD est toujours la vitesse corrigée (CAS), ce qui est confirmé par la présence d'un petit « C » à côté de l'échelle de vitesse.

Le pilote peut néanmoins sélectionner la vitesse vraie (Vv, ou TAS pour *True Air Speed*), à l'aide du sélecteur CAS/TAS/GND SPD. La vitesse vraie est la vitesse de l'air sur l'appareil.

Il peut également sélectionner la vitesse-sol (GS pour *Ground Speed*). La vitesse-sol est tout simplement la vitesse de progression de l'appareil par rapport au sol.



Affiche de l'altitude ou de la hauteur

Le sélecteur ALT RADAR/BARO/AUTO permet de choisir ce qui est affiché dans le HUD :

- en position ALT RADAR, seule la hauteur mesurée par la radiosonde est affichée (un petit « R » le confirme à côté de l'échelle).
- en position BARO, position par défaut, l'échelle affiche l'altitude barométrique. La hauteur mesurée par la radiosonde reste affichée en dessous de l'échelle d'altitude.
- en position AUTO, l'altitude est remplacée sur l'échelle par la hauteur mesurée par la radiosonde quand l'appareil est proche du sol (au-dessus de 1 500 pieds en montée, et en dessous de 1 200 pieds en descente). Il est déconseillé d'utiliser ce réglage à proximité du terrain, en particulier en vol aux instruments, du fait de la désorientation qu'il peut rapidement causer.

