

Département des industries créatives et numériques

Ergonomie et prise en main dans un simulateur de vol : influence des systèmes d'assistance

Mémoire présenté par

Lallement Damian

*En vue de l'obtention du diplôme de
Master en Jeu vidéo*

sous la supervision de

Chapelle Joakim, superviseur

Vandenbussche Charles, coach

Année académique 2024-2025

Remerciements

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, je remercie chaleureusement Charles Vandenbussche, mon coach, pour son accompagnement bienveillant, ses conseils pertinents et sa disponibilité tout au long de ce projet.

Je remercie également Joakim Chapelle, mon superviseur, pour son suivi, ses retours et son soutien, qui ont largement contribué à l'avancement et à la qualité de ce travail.

Enfin, je souhaite remercier Christelle Rebourg, UX designeuse chez Asobo Studio, pour le temps qu'elle m'a accordé et pour ses conseils précieux concernant la mise en place de mon protocole de playtest. Son expertise m'a été d'une grande aide pour adapter ma méthodologie aux contraintes réelles de l'expérience utilisateur dans le domaine de la simulation.

Partie 1 : Introduction, Enjeux et mise en problématique :.....	4
Introduction	4
Enjeux	4
Mise en Problématique	5
Périmètre de l'étude	6
Partie 2 : Cadre théorique et état de l'art	7
Introduction	7
Modèle de vol.....	7
L'implémentation du modèle de vol dans Flight simulator	7
Expérience utilisateur et accessibilité dans les environnements complexes	9
Analyse des Assistances dans Microsoft Flight Simulator 2024 et X-Plane 12	12
Partie 3 : Méthodologie et protocole de test	14
Méthodologie	14
Protocole de test	15
Implémentation	18
Partie 4 : Résultat / Analyse / Conclusion	24
Présentation des participants	24
Analyse globale	24
Analyse graphique croisée : NASA-TLX, SUS, LOGS par niveau d'assistance	26
Analyse de la progression	31
Discussion critique des résultats	32
Conclusion et ouverture	33
Annexes	34
Annexe 1 – Présentation NASA-TLX	34
Annexe 2 – Présentation SUS.....	34
Annexe 3 – Modèle de vol	35
Annexe 4 – Courbes Trainée/Portance	42
Bibliographie	44

Figure 1 - Schéma des forces aérodynamiques	36
Figure 2 - Représentation de l'angle d'attaque	37
Figure 3 - Angle d'attaque et coefficient de trainée	42
Figure 4 - Angle d'attaque et coefficient portance.....	43
Figure 5 – HUD.....	19
Figure 6 - Trajectoire Suggérée.....	20
Figure 7 - Parcours	21

Partie 1 : Introduction, Enjeux et mise en problématique :

1.1 Introduction

Le genre des jeux de simulation trouve ses racines dans les outils de formations développés à des fins militaires et industrielles. Dès les années 1960 des simulateurs de vol analogiques étaient utilisés par les forces aériennes pour entraîner les pilotes dans des environnements contrôlés, sans risque. Ces systèmes, extrêmement coûteux, visaient une reproduction fidèle des comportements d'un aéronef dans des situations variées. Le réalisme était alors une nécessité opérationnelle, l'objectif étant de reproduire le plus fidèlement possible les conditions de vol réel auquel les pilotes peuvent être confrontées.

Avec l'émergence de l'informatique personnelle dans les années 1980, ces technologies ont commencé à migrer vers d'autres usages, le lancement en 1982 de Microsoft Flight Simulator comme premier simulateur de vol disponible sur un ordinateur personnel, marque un tournant à une époque où le jeu vidéo explore des genres différents du jeu d'arcade.

Au fil du temps, le genre s'est élargi à d'autres domaines tels que : l'agriculture, la gestion ferroviaire, la course automobile. Toutefois, les simulateurs de vol restent un genre précurseur de cette volonté de recréer un système réaliste à des fins ludiques et de formations. Longtemps austère et réservé à un public averti, l'arrivée récente de Microsoft Flight Simulator 2020-2024 dotés de graphismes ultraréaliste, marque une démocratisation des jeux de simulation de vol qui attire de plus en plus le grand public. Toutefois, ces environnements restent souvent complexes et peu adaptés aux utilisateurs novices.

1.2 Enjeux

Complexité des Simulateurs de Vol

Les simulateurs de vol modernes, notamment ceux destinés à des usages professionnels ou à la formation sont souvent conçus pour reproduire avec une grande fidélité les conditions réelles du pilotage. Cette exigence de réalisme se traduit par une interface dense, un vocabulaire technique et des contrôles complexes sur plusieurs axes. Si cette complexité est justifiée dans un cadre professionnel, elle peut constituer un frein pour un usage de loisir.

Dans le domaine du jeu vidéo dans lequel s'inscrit ce mémoire, la tendance est à la démocratisation de l'expérience de simulation, notamment grâce à des interfaces plus accessibles, des modes d'assistance adaptatifs et une courbe d'apprentissage adapté à des novices. C'est dans cette logique que s'inscrit Microsoft Flight Simulator (2020), dont les concepteurs ont mis en place de nombreuses options pour ouvrir l'expérience à un

public non spécialisé. Comme le résume un article du journal le Monde : “ *Asobo Studio ne s’y est pas trompé, en proposant une série d’options pour rendre l’expérience accessible aussi aux pilotes du dimanche : ceux qui souhaiteraient simplement se balader, la tête dans les nuages, sans avoir à apprendre à manœuvrer un A320* »” (« *Flight Simulator* », un jeu vidéo de haut vol, 2020).¹

Importance de l'Accessibilité

Une accessibilité insuffisante peut rapidement devenir un obstacle à la rétention des joueurs, même dans les jeux initialement attractifs. L’étude de Straat et Verhagen (2018), portant sur l’expérience de joueurs dans le jeu « Tom Clancy’s The Division (Ubisoft) »², montre comment des éléments mal expliqués ou mal structurés peuvent devenir des facteurs de désengagement. Malgré une phase initiale positive les joueurs ont vu leur motivation décroître fortement après seulement quelques heures de jeu. Les raisons évoquées incluent une interface surchargée, un système de compétence peu lisible et un manque de compréhension du système de récompense. Ces difficultés d’interprétation et de prise en main ont contribué à un sentiment de perte de contrôle et à une frustration croissante. Ce constat s’applique tout particulièrement aux jeux de simulation, dotés d’interfaces complexes et de systèmes exigeants.

1.3 Mise en Problématique

Ce mémoire s’intéresse à l’impact de différentes formes d’assistance sur l’expérience de jeu au sein d’un simulateur de vol grand public. L’objectif est de comprendre comment ces assistances peuvent améliorer la prise en main du système, en rendant l’expérience plus accessible et engageante. Par accessibilité, on entend la capacité du simulateur à être compris et utilisé efficacement par des joueurs aux profils variés, y compris ceux n’ayant pas d’expérience préalable en simulation ou en pilotage. Le terme prise en main désigne quant à lui la capacité du joueur à comprendre et à interagir avec les commandes et l’interface, de manière autonome.

Ces deux dimensions sont étroitement liées à la notion de charge cognitive, définie comme la quantité d’informations qu’un individu doit traiter mentalement à un moment donné. Lorsqu’un système est trop complexe ou mal expliqué, la charge cognitive tend à augmenter, ce qui peut générer de la confusion et du désengagement.

Dès lors, une question centrale émerge :

¹ Lamy, C. (2020, août 14). « *Flight Simulator* », un jeu vidéo de haut vol. https://www.lemonde.fr/m-le-mag/article/2020/08/14/flight-simulator-un-jeu-video-de-haut-vol_6048966_4500055.html

² Staat, B., & Verhagen, H. (2018). Exploring Video Game Design and Player Retention- a Longitudinal Case Study. <https://doi.org/10.1145/3275116.3275140>

Dans quelle mesure l'intégration d'assistances influence-t-elle la charge cognitive perçue et l'expérience de jeu dans un simulateur de vol ?

Cette question sera explorée à travers une analyse des différentes formes d'assistance disponibles et leur impact sur l'expérience de jeu.

Dans cette recherche, le terme assistance renvoie à l'ensemble des systèmes intégrés au simulateur pour accompagner l'utilisateur dans son apprentissage et dans la réalisation de ses actions. L'expérience de jeu désigne ici la manière dont le joueur perçoit son interaction avec le simulateur, elle englobe à la fois les aspects fonctionnels, émotionnels et cognitifs.

1.4 Périmètre de l'étude

Cette étude se concentre exclusivement sur des joueurs novices, avec peu ou pas d'expérience préalable sur des simulateurs de vol. Elle vise à mesurer l'efficacité des systèmes d'assistance dans un contexte de découverte. Les tests sont réalisés avec une manette Xbox.

L'étude est basée sur un prototype semi-réaliste, simplifié par rapport à des simulateurs commerciaux, le comportement d'un aéronef n'est pas reproduit fidèlement.

Partie 2 : Cadre théorique et état de l'art

2.1 Introduction

Dans cette section, nous dresserons un état des lieux des systèmes de vol existants, en mettant l'accent sur les aspects physiques, l'implémentation et les algorithmes qui sous-tendent ces simulations. Nous aborderons également les spécifications UX (User Experience) en comparaison avec d'autres genres vidéoludiques, afin de mieux comprendre comment les simulateurs de vol se distinguent dans ce domaine. Enfin, nous nous concentrerons sur l'implémentation des systèmes d'assistance dans des simulateurs de vol existants, tels que *Microsoft Flight Simulator 2024* et *X-Plane*.

2.2 Modèle de vol

Le modèle de vol repose sur un ensemble de forces physiques : portance, poids, traction (ou poussée) et la traînée. Chacune de ces forces dépend de paramètres dynamiques (vitesse, angle d'attaque, altitude) et leur équilibre conditionne directement la trajectoire et la stabilité de l'aéronef. Ce système est d'autant plus complexe que ces forces ne sont pas indépendantes, elles s'influencent mutuellement à chaque instant. Une modification d'un paramètre entraîne des répercussions immédiates sur plusieurs axes du vol.

Cette interconnexion impose une coordination fine de nombreux paramètres simultanés, notamment à travers les surfaces de contrôle (ailerons, gouverne de profondeur, dérive). L'utilisateur doit donc intégrer et ajuster en temps réel des actions sur trois axes de rotation (roulis, tangage, lacet), ce qui rend la prise en main exigeante, en particulier pour les utilisateurs novices. Une présentation détaillée des forces en jeu, des formules utilisées, ainsi que des profils aérodynamiques de référence est disponible en [Annexe 3 – Modèle de vol](#).

2.3 L'implémentation du modèle de vol dans Flight simulator

D'après la documentation (Flight Model Physics, 2020) destinée aux développeurs d'add-on, le modèle de vol de Microsoft Flight Simulator repose sur une simulation réaliste des dynamiques de vol et intègre des principes aérodynamiques avancés.

Voici les éléments importants de cette implémentation :

Fichier de configuration

Un tableur Excel permet au simulateur d'accéder à diverses informations. Celui-ci contient des données techniques essentielles telles que la masse maximale, la surface,

l'envergure des ailes et les coefficients aérodynamiques. Celui-ci précalcule également les vitesses critiques pour différentes configurations de l'avion.

Le tableur par défaut contient des données détaillées sur les performances de vol de l'avion DA62. Voici une synthèse des principales informations et paramètres :

Paramètres de base

- **Densité de l'air (Airdens) :** 1.225 kg/m³
- **Vitesse de décrochage (VS1) :** 72 KCAS (37.04 m/s)
- **Vitesse de décrochage (VS0) :** 68 KCAS (34.98 m/s)
- **Masse maximale :** 5071 lbs (22564.62 N)
- **Surface de l'aile :** 184.1 sqft (17.10 m²)

Performances aérodynamiques

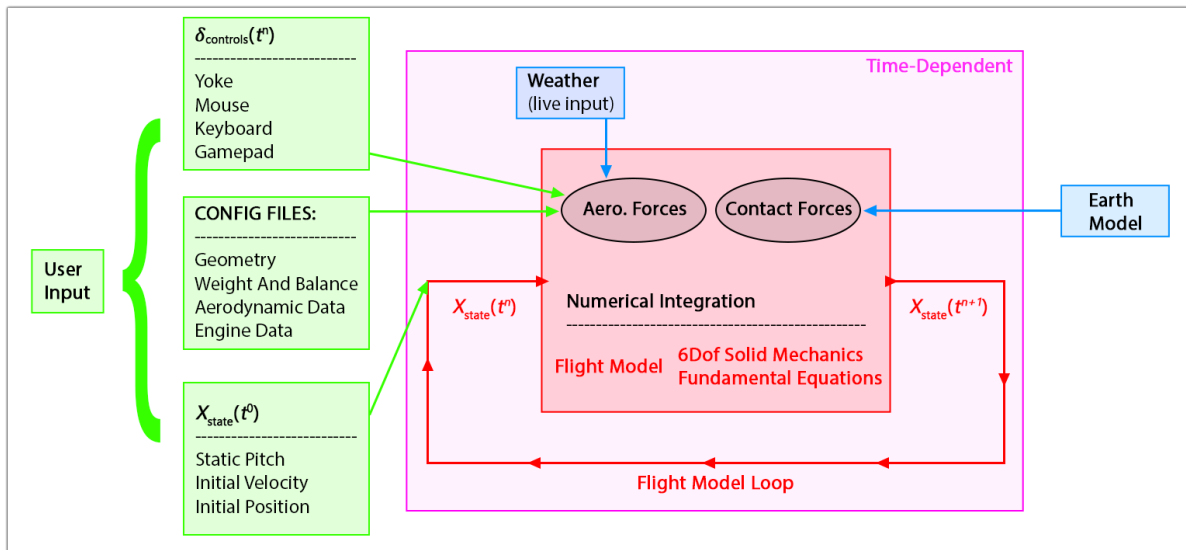
- **Coefficient de portance maximum sans volets (Cl Max 1) :** 1.569991
- **Coefficient de portance maximum avec volets (Cl Max 0) :** 1.760128
- **Différence de portance (Delta Lift) :** 0.190137
- **Puissance maximale (HP) :** 360

Utilisation des données

Les données de ce tableau sont ensuite utilisées pour ajuster les paramètres du modèle de vol de Microsoft Flight Simulator. Chaque paramètre joue un rôle crucial dans la simulation des performances de vol de l'avion, permettant une expérience de vol réaliste.

- **Vitesse de décrochage :** Utilisée pour définir les vitesses critiques au-dessus desquelles l'avion peut voler en toute sécurité.
- **Masse maximale et surface de l'aile :** Importantes pour calculer les performances en montée, en descente et en croisière.
- **Coefficients aérodynamiques :** Essentiels pour modéliser les forces de portance et de traînée, influençant la manœuvrabilité et la consommation de carburant de l'avion.

Ce schéma illustre le processus de simulation, il prend en compte les inputs du joueur, les forces aérodynamiques, les forces de contact, et des paramètres environnementaux.



On peut y résumer le déroulement d'une boucle de la simulation à travers ces différentes étapes :

1. **User Input** : Les entrées du joueur sont traitées et modulent les forces appliquées à l'aéronef.
2. **CONFIG FILES** et **$X_{state}(t^0)$** : Utilisés pour définir les conditions initiales et les paramètres du modèle de vol.
3. **Forces** : Calcul des forces aérodynamiques et de contact, influencées par les conditions météorologiques en temps réel.
4. **Numerical Integration** : Les équations de la mécanique des solides sont résolues par intégration numérique pour obtenir le nouvel état du système.
5. **Flight Model Loop** : La boucle de simulation continue, utilisant le nouvel état du système comme point de départ pour l'itération suivante.

Ce processus permet de simuler de manière réaliste le comportement d'un avion en vol, en tenant compte de divers facteurs dynamiques et environnementaux. Toutefois, la richesse de cette simulation physique peut rapidement devenir un obstacle à la prise en main. Cette complexité technique rend essentielle une réflexion sur l'expérience utilisateur et l'accessibilité dans le cadre d'environnement interactif complexe.

2.4 Expérience utilisateur et accessibilité dans les environnements complexes

Celia Hodent propose une définition pratique de l'expérience utilisateur (UX) “ *My practical approach to game UX is to consider the whole experience players have with the game itself—from interacting with menus to the emotion and motivation felt during and*

after gameplay.” (Hodent, 2017, p. 106). ³ Dans son approche Hodent distingue deux composantes fondamentales de l’UX vidéoludique. La première l’usabilité, désigne la facilité d’utilisation du système, sa clarté et son efficacité perçue. La seconde, « l’engageability », est défini comme la capacité du jeu à susciter une implication émotionnelle, à capter l’attention du joueur et à maintenir sa motivation au fil du temps.

Ces deux dimensions sont intimement liées à la notion d’accessibilité, entendu ici comme la capacité du jeu à être utilisé, compris et apprécié par des profils de joueurs variés, qu’ils soient débutants ou expérimentés. Une expérience accessible repose sur des contrôles intuitifs, une interface claire des aides contextuelles, et une structure d’apprentissage qui respecte le rythme de chacun. L’accessibilité ne cherche pas à simplifier le système, mais à adapter la complexité pour la rendre progressivement assimilable, en maintenant un niveau d’effort cognitif raisonnable.

Cette approche rejoint les principes de Nielsen (1994), selon lesquels un système doit permettre aux utilisateurs d’atteindre un niveau raisonnable de compétence en peu de temps. Cela suppose une interface facile à apprendre, mais aussi des mécanismes d’accompagnement pour guider les nouveaux utilisateurs dans leurs compréhensions du système. Comme le souligne Linja-aho (2006), cette phase de prise en main est cruciale, car elle aide à aligner le modèle mental du joueur, ce qu’il pense du jeu avec le fonctionnement réel de celui-ci. Ce processus passe généralement par deux grandes formes d’onboarding : les tutoriels autonomes, dans lequel le joueur suit des consignes fournies par le jeu et les séquences guidées, semblable à l’intervention d’un instructeur, où les actions sont démontrées ou assistées en temps réel.

Dans les systèmes complexes comme les jeux de simulation de vol, l’usabilité et l’accessibilité deviennent des éléments centraux. Une expérience utilisateur bien conçue permet d’amortir la difficulté, en facilitant l’entrée dans le système sans sacrifier la richesse de l’expérience. C’est dans cette logique que des systèmes d’assurances peuvent être intégrés au sein des jeux de simulation afin de les rendre plus lisibles et accueillants.

³ Hodent, C. (2017). *The Gamer’s Brain : How Neuroscience and UX Can Impact Video Game Design* (1re éd.). CRC Press. <https://www.perlego.com/book/1472236/the-gamers-brain-how-neuroscience-and-ux-can-impact-video-game-design-pdf>

Traduction : Mon approche pratique de l’UX des jeux consiste à prendre en compte l’ensemble de l’expérience des joueurs avec le jeu lui-même, de l’interaction avec les menus à l’émotion et à la motivation ressenties pendant et après le jeu.

Spécifications UX des simulations par rapport à d'autres genres vidéoludiques

Selon Turunen (2017), les jeux de simulation se distinguent des autres genres en ce que le plaisir de jeu ne provient pas simplement de l'accomplissement des objectifs, mais de l'expérience de contrôle et de maîtrise qu'ils proposent. Contrairement à d'autres types de jeux centrés sur la progression narrative ou les actions spectaculaires, les simulations valorisent une approche plus active, autonome et systémique, où le joueur est invité à comprendre, expérimenter et intégrer les mécaniques du jeu.

Ce besoin de maîtrise propre aux jeux de simulation implique que le joueur doit intégrer un ensemble de règles complexes. L'expérience repose alors largement sur l'auto-apprentissage, l'interprétation d'une interface dense et la coordination simultanée de plusieurs sources d'information. Cependant, lorsque trop d'éléments doivent être traités en parallèle tel que des commandes complexes, de la navigation et une interface chargée. La mémoire de travail est rapidement saturée, ce qui nuit à la compréhension, à l'efficacité de l'action et au plaisir de jeu (Hodent, 2017). Cette surcharge mentale freine l'apprentissage progressif, car elle empêche le joueur de construire des schémas mentaux stables, une étape pourtant cruciale pour atteindre un état de fluidité et de maîtrise dans l'interaction avec l'environnement simulé.

Pour Nielsen (1994) un système interactif bien conçu doit offrir un niveau de flexibilité suffisant pour convenir à des profils d'utilisateurs variés. Cela signifie qu'il doit être intuitif et rassurant pour les débutants, tout en permettant des interactions efficaces pour les utilisateurs expérimentés, sans leur imposer des contraintes inutiles ou des interfaces trop simplifiées.

Quelles solutions apporter ?

Avant d'envisager les solutions, il est crucial de rappeler les défis spécifiques auxquels ces dernières doivent répondre. Les simulateurs de vol présentent des obstacles notables à la prise en main, notamment des interfaces riches en données, un vocabulaire technique exigeant et des contrôles multidimensionnels nécessitant une bonne coordination.

Comme mentionné précédemment ce flux d'informations intense peut saturer rapidement la mémoire de travail, surtout lorsqu'il est nécessaire de traiter des signaux variés en parallèle. La charge cognitive qui en découle affecte l'efficacité de l'interaction, mais aussi l'apprentissage progressif. Réduire cette charge devient alors une condition clé pour améliorer l'accessibilité et la qualité de l'expérience de jeu.

Ces enjeux sont bien identifiés dans l'industrie du jeu vidéo, qui y répond par la mise en œuvre de dispositifs d'assistance destinés à faciliter l'expérience. Pour mieux comprendre comment ces stratégies sont déployées en pratique, nous analyserons les

solutions proposées par deux références majeures du domaine : Microsoft Flight Simulator et X-Plane.

2.5 Analyse des Assistances dans Microsoft Flight Simulator 2024 et X-Plane 12

La mise en place de dispositifs d'assistance représente une stratégie essentielle pour améliorer l'accessibilité et l'expérience de jeu. Ces assistances peuvent être de plusieurs types : des fonctionnalités automatisées (stabilisation automatique, assistance au roulis, etc.), des éléments d'interface utilisateur (HUD simplifié, indicateurs de trajectoire, retours visuels ou sonores).

Ces outils n'ont pas pour but de diminuer la richesse de l'expérience, mais d'en réduire la complexité cognitive. En réduisant le nombre d'informations à traiter ou en automatisant certaines actions, les assistances permettent de préserver les ressources mentales du joueur et contribuent à une montée en compétence plus progressive favorisant la motivation et la rétention.

Dans une perspective de game design, l'intégration d'assistances permet de réguler la difficulté perçue en fonction des compétences du joueur, et donc de favoriser un état de "*flow*" (Csikszentmihaly, 1990), dans lequel l'engagement et la motivation sont maximisés.

Les solutions d'assistance varient fortement selon les titres. Cette section compare deux références majeures du genre : Microsoft Flight Simulator 2024 (MFS2024) et X-Plane 12, afin d'observer comment elles répondent aux enjeux de surcharge cognitive, de prise en main et d'engagement des joueurs.

MFS2024 se distingue par une volonté affirmée de rendre l'expérience accessible à un public large, y compris aux débutants sans expérience aéronautique. Il propose plusieurs niveaux d'assistance adaptative.

À l'inverse, X-Plane 12 adopte une approche orientée vers les passionnés et professionnels de l'aviation, assumant un certain degré d'exigence technique et de réalisme dès le départ.

	Microsoft Flight Simulator 2024	X-Plane 12
Guidage	Manœuvres assistées, pathfinding.	Guidage limité, surtout via systèmes embarqués (GPS).
Interface HUD	HUD adaptatif, visuellement épuré et pédagogique, Copilote virtuel	Interface technique, conçue pour reproduire fidèlement les cockpits.
Automatisation des procédures	Checklists guidées, automatisation des phases clés (roulage, checklist, etc.).	Checklists statiques.
Automatisation des contrôles	Stabilisation automatique, contrôle automatique du palonnier	Autopilote en fonction de l'appareil.
Profils de contrôle	Profils préconfigurés selon le niveau du joueur.	Configurations manuelles requises.

Les dispositifs intégrés à MFS2024 répondent efficacement aux problématiques de charge cognitive identifiées dans la littérature (Hodent, 2017), en apportant une assistance contextuelle, modulaire, et visuellement accessible. Cette architecture UX permet aux joueurs novices de rester engagés et motivés tout au long de leur apprentissage, sans sacrifier la profondeur du simulateur.

À l’opposé, X-Plane 12 représente une approche dans laquelle l’exactitude et le réalisme technique priment sur le confort initial de l’expérience. Si cette philosophie séduit les puristes, elle peut constituer une barrière d’entrée, notamment pour des utilisateurs peu familiers avec les procédures aéronautiques complexes.

Si les solutions proposées par les simulateurs commerciaux témoignent d’une volonté d’accompagner les joueurs, leur impact réel sur la charge cognitive et l’expérience de jeu mérite d’être testés dans un cadre contrôlé. C’est précisément l’objectif de la méthodologie présentée ci-après.

Partie 3 : Méthodologie et protocole de test

3.1 Méthodologie

Objectifs de l'expérimentation

Cette expérimentation vise à mesurer l'impact de différents niveaux d'assistance sur l'expérience utilisateur dans un simulateur de vol. Plus précisément, il s'agit d'évaluer dans quelle mesure ces assistances influencent la charge cognitive perçue, l'utilisabilité et les performances en jeu de joueurs novices.

Problématique et hypothèses

La question centrale est la suivante :

Dans quelle mesure l'intégration d'assistances influence-t-elle la charge cognitive perçue et l'expérience de jeu dans un simulateur de vol ?

Trois hypothèses ont été formulées :

- **H1** : L'augmentation du niveau d'assistance réduit la charge cognitive.
- **H2** : Les joueurs obtiennent de meilleures performances (temps, trajectoire, erreurs) avec un niveau d'assistance plus élevé.
- **H3** : Un scénario avec un niveau d'assistance plus élevé obtient un meilleur score d'utilisabilité.

Participants

L'expérimentation sera menée auprès d'un échantillon de 18 à 24 participants, avec une bonne connaissance de l'utilisation d'une manette et novices en utilisation de jeu de simulation de vol (moins de 5 heures de jeu cumulé sur ce type de jeu). Les données récoltées seront anonymisées et utilisées uniquement dans le cadre de cette expérimentation.

Prototype et environnement de test

Le simulateur utilisé est un prototype développé sous Unreal Engine 5, intégrant un système de vol semi-réaliste, conçu spécifiquement pour cette étude. Le joueur est invité à effectuer un parcours de navigation aérienne unique (moyennement complexe, avec virages et altitude variable). Le système permet de tester différents niveaux d'assistance.

Variables de l'étude

Variables indépendantes :

Niveau d'assistance : Légère/ Modérée/ Complète

	Légère	Modérée	Complète
HUD Simplifié	X	X	X
Stabilisateur		X	X
Auto-Lacet		X	X
Trajectoire Suggérée			X
Vitesse Conseillée			X

Variables dépendantes :

- Charge cognitive (NASA-TLX)
- Utilisabilité perçue (SUS)
- Performances (temps, erreurs de trajectoire, précision du trajet)
- Comportement utilisateur (observations, difficultés rencontrées)

3.2 Protocole de test

L'expérimentation se fait sur le principe du plan intra-sujet, dans lequel chaque participant expérimente successivement les trois niveaux d'assistance. Ce choix permet de réduire les effets de variance interindividuelle, chaque joueur servant de référence pour lui-même.

Afin de limiter l'effet d'apprentissage, un contrebalancement complet est mis en place à l'aide d'un plan en carré latin. Ainsi, les différents niveaux d'assistances sont présentés selon un ordre alterné permettant d'explorer toutes les combinaisons possibles.

Combinaisons possibles : ABC – BCA – CAB – ACB – BCA – CBA

Les combinaisons sont ensuite répétées plusieurs fois de manière à lisser l'échantillon, par exemple pour 18 testeurs chaque combinaison sera testée 3 fois.

Ce design expérimental permet une collecte de données dans un laps de temps raisonnable (environ 20 minutes par session).

Déroulement du test

Chaque session dure environ 20 minutes et se déroule ainsi :

- Introduction (5 min) : présentation, explication des objectifs et des contrôles.
- Réalisation des 3 scénarios (10–15min) : un pour chaque niveau d'assistance.
- À la fin de chaque scénario :
 - Questionnaire NASA-TLX
 - Questionnaire SUS

Outils de collecte des données

	Objectif de mesure	Justification
NASA-TLX	Évaluation de la charge cognitive perçue (mental, effort, etc.)	Outil standardisé dans les environnements à forte complexité informationnelle.
SUS	Évaluation de l'utilisabilité perçue	Court, simple, adapté à des systèmes interactifs ou logiciels.
Logs in-Game⁴	Données objectives (temps, erreurs, trajectoire, précision)	Permet d'évaluer l'efficacité réel en jeu.

⁴ Données récoltées en jeu lors de la session de test

Le NASA-TLX (NASA Task Load Index) est un outil d'autoévaluation de la charge cognitive perçue, basé sur six dimensions : l'effort mental, l'effort physique, la demande temporelle, la performance, la frustration et la charge de travail globale. Il permet de quantifier l'effort subjectif requis par une tâche en environnement interactif. Plus de détails sont disponibles en [Annexe 1 - NASA-TLX](#).

Le SUS (System Usability Scale) est un questionnaire d'évaluation de l'utilisabilité composé de dix affirmations notées sur une échelle de Likert. Il permet d'obtenir un score global représentant la facilité d'utilisation perçue d'un système, en tenant compte de la cohérence, de la simplicité et de la confiance ressentie par l'utilisateur. Plus de détails sont disponibles en [Annexe 2 - SUS](#).

Limites et biais potentiels

Plusieurs limites méthodologiques sont à noter :

Échantillon réduit et ciblé : L'étude repose sur un nombre restreint de participants entre 18 et 24, ce qui limite la portée statistique des résultats. De plus, le recrutement ciblé sur des profils novices empêche de généraliser aux utilisateurs experts.

Prototype : Le simulateur utilisé est un développement personnel sous Unreal Engine. Bien qu'il assure un contrôle sur les variables, il ne reproduit pas toute la complexité d'un simulateur commercial comme X-Plane ou Microsoft Flight Simulator et limite donc l'extrapolation des résultats.

Effets d'apprentissage : Bien que le contrebalancement limite ces effets, l'ordre d'exposition peut malgré tout influencer la performance.

Mesures subjectives sensibles au contexte : La NASA-TLX et le SUS sont subjectifs et peuvent être influencés par l'état émotionnel du moment (frustration, enthousiasme) et peuvent être influencées par l'impression de réussite ou d'échec.

3.3 Implémentation

Cette section présente les différentes étapes de développement du prototype, les choix techniques retenus ainsi que les fonctionnalités implémentées pour les besoins de l'étude.

Modèle de vol

Cette partie décrit l'implémentation technique du modèle de vol dans le prototype.

Déroulement d'un cycle de simulation

Chaque cycle de la simulation est composé de 3 étapes :

- 1- Traitement des inputs
- 2- Calcul des forces aérodynamiques
- 3- Application des forces calculées précédemment

À chaque nouveau cycle, la première étape du cycle consiste à lire et interpréter les actions que le joueur effectue via les contrôles à sa disposition. Ces inputs sont enregistrés et influenceront ensuite les paramètres de vol, comme l'orientation et la poussée.

Une fois les commandes capturées, les différentes fonctions de la simulation sont appelées afin de procéder aux calculs des forces physiques agissant sur l'aéronef. Cela inclut : le calcul de la portance, de la trainée et de la poussée. Le résultat de ces calculs dépend à la fois de l'état de l'aéronef (position, vitesse, inclinaison) et de son environnement (densité de l'air).

Les forces calculées sont ensuite appliquées au modèle de l'aéronef, modifiant sa position, sa rotation et sa vitesse pour le prochain cycle. Cette séparation entre calcul et application assure la continuité physique de la simulation.

Calcul des forces

Dans le prototype, le poids est pris en compte via l'application d'une force constante orientée vers le sol. Les forces aérodynamiques de portance et de trainée sont-elles modélisées de la manière suivante, leurs formules respectives sont appliquées aux paramètres de vol et ajustées à l'aide de coefficients précalculés extraits de courbes, elle caractérise le comportement aérodynamique de l'aéronef en fonction de son angle d'attaque.

Ces courbes permettent d'associer chaque angle d'attaque à un coefficient de portance ou de trainée spécifique. Les profils utilisés sont une adaptation de données expérimentales issues de souffleries, notamment du profil NACA 0012 (Aerodynamic Lift, Drag and Moment Coefficients, 2017), ajustée via des essais en jeu pour garantir un rendu crédible (Les courbes sont disponibles en [Annexe 4 – Courbes Trainée/Portance](#)).

L'application de ces forces est gérée via le moteur physique d'Unreal qui permet d'appliquer des forces à un acteur. Les calculs prennent également en compte d'autres paramètres comme la densité de l'air et la surface de vol.

Assistances

Un HUD simplifié permet au joueur de visualiser les paramètres de vol essentiels (Altitude, vitesse, orientation et assiette).



Figure 1 – HUD

Les valeurs de vitesse et d'altitude sont affichées numériquement, l'indicateur d'assiette et d'inclinaison est lui généré et affiché via un shader procédural.

Le stabilisateur corrige automatiquement les déséquilibres mineurs d'assiette et d'inclinaison, limitant les mouvements brusques ou instables de l'appareil. Ce système repose sur un retour automatique vers une posture neutre après un mouvement.

Le système de lacet automatique évite les pertes de trajectoire dues à une mauvaise coordination du palonnier. L'objectif est de maintenir une orientation fluide en virage sans intervention manuelle.

La trajectoire suggérée affiche en jeu une trajectoire optimale en fonction des checkpoints. Ce système guide visuellement l'utilisateur et permet une navigation fluide sans effort supplémentaire.

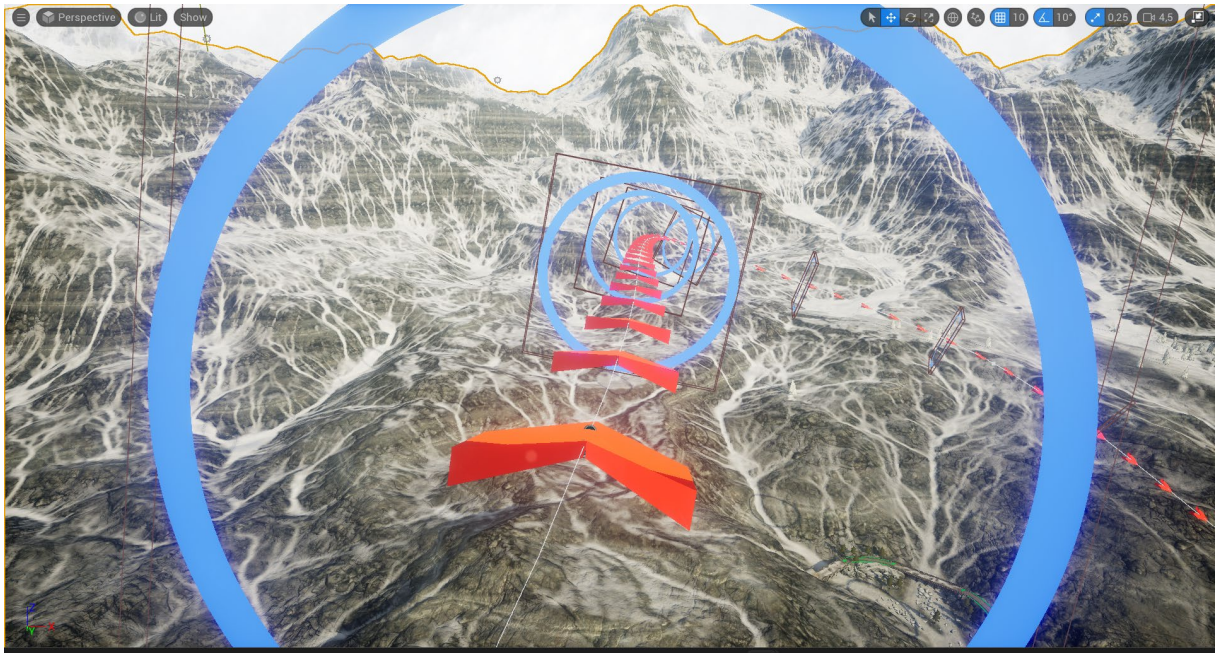


Figure 2 - Trajectoire Suggérée

Le système de vitesse conseillée affiche dans le HUD le régime moteur conseillé à tout moment du parcours.

Parcours de test

Le parcours emprunté par le joueur est généré dynamiquement à l'aide du système de splines d'Unreal Engine. Une spline définit la trajectoire globale du vol, offrant une flexibilité importante lors de la création du parcours. Le long de cette spline, des checkpoints sont instanciés à intervalles réguliers, paramétrables dans l'éditeur. Pour limiter la surcharge visuelle et guider progressivement le joueur, seulement deux checkpoints sont visibles simultanément lors des tests, le checkpoint actuel et le suivant facilitant l'anticipation sans perturber la navigation.

Le système intègre également la génération des chevrons visuels qui matérialisent la trajectoire suggérée. Ces indicateurs directionnels sont affichés ou non selon le niveau d'assistance.



Figure 3 - Parcours

Récolte des données in-game

Afin d'évaluer les performances des utilisateurs lors des tests, un système de collecte automatique des données in-game a été intégré au prototype. Ce système permet d'enregistrer les principales métriques liées à l'interaction du joueur avec le simulateur.

Les données sont ensuite enregistrées au format « JSON » selon l'architecture suivante :

- Nom du testeur
- Temps total du test
- Liste chronologique des scénarios (A, B, C) en fonction du niveau d'assistances

Pour chaque scénario :

- Type : A, B ou C
- Durée du scénario
- Nombre de réapparitions total
- Nombre de crashes
- Nombre de checkpoints ratés
- Déviation moyenne = Écart moyen par rapport à la trajectoire idéale
- Précision moyenne = Score moyen de précision sur l'ensemble du parcours.
- Liste des checkpoints du parcours

Pour chaque checkpoint :

- Index
- Position (x,y,z)

- Temps écoulé au moment de la validation
- Précision au moment du franchissement (Entre 0 et 1)

À la fin de chaque session, les données sont exportées automatiquement dans un fichier JSON nommé selon le nom du participant et la date du test. Ces fichiers permettent ensuite une analyse comparative entre les différents niveaux d'assistance et une corrélation avec les données recueillies via les questionnaires SUS et NASA-TLX.

Contrôles

Le joueur contrôle l'aéronef sur plusieurs axes en utilisant le joystick de gauche d'une manette.

Les axes de contrôle sont les suivants :

- Tangage : contrôle l'inclinaison verticale.
- Roulis : contrôle l'inclinaison horizontale.
- Lacet : contrôle la direction horizontale.

Le joueur peut également utiliser la touche Y d'une manette d'XBOX afin de réapparaître au dernier checkpoint visité.

Lorsqu'un input du joueur est détecté, il est traité de la manière suivante :

La valeur de l'input est enregistrée dans une variable, elle est ensuite multipliée par une variable globale « AirControl » qui permet d'avoir une intensité commune sur chaque axe, la valeur est ensuite modulée par une variable de contrôle supplémentaire qui dépend de l'axe concerné et de sa direction.

Par exemple, cela donne pour une action du joueur sur l'axe de tangage :

$$InputY * AirControl * PitchAirControl$$

Limites de l'implémentation

Plusieurs limites techniques sont à noter concernant la modélisation aérodynamique, les systèmes d'assistance et l'environnement de simulation.

Le modèle physique de l'aéronef est basé sur des principes aérodynamiques réel, mais reste simplifié pour les besoins de l'expérimentation. Plusieurs limites en découlent :

- Le comportement de l'appareil s'écarte de la réalité lorsque celui-ci s'approche des limites de son enveloppe de vol (angle d'attaques extrêmes, vitesses critiques), où les phénomènes de décrochage et d'instabilité ne sont pas fidèlement simulés.
- La conservation de l'énergie (cinétique, potentielle) n'est pas strictement fidèle à la réalité en raison d'approximations dans le calcul des forces.

- Les coefficients de portance et de trainée, bien qu'inspirés de courbes réelles, ont été modifiés de manière expérimentale pour garantir un comportement agréable au joueur, ces valeurs ne correspondent donc pas aux caractéristiques physiques du modèle visuel de l'avion.
- Les calculs aérodynamiques reposent principalement sur la voilure fixe, sans modélisation précise des autres surfaces portantes (empennages, fuselage).
- Les surfaces de contrôle mobiles (gouvernes, ailerons) sont prises en compte de manière simplifiée, l'interaction de l'air avec ses surfaces est estimée, mais ne repose pas sur une simulation de fluide réelle.
- Aucun système météorologique n'est présent dans l'environnement, les conditions atmosphériques sont statiques.

Certaines limitations dans l'implémentation des contrôles et des assistances sont également à noter :

- Les systèmes d'assistance implémentés sont fixes et non paramétrables, le joueur ne peut pas ajuster leur niveau ou leur sensibilité.
- Les contrôles ne sont pas configurables sauf pour inverser les axes de contrôles.

Partie 4 : Résultat / Analyse / Conclusion

4.1 Présentation des participants

L'étude s'appuie sur les données recueillies lors de test auprès de 18 personnes, la tranche d'âge des testeurs est comprise entre 21 et 26 ans, aucun des testeurs ne possède d'expérience significative dans les jeux de simulations de vol.

4.2 Analyse globale

Dans cette partie, nous allons faire une première analyse globale basée sur les moyennes des différents scores obtenus par les testeurs.

Subjectif (Charge cognitive/Utilisabilité) moyenne

Niveau d'assistance	Charge cognitive (NASA-TLX)	Utilisabilité perçue (SUS)
Légère	65.11/100	57.08/100
Modérée	42.71/100	66.25/100
Complète	30.36/100	75.14/100

Le tableau ci-dessus permet de mettre en évidence une relation entre le niveau d'assistance testé et la perception des joueurs en termes de charge cognitive et d'utilisabilité. On peut y observer la tendance suivante, plus le niveau d'assistance est élevé, plus la charge cognitive diminue, et plus l'utilisabilité perçue augmente. Cette relation suggère que les dispositifs d'assistance jouent un rôle important dans l'allègement de la charge cognitive et dans l'amélioration de l'expérience ressentie par le joueur.

Ces résultats confirment l'hypothèse H1 et H3 : les assistances contribuent significativement à l'accessibilité et à une meilleure expérience utilisateur en réduisant la complexité cognitive perçue.

Objectif (Performances) moyenne

Niveau d'assistance	Temps (sec)	Déviatiion (%)	Précision moyenne (%)	Nb checkpoint raté	Nombre de réapparitions	Score
Légère	191.22	52	57	1.56	3.94	65.64
Modérée	157.67	53	59	0.78	1.39	76.24
Complète	146.11	50	66	0.33	0.44	88.45

Les données de performance confirment également l'impact positif des assistances. On constate une amélioration générale des performances avec l'augmentation du niveau d'assistance. Le temps moyen pour compléter le parcours diminue sensiblement, les données d'observations et le nombre de réapparitions expliquent cette réduction du temps de parcours par une diminution du nombre d'erreurs et de perte de contrôle de l'appareil. En revanche le pourcentage de déviation reste relativement stable d'un test à l'autre et augmente même entre le niveau d'assistance léger et modéré, cette augmentation s'explique par l'ajout d'assistance de contrôles bien que celles-ci réduisent la difficulté de prise en main du système par le joueur, elles lui enlèvent également du contrôle, afin de palier à ce problème, il serait intéressant d'intégrer un paramètre permettant de moduler la sensibilité de cette aide, afin de correspondre plus fidèlement au besoin du joueur.

Le score de performance globale est une mesure synthétique, qui intègre l'ensemble des mesures de performance normalisé, il est calculé comme suit :

$$Score = 100 - 50\% \cdot Temps \cdot 100 - 20\% \cdot MissCheckpoint \cdot 100 - 20\% \cdot Deviation \cdot 100 + 25\% \cdot Precision \cdot 100 - 25\% \cdot Respawn \cdot 100$$

Conclusion

En analysant les données subjectives (ressenti utilisateur) et objectives (performances), on constate une corrélation directe entre niveau d'assistance, réduction d'erreurs, amélioration de la précision et du confort perçu.

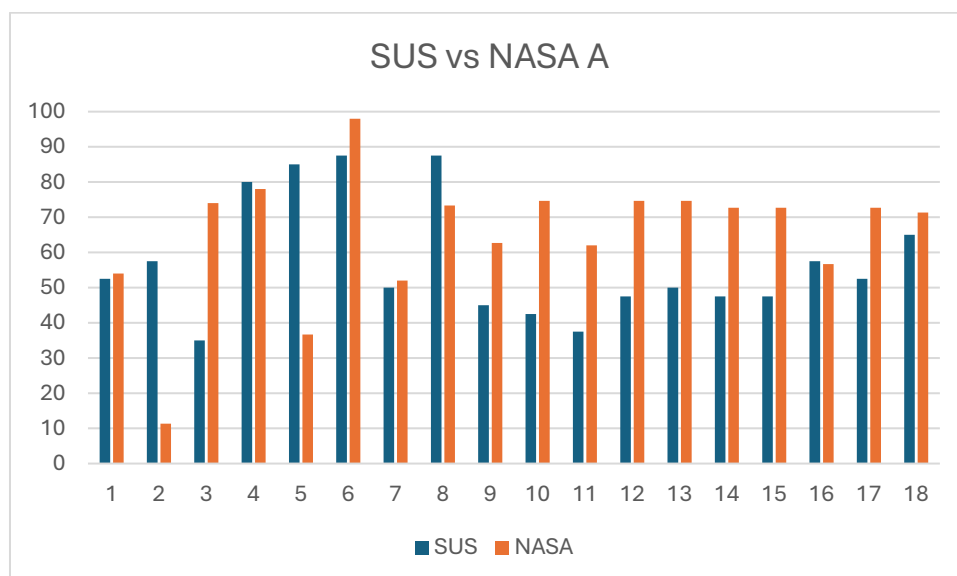
Les assistances permettent aux utilisateurs novices de se concentrer sur l'essentiel (navigation, trajectoire) sans être submergés par la complexité des contrôles.

Cela se traduit par une meilleure fluidité, moins de perte de contrôle et d'hésitations, renforçant à la fois l'efficacité de l'action et la sensation de réussite.

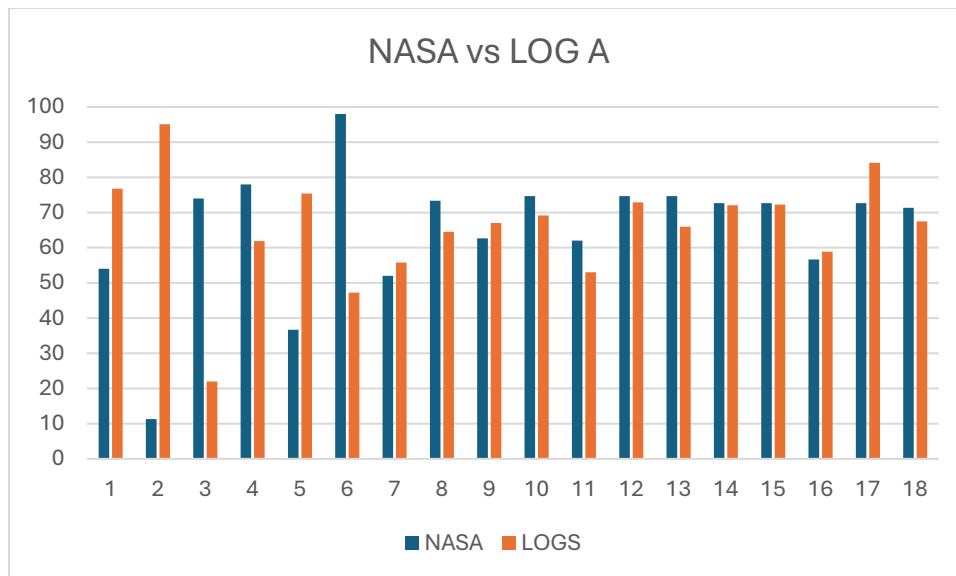
4.3 Analyse graphique croisée : NASA-TLX, SUS, LOGS par niveau d'assistance

Dans cette partie, nous allons analyser plus finement les résultats obtenus en croisant les différentes données.

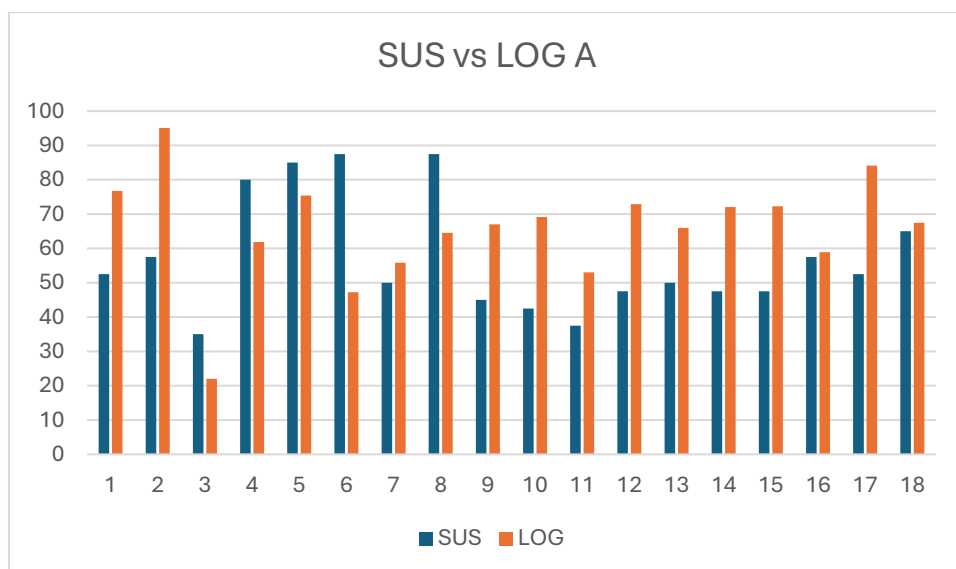
Assistance légère



Les testeurs avec une forte charge cognitive tendent à avoir un score d'utilisabilité faible cette corrélation négative est visible pour plus de la moitié de l'échantillon, ce qui indique que sans aide suffisante l'interaction est jugée plus pénible par l'utilisateur.

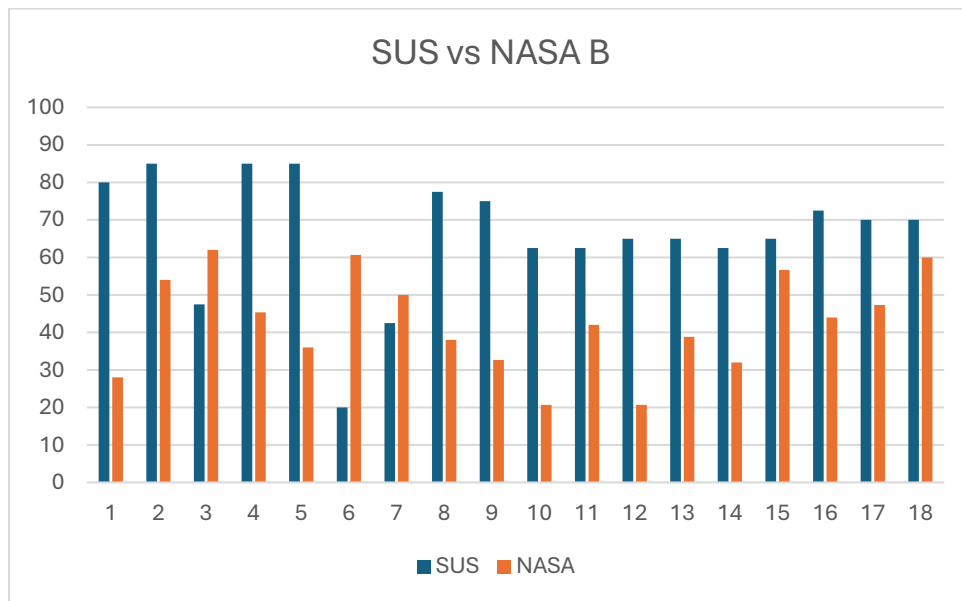


On observe une relation assez constante entre les scores de performances et la charge cognitive perçue, à ce niveau d'assistance la charge cognitive ne semble pas influencer significativement les performances, sauf pour les utilisateurs ayant un score inférieur à 50 qui eux perçoivent une charge cognitive plus élevée.

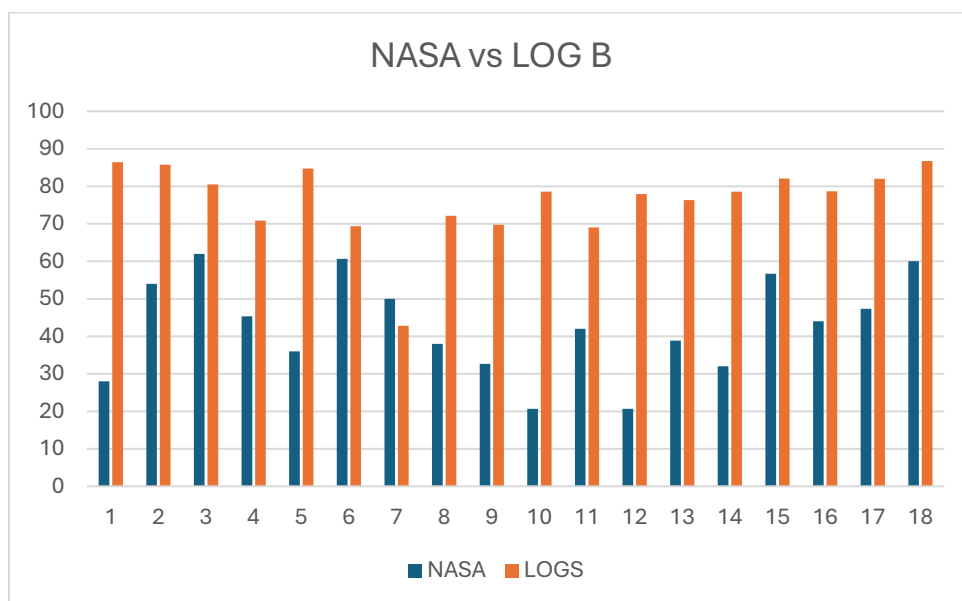


Les testeurs qui obtiennent les meilleurs résultats de performances obtiennent en général un score d'utilisabilité supérieur à 50, Toutefois, des cas inverses suggèrent que certaines bonnes performances sont perçues comme inconfortables par l'utilisateur, en croisant les données, on peut faire l'hypothèse que cette perception négative est liée à un effort cognitif plus important.

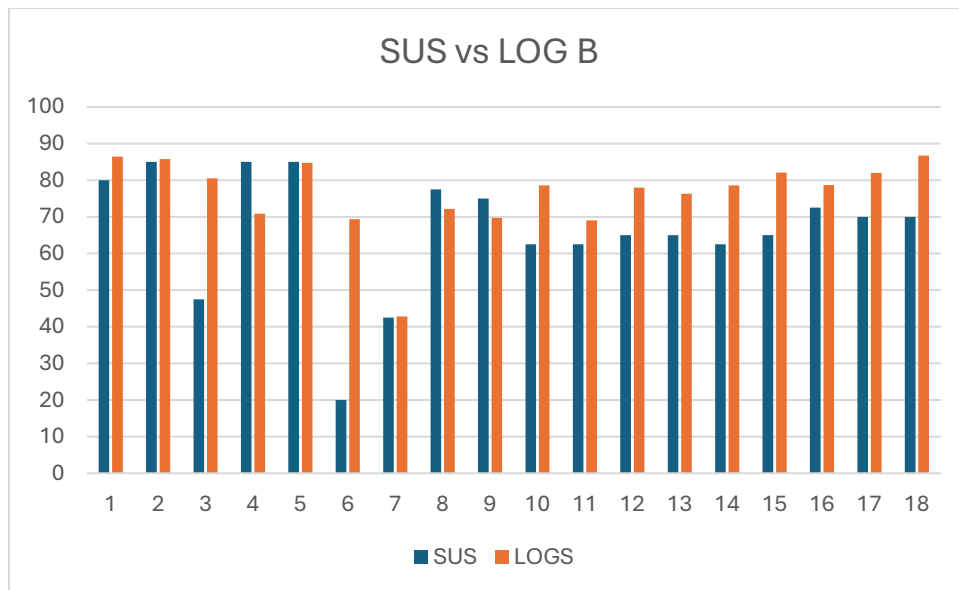
Assistance modérée



La relation est plus claire et homogène que pour le niveau d'assistance précédent, les scores d'utilisabilité sont plus élevés tandis que les scores de charge cognitive sont plus faibles.

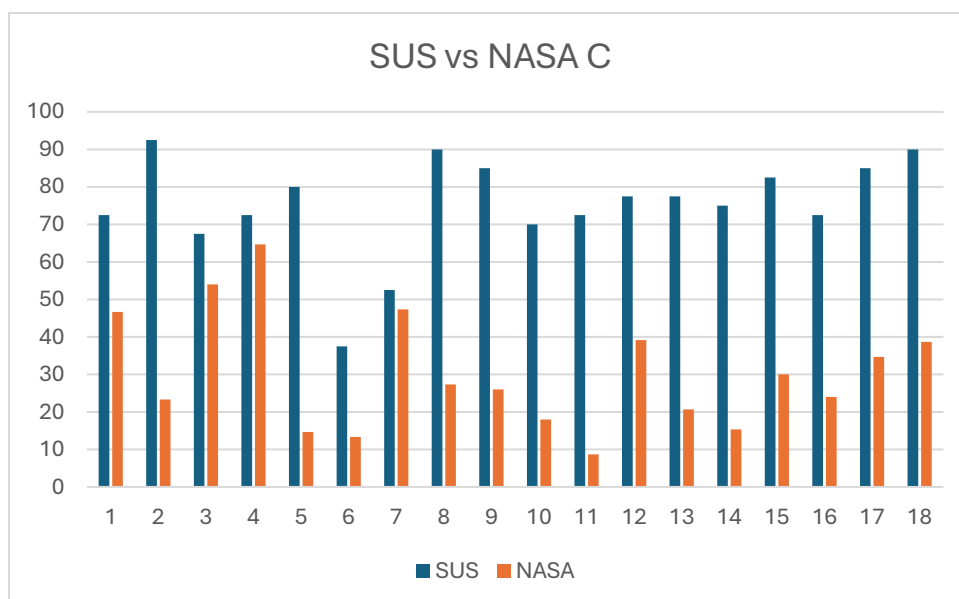


Une corrélation inverse est visible ici, les scores de performances les plus élevés sont associés à une charge cognitive réduite.

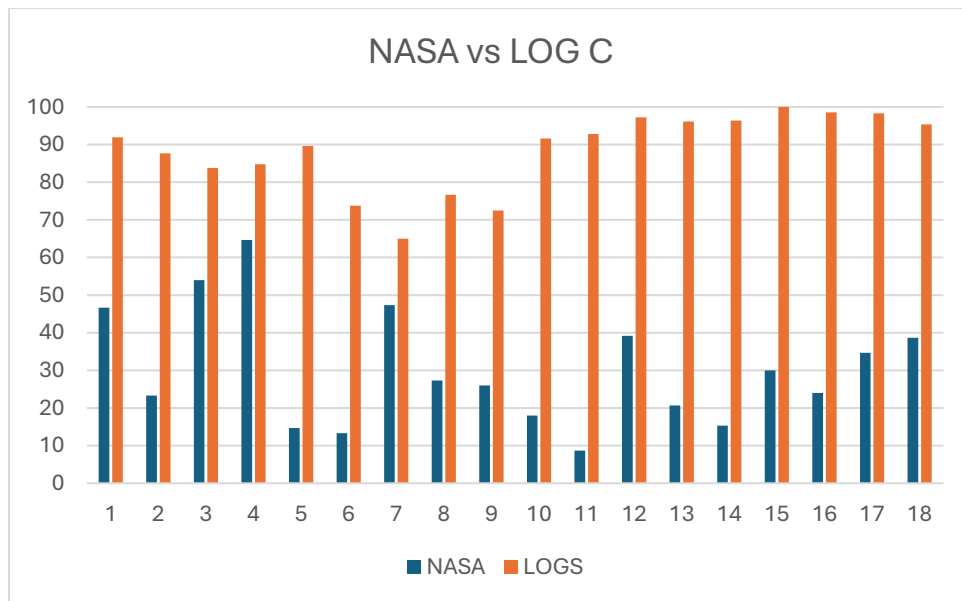


Les meilleures performances sont majoritairement associées à une meilleure utilisabilité perçue. L'alignement entre performance réelle et le ressenti perçue par l'utilisateur indique une expérience utilisateur plus fluide.

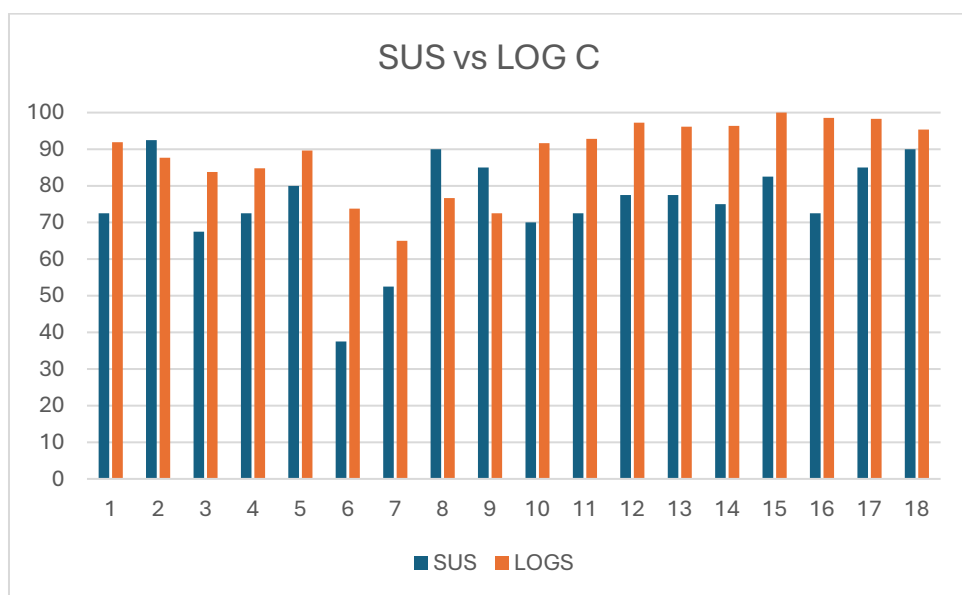
Assistance complète



Avec ce niveau d'assistance la charge cognitive est faible et l'utilisabilité perçue élevée. Ce qui démontre que l'assistance complète permet une expérience fluide et moins contraignante cognitivement, on peut également noter l'impact important de l'UI sur l'utilisabilité perçue.



Les joueurs qui obtiennent les meilleures performances sont aussi ceux avec la plus faible charge cognitive.



On peut observer une forte corrélation positive entre les performances obtenue et l'utilisabilité du système indiquant que les utilisateurs ressentent les bénéfices des assistances.

Conclusion

L'analyse croisée des mesures subjectives (NASA-TLX, SUS) et objectives (LOGS) met en évidence une tendance, l'augmentation du niveau d'assistance s'accompagne d'une amélioration de l'expérience utilisateur, tant sur le plan de la performance que de la charge mentale et de l'utilisabilité.

Le niveau d'assistance légère se caractérise par une charge cognitive élevée « 61.15/100 », pour des performances relativement faible « 65.57/100 » et une utilisabilité

réduite « 56.25/100 » cela démontre une interaction coûteuse et non optimal pour le joueur.

À l'inverse, le niveau d'assistance complet est associé à une baisse importante de la charge cognitive « 28.21/10 » à une nette augmentation des performances « 88.61/100 » et une forte perception d'utilisabilité « 72.91/100 » indiquant une expérience facilitée et plus satisfaisante pour l'utilisateur.

Le niveau d'assistance modérée apparaît comme une solution intermédiaire efficace, conjuguant une réduction visible de la charge cognitive « 39.38/100 » avec une amélioration des performances « 75.98/100 » et de l'utilisabilité « 62.36/100 ». Cette progression semble indiquer une corrélation directe entre le degré d'assistance et la qualité de l'expérience pour un utilisateur novice.

Ces résultats appuient l'idée qu'un niveau d'assistance adapté peut optimiser l'interaction d'un joueur novice avec un jeu de simulation de vol, et renforce la pertinence des systèmes adaptatifs d'assistance dans les environnements complexes.

4.4 Analyse de la progression

Cette section explore les variations de performance en fonction de l'ordre dans lequel les niveaux d'assistance ont été expérimentés.

Effet d'apprentissage

Les résultats montrent une progression des scores sur le parcours A selon sa position dans l'ordre de test :

- Score moyen sur A en 1^{ère} position : 61
- Score moyen sur A en 3^e position : 70

En complément la moyenne globale des scores lorsque A est testé en dernière position est également plus élevée 84 contre 77 lorsque A est testé en première position. Cet écart suggère que les participants réalisent de meilleures performances lorsqu'ils abordent le parcours sans assistance après l'avoir expérimenté avec des assistances.

Effet de désengagement

Si les scores du parcours « A » montre une amélioration lorsqu'il est testé en dernière position, les résultats obtenus pour les parcours B et C révèlent une dynamique différente, où l'ordre de test n'induit pas nécessairement une meilleure performance.

Pour le parcours B, les participants obtiennent un score moyen de 79 lorsqu'il est testé en première position, contre 76 lorsqu'il est présenté en dernier. Cette légère baisse suggère que l'exposition préalable aux autres niveaux d'assistance n'améliore pas significativement les résultats, et pourrait aussi traduire une difficulté à maintenir le

niveau d'attention ou de concentration sur un parcours moins stimulant après une phase initiale plus engageante.

Le parcours C, affiche également des scores plus faibles lorsque qu'il apparait en dernière position 85 contre 89 en première position. Le fait que la performance régresse lorsque le niveau d'assistance est joué en fin de session peut être interprété comme un désengagement progressif.

Ces résultats semblent valider l'objectif d'une amélioration de l'accessibilité. Toutefois, il soulève également une question centrale de Game design : comment maintenir l'engagement sans trop réduire la difficulté ?

Il semble en effet qu'une assistance trop forte puisse avoir des effets négatifs en limitant l'implication, en diminuant la sensation de maîtrise et de progression. Les résultats du parcours B et C lorsqu'ils sont testés en dernière position nous permettent de formuler l'hypothèse suivante :

Lorsqu'un niveau perçu comme facile est rencontré après un niveau plus complexe, le joueur, ayant déjà mobilisé un effort cognitif important, baisse naturellement son niveau d'attention. Cette perte d'engagement affecte la qualité de l'exécution, sans pour autant provoquer un échec. Il s'agit ici d'un désengagement implicite, où la tâche reste réalisable, mais devient moins stimulante.

Ainsi, tester un niveau plus simple après un parcours exigeant ne garantit pas de meilleurs résultats, cela peut au contraire réduire l'attention portée à la tâche, et donc altérer subtilement l'expérience.

4.5 Discussion critique des résultats

Les résultats présentés précédemment montre qu'un niveau d'assistance accru s'accompagne d'un allègement de la charge cognitive, d'une amélioration des performances et d'une meilleure utilisabilité. Toutefois, les observations réalisées lors des séances de test apportent une nuance complémentaire à l'interprétation globale des résultats. En effet, plusieurs participants ont semblé ressentir une frustration vis-à-vis des assistances, trop sensibles pour certains, trop intrusif pour d'autres. Cette observation met en évidence un point important, la personnalisation des assistances apparait comme un facteur déterminant pour garantir une expérience au plus proche des besoins de l'utilisateur.

Les résultats de progression renforcent cette idée, en effet au-delà d'un simple confort, cette possibilité de configurations sur mesure représente un levier potentiel d'engagement et d'autonomie non négligeable.

De plus, les données recueillies en jeu ne reflètent pas tous les aspects de la qualité d'un vol comme la fluidité ou la régularité.

Les questionnaires SUS et NASA-TLX révèlent une préférence générale pour les niveaux d'assistance élevés, perçus comme réduisant la charge cognitive. Cela corrobore l'objectif initial de rendre le simulateur plus accessible, mais pose aussi la question du manque de challenge, une assistance trop forte pourrait réduire la sensation de contrôle et l'engagement du joueur.

4.6 Conclusion et ouverture

Ce travail de recherche avait pour objectif de concevoir, implémenter et évaluer l'impact sur les performances et l'expérience utilisateur d'assistance dans un environnement de jeu de simulation de vol pour des joueurs novice. À travers la modélisation d'un modèle de vol semi-réaliste, la réalisation de différents niveaux d'assistance, la mise en place d'un parcours expérimental et la récolte de données en jeu, ce projet a permis d'explorer les effets de ces assistances sur les performances et l'expérience utilisateur. Les résultats montrent que les systèmes d'assistance testés peuvent significativement améliorer les performances et l'expérience des testeurs. Néanmoins, ces bénéfices doivent être mis en relation avec le risque d'une perte d'autonomie et d'engagement, en particulier lorsque les aides prennent trop le contrôle. En effet, les retours utilisateur ainsi que l'analyse de la progression des participants a mis en évidence qu'un test avec un niveau d'assistance élevé testé en dernière position n'est pas systématiquement mieux réussi, notamment lorsqu'il est perçu comme plus facile que le test qui le précède. Ces observations invitent à réfléchir à des modèles de difficulté incrémentale, capable de maintenir un niveau d'engagement constant. Cela renforce la pertinence d'une approche fondée sur des assistances adaptatives, capables d'évoluer en fonction du profil du joueur, de ses performances ou du contexte de jeu.

L'ensemble de l'implémentation présente des limites structurelles : simplification des dynamiques de vol, absence de système météorologique, et échantillon réduit. Ces limites n'invalident pas les résultats, mais invitent à les considérer comme une première étape exploratoire et non comme une vérification définitive.

Cette recherche pourrait être enrichie par le développement d'aides adaptatives qui pourrait être ajustées en fonction du niveau de l'utilisateur ou du contexte de vol. L'enjeu serait alors non seulement de faciliter la prise en main, mais aussi de soutenir l'engagement et la motivation du joueur en l'aidant à progresser de manière autonome au sein d'environnements complexes.

Annexes

Annexe 1 – Présentation NASA-TLX

Le NASA-TLX (NASA Task Load Index) est un outil d'évaluation subjectif largement utilisé en ergonomie cognitive pour mesurer la charge mentale perçue par un individu lors de l'exécution d'une tâche. Développé par le « Human Performance Group » de la NASA (Hart & Staveland, 1988), il permet de quantifier la charge de travail mentale à travers six dimensions pondérées, évaluées par l'utilisateur à l'issue d'une tâche.

Les six dimensions du NASA-TLX sont les suivantes :

1. Exigences mentales (Mental Demand) : effort cognitif requis (mémoire, calcul, prise de décision).
2. Exigences physiques (Physical Demand) : effort physique requis (mouvements, manipulation).
3. Exigences temporelles (Temporal Demand) : pression temporelle perçue (urgence, rythme imposé).
4. Performance : autoévaluation du niveau de réussite (perception de sa propre efficacité).
5. Effort : quantité globale d'effort investie pour accomplir la tâche.
6. Frustration : niveau d'irritation, de stress ou de contrariété ressenti.

Chaque dimension est évaluée par l'utilisateur sur une échelle de 0 à 100, généralement à l'aide d'une échelle visuelle analogique ou numérique. L'utilisateur attribue également des pondérations à chaque dimension en comparant les couples de critères deux à deux (pondération par paire), afin de prendre en compte leur importance relative dans la tâche évaluée.

Le score final du NASA-TLX est une moyenne pondérée des six dimensions, et reflète donc une mesure synthétique, mais nuancée de la charge cognitive perçue.

Annexe 2 – Présentation SUS

Le SUS (System Usability Scale) est un questionnaire standardisé permettant d'évaluer l'utilisabilité perçue d'un système interactif. Développée par John Brooke en 1986, cette échelle est aujourd'hui l'un des outils d'évaluation les plus utilisés dans les domaines de l'expérience utilisateur (UX), de l'ergonomie logicielle et de l'évaluation d'interfaces.

Le SUS se compose de 10 affirmations auxquelles les participants doivent répondre avec une pondération allant de « Pas du tout d'accord » (1) à « Tout à fait d'accord » (5) avec une alternance entre formulations positives et négatives.

Exemples d'affirmations :

- « Je pense que j'utiliserais ce système fréquemment. »
- « Je trouve ce système inutilement complexe. »
- « J'ai trouvé ce système facile à utiliser. »
- « J'ai besoin d'apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir utiliser ce système. »

Le score total SUS est ensuite obtenu en additionnant les scores ajustés des 10 affirmations, puis en multipliant le total par 2,5. Le score final est donc compris entre 0 et 100. Le score SUS moyen est estimé à 68. Un score inférieur à ce seuil signale des déficiences au niveau de l'utilisabilité du produit.

Annexe 3 – Modèle de vol

Le modèle de vol est l'élément central de toute simulation de vol. Il comprend une version simplifiée de la physique de vol, basée sur des approximations de la réalité ainsi que toutes les formules de calcul de masse, d'inertie, de portance, de traînée, et de moment.

Ces formules et descriptions physiques sont issues du domaine de l'aérodynamisme, défini par : l'étude des forces qui résultent du mouvement d'un objet dans l'air. (NASA Glenn Center, 2023)

Il existe plusieurs méthodes pour implémenter un système de vol. "En fonction de votre objectif, vous pouvez aborder la tâche de création d'un modèle de vol de différentes manières"⁵ (*Realistic Aircraft Physics for Games*, 2020). Les différences résident principalement dans le niveau de réalisme de ceux-ci, qui s'étend d'une représentation fidèle de la réalité à des modèles de type arcade. Mais tous les modèles reposent sur des principes physiques avec plus ou moins d'approximations et de contraintes. (Exemple de modèle semi-réaliste jouable sur navigateur web [geo-fs.com](https://www.geo-fs.com)).

L'approche la plus commune pour réaliser un modèle de vol basé sur la physique, tel que décrit par Bywalec et Bourg (2013), consiste à utiliser une combinaison de formules aérodynamiques, de données calculées en temps réel dans le simulateur et de données empiriques précalculées pour décrire l'aérodynamisme des différentes surfaces de l'avion, celles-ci étant la plupart du temps obtenues par observation en

⁵ Jump Trajectory (Réalisateur). (2020, juin 28). *Realistic Aircraft Physics for Games*. <https://www.youtube.com/watch?v=p3jDJ9FtTyM>

soufflerie ou part des tests en vol (*Aerodynamic Lift, Drag and Moment Coefficients*, 2017).

Pour pouvoir concevoir ce type de système, il convient de se familiariser avec les principales forces physiques qui entrent en jeu lorsqu'un avion est en vol.

Ces forces constituent le socle sur lequel repose toute modélisation du comportement en vol. Nous allons les examiner plus en détail dans la section suivante.

Forces Physiques

Il existe quatre forces majeures qui agissent sur un avion en vol : le poids, la portance, la traction (ou poussée) et la traînée. Le poids, directement liée à la masse, est la force qui tend à tirer l'avion vers le sol. À l'opposé, la portance est la force générée par les surfaces de vol (entendu ici comme la surface des ailes), contre le poids et qui permet à l'avion de rester en vol. La poussée ou la trainée est générée par le système de propulsion ou de traction de l'avion. En augmentant la vitesse de l'avion, elle permet aux surfaces de vol de générer plus ou moins de la portance. La traînée agit à l'encontre de la traction en ayant tendance à ralentir l'avion. (Bywalec & Bourg, 2013).

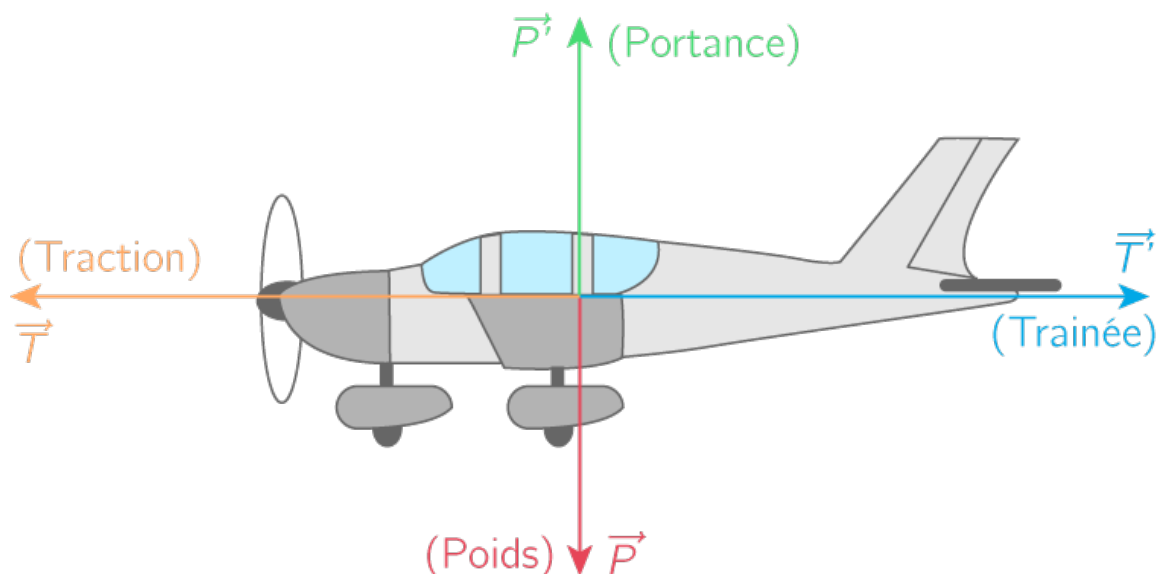


Figure 4 - Schéma des forces aérodynamiques

Ces différentes forces interagissent entre elles et sont intrinsèquement liées à de nombreux facteurs tels que : la vitesse, l'altitude, l'orientation, etc. (NASA Glenn Center, 2023)

Si on fait abstraction de ces facteurs, les interactions entre les forces peuvent être décrites comme suit (NASA Glenn Center, 2023) :

- Si le poids diminue et que la portance reste constante, l'avion va monter.
- Si la portance diminue et que le poids reste constant, l'avion va descendre.

- Si la poussée augmente et que la traînée reste constante, l'avion va accélérer.
- Si la traînée augmente et que la poussée reste constante, l'avion va ralentir.

Tel que décrit par la seconde loi du mouvement de Newton, lorsque les forces ne sont pas en équilibre, l'avion se déplace dans la direction de la plus grande force. (NASA Glenn Center, 2023).

Formules et paramètres de vol :

Une force est représentée par un vecteur composé d'une magnitude et d'une direction.

Angle d'attaque :

L'angle d'attaque (α) représente l'angle entre la ligne de référence de l'avion et le vecteur représentant son mouvement relatif par rapport au volume d'air qu'il traverse.

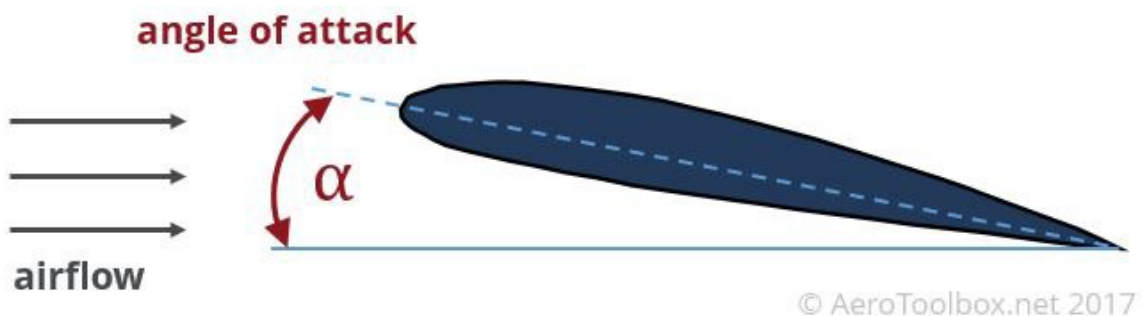


Figure 5 - Représentation de l'angle d'attaque

Ce schéma illustre le concept de l'angle d'attaque (α) d'une aile d'avion.

Le schéma présente une aile d'avion en coupe transversale, avec la ligne de référence (corde de l'aile) en pointillés bleus, reliant le bord d'attaque au bord de fuite.

L'angle d'attaque est l'angle (α) entre cette corde et la direction du flux d'air relatif (airflow) illustré par des flèches noires.

Portance : Un angle d'attaque positif augmente généralement la portance, permettant à l'avion de rester en l'air, mais un angle trop élevé peut provoquer un décrochage.

Traînée : La traînée augmente avec l'angle d'attaque, ce qui peut ralentir l'avion.

Coefficients Aérodynamiques :

Comme introduit plus tôt, la création d'un modèle de vol requiert la combinaison de formules permettant de calculer les différentes forces et de données empiriques précalculées.

Afin d'approximer le comportement aérodynamique réel d'une surface de vol en contact avec l'air, on utilise différents coefficients qui permettent de moduler les forces appliquées aux surfaces de vol en fonction de leur angle d'attaque.

Ci-dessous un exemple de courbes représentant les coefficients de portance et de traînée d'une surface de vol en fonction de son angle d'attaque.

Coefficient de Portance :

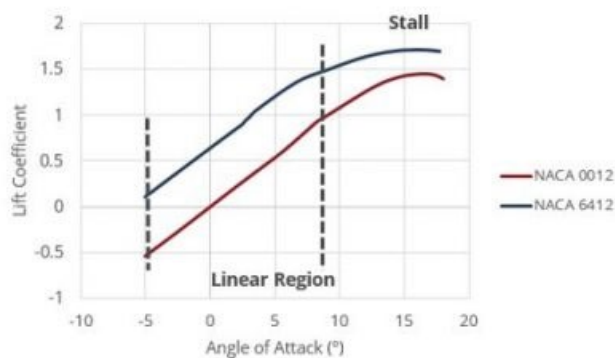


Figure 6 - Variation de la portance en fonction de l'angle d'attaque

Axe des abscisses (x) : Angle d'attaque (°)

Axe des ordonnées (y) : Coefficient de portance

Coefficient de Traînée :

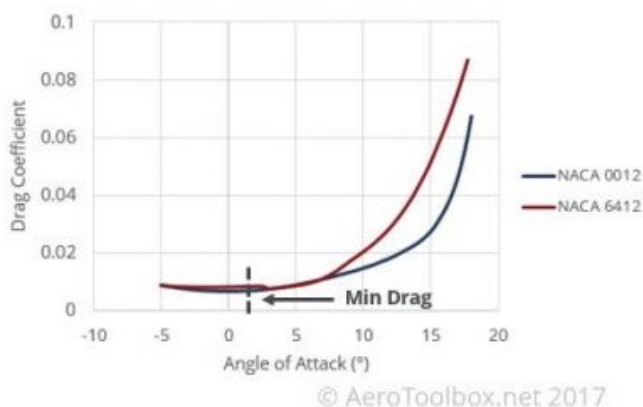


Figure 7 - Variation de la traînée en fonction de l'angle d'attaque

Axe des abscisses (x) : Angle d'attaque (°)

Axe des ordonnées (y) : Coefficient de traînée

Région Linéaire : Pour les angles d'attaque faibles (environ -5° à 5°), le coefficient de portance augmente de manière linéaire pour les deux profils.

Stall (Décrochage) : Au-delà d'un certain angle d'attaque (environ 10°-15°), le coefficient de portance commence à diminuer, indiquant un décrochage.

Traînée Minimale : Le coefficient de traînée est minimal pour des angles d'attaque faibles et augmente de manière exponentielle avec des angles d'attaque plus élevés.

Ces coefficients sont calculés via l'outil [xFoil](#) pour les profils NACA-0012 et NACA-6412 représenter ci-dessous.

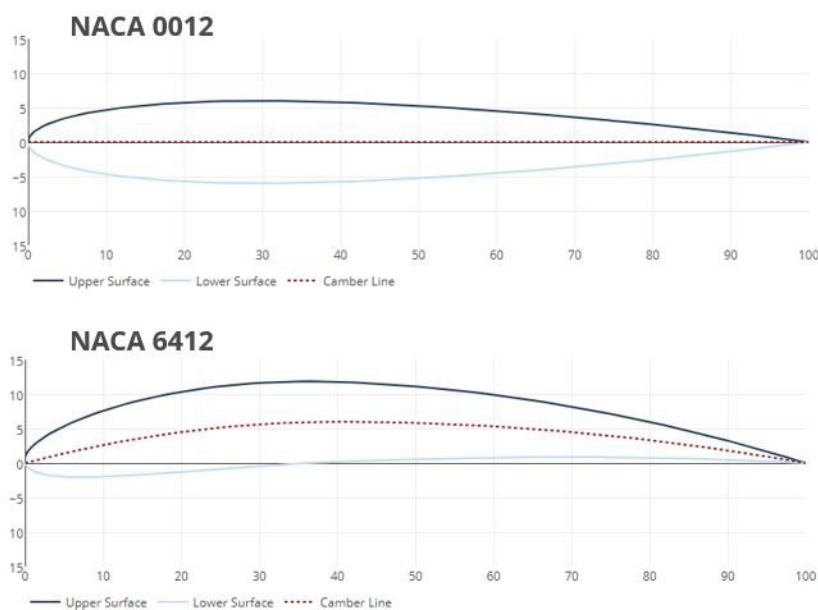


Figure 8 - Profil NACA 0012 et NACA 6412

Poids :

$$P = m \cdot g$$

m = Masse

g = Constante gravitationnel

Magnitude	Dépend de la masse
Direction	Dirigé vers le centre de la terre

Portance :

$$L = C_L(\alpha) \frac{pv^2}{2} S$$

C_L = Coefficient de portance

α = Angle d'attaque

p = Pression atmosphérique

v = Vitesse par rapport au volume d'air traversé

S = Surface de totale de vol

Magnitude	Formule de la portance modulée par le coefficient de portance
Direction	Perpendiculaire à la direction de vol

Trainée :

$$D = C_D(\alpha) \frac{pv^2}{2} S$$

C_D = Coefficient de trainée

α = Angle d'attaque

p = Pression atmosphérique

v = Vitesse par rapport au volume d'air traversé

S = Surface de totale de vol

Magnitude	Formule de la trainée modulée par le coefficient de trainée
Direction	Opposé au mouvement de l'avion

Poussée :

$$M = C_M(\alpha) \frac{pv^2}{2} SL$$

C_M = Moment coefficient

α = Angle d'attaque

p = Pression atmosphérique

v = Vitesse par rapport au volume d'air traversé

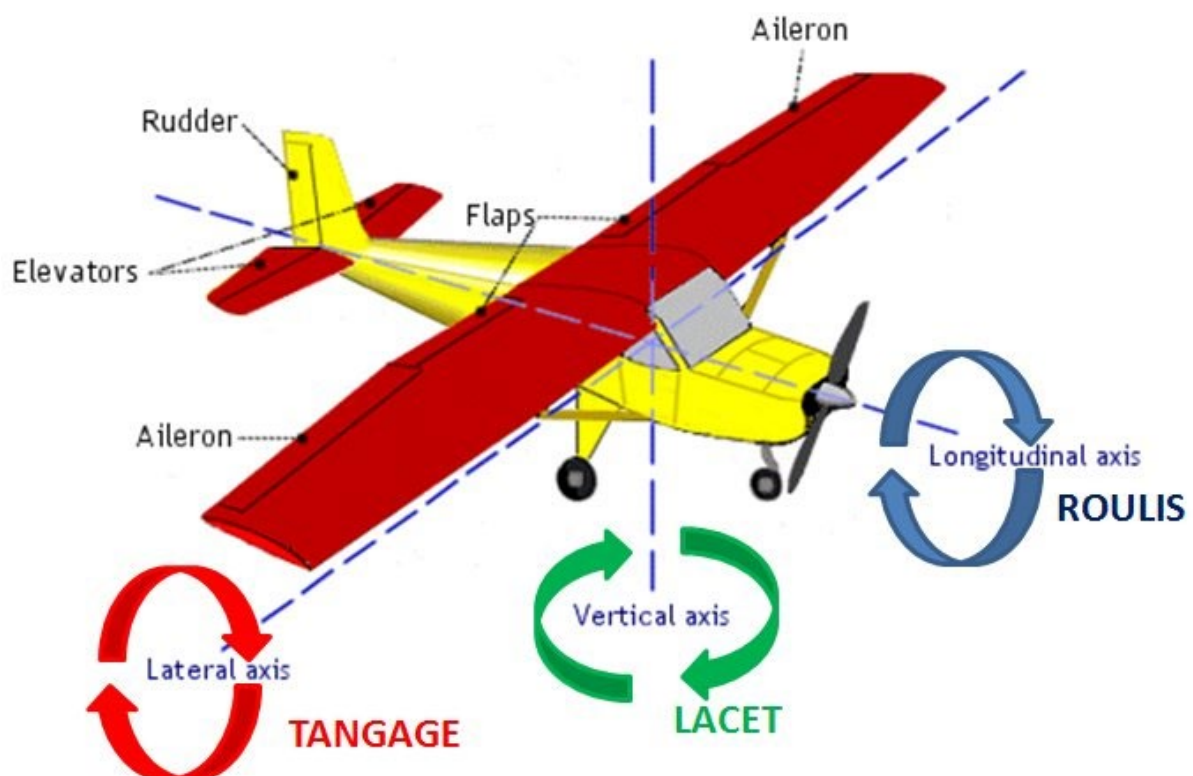
S = Surface de totale de vol

L = Portance

Magnitude	Dépend de la puissance du système de propulsion
Direction	Aligner avec le système de propulsion

Surface de contrôle :

Pour pouvoir influencer la direction de vol, le pilote doit pouvoir contrôler l'avion. Ce contrôle passe par l'utilisation de surfaces de contrôle (en rouge sur le schéma ci-dessous) qui, en modifiant l'écoulement de l'air autour de l'avion, lui permettent d'effectuer des rotations sur plusieurs axes.



Le roulis s'effectue autour de l'axe longitudinal, le tangage autour de l'axe latéral et le lacet autour de l'axe vertical.

Annexe 4 – Courbes Trainée/Portance

La courbe de trainée, montre une croissance continue avec l'augmentation de l'angle d'attaque, reflétant une résistance croissante.

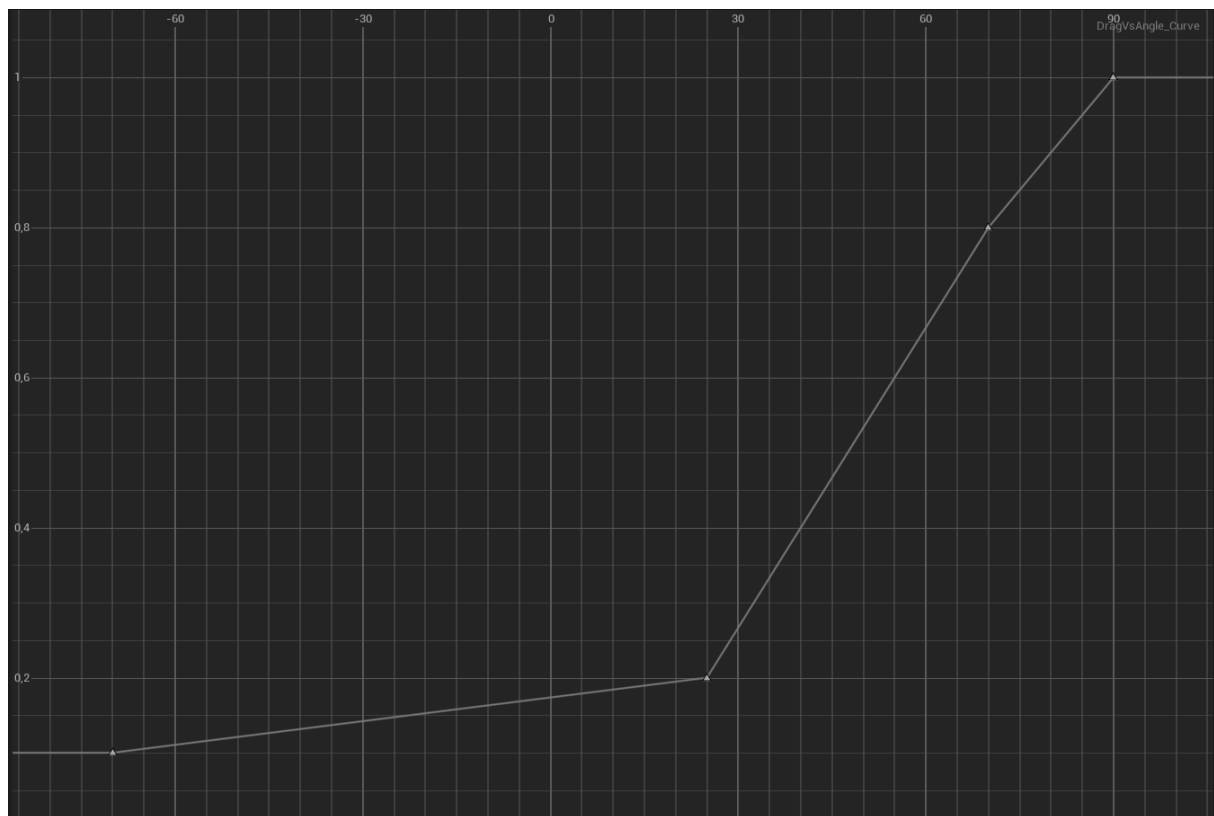


Figure 9 - Angle d'attaque et coefficient de trainée

La courbe de portance illustre comment la force de portance varie avec l'angle d'attaque. Elle atteint un maximum avant de s'effondrer brutalement lorsque l'angle est trop élevé, traduisant un décrochage.

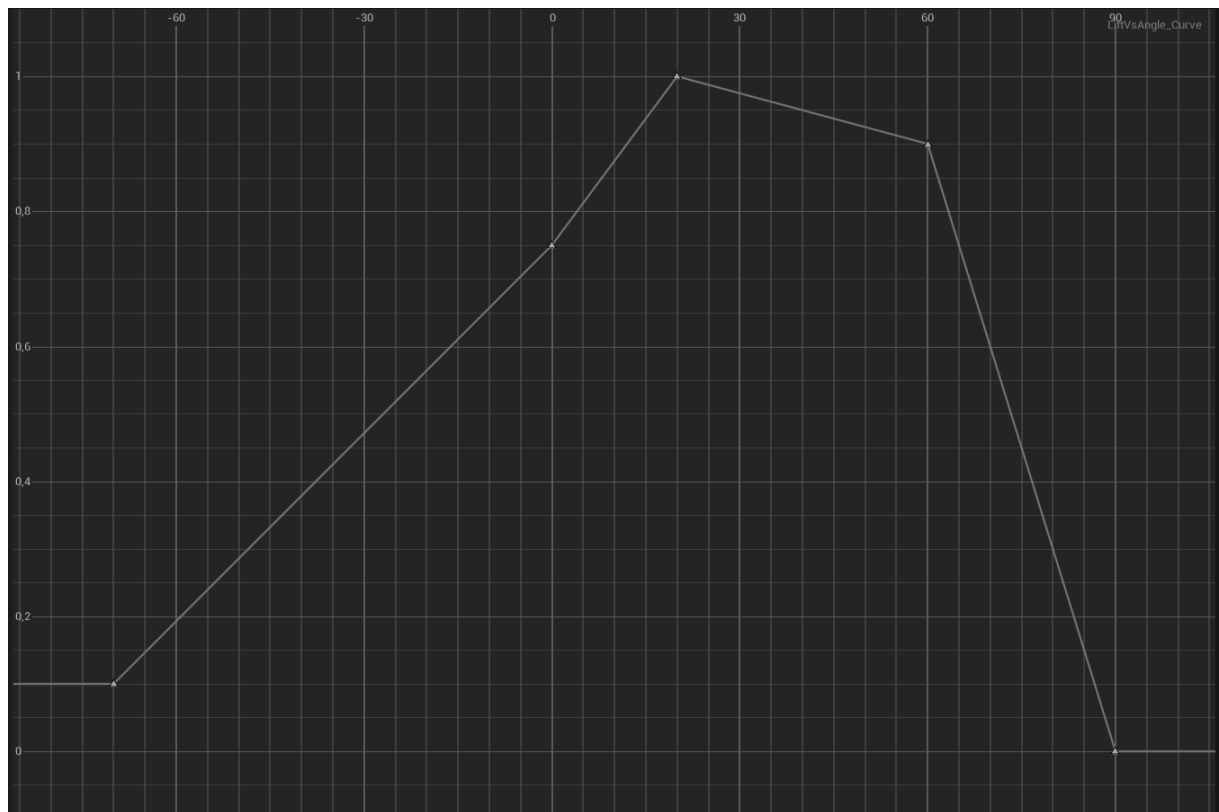


Figure 10 - Angle d'attaque et coefficient portance

Bibliographie

Jump Trajectory (Réalisateur). (2020, juin 28). *Realistic Aircraft Physics for Games*.
<https://www.youtube.com/watch?v=p3jDJ9FtTyM>

Flight Model Physics. (2020).
https://docs.flightsimulator.com/html/Samples_And_Tutorials/Primers/Flight_Model_Physics.htm

Turunen, J. (2017). *The good, the bad and the unpleasant—A study of graphical user interfaces in video games*.

Schell, J. (2019). *The Art of Game Design: A Book of Lenses, Third Edition*. CRC Press.

Hodent, C. (2017). *The Gamer's Brain : How Neuroscience and UX Can Impact Video Game Design* (1^{re} éd.). CRC Press. <https://www.perlego.com/book/1472236/the-gamers-brain-how-neuroscience-and-ux-can-impact-video-game-design-pdf>

Aerodynamic Lift, Drag and Moment Coefficients. (2017, août 2). AeroToolbox.
<https://aerotoolbox.com/lift-drag-moment-coefficient/>

Aircraft Force Interactive. (s.d.). Glenn Research Center | NASA.
<https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/foilsimu/>

Allerton, D. (2009). *Principles of Flight Simulation*. John Wiley & Sons.

Bywalec, B., & Bourg, D. (2013). *Physics for Game Developers, 2nd Edition*.
<https://www.oreilly.com/library/view/physics-for-game/9781449361037/>

Effects of Shape on Lift Interactive. (s.d.). Glenn Research Center | NASA.
<https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/foilshape/>

Fundamental Forces in Flight. (2017, août 1). AeroToolbox.
<https://aerotoolbox.com/forces-in-flight/>

Lamy, C. (2020, août 14). «*Flight Simulator*», un jeu vidéo de haut vol.
https://www.lemonde.fr/m-le-mag/article/2020/08/14/flight-simulator-un-jeu-video-de-haut-vol_6048966_4500055.html

Staat, B., & Verhagen, H. (2018). Exploring Video Game Design and Player Retention- a Longitudinal Case Study. <https://doi.org/10.1145/3275116.3275140>

Linja-aho, M. (2006). (PDF) Creating a Framework for Improving the Learnability of a Complex System. <https://doi.org/10.17011/ht/urn.2006519>

Csikszentmihalyi, M. (1990). (PDF) *Flow: The Psychology of Optimal Experience*.
https://www.researchgate.net/publication/224927532_Flow_The_Psychology_of_Optimal_Experience

Résumé

Ce mémoire étudie l'impact de différents niveaux d'assistance sur l'expérience utilisateur et les performances dans un environnement de simulation de vol destiné à un public novice. Un prototype semi-réaliste développé sous Unreal Engine a permis d'expérimenter trois niveaux d'aides. L'évaluation s'appuie sur une approche mixte combinant données de performance, questionnaires SUS (System Usability Scale) et NASA-TLX (charge cognitive perçue). Les résultats montrent qu'un niveau d'assistance élevé améliore la lisibilité du système et réduit la charge mentale, mais peut aussi entraîner un désengagement lorsque la tâche devient trop guidée ou perçue comme trop simple. L'étude souligne l'importance de trouver un équilibre entre accompagnement automatisé et autonomie, et ouvre des pistes pour la conception d'aides adaptatives dans les environnements complexes.

Mots-clés

Simulation de vol · Expérience utilisateur · Accessibilité · Charge cognitive · Assistances