

Borealis Horizon : un voyage relativiste en temps réel jusqu'aux Piliers de la Création — modèle, implémentation et limites

Borealis Dynamics

Expérience publique sur <https://ngc6611.pages.dev> · version 1.1.0 du site · décollage le 19 octobre 2026, 12:00 (UTC-3) · document du 19/10/2026

RÉSUMÉ

Borealis Horizon est une simulation publique, exécutée dans le navigateur, d'un voyage interstellaire à accélération propre constante de 1 g depuis la Terre jusqu'à un point situé à 7 années-lumière des Piliers de la Création (M16), soit un parcours de 6 985 années-lumière dans le référentiel de la Terre. La simulation se déroule en temps réel à partir d'un instant de départ fixé lors de la publication : l'observateur voit, à chaque seconde de bord, l'état cinématique prévu par le modèle — obtenu par intégration numérique pendant la montée et par des expressions en forme close dans les phases relativistes d'accélération et de freinage — et le ciel qu'enregistrerait une caméra à exposition fixe. Cet article documente le modèle physique (mouvement hyperbolique en forme close avec une phase initiale newtonienne intégrée par Runge-Kutta ; dilatation du temps ; retard des signaux et horizon d'accélération ; aberration et décalage Doppler de la couleur et de la luminosité ; extinction interstellaire ; fond diffus cosmologique transformé direction par direction ; reconstruction tridimensionnelle de la nébuleuse de l'Aigle à partir de photographies publiques ; fusée à photons idéale), les choix d'implémentation (formulations numériquement stables pour γ jusqu'à $\sim 10^4$, tables précalculées, intégration conservant le flux, vérification par tests de régression) et les limites connues. Avec $\gamma = 3\,606$ à l'inversion, 17,21 ans de bord et 6 987 ans sur Terre, le voyage est présenté comme une expérience de visualisation : fidèle là où la physique est calculable et ouvertement simplifié là où l'ingénierie ou les données n'existent pas.

ABSTRACT

Borealis Horizon is a public, browser-based simulation of an interstellar voyage at a constant proper acceleration of 1 g from Earth to a point 7 light-years short of the Pillars of Creation (M16), covering 6,985 light-years in Earth's frame. The simulation runs in real time from a launch instant fixed at publication: every board second shows the kinematic state predicted by the model — numerical integration during the ascent, closed-form expressions in the relativistic acceleration and braking phases — and the sky a fixed-exposure camera would record. This paper documents the physical model (closed-form hyperbolic motion with a Newtonian ascent phase integrated by Runge-Kutta; time dilation; signal delay and the acceleration horizon; aberration and Doppler shifts of colour and brightness; interstellar extinction; the cosmic microwave background transformed direction by direction; a three-dimensional reconstruction of the Eagle Nebula from public photographs; an ideal photon rocket), the implementation choices (numerically stable formulations up to $\gamma \sim 10^4$, precomputed tables, flux-conserving integration, regression tests) and the known limitations. With $\gamma = 3,606$ at turnaround, 17.21 board years and 6,987 Earth years, the voyage is presented as a visualization experiment: faithful where physics is computable and openly simplified where engineering or data do not exist.

Mots-clés : relativité restreinte ; mouvement hyperbolique ; aberration ; effet Doppler ; fond diffus cosmologique ; nébuleuse de l'Aigle ; visualisation scientifique ; WebGL. **Keywords:** special relativity; hyperbolic motion; aberration; Doppler effect; cosmic microwave background; Eagle Nebula; scientific visualization; WebGL.

1. Introduction et conception de l'expérience

Les voyages à accélération propre constante sont l'exemple classique de la manière dont la relativité restreinte transforme des distances galactiques en durées humaines : la rapidité croît linéairement avec le temps propre et la distance parcourue croît exponentiellement avec elle [1, 2]. Ce que l'on voit rarement, c'est l'*aspect* de ce voyage — comment le ciel se comprime vers l'avant, comment les couleurs changent, comment le fond diffus cosmologique (CMB) devient un foyer visible, comment l'image de la Terre se fige derrière le vaisseau — présenté sans raccourcis, avec les bons nombres, sur la durée réelle du voyage.

Borealis Horizon est cette expérience. Le vaisseau part d'une base côtière fictive, monte avec une poussée de 1,1 g, passe à 1 g d'accélération propre constante, inverse la poussée à mi-parcours et s'arrête, au repos par rapport à la Terre, 7 années-lumière avant le plan des Piliers de la Création, après 6 985 années-lumière. La simulation tourne dans un navigateur ordinaire (HTML, JavaScript et WebGL2, sans bibliothèques externes), et l'instant du départ, $T_0 = 19/10/2026\ 12:00:00\ \text{UTC}-3$, a été horodaté lors de la publication : tous les visiteurs voient le même vaisseau, au même point, en temps réel. Il n'y a ni accélération du temps, ni pause, ni retour en arrière ; le voyage dure 17,21 ans de bord en durée réelle du site.

La conception obéit à trois principes. (i) *Fidélité là où il y a calcul* : cinématique, horloges, lumière et fond cosmique sont calculés à partir des lois physiques, sans effets de mise en scène. (ii) *Exposition fixe* : le gain et la fonction de compression tonale du hublot sont fixés à l'avance, sans ajustement automatique de l'exposition selon la scène. (iii) *Simplification déclarée* : ce que l'ingénierie ne sait pas faire (le moteur, le bouclier) et ce que les données ne contiennent pas (la troisième dimension de la nébuleuse) est assumé explicitement et listé pour le public sur la page « Licence poétique » du site. Cet article est la contrepartie technique de cette liste : il décrit le modèle, les formules, l'implémentation et les problèmes connus.

La section 2 présente le modèle de mouvement ; la section 3, le temps et les signaux ; la section 4, la lumière (aberration, Doppler, extinction, catalogues, exposition, Terre) ; la section 5, le fond cosmique ; la section 6, la reconstruction de la nébuleuse de l'Aigle ; la section 7, la propulsion, l'énergie et le flux sur le bouclier ; la section 8, les rencontres scénographiques ; la section 9, les instruments, le journal et la radio de bord ; la section 10, l'implémentation et la robustesse numérique ; la section 11, les limitations et les problèmes connus. Les annexes rassemblent constantes, paramètres et jalons.

2. Modèle de mouvement

2.1 Phase de montée ($\tau < 24\ \text{h}$)

La trajectoire est une fonction pure du temps de bord τ (secondes depuis le départ), définie en deux phases. Dans la première, d'une durée fixe d'un jour de bord, le vaisseau monte radialement depuis la surface de la Terre sous l'effet de la gravité terrestre et d'une poussée par unité de masse

$$a(r) = \max\left(1,1\frac{GM}{r^2}, g_0\right), \quad (1)$$

avec $GM = g_0 R_\oplus^2$ ($g_0 = 9,80665\ \text{m/s}^2$, $R_\oplus = 6\ 371\ \text{km}$), de sorte que la poussée vaut 1,1 g sur la plateforme et passe à g_0 lorsque $1,1\ GM/r^2$ tombe sous g_0 , à 311 km d'altitude ($r = R_\oplus\sqrt{1,1}$). L'accélération résultante est $a(r) - GM/r^2$: 0,1 g net au début, croissant jusqu'à pratiquement 1 g à mesure que la gravité terrestre s'efface. Il n'y a ni atmosphère, ni traînée, ni rotation de la Terre, ni Soleil, ni Lune dans cette phase (section 11). Le système

$$\frac{dr}{d\tau} = v, \quad \frac{dv}{d\tau} = a\left(r\right) - \frac{GM}{r^2} \quad (2)$$

est intégré par Runge–Kutta d'ordre quatre avec un pas variable prescrit $h = 0,02 + 5 \times 10^{-4} \tau$ (de 20 ms au sol à 43 s à la fin du jour), en conservant les tables de τ , r , v et de l'accélération. Comme $v \ll c$ pendant toute la journée (827 km/s à la fin), la phase est traitée comme newtonienne ; la correction relativiste intervient dans deux intégrales accumulées avec l'état : la *combustion* b (rapidité accumulée par la poussée, section 7),

$$b\left(\tau\right) = \frac{1}{c} \int_0^\tau a\left(r\left(\tau'\right)\right) d\tau', \quad (3)$$

intégrée par la règle de Simpson à chaque pas, et le temps terrestre $t_\oplus$, avec la dilatation au premier ordre en v^2/c^2 ,

$$dt_\oplus = \left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right) d\tau, \quad (4)$$

évaluée avec la moyenne de v^2 aux extrémités du pas. À la fin du jour, le vaisseau est à 34,9 millions de kilomètres du centre de la Terre, à 827 km/s, avec $t_\oplus - \tau = 0,107$ s. Entre les nœuds de la table, l'état est interpolé par des polynômes d'Hermite cubiques utilisant les dérivées connues (v pour r , a pour v), ce qui préserve la continuité de r , de v et de l'accélération indiquée.

2.2 Phase relativiste : mouvement hyperbolique en forme close

À partir de $\tau_1 = 86\,400$ s, l'accélération propre est constante, $a = g_0$, et la trajectoire est le mouvement hyperbolique de Rindler [1, 3]. Avec la rapidité η définie par $\beta = \tanh \eta$ et $\gamma = \cosh \eta$, l'accélération propre constante donne

$$\eta\left(\tau\right) = \eta_1 + \frac{a}{c}\left(\tau - \tau_1\right), \quad (5)$$

où $\eta_1 = \operatorname{artanh}(v_1/c) = 2,76 \times 10^{-3}$ est la rapidité à la fin de la montée. La position radiale et le temps terrestre suivent, pour $\tau_1 \leq \tau < \tau_F$,

$$r = r_1 + \frac{c^2}{a} \cdot 2 \sinh \frac{\eta + \eta_1}{2} \sinh \frac{\eta - \eta_1}{2}, \quad t_\oplus = t_1 + \frac{c}{a} \cdot 2 \cosh \frac{\eta + \eta_1}{2} \sinh \frac{\eta - \eta_1}{2}, \quad (6)$$

qui sont les identités $\cosh \eta - \cosh \eta_1 = 2 \sinh((\eta + \eta_1)/2) \sinh((\eta - \eta_1)/2)$ et $\sinh \eta - \sinh \eta_1 = 2 \cosh((\eta + \eta_1)/2) \sinh((\eta - \eta_1)/2)$ écrites sans la soustraction de deux nombres presque égaux (section 10). L'inversion a lieu à la rapidité η_F telle que le freinage symétrique, de η_F à zéro, couvre exactement la distance restante jusqu'à la destination $D = 6\,985$ al :

$$\cosh \eta_F = \frac{1}{2} \left[\frac{a(D - r_1)}{c^2} + \cosh \eta_1 + 1 \right], \quad (7)$$

obtenue en égalant $r(\eta_F) + (c^2/a)(\cosh \eta_F - 1) = D$. Pendant le freinage ($\tau_F \leq \tau < \tau_{\text{fim}}$), la rapidité décroît linéairement, $\eta = (\tau_{\text{fim}} - \tau) a/c$, et la distance restante est

$$D - r = \frac{c^2}{a} \cdot 2 \sinh^2 \frac{\eta}{2}, \quad t_{\text{fim}} - t_\oplus = \frac{c}{a} \sinh \eta. \quad (8)$$

Le tableau 1 résume les valeurs. L'échelle $c/a = 0,9687$ an est la constante naturelle du voyage : chaque 0,9687 an de bord ajoute une unité à la rapidité ; chaque « 9 » supplémentaire dans la fraction de la vitesse

de la lumière coûte le même tronçon de ruban, comme le montre le ruban de rapidité du panneau de vitesse.

Tableau 1. Valeurs caractéristiques de la trajectoire ($a = g_0$, $D = 6\,985$ années-lumière).

Grandeur	Valeur	Remarque
Fin de la montée, τ_1	86 400 s	$r_1 = 3,49 \times 10^7$ km, $v_1 = 827$ km/s, $\eta_1 = 2,76 \times 10^{-3}$
Rapidité à l'inversion, η_F	8,8836	$\gamma_F = 3\,606,3$; $1 - \beta_F = 3,84 \times 10^{-8}$ (il manque 41,5 km/h pour atteindre c)
Inversion, τ_F	8,6057 ans	$t_{\oplus} = 3\,493,47$ ans ; $r_F = 3\,492,5$ al
Arrivée, τ_{fim}	17,2114 ans	6 286,5 jours de bord ; $t_{\oplus} = 6\,986,94$ ans
Vitesse propre maximale, $\gamma\beta c$	7,23 UA/s	distance sur la carte de la Galaxie par seconde de bord
Parcours contracté à l'inversion, D/γ_F	1,94 al	la route entière, mesurée à bord
Combustion totale, b_{fim}	17,7672	rapport de masses $e^b = 5,20 \times 10^7$ (section 7)

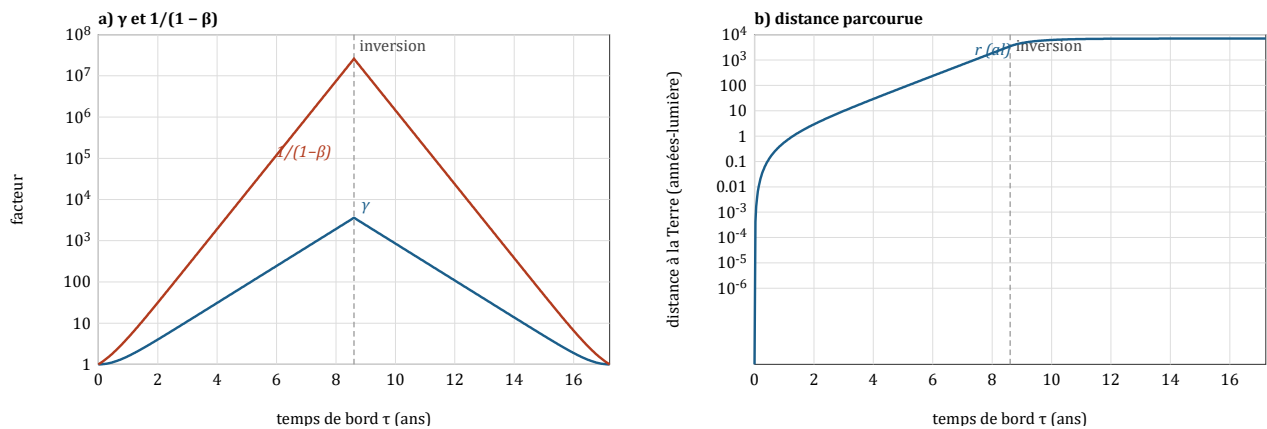


Figure 1. Cinématique du voyage en fonction du temps de bord, d’après les équations (5)–(8) : (a) le facteur de Lorentz $\gamma = \cosh \eta$ et $1/(1 - \beta) = (e^{2\eta} + 1)/2$ croissent exponentiellement jusqu’à l’inversion ($\gamma = 3\,606$; $1 - \beta = 3,8 \times 10^{-8}$) et décroissent symétriquement pendant le freinage ; (b) la distance à la Terre en années-lumière, en échelle logarithmique — le vaisseau franchit 1 année-lumière à 1,29 an de bord et la moitié du parcours (3 492,5 al) à l’inversion.

2.3 État instantané et jalons

Pour tout τ , la fonction d’état renvoie la phase, τ , $t_{\oplus}$, r , v , η , β , γ , $\varepsilon = 1 - \beta$, l’accélération indiquée et la combustion. Les jalons définis par une distance ou par une grandeur physique (échappement à la gravité terrestre, orbites planétaires, 1 jour-lumière, héliopause, nuage d’Oort, Bulle locale, seuils de température du CMB, distances d’étoiles de référence) sont résolus par bisection sur la fonction d’état, avec 200 itérations au plus et arrêt lorsque le point milieu coïncide avec une extrémité en double précision ; les jalons de durée fixe et de calendrier sont construits directement. Un jalon comme « Distance de Proxima Centauri » signifie atteindre, depuis la Terre, la distance de cette étoile (4,25 al) — et non passer près d’elle. Le même état alimente tous les panneaux, le journal de bord, la radio et le ciel : il n’existe pas de seconde source de vérité.

3. Temps et signaux

3.1 Horloges

L'horloge de bord est l'horloge réelle du visiteur, alignée sur celle du serveur par l'en-tête Date d'une requête HEAD — une estimation de l'alignement, non une garantie : l'en-tête a une résolution de 1 s, le réseau peut être asymétrique et, si la requête échoue, c'est l'horloge locale qui fait foi — et $\tau = t_{\text{actuel}} - T_0$. Le panneau « la Terre en avance » affiche $t_{\oplus} - \tau$ avec une unité dynamique. Au début, la différence croît comme $a^2\tau^3/(6c^2)$, d'après (4) : 1,8 attoseconde à la première seconde, 1 picoseconde seulement à 82 s — en dessous de la résolution de l'intégration en double précision pendant les premières secondes, ce qui explique le plancher en picosecondes du panneau ; à l'arrivée, l'avance est de 6 970 ans. La vitesse propre, $\gamma\beta c$, est affichée dans le panneau de vitesse : à l'inversion, le vaisseau avance de 7,23 UA de la carte de la Galaxie par seconde de bord. Le panneau de navigation affiche la distance restante mesurée à bord (la distance dans le référentiel de la Terre divisée par γ) et de combien la contraction a déjà raccourci le chemin ; divisée par γ_F , la route entière mesurerait 1,94 année-lumière.

3.2 Référentiels des horloges

Trois temps apparaissent sur les instruments et il convient de ne pas les confondre. τ est le temps propre du vaisseau — l'horloge de bord. $t_{\oplus}$ est le temps coordonnée du référentiel inertiel dans lequel la Terre est au repos, le « temps terrestre » du modèle ; $t_{\oplus} - \tau$ est l'avance accumulée par cette horloge sur celle de bord, mais ce n'est pas quelque chose que la caméra arrière puisse montrer : l'image qui arrive a été émise en $t_{\oplus} - x/c$, bien avant (section 3.3), et la simultanéité du référentiel instantanément comobile du vaisseau est encore une autre construction, non utilisée dans les panneaux. De même, $\gamma\beta c$ est une distance dans le référentiel de la Terre par seconde propre du vaisseau ; localement, rien ne dépasse c . La relativité générale reste en dehors du modèle : la gravité terrestre intervient comme force newtonienne pendant la montée, mais il n'y a pas de correction gravitationnelle des horloges. L'échelle de ce qui est omis n'est pas négligeable face à la précision affichée : le potentiel à la surface terrestre ($\Delta\Phi/c^2 \approx 7 \times 10^{-10}$) accumule ~ 150 s en 6 987 ans, et celui du Soleil à 1 UA ($\approx 10^{-8}$), ~ 36 min — le « temps terrestre » à la seconde près dépend du référentiel et du potentiel choisis [22].

3.3 Retard des signaux et horizon d'accélération

La liaison avec la Terre est traitée avec la Terre immobile au point de départ et une lumière se propageant en ligne droite (l'orbite terrestre, de 8 minutes-lumière, est négligée face à 6 985 années-lumière). Avec $x = r - R_{\oplus}$, l'image de la Terre qui atteint le vaisseau dans l'état $(t_{\oplus}, x)$ a été émise en $t_{\oplus} - x/c$, et un signal émis par le vaisseau atteint la Terre en $t_{\oplus} + x/c$. Pour qui accélère à g à partir du repos, il existe un horizon : les signaux émis à l'origine après $t_{\oplus} = c/a = 0,9687$ an n'atteignent jamais le vaisseau tant qu'il accélère [3]. La simulation n'impose pas ce fait ; il émerge de (6) : à l'inversion, la lumière qui arrive de la Terre a été émise seulement 0,9686 an après le départ et est âgée de 3 492,5 ans ; à l'arrivée, elle a été émise 1,937 an après le départ.

L'image de la Terre, en plus d'être ancienne, défile au ralenti et rougie par le facteur Doppler arrière

$$D_{\text{ré}} = \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}} = e^{-\eta}, \quad (9)$$

égal à 1/7 213 à l'inversion : une seconde de bord montre 1/7 213 de seconde de la Terre, et la lumière arrive 7 213 fois plus rouge. Le Soleil vu par l'arrière est un corps noir de 5 772 K vu à $T' = 5 772 e^{-\eta} = 0,80$ K à l'inversion — plus froid que le fond cosmique — et une station FM à 100 MHz arriverait à 13,9 kHz. La

caméra arrière affiche la date d'émission, l'âge de la lumière et le facteur de ralenti, calculés par ces expressions.

3.4 Calendrier

Les compteurs de durée utilisent des années de 365,25 jours (31 557 600 s) et des mois d'un douzième d'année ; les dates sont obtenues en ajoutant τ ou $t_{\oplus}$ à l'instant du départ — fixé en UTC (19/10/2026 15:00:00 UTC, présenté comme 12:00 UTC-3) — et formatées dans le fuseau horaire local du visiteur ; le calendrier du journal de bord utilise le fuseau de Brasília. Aucune communication réelle n'existe : le panneau calcule le retard qu'aurait un signal ; la radio de bord est une fiction écrite pour le trajet (section 11).

4. Lumière

4.1 Aberration

Chaque source au repos dans le référentiel de la Galaxie est vue par le vaisseau dans une direction aberrée. Avec θ l'angle entre la source et la direction du mouvement dans le référentiel de la Galaxie et θ' l'angle observé, la relation exacte est

$$\tan \frac{\theta'}{2} = e^{-\eta} \tan \frac{\theta}{2}, \quad (10)$$

la « formule du demi-angle » [4]. Elle est préférée à la forme usuelle $\cos \theta' = (\cos \theta + \beta)/(1 + \beta \cos \theta)$ parce qu'elle reste stable quand $\beta \rightarrow 1$: $\tan(\theta/2)$ est calculé comme $\sin \theta/(1 + \cos \theta)$ pour l'hémisphère avant et $(1 - \cos \theta)/\sin \theta$ pour l'hémisphère arrière, sans annulation, et le facteur $e^{-\eta}$ comprime l'hémisphère avant ($\theta < 90^\circ$) dans un cône de rayon angulaire $2 \cdot \text{atan}(e^{-\eta}) \approx 2e^{-\eta}$ autour de la proue ; la direction exactement arrière reste derrière. À l'inversion, l'hémisphère avant tient dans un cercle de $0,016^\circ$ de rayon — ce que le panneau d'aberration appelle « la moitié du ciel dans un cercle de θ' ». La même formule, inversée, est utilisée pour la nébuleuse, la Voie lactée diffuse et la Terre : on intègre le rayon dans le référentiel de repos et on transforme la radiance à la fin.

4.2 Doppler : couleur et luminosité

Le facteur Doppler d'une source vue dans la direction θ' est $D = 1/[\gamma(1 - \beta \cos \theta')]$. Pour $\gamma \sim 10^3$, l'expression $1 - \beta \cos \theta'$ perd des chiffres près de la proue — de façon mesurable en double précision et sévère dans le float32 du shader, dont l'epsilon machine (6×10^{-8}) dépasse $1 - \beta$ à l'inversion ; l'implémentation utilise la forme équivalente

$$D = \frac{1}{\gamma \left[\varepsilon + 2\beta \sin^2 \left(\theta' / 2 \right) \right]}, \quad \varepsilon = 1 - \beta = \frac{2}{e^{2\eta} + 1}, \quad (11)$$

où ε est obtenu directement à partir de la rapidité, sans soustraire β de 1 (section 10). Une étoile traitée comme un corps noir de température T apparaît comme un corps noir de température $T' = D \cdot T$; une raie d'émission de longueur d'onde λ apparaît à $\lambda' = \lambda/D$; le flux d'une source ponctuelle varie comme D^2 et la radiance d'une source étendue comme D^4 [5]. Pour les étoiles du catalogue HYG, qui ont une vitesse propre, le Doppler de l'étoile par rapport au référentiel de la Galaxie est inclus dans le même logarithme. C'est de ces trois règles, appliquées à chaque étoile, qu'émerge l'arc stellaire : à l'avant, les étoiles froides (3 000–4 000 K) décalées par $D \sim 2$ –3 deviennent blanches et bleues, les chaudes disparaissent dans l'ultraviolet, et le ciel arrière s'éteint et rougit.

4.3 Spectres, couleurs et catalogues

Les spectres stellaires sont des corps noirs. La conversion de la température en couleur utilise les fonctions colorimétriques CIE 1931 dans l'ajustement analytique de Wyman, Sloan et Shirley [6], intégrées numériquement avec la loi de Planck entre 360 et 830 nm, et la matrice XYZ→sRGB linéaire ; le résultat est la fraction de la puissance bolométrique qui tombe dans chaque canal, tabulée sur 1 024 températures de $\log_{10} T = 0,5$ à $9,5$ et échantillonnée dans le shader avec interpolation (sans paliers de couleur). La radiance d'une étoile de luminosité visuelle L_V à une distance d est L_V/d^2 en unités de $L_\odot/(4\pi \text{ al}^2)$, la température du HYG étant estimée par l'indice de couleur B-V (Ballesteros 2012 [7] ; B-V = 0,65 lorsqu'il manque) et celle de l'addendum Gaia par classe spectrale.

Le catalogue compte 299 858 étoiles : les 109 400 du HYG v4.1 [8], avec positions, vitesses et époque J2000, et 190 458 sélectionnées dans la distribution Gaia EDR3/Hipparcos/Tycho préparée pour Celestia [9] ($V < 9$ le long de la route, $V < 9$ depuis la Terre ou $V < 13$ à moins de 15° de la destination), dédoublées par HIP/HD. Les positions sont tridimensionnelles, de sorte que la parallaxe le long de la route est géométrique, et non mise en scène. Pour le HYG, la position affichée est la position retardée : on résout, par itération de point fixe, l'instant d'émission t_e tel que la lumière émise en $p + v \cdot (t_e - \text{époque})$ atteigne l'observateur dans l'année courante, en ancrant la solution à la position observée à l'époque du catalogue. Il n'y a ni scintillation, ni lumière zodiacale, ni lentilles gravitationnelles.

4.4 Extinction interstellaire

La poussière est un disque axisymétrique explicite, avec une profondeur optique intégrée entre l'observateur et la source,

$$\tau = K \int_0^d e^{-|z|/H} ds, \quad K = 5,1 \times 10^{-4} \text{ al}^{-1}, \quad H = 330 \text{ al}, \quad (12)$$

avec le Soleil à 65 al du plan ; K équivaut à 0,55 magnitude par millier d'années-lumière dans le plan. L'intégrale a une forme close le long d'un segment rectiligne (annexe A). L'extinction est appliquée de manière *différentielle* : la magnitude de catalogue inclut déjà l'extinction jusqu'à la Terre, on soustrait donc la profondeur optique Terre-étoile et on ajoute celle vaisseau-étoile, pour qu'une étoile conserve sa luminosité mesurée tant que le vaisseau est près de la Terre. La dépendance spectrale utilise des facteurs $\exp(-\{-0,18; 0; 0,30\} \cdot \tau)$ dans les canaux R, G et B. L'éclat diffus de la Voie lactée est un modèle de disque de densité $0,055 \cdot e^{-R/8500} \cdot e^{-|z|/700}$ (années-lumière), de spectre à 5 000 K, avec le centre galactique à 26 670 al, intégré en 28 pas logarithmiques jusqu'à 72 000 al, avec la même poussière ; les Nuages de Magellan, M31 et M33 sont des nuages de particules de forme approchée. Les requêtes à la carte tridimensionnelle Bayestar n'ont pas abouti pendant la préparation, de sorte qu'aucun nuage réel de poussière n'est représenté (section 11).

4.5 Exposition fixe, PSF et conversion pour l'écran

Le moteur de rendu est HDR : le flux de chaque étoile est accumulé dans un *buffer* en demi-précision, en unités physiques, avec un gain fixe E choisi une fois pour toutes ($E_{\text{sombre}} = 5\,400$ dans la calibration de référence de 1 200 px/rad, mis à l'échelle avec $(\text{px/rad})^2$ pour que la luminosité soit indépendante de la résolution). Une étoile non résolue est dessinée comme une gaussienne compacte, $\sigma = \max(0,55 \text{ px}; 1,2 \times 10^{-4} \text{ rad} \cdot \text{px/rad})$, sans disque lumineux artificiel ; un disque physique n'apparaît que lorsque le rayon angulaire aberré dépasse 1,2 px. La conversion pour l'écran est une compression SDR fixe, et non un œil simulé ni une exposition automatique :

$$m = \text{mix}\left(\frac{c(1 - e^{-L})}{L}, 1 - e^{-c}, s(L)\right), \quad m' = 1,03 \frac{m^2}{m + 0,03}, \quad \text{sortie} = m'^{1/2,2}, \quad (13)$$

où c est la couleur linéaire, L sa luminance et $s(L)$ une transition douce entre 1,5 et 12 qui passe de la préservation de la teinte à une saturation par canal. Avec cette calibration, au repos, toute étoile jusqu'à la magnitude 7 apparaît et la limite de rendu se situe vers la magnitude 8 — le critère est un pixel au-dessus d'un seuil fixe de luminosité à l'écran, vérifié par une réplique CPU du shader sur le catalogue (section 10). En prenant la magnitude 8,0 comme référence approximative et 6,5 comme référence d'observation à l'œil nu sous un ciel sombre, la différence correspond à des sources ayant environ quatre fois moins de flux ($10^{0,4 \cdot 1,5} \approx 4$). Cette comparaison caractérise l'exposition choisie ; elle ne constitue pas une calibration de la vision humaine. Les dénombrements — environ 56 000 étoiles rendues sur le ciel entier, contre $\sim 9\,000$ visibles à l'œil nu — se rapportent au ciel entier et ne mesurent pas la sensibilité. La caméra arrière utilise le même gain.

4.6 Terre, atmosphère et base de lancement

La Terre est dessinée comme une sphère texturée avec le composite Blue Marble: Next Generation de janvier 2004 ($2\,048 \times 1\,024$) [20] et la couverture nuageuse Blue Marble Clouds, celle-ci avec un détail procédural continu en deux couches sphériques (1,5–3,8 km et 8,5–9,3 km d'altitude) pour que l'approche de la caméra ne révèle pas de pixels. La surface reçoit la lumière solaire avec le terminateur de l'instant du départ et un halo atmosphérique à diffusion simple ; le ciel diurne vu depuis la base s'assombrit entre 50 et 100 km d'altitude, par choix visuel, en conservant le limbe éclairé. La base est un décor : latitude égale à la déclinaison de M16 ($-13,88^\circ$, imposée par l'axe de la route), longitude visuelle fixée à $-39,02^\circ$, caméra à 35 m, tour de 112 m, littoral et fleuve procéduraux ; les détails de la base disparaissent à 12 km et l'ensemble à 90 km. L'orientation de la Terre affichée ne tourne pas (section 11). Lorsque la Terre se réduit à moins de 1,2 px de rayon apparent, elle devient un point, un corps noir de 5 772 K d'une luminosité de $1,36 \times 10^{-10} L_\odot$ et d'une teinte bleutée, et l'étoile qui se trouve derrière le disque est occultée par la Terre de la scène.

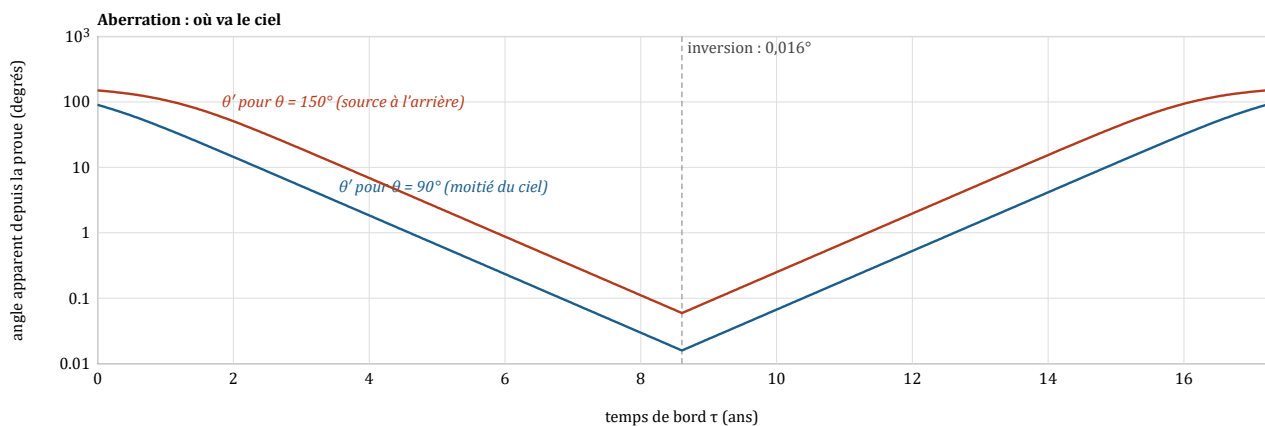


Figure 2. Angle apparent, mesuré depuis la proue, d'une source qui, dans le référentiel de la Galaxie, se trouve à 90° (limite de la moitié du ciel) et d'une source à 150° , presque derrière le vaisseau, d'après l'équation (10) : $\tan(\theta'/2) = e^{-\eta} \tan(\theta/2)$. Après 1 an de bord, la moitié du ciel tient déjà dans 39° ; après 3 ans, dans 7° ; à l'inversion, dans $0,016^\circ$ — et la source arrière apparaît à $0,06^\circ$ de la proue.

5. Fond diffus cosmologique

Le CMB est un corps noir à $T_0 = 2,7255$ K [10] dans le référentiel où il est isotrope. Pour un observateur en mouvement, chaque direction continue de présenter un spectre de corps noir, de température

$$T(\theta) = \frac{T_0}{\gamma(1 - \beta \cos \theta)}, \quad (14)$$

θ étant mesuré à partir de la direction du mouvement [11]. Le vaisseau part du Système solaire, qui se déplace déjà à 369,82 km/s en direction de $(l, b) = (264,021^\circ, 48,253^\circ)$ par rapport au CMB [10] ; le boost du vaisseau est composé avec ce dipôle : l'axe et la rapidité effective du référentiel du CMB vu depuis le vaisseau sont obtenus en composant les deux vitesses, en prenant soin de calculer $\gamma - |\gamma\beta|$ comme $e^{-\eta}$ pour éviter l'annulation. La température dans une direction d est alors $T_0/(e^{-\eta_{\text{eff}}} + \frac{1}{2}|\gamma\beta|_{\text{eff}}|d - \text{axe}|^2)$, où $|d - \text{axe}|^2 = 2(1 - \cos \theta)$ est stable à l'apex. À la proue, à l'inversion, $T = 19\,652$ K.

La radiance de chaque direction est la loi de Planck intégrée dans le visible avec les fonctions CIE, tabulée sur 2 048 températures de 300 à 50 000 K en échelle logarithmique. La tache optique est intégrée sur l'aire de chaque pixel par une quadrature de Gauss à 4 points et une subdivision adaptative (jusqu'à six niveaux) du noyau, dont la largeur angulaire $\sim 2e^{-\eta}$ rad est comparée au pixel indépendamment de la résolution ; ainsi, un apex plus petit qu'un pixel conserve son énergie lorsqu'il franchit la frontière entre pixels ou que la résolution change. En dessous de 300 K au pic, la queue visible est inférieure à $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ et la tache n'est pas calculée. Le résultat est additionné en virgule flottante 32 bits avant la compression (13) et n'est *pas* atténué par la poussière des Piliers, qui est transparente aux micro-ondes dans le référentiel de la poussière.

L'irradiance sur une plaque tournée vers la proue, $\int \sigma T(\theta)^4 / \pi \cdot \cos \theta \, d\Omega$ sur l'hémisphère frontal, est tabulée en η avec des pas logarithmiques en θ (le cône chaud a une largeur $\sim 1/\gamma$) : elle vaut $\sigma T_0^4 = 3,1 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ au repos et tend vers $(16/3)\gamma^2 \sigma T_0^4$, la composante T^{0x} du rayonnement transformé ; à l'inversion, elle vaut 217 W/m^2 , et les deux limites sont vérifiées par un test. Le tableau 2 donne les jalons de température ; la même irradiance, convertie par la fraction visible du corps noir, éclaire la cabine (5,4 % de la lumière solaire visible à l'inversion).

Tableau 2. Température du fond cosmique à la proue au cours du voyage.

Température à la proue	Premier passage (ans de bord)	Temps total au-dessus de la valeur (ans)
300 K (début du calcul optique)	4,55	8,11
1 000 K	5,72	5,77
2 000 K	6,39	4,43
5 000 K	7,28	2,65
10 000 K	7,95	1,31
19 652 K (pic, inversion)	8,61	—

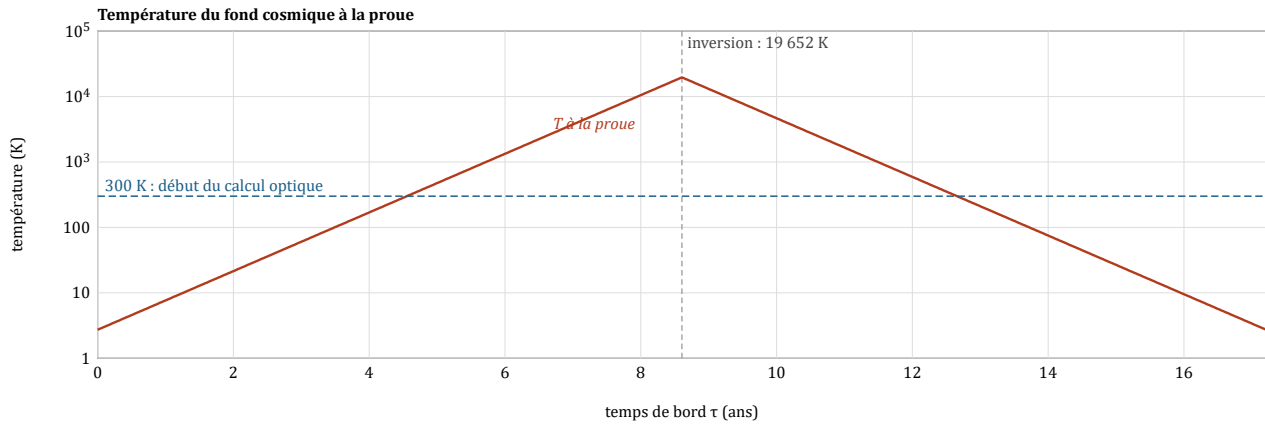


Figure 3. Température de corps noir du fond cosmique dans la direction de la proue, $T = T_0 e^{\eta}$ (corrigée du dipôle solaire), d'après l'équation (14) : elle augmente d'un facteur e tous les 0,97 an de bord, dépasse 300 K à 4,55 ans — lorsque la tache optique commence à être calculée — et atteint 19 652 K à l'inversion, puis redescend symétriquement pendant le freinage.

6. Nébuleuse de l'Aigle : données et reconstruction

6.1 Données

La géométrie dans le plan du ciel provient de deux photographies publiques [12, 13] : ESO0926a (grand champ de 32', filtres B, V et R, CC BY 4.0) fournit la structure du grand champ ; Hubble heic1501a (les Piliers, CC BY 4.0), recalée par corrélation sur la première (rotation de 35°), intervient pour les structures plus petites que 0,08 al. Les directions des étoiles de NGC 6611 proviennent de SIMBAD et ont été vérifiées, en secondes d'arc, par rapport au WCS de l'image ESO ; les températures (32 000–41 500 K) et les luminosités de huit systèmes proviennent du tableau 5 de Sana et al. [14], les binaires non résolues étant traitées comme une seule source. Les rapports de quinze raies optiques relatifs à $H\beta$ ($H\alpha/H\beta = 4,343$) proviennent du spectre d'exemple de McLeod et al. [15], obtenu avec MUSE, et l'émissivité $H\alpha$ utilise le coefficient de recombinaison $3,56 \times 10^{-25} \text{ erg cm}^3 \text{ s}^{-1}$, vérifié par la relation entre mesure d'émission et brillance en rayleighs. La profondeur provient d'un maillage de référence pour l'impression 3D (NASA/STScI), mis à l'échelle par 1,725 pour coïncider avec la silhouette recalée : hauteur des Piliers 8,625 al, boîte de $6,39 \times 10,53 \times 9,81$ al, grille de $142 \times 234 \times 218$ cellules. Toutes les dimensions transversales sont des angles mesurés multipliés par la distance adoptée, 7 000 al jusqu'au centre de M16 et 6 992 al jusqu'au plan des Piliers ; la profondeur est supposée (section 6.2).

6.2 Modèle de transfert

Le rehaussement de vulgarisation des photographies est défait par une loi de puissance d'exposant 2,4 (hypothèse) et l'image résultante est décomposée en une enveloppe d'émission (maximum doux à 0,7 al) et une profondeur optique photographique allant jusqu'à $\tau_f = 4,5$, convertie en la profondeur optique adoptée par le modèle par $\tau_v = \min[8, \tau_f(1 + 2,6 \tau_f)]$ — une règle déclarée, et non une mesure indépendante. Les couches sont des nappes dotées d'une épaisseur : l'émission de recombinaison dans une nappe centrée 15 al derrière le plan des Piliers ($\sigma = 3$ al, plancher de 2 %), les bandes et le nuage parent à 8,5 al ($\sigma = 2$ al), les étoiles de l'amas dans un plan commun 3,2 al derrière le plan des Piliers. La lumière vue sur un absorbant est traitée comme un voile émis dans une couche de 0,1 à 1,4 al devant celui-ci, avec le spectre du fond. La diffusion de la lumière stellaire utilise un albédo de 0,5 et une fonction de phase de Henyey–Greenstein avec $g = 0,6$; l'opacité $\kappa = 6 \text{ al}^{-1}$; le continuum diffusé est un corps noir de 37 755 K. La brillance absolue est fixée par une unique mesure d'émission, $10^5 \text{ cm}^{-6} \cdot \text{al}$ ($\approx 100 \text{ e}^-/\text{cm}^3$ sur 10 al), une valeur plausible, plutôt élevée.

Le transfert est une marche de rayons dans le référentiel de repos de la nébuleuse, avec 224 échantillons (24 devant, 160 dans l'intervalle fin des bandes et des Piliers, 40 derrière) : émission de raies, continuum diffusé et absorption grise sont intégrés dans l'ordre le long du rayon ; la radiance est transformée par Doppler et aberration à la fin (les raies décalées par λ/D sortent du visible à l'approche — H α , à 656 nm, se trouve à 234 nm à 77 % de c) ; la passe conserve, outre la radiance prémultipliée, la profondeur de sortie (codée comme $\log_2(1 + d)/34$, la même que celle de la passe des étoiles) et la profondeur optique cumulée en quatre points, de sorte que les étoiles situées derrière la matière soient atténuées par ce qui se trouve réellement devant elles. Le niveau de détail des textures est choisi selon l'angle de repos par pixel apparent, qui croît avec le facteur Doppler : la nébuleuse ne gagne jamais plus de détail angulaire que n'en possède le plan photographique, et ne crénèle pas non plus lorsqu'elle est lointaine. La distribution volumique adoptée n'est pas déterminée de manière unique par les observations : la spectroscopie fournit des contraintes sur les vitesses, la densité électronique, l'extinction et la géométrie relative des Piliers [15], mais n'établit pas le champ tridimensionnel complet de densité et d'émissivité utilisé ici ; les positions et épaisseurs des couches, le plan commun des étoiles et la profondeur attribuée au maillage sont des hypothèses documentées du modèle. La section 11 résume ce qui, dans ce modèle, relève de l'hypothèse.

7. Propulsion, énergie et flux sur le bouclier

7.1 Fusée à photons

On adopte une fusée à photons parfaite : toute la masse de combustible est convertie en rayonnement collimaté dans le sens opposé à la poussée. Pour ce propulseur, l'équation de la fusée relativiste donne $m(\tau) = m_{\text{fim}} e^{b_{\text{fim}} - b(\tau)}$, où b est la rapidité accumulée par la poussée, (3) : $b = b_1 + \eta - \eta_1$ pendant l'accélération et $b = b_F + \eta_F - \eta$ pendant le freinage, avec $b_F = b_1 + \eta_F - \eta_1$ et $b_1 = 2,83 \times 10^{-3}$ la combustion de la montée. Avec une masse sèche $m_{\text{fim}} = 100 \text{ t}$:

$$m_0 = m_{\text{fim}} e^{b_{\text{fim}}} = 5,20 \times 10^9 \text{ t}, \quad E_{\text{comb}} = m_{\text{fim}} (e^{b_{\text{fim}}} - 1) c^2 = 4,68 \times 10^{29} \text{ J}, \quad (15)$$

ce que le Soleil émet en 1 221 s. La puissance du faisceau, dans le référentiel instantané du vaisseau, est $P = m \cdot a_{\text{emp}} \cdot c$. Au début du décollage, avec une poussée de 1,1 g, elle vaut approximativement $1,68 \times 10^{22} \text{ W}$; à titre de comparaison, la référence $P_{\text{ref}} = m g_0 c$ adoptée dans le modèle vaut $1,53 \times 10^{22} \text{ W}$ avec la masse initiale. Pendant le freinage à 1 g, la puissance passe de $2,1 \times 10^{18} \text{ W}$ à l'inversion à $2,9 \times 10^{14} \text{ W}$ juste avant l'arrêt, lorsque le moteur est coupé ; pendant le freinage, le faisceau pointe vers l'avant par rapport au mouvement. La fraction de combustible utilisée est $(1 - e^{-b}) / (1 - e^{-b_{\text{fim}}})$ et la réserve s'annule exactement à l'arrêt ; le panneau des systèmes affiche la réserve, et le formatage utilisé par la radio de bord la calcule directement, $e^{-b}(1 - e^{b - b_{\text{fim}}}) / (1 - e^{-b_{\text{fim}}})$, pour ne pas perdre les derniers chiffres par annulation, en composant les deux pourcentages en arithmétique décimale entière (la somme fait exactement 100 % sans arrondir la réserve à zéro avant la fin). Un faisceau collimaté n'est pas visible latéralement dans le vide sans un mécanisme de diffusion ; dans le milieu interstellaire, son apparence dépendrait du spectre du faisceau ainsi que des propriétés et de la distribution du gaz et de la poussière. Cette diffusion n'est pas calculée par le simulateur ; c'est pourquoi sa contribution visuelle a été omise — il n'y a ni panaches ni éclairs — et le freinage est indiqué par les instruments.

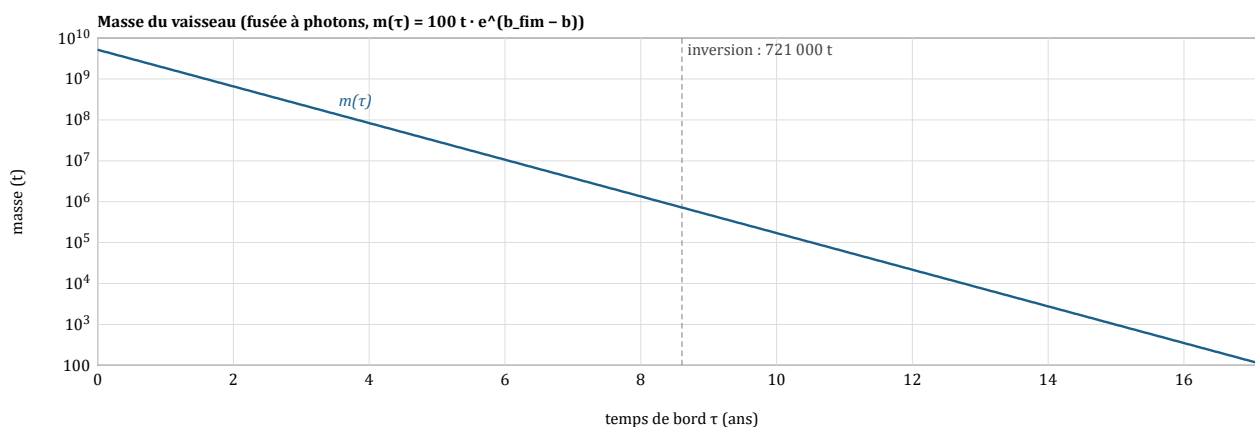


Figure 4. Masse totale du vaisseau au cours du voyage pour la fusée à photons idéale avec 100 t de masse sèche : $5,20 \times 10^9$ t au départ, $7,21 \times 10^5$ t à l'inversion et 100 t à l'arrêt ; en échelle logarithmique, la courbe est une droite sur chaque tronçon, car la combustion b est la rapidité accumulée elle-même.

7.2 Milieu interstellaire et bouclier

Le gaz interstellaire arrive sur la proue comme un faisceau de protons d'énergie cinétique $(\gamma - 1)m_p c^2$, avec une densité γn dans le référentiel du vaisseau. Le flux d'énergie sur une surface normale au mouvement est

$$W = n c m_p c^2 \beta \gamma (\gamma - 1) = n c m_p c^2 \sinh \eta \cdot 2 \sinh^2 \frac{\eta}{2}, \quad (16)$$

écrit sous la seconde forme pour éviter $\gamma - 1$ à basse vitesse. Avec $n = 0,1 \text{ cm}^{-3}$, la densité de la Bulle locale adoptée pour tout le voyage, $W = 5,9 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$ à l'inversion (3,4 TeV par proton), environ 930 fois l'existance de la surface du Soleil ; la température d'équilibre radiatif d'une face, $(W/\sigma)^{1/4}$, est de $\sim 32\,000 \text{ K}$. Le bloc BOUCLIER du panneau des systèmes affiche ces grandeurs et suppose un bouclier capable de les supporter. Semyonov [16, 17] montre que le gaz reçu est la source de rayonnement dominante d'un vol relativiste, au-dessus des rayons cosmiques, et qu'il impose un blindage réel ; la simulation ne modélise ni la dose, ni l'érosion par la poussière, ni le rayonnement secondaire (section 11).

8. Rencontres scénographiques

8.1 Positions et vitesses

Sur une droite de la Terre à M16, le vaisseau ne passerait près d'aucun corps du Système solaire. Pour que le voyage ait quelque chose à montrer pendant les premiers jours, la Lune, Mars, Cérès, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune et Pluton sont placés au point où le vaisseau croise le rayon orbital moyen de chacun, alternativement de part et d'autre de la route, à 1,5 rayon du centre (Saturne à 1,55 R et 0,18 R au-dessus du plan des anneaux ; Uranus à 1,5 R, par l'ouverture entre la première et la deuxième bande, avec plus de 300 km de marge) ; les lunes de Jupiter ont leurs rayons réels (1 821, 1 560 et 2 634 km) à des positions fixes, Charon (606 km) se trouve à (9 000 ; 5 000 ; 12 000) km de Pluton — 15 800 km, environ 20 % de moins que la séparation réelle de $\sim 19\,600 \text{ km}$ — et la ceinture d'astéroïdes est représentée par vingt rochers de 20–92 km. L'instant de chaque passage est le jalon physique du rayon orbital (annexe B), et la vitesse est celle de la trajectoire : le déplacement par image est $\gamma \beta c \cdot \Delta \tau$ — la Lune traverse son diamètre en 41 s à 307 000 km/h ; Pluton passe à 38,7 millions de km/h, en 0,22 s. Il n'y a ni ralenti, ni assistance gravitationnelle, ni perturbation de la route.

8.2 Représentation

Les corps sont des sphères texturées (Solar System Scope, CC BY 4.0, avec des remplissages des régions non observées ; Pluton de New Horizons avec des lacunes ; Cérès fictif) éclairées depuis une direction fixe, $\text{normalize}(-0,48; 0,65; -0,90)$, et non par le Soleil — la phase affichée n'est pas la phase réelle. L'aberration est appliquée à la position et à la taille angulaire de chaque corps, mais il n'y a ni décalage Doppler de couleur ni gain D^4 sur les textures : lors des passages planétaires, $\beta \leq 0,036$, ce qui omet jusqu'à 3,7 % de décalage spectral et jusqu'à 15,5 % de gain de radiance (D^4) pour un corps situé à l'avant ; dans le nuage d'Oort, $\beta = 0,25$ et le facteur $D \approx 1,3$ triplerait déjà presque la radiance. Les anneaux de Saturne sont un matériau synthétique avec les bandes C (1,275–1,58 R_S), B (1,58–2,018), division de Cassini (2,018–2,10), A (2,10–2,349) et Encke (2,291–2,297), avec $R_S = 58\,232$ km dans la scène : en kilomètres, les bords se situent à 74 246 (C intérieur ; NASA 74 658), 92 007 (C/B ; 91 975), 117 512 (B extérieur ; 117 507), 122 287 (A intérieur ; 122 340) et 136 787 km (A extérieur ; 136 780) — des écarts allant jusqu'à 0,55 % ; ce qui est synthétique, c'est la texture. Les anneaux d'Uranus sont sept bandes scénographiques centrées de 1,62 à 2,07 R_U par pas de 0,075 R_U , d'une largeur de 400 à 1 500 km, élargies pour la visibilité : les anneaux réels ont de 1 à 10 km de large (l'anneau ϵ , de 20 à 100 km). Ils ont transparence et ombre, sans émission propre.

8.3 Nuage d'Oort et Bulle locale

À partir de 2 000 UA du Soleil (jour 90,2 de bord, $\beta = 0,25$), un intervalle de 24 heures de bord présente neuf groupes de trois corps glacés de 35 à 125 km, à texture lunaire, passant à 4 500 km au plus du vaisseau entre 00 h 00 et 23 h 52 de bord ; la fin de ce jour clôt seulement la séquence — le modèle situe la sortie du nuage à 100 000 UA, au jour 574. Le nuage réel est déduit, non observé ; les corps de plus de 1 km sont distants de dizaines d'UA les uns des autres, et la probabilité de passer à 10 000 kilomètres de l'un d'eux en 24 heures est essentiellement nulle. La « paroi » de filaments de la Bulle locale est une transition gaussienne ($\sigma = 0,003$ al) à 300 al, dessinée en coordonnées d'écran par un bruit fractal sans Doppler ni aberration ; la bulle réelle est un gaz chaud, invisible dans l'optique et sans bord net, et à 300 al le vaisseau est déjà à $\gamma \approx 310$. Les jalons héliosphériques (choc terminal à 90 UA, héliopause à 120 UA, Voyager 1 à 165 UA plus 3,57 UA/an depuis 2025, ceinture de Kuiper à 40 UA) sont des valeurs arrondies, mesurées comme distance au Soleil.

9. Instruments, journal et radio de bord

9.1 Panneaux

Tous les panneaux sont des fonctions pures de l'état (section 2.3), formatées dans des modules sans accès au document et testées sous Node. Le panneau de vitesse affiche la vitesse en km/h, la fraction de c avec au moins deux chiffres significatifs de l'écart à 100 % (99,9999962 % à l'inversion), la vitesse propre $\gamma\beta c$ en unités dynamiques (km, milliers de km, millions de km, UA par seconde de bord) et le *ruban de rapidité* : comme η croît au même rythme chaque jour de bord, le vaisseau avance sur le ruban à pas constant, et les graduations de 50 %, 90 %, 99 %, ... 99,99999 % de c , en $\eta = \frac{1}{2} \ln((2 - \epsilon)/\epsilon)$, sont presque équidistantes. Le panneau du temps affiche l'avance de la Terre, $t_{\oplus} - \tau$, sur une pleine échelle 1-2-5 avec une unité dynamique à partir des picosecondes (en dessous, la différence reste sous la résolution de l'intégration pendant les premières secondes) et le facteur γ en échelle logarithmique ; la masse, également en échelle logarithmique, se trouve dans le panneau « Masse et combustible », à côté de la réserve. La carte de navigation suit un cycle de 64 s : 10 s en vue générale, 2 s de rapprochement, 50 s en vue locale et 2 s de retour, le vaisseau continuant à se déplacer sur la règle pendant les transitions. La vue générale représente la position par $X = \frac{1}{2} \ln(1 + k u) / \ln(1 + k)$ avant l'inversion, avec $u = (r - R_{\oplus}) / (r_F - R_{\oplus})$ et $k = 10^{12}$, et par

$X = 1 - \frac{1}{2} \ln(1 + kw) / \ln(1 + k)$ après, avec $w = (D - r) / (D - r_F)$ évalué par (8) : la règle passe de la distance parcourue à la distance restante à l'inversion, et les premiers kilomètres comme les dernières années-lumière restent visibles ; la Terre et Pluton sont des références fixes du Système solaire, la prochaine rencontre étant mise en évidence. La vue locale affiche deux jalons — le précédent et le suivant, avec des distances arrondies dans l'unité affichée et priorité aux rencontres — et, lorsque le jalon est loin, une référence absolue arrondie avec des incréments locaux, pour que le mouvement reste perceptible ; les lectures inférieures diffèrent entre les deux vues, et la distance à bord jusqu'à l'arrêt est la distance restante divisée par γ . Le panneau de rayonnement trace λB_λ normalisé à son propre pic pour le Soleil vu par l'arrière et le CMB vu par la proue, et compare, sur une barre d'énergie, l'irradiance solaire $L_\odot / (4\pi d^2) \cdot D^2$ à l'irradiance du CMB à la proue (section 5) : le fond cosmique dépasse le Soleil avant la première année de bord ; à l'inversion, c'est 217 W/m^2 contre $5,4 \times 10^{-22} \text{ W/m}^2$ pour le Soleil vu par l'arrière — un facteur $\approx 4 \times 10^{23}$ — et, à l'arrivée, vaisseau arrêté, $\approx 5 \times 10^8$. La caméra arrière compose la Terre ou le Soleil avec la date d'émission, l'âge de la lumière et le facteur de ralenti (9) ; le hublot avant et la caméra arrière sont mis à jour à 10 et 5 Hz en croisière.

9.2 Lumière de la cabine

La cabine est une image unique avec trois couches de lumière calculées : un cycle circadien (jour de 07 h à 19 h, nuit de 22 h à 05 h à 55 % avec une teinte chaude, rampes entre les deux) en multiplication ; la lumière qui entre par le hublot, en addition — la somme de la lumière diurne de la Terre pendant la montée ($0,15 \cdot e^{-h/8500 \text{ m}}$) et de l'irradiance du CMB convertie par la fraction visible du corps noir à la température de la proue et normalisée par 550 W/m^2 , ce qui donne 0,32 % de la lumière solaire visible à 7 ans et 5,37 % à l'inversion (une approximation d'éclairage : la température du CMB varie avec la direction et le coefficient utilise celle de la proue) ; et un reflet de la vitre, dont l'opacité $0,09 \cdot \text{niveau} / (1 + \text{lumière extérieure} / 0,005)$ cède lorsqu'il y a de la lumière extérieure. La plaque du constructeur et les ombres de la cabine suivent ces couches ; il n'y a pas de photométrie calibrée.

9.3 Journal et radio

Le journal de bord est généré par des modules de jalons qui reçoivent la fonction d'état et un solveur par bisection : chaque jalon (échappement, orbites, 1 jour-lumière, héliopause, Oort, températures du CMB, demi-angle d'aberration, « +100 ans sur Terre », étoiles de référence comme Proxima, Sirius, Véga et Bételgeuse, seuils de vitesse, inversion, arrivée) est un instant τ calculé, non écrit à la main, et 108 faits de contexte accompagnent les jalons, avec leur source annotée dans le code. La radio de bord est un bandeau d'actualités de 2 415 répliques préécrites (241 originales et 2 174 issues d'une extension), à trois voix — Borealis et deux employés fictifs, Madame Chantal, de la Direction de la Conformité et de l'Intégrité du Patrimoine, et Monsieur Gérard, du Support opérationnel et imprévus. Les commentaires du catalogue suivent une contrainte éditoriale d'écriture des nombres en chiffres, avec des exceptions pour « 1 g » et « 24 h/24 heures » ; l'analyseur préserve aussi la devise approuvée du vaisseau. Les nombres en toutes lettres sont permis dans l'humour administratif, mais pas pour introduire des données physiques. Les valeurs des bulletins proviennent de la simulation ; la relecture éditoriale et les tests vérifient que les commentaires n'inventent ni lectures ni pannes et ne contredisent pas les jalons. La distribution est déterministe : chaque réplique a une phase de vol et un sujet, elle est sélectionnée par le jalon précédent ou suivant et par des fenêtres de proximité, ne se répète pas avant 15 min (historique des 24 dernières), et les réponses des personnages expirent au bout de 5 min ou lorsque la phase change ; les messages devenus obsolètes sont écartés. Il n'y a pas de génération de texte par IA en temps réel.

10. Implémentation et robustesse numérique

10.1 Architecture

L'application est statique : HTML, CSS, JavaScript (modules ES) et WebGL2, sans bibliothèques d'exécution. La fonction d'état (section 2) est pure et déterministe ; la boucle d'images lit l'horloge, calcule l'état et met à jour les panneaux, le ciel, la caméra arrière et la radio. Le ciel utilise une passe HDR de points (étoiles, avec PSF gaussienne et disque physique lorsqu'il est résolu), une passe de fond (Voie lactée diffuse, Terre, atmosphère), une passe volumique pour la nébuleuse (demi-résolution jusqu'à ce que les Piliers occupent plus de 40 px) et une passe finale de composition qui ajoute le CMB en 32 bits et applique (13). Les fréquences d'images sont choisies par phase : 60 Hz lors des passages rapprochés, 30 Hz pendant les deux premiers jours, 10 Hz en croisière (5 Hz pour la caméra arrière), car en croisière rien ne change à l'échelle d'une image.

10.2 Formulations stables

Plusieurs grandeurs du voyage présentent des rapports d'ordre 10^7 – 10^{19} entre le départ et l'inversion, et la double précision ($2^{-52} \approx 2,2 \times 10^{-16}$) ne suffit pas pour les formes naïves. Les choix :

- **Rapidité comme variable d'état.** η est linéaire en τ (5) ; β , γ et $\varepsilon = 1 - \beta$ en sont dérivés : $\varepsilon = 2/(e^{2\eta} + 1)$ évite l'annulation de $1 - \tanh \eta$ (qui sature à 10^{-16}) et représente des valeurs bien plus petites, dans les limites de la virgule flottante. À l'inversion, $\varepsilon = 3,84 \times 10^{-8}$: la vitesse est à 41,5 km/h de c et ce nombre est affiché avec deux chiffres significatifs.
- **Distance restante.** $D - r$ perdrait les derniers kilomètres de $6,6 \times 10^{19}$ m (à cette magnitude, l'espacement entre doubles est de 8 192 m) ; le freinage utilise (8), qui tend continûment vers zéro, et la carte de la route convertit en kilomètres à partir de celle-ci.
- **Différences de fonctions hyperboliques.** (6) utilise les identités de transformation de produit en somme au lieu de $\cosh \eta - \cosh \eta_1$, qui perdrait des chiffres au début de la phase 2.
- **Doppler et aberration.** (10) et (11) ne forment jamais $1 - \beta \cos \theta$; l'angle est propagé sous la forme $\tan(\theta/2)$, avec les branches $\sin \theta/(1 + \cos \theta)$ et $(1 - \cos \theta)/\sin \theta$; la limite $\tan(\theta'/2) > 10^{15}$ est traitée comme $\theta' = \pi$. La composition avec le dipôle solaire calcule $\gamma - |\gamma\beta|$ comme $e^{-\eta}$.
- **Combustible.** Fractions via $\exp m1/\exp$ et réserve calculée directement ; dans le formatage de la radio, pourcentages en entiers décimaux (BigInt) pour que 99,9... % et 0,0...1 % fassent 100 % sans arrondir la réserve à zéro.
- **Fond cosmique.** Radiance en table logarithmique ; température par $|d - \text{axe}|^2$, stable à l'apex ; intégration par pixel avec conservation du flux, critère de subdivision en unités angulaires ; somme en 32 bits hors du *buffer* en demi-précision des étoiles, qui est limité à 60 000 pour ne pas déborder.
- **Profondeur.** Codage logarithmique $\log_2(1 + d)/34$, avec d en années-lumière, partagé entre étoiles et nébuleuse : une plage de nombreux ordres de grandeur dans le même *buffer* — plage représentable, et non résolution ; en float32, le terme $1 + d$ perd les incréments inférieurs à $\sim 10^{-7}$ al.
- **Horloge.** Alignement sur le serveur par HEAD (une estimation, section 3.1) ; T_0 et les temps sont des entiers de millisecondes ; $\tau = t - T_0$ est exact en double précision pendant $\sim 10^5$ ans.

10.3 Vérification

Le dépôt comprend 128 tests automatisés répartis en 19 fichiers (Node.js), exécutés à chaque modification, et deux pages de vérification dans le navigateur (806 vérifications de la carte de la route et 2 804 des textes de la radio). Parmi les tests physiques : l'irradiance du CMB face à ses deux limites analytiques ; l'émissivité $H\alpha$ face à la relation mesure d'émission-Rayleigh ; l'arrêt avec $v = 0$ et combustion totale en τ_{fim} ; la vitesse

lors des passages (déplacement = $\gamma\beta c \cdot \Delta\tau$) ; la stabilité du CMB après une heure simulée et l'indépendance vis-à-vis de l'historique ; l'absence de pic artificiel à l'arrière ; l'image de la Terre dans la caméra arrière ; et une réplique CPU du shader de points sur les 109 400 étoiles du HYG, qui fixe la limite de magnitude au repos (regroupées par partie entière de la magnitude : toute étoile jusqu'à la mag 7 visible ; 30–60 % de celles de mag 8 ; aucune de mag 9 ; 50 000–62 000 visibles sur le ciel entier), la couleur blanche de Sirius, l'augmentation du nombre d'étoiles à l'avant après 1 an de bord, la prédominance des étoiles froides décalées à 3 ans et l'anneau de 1° avec 300–2 000 étoiles à l'inversion. Le nettoyage de la version 1.0 a été vérifié par comparaison pixel à pixel d'un état figé (0,03 % de pixels différents, uniquement des chiffres qui changent avec l'horloge). Les nombres de cette section se rapportent à la version 1.1.0 du site, du 19/10/2026 : les tests s'exécutent avec `node --test check-*.mjs` dans le dossier `hybrid/`, et les pages de vérification s'ouvrent dans le navigateur (`check-route.html`, `check-radio.html`) ; les sources des données et du maillage, avec les hachages des fichiers, figurent sur la page « Sources et crédits ». Ces tests vérifient la cohérence interne avec le modèle ; ce ne sont pas des validations observationnelles — les réussir ne calibre pas les photographies et ne démontre pas qu'un œil humain verrait cette luminosité.

10.4 Publication et temps réel

Le site est publié sous forme de fichiers statiques ; la publication estampille la version, un identifiant de génération et l'instant $T_0 = 1792422000000$ ms (époque Unix), scellé : toute publication ultérieure répète le même T_0 , et les raccourcis temporels utilisés pendant le développement sont ignorés dans la copie publiée. L'instant est unique pour tous les visiteurs ; l'état affiché est la fonction d'état évaluée sur l'horloge réelle.

11. Limitations et problèmes connus

Les simplifications sont listées pour le public sur la page « Licence poétique » ; elles sont ici organisées par type, avec ce que l'on sait de leur ampleur.

11.1 Impossibilités assumées

- **Propulsion.** La fusée à photons parfaite n'existe pas. Le rapport de masses de $5,2 \times 10^7$ pour 100 t de masse sèche totale, et la puissance de $1,68 \times 10^{22}$ W au départ, sont hors de portée de toute ingénierie connue. Dans un modèle simplifié où une fraction constante $1 - f$ de l'énergie de masse perdue est émise en photons collimatés, le reste s'échappant de manière isotrope dans le référentiel instantané du vaisseau, le rapport de masses est $e^{b_{\text{fim}}/(1-f)}$: à titre d'exemple hypothétique, une efficacité de 50 % porte le rapport de $5,2 \times 10^7$ à $2,7 \times 10^{15}$ — ce pourcentage ne représente pas une efficacité universelle des moteurs à antimatière. La masse des réservoirs, des radiateurs et de la réserve est nulle.
- **Bouclier et équipage.** Flux de $5,9 \times 10^{10}$ W/m² ($n = 0,1$ cm⁻³) sans effet sur le vaisseau ; dose, érosion par les grains, rayonnement secondaire et ionisation non modélisés ; inversion instantanée ; 1 g ininterrompu après la montée, pendant l'accélération et le freinage (zéro à l'arrêt) ; pas de support vie.
- **Lancement.** Montée verticale sans atmosphère, traînée, rotation (465 m/s) ni orbite de la Terre (29,8 km/s), sans orbite de stationnement ; partir d'une orbite de 400 km changerait le combustible de 0,008 % et le temps de bord de 41 min. La direction de la montée est celle de la route, ce qui exigerait M16 au zénith de la base à T_0 ; à midi le 19/10/2026, elle se trouvait à $\sim 30^\circ$ de hauteur à cette longitude, et l'orientation visuelle fixe de la Terre masque la différence.

11.2 Limites des données

- **Distance.** 7 000 al jusqu'au centre de M16 est la valeur classique ; les parallaxes Gaia DR2 donnent $1\,740 \pm 130$ pc $\approx 5\,700 \pm 400$ al pour NGC 6611 [18]. La différence change peu le temps de bord (17,2 $\rightarrow$ 16,8 ans, à cause du logarithme dans (7)), mais change de $\sim 1\,300$ ans le temps sur Terre et met à l'échelle toutes les dimensions de la nébuleuse (hauteur des Piliers 8,6 $\rightarrow$ 7,0 al).
- **Nébuleuse.** Toute la profondeur est une hypothèse : nappes, plan commun des étoiles, exposant du rehaussement, conversion $\tau_f \rightarrow \tau_v$, albédo, g, κ , une unique mesure d'émission ; seules huit des ~ 500 étoiles de l'amas éclairent le gaz ; spectre de raies d'un seul point, uniquement optique ; pas de diffusion multiple ; la nébuleuse est montrée comme sur les photographies — lumière émise $\sim 6\,992$ ans avant 2026, à la distance adoptée —, tandis qu'à l'arrivée, 6 987 ans terrestres après le départ, le vaisseau reçoit une lumière émise ~ 7 ans avant cet instant : entre les deux époques observées s'écoulent $\sim 14\,000$ ans d'évolution non modélisée. D'après le taux de photoévaporation mesuré (McLeod et al. [15] : $\sim 70 M_\odot/\text{Myr}$, durée de vie ~ 3 Myr), le changement serait faible. L'hypothèse d'une supernova récente, avancée à partir de données Spitzer [19], relève de la vulgarisation ; les images Hubble de 1995 et 2014 [13] n'enregistrent que de petits changements dans les Piliers.
- **Catalogues.** 299 858 étoiles contre des milliards en réalité ; il manque les faibles et les lointaines, en particulier celles que l'aberration amènerait dans le hublot près de M16 ; l'addendum Gaia n'a pas de vitesses (il reste immobile) et a été sélectionné avec un axe de route antérieur, décalé de $0,1^\circ$ par rapport à l'actuel ; températures par couleur ou classe, spectres sans raies.
- **Poussière.** Modèle de disque lisse (12), sans les nuages réels de la direction de Serpens/Aquila ; Voie lactée diffuse et galaxies extérieures synthétiques.
- **Mouvement de M16.** Aucune vitesse relative Soleil-amas ; l'échelle de ce qui est ignoré est de 0,024 al en 7 000 ans par km/s.

11.3 Choix de mise en scène

- **Rencontres.** Planètes placées au croisement du rayon orbital, alternativement de part et d'autre, à 1,5 rayon ; éclairage de direction fixe (phase non réelle) ; ni Doppler de couleur ni gain de radiance sur les planètes (jusqu'à 3,7 % en fréquence et 15,5 % en radiance avec $\beta \leq 0,036$; dans le nuage d'Oort, $\beta = 0,25$ et $D \approx 1,3$ tripleraient presque la luminosité) ; anneaux de Saturne synthétiques, avec des bords à 0,55 % au plus des bords réels ; anneaux d'Uranus en bandes de 400–1 500 km de large contre 1–10 km en réalité ; lunes de Jupiter fixes ; Charon ~ 20 % plus près de Pluton qu'en réalité ; vingt rochers en guise de ceinture ; nuage d'Oort avec neuf groupes inventés en 24 h (fréquence réelle ≈ 0) ; « paroi » de la Bulle locale à 300 al, artistique.
- **Terre.** Carte Blue Marble de 2004 avec des nuages historiques ; la Terre affichée ne tourne pas (méridien et terminateur de T_0) ; ni météorologie, ni saisons, ni lumières urbaines.
- **Cabine et perception.** Une image unique avec des couches de lumière ; ni son, ni vibration, ni poids ; caméra à exposition fixe, sans adaptation de l'œil ni calibration photométrique du moniteur ; le reflet de la vitre est une couche visuelle, et non une simulation optique.
- **Récit.** Le vaisseau, la base, la plaque et la radio de bord (2 415 répliques, personnages fictifs, sans lectures ni pannes inventées) sont de la fiction ; l'entreprise est réelle.

11.4 Incohérences internes connues

- La densité du milieu dans le calcul du bouclier est de $0,1 \text{ cm}^{-3}$ pour tout le voyage, alors que l'estimation de la brillance diffusée de l'échappement utilise 1 cm^{-3} sur la route et 100 cm^{-3} dans la

cavité de M16 ; à l'intérieur de l'héliosphère, la valeur est encore différente. La chaleur sur le bouclier varie d'un facteur 10 selon le choix.

- La luminosité solaire apparaît comme $3,83 \times 10^{26}$ W dans les unités du panneau d'énergie et $3,828 \times 10^{26}$ W dans les jalons (0,05 %).
- Les textes du journal appellent le point final « arrivée aux Piliers », alors que la carte l'appelle arrêt, à 6,9 al de la face la plus proche.

11.5 Hypothèses et sensibilité du modèle

- La température d'équilibre du bouclier suppose un rayonnement par une seule face ; par deux faces, elle serait plus basse d'un facteur $2^{-1/4}$ (16 %).
- Le rehaussement photographique inversé (exposant 2,4), le facteur 1,725 du maillage, le plafond $\tau_v \leq 8$ et la grille de $142 \times 234 \times 218$ sont des choix de conception documentés, et non des mesures ; les modifier change l'apparence de la nébuleuse sans contredire aucune donnée.

12. Conclusion

Borealis Horizon montre qu'un voyage relativiste peut être présenté au public avec les bons nombres, en temps réel, pendant 17 ans, avec un code qui tient dans un navigateur : cinématique en forme close, lumière transformée direction par direction, fond cosmique calculé à partir de la loi de Planck et nébuleuse construite à partir d'observations publiques, le tout sous exposition fixe et avec des choix visuels documentés. Le prix en est les simplifications déclarées — un moteur et un bouclier qui n'existent pas, une distribution volumique de la nébuleuse que les observations ne déterminent pas à elles seules, des planètes placées là où elles sont belles — et ce document les rend explicites, avec l'ampleur de chacune, pour que le lecteur sache exactement ce qu'il voit.

Références

- [1] Rindler, W. *Relativity: Special, General, and Cosmological*. 2e éd., Oxford University Press, 2006.
- [2] Møller, C. *The Theory of Relativity*. 2e éd., Clarendon Press, 1972.
- [3] Rindler, W. "Kruskal space and the uniformly accelerated frame". *American Journal of Physics* 34, 1174 (1966).
- [4] Penrose, R. "The apparent shape of a relativistically moving sphere". *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 55, 137 (1959); la forme en demi-angle de l'aberration découle de la transformation de Lorentz des cosinus directeurs.
- [5] Peebles, P. J. E.; Wilkinson, D. T. "Comment on the anisotropy of the primeval fireball". *Physical Review* 174, 2168 (1968) — radiance $\propto D^4$ et invariance de I_ν/ν^3 .
- [6] Wyman, C.; Sloan, P.-P.; Shirley, P. "Simple analytic approximations to the CIE XYZ color matching functions". *Journal of Computer Graphics Techniques* 2(2), 1 (2013). <https://jcgt.org/published/0002/02/01/>
- [7] Ballesteros, F. J. "New insights into black bodies". *EPL* 97, 34008 (2012). arXiv:1201.1809.
- [8] Nash, D. *HYG Database v4.1* (CC BY-SA 4.0). <https://github.com/astronexus/HYG-Database>
- [9] Tribick, A. *celestia-gaia-stardb v1.1.1.1* — Gaia EDR3 / Hipparcos / Tycho pour Celestia (CC BY-NC 3.0 IGO); Gaia Collaboration, *A&A* 649, A1 (2021); Bailer-Jones et al., *AJ* 161, 147 (2021). <https://github.com/ajtribick/celestia-gaia-stardb>
- [10] Particle Data Group, "Cosmic microwave background", *Review of Particle Physics* (2025), éq. 29.2 : $T_0 = 2,7255$ K; dipôle de 369,82 km/s vers $(l, b) = (264,021^\circ, 48,253^\circ)$. Fixsen, D. J. "The temperature of the cosmic microwave background". *ApJ* 707, 916 (2009).
- [11] Planck Collaboration. "Planck 2018 results. I. Overview". *A&A* 641, A1 (2020).

- [12] ESO. "The Eagle Nebula" (eso0926a), WFI/La Silla, 2009, CC BY 4.0.
<https://www.eso.org/public/images/eso0926a/>
- [13] NASA/ESA Hubble. "Pillars of Creation" (heic1501a) et communiqué heic1501, 2015, CC BY 4.0.
<https://esahubble.org/news/heic1501/>
- [14] Sana, H. et al. "The massive star binary fraction in young open clusters — II. NGC 6611 (Eagle Nebula)". *MNRAS* 400, 1479 (2009).
- [15] McLeod, A. F. et al. "The Pillars of Creation revisited with MUSE: gas kinematics and high-mass stellar feedback traced by optical spectroscopy". *MNRAS* 450, 1057 (2015).
- [16] Semyonov, O. G. "Radiation hazard of relativistic interstellar flight". *Acta Astronautica* 64, 644 (2009).
arXiv:physics/0610030.
- [17] Semyonov, O. G. "Radiation conditions in relativistic interstellar flight". *Acta Futura* 12 (2020). arXiv:2004.10079.
- [18] Kuhn, M. A.; Hillenbrand, L. A.; Sills, A.; Feigelson, E. D.; Getman, K. V. "Kinematics in young star clusters and associations with Gaia DR2". *ApJ* 870, 32 (2019).
- [19] Flagey, N. et al. "Tracing the energetics and evolution of dust with Spitzer: a chapter in the history of the Eagle Nebula". *A&A* 531, A51 (2011).
- [20] NASA Earth Observatory. *Blue Marble: Next Generation* (janvier 2004) et *Blue Marble Clouds*.
- [21] Solar System Scope. *Solar System Textures* (CC BY 4.0); NASA/JHUAPL/SwRI, carte de Pluton (New Horizons).
- [22] Ashby, N. "Relativity in the Global Positioning System". *Living Reviews in Relativity* 6, 1 (2003).

Annexe A. Constantes et paramètres

Symbole	Valeur	Usage
c	299 792 458 m/s	exacte
g_0	9,80665 m/s ²	accélération propre de croisière
an	365,25 j = 31 557 600 s	année-lumière = $9,4607 \times 10^{15}$ m ; calendrier de bord
UA	$1,495978707 \times 10^{11}$ m	vitesse propre, jalons
$R_{\oplus}$	6 371 km	$GM = g_0 R_{\oplus}^2$
T_0 (CMB)	2,7255 K	monopôle
dipôle solaire	369,82 km/s ; (l, b) = (264,021°, 48,253°)	composition avec le boost du vaisseau
σ	$5,670374419 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$	irradiance, bouclier
$m_p c^2$	$1,50327759 \times 10^{-10}$ J (938,27 MeV)	flux sur le bouclier
n	0,1 cm ⁻³	densité du milieu (bouclier)
m_{fim}	100 t	masse sèche
D, distances	7 000 al (centre de M16) ; 6 992 al (plan des Piliers) ; 6 985 al (arrêt)	route
direction de la route	l = 16,890922°, b = 0,753177°	tiers supérieur des Piliers
poussière	K = $5,1 \times 10^{-4}$ al ⁻¹ ; H = 330 al ; $z_{\odot} = 65$ al ; canaux (-0,18 ; 0 ; 0,30)	extinction
exposition	$E_{\text{sombre}} = 5\,400$ à $1\,200$ px/rad ; $\sigma_{\text{PSF}} = \max(0,55 \text{ px} ; 1,2 \times 10^{-4} \text{ rad})$	ciel
nébuleuse	échelle 1,725 ; nappes 15 al (σ 3), 8,5 al (σ 2), étoiles 3,2 al ; $\tau_v = \tau_f(1 + 2,6\tau_f)$; albédo 0,5 ; g = 0,6 ; $\kappa = 6 \text{ al}^{-1}$; 224 échantillons	transfert

Profondeur optique de (12) le long d'un segment de longueur d entre les hauteurs z_0 et z_1 (mesurées depuis le plan) : $\tau = K d e^{-|z|/H}$ si $|z_1 - z_0| < 10^{-3} d$, et, dans le cas contraire, $\tau = (K d / \Delta z) [\text{sgn}(z_1) H (1 - e^{-|z_1|/H}) - \text{sgn}(z_0) H (1 - e^{-|z_0|/H})]$.

Annexe B. Jalons du voyage

Jalon	Temps de bord	État
Échappement à la gravité terrestre ($v^2 = 2GM/r$)	44 min	montée à 0,1–1 g net
Lune (rayon orbital)	2,98 h	307 000 km/h ; 41 s pour traverser le diamètre
Fin de la montée (début de la forme close)	24 h	$34,9 \times 10^6$ km ; 827 km/s
Mars · Cérès · Jupiter	2,19 · 3,27 · 4,59 j	passages scénographiques à 1,5 rayon
Saturne · Uranus · Neptune · Pluton	6,25 · 8,87 · 11,1 · 12,7 j	Pluton à $38,7 \times 10^6$ km/h
Nuage d'Oort (2 000 UA)	90,2 j	$\beta = 0,25$; sortie du modèle (100 000 UA) au jour 574
Bulle locale (300 al)	6,23 ans	$\gamma \approx 310$
CMB à 1 000 K à la proue	5,72 ans	Tableau 2
Inversion	8,606 ans	$\gamma = 3\,606$; 3 493 ans sur Terre ; 3 492,5 al
Arrêt	17,211 ans	6 985 al ; 6 987 ans sur Terre ; $v = 0$; combustible épuisé

Borealis Dynamics · Borealis Horizon, version 1.1.0 · Les sources et licences de chaque ressource figurent sur la page « Sources et crédits » du site ; les simplifications, sur la page « Licence poétique » ; les changements de chaque version, dans « Versions ». Le site est non commercial, éducatif et gratuit.