



HAL
open science

Planétariums numériques, entre images de sciences et réalité virtuelle : développement d'une méthode sémio-scientifique pour analyser les contenus d'un dispositif de médiation en mutation

Marion Parisis, Eric Triquet

► To cite this version:

Marion Parisis, Eric Triquet. Planétariums numériques, entre images de sciences et réalité virtuelle : développement d'une méthode sémio-scientifique pour analyser les contenus d'un dispositif de médiation en mutation. 23ème Congrès de la SFSIC : La numérisation des sociétés, Jun 2023, Bordeaux, France. pp.441-452. hal-04598684

HAL Id: hal-04598684

<https://hal.science/hal-04598684>

Submitted on 3 Jun 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Planétariums numériques, entre images de sciences et réalité virtuelle : développement d'une méthode *sémio-scientifique* pour analyser les contenus d'un dispositif de médiation en mutation.

Digital Planetariums, Science Images and Virtual Reality: Development of a *Semio-scientific* Method to Analyze New Contents of a Changing Mediation Device.

Marion Parisis

Centre Norbert Elias, Avignon Université

marion.paris@alumni.univ-avignon.fr

Éric Triquet

Centre Norbert Elias, Avignon Université

eric.triquet@univ-avignon.fr

Mots-clés : planétariums numériques, dispositif de médiation, réalité virtuelle, images, méthodologie.

Keywords: digital planetariums, mediation device, virtual reality, images, methodology.

Résumé

Notre travail étudie les images de l'espace présentées par les planétariums numériques de nouvelles générations. Le présent article propose d'analyser ces images – transposées du monde de la recherche en astrophysique – au moyen d'une double approche sémiologique et scientifique. Nous l'appliquons à l'exemple des trous noirs pour montrer comment elle permet de construire des significations en lien avec les phénomènes physiques sous-jacents.

Abstract

Our work examines the images of space presented by the new generation of digital planetariums. This article proposes to analyze these images - transposed from astrophysical research - using a dual semiological and scientific approach. We apply it to the example of black holes to show how it can be used to construct meanings linked to the underlying physical phenomena.

Planétariums numériques, images de science et réalité virtuelle : développement de la méthode *sémio-scientifique* pour analyser les nouveaux contenus d'un dispositif médiatique en mutation

Marion Parisis et Éric Triquet

Introduction

Cet article s'inscrit dans le contexte d'une thèse CIFRE dont le partenaire industriel est la société RSA Cosmos – Konica Minolta, une des entreprises leader sur le marché des planétariums numériques¹. Elle développe notamment le logiciel *SkyExplorer* qui nous intéresse dans cette recherche.

Notre travail s'intéresse aux images issues de la recherche en astrophysique proposées par le logiciel *SkyExplorer*. Ce dernier propose une représentation en réalité virtuelle de l'univers et des objets célestes à partir d'images produites par les chercheurs en astrophysique. Mais aussi, il offre au médiateur, utilisateur du logiciel, la possibilité d'agir sur ces images. Cependant, lors de leur transposition depuis le monde de la recherche, ces images font l'objet de transformations destinées à les rendre accessibles à un public profane ; ce qui rend leur interprétation particulièrement délicate.

Nous présentons dans cet article une méthode d'analyse qui tente d'appréhender leurs significations. Nous avons choisi de la nommer « analyse sémio-scientifique ». Il s'agit d'une analyse sémiologique qui vise à mettre au jour les phénomènes physiques associés aux images présentées via le dispositif numérique. L'adjectif « scientifique » accolé au préfixe « sémio » renvoie à la nature des significations produites, lesquelles s'inscrivent dans le champ des sciences astrophysiques. Cette méthodologie, et la façon de la nommer, sont actuellement en cours de réflexion dans notre thèse.

Le planétarium, un dispositif de médiation en mutation

Un dispositif de médiation par l'image et son évolution technologique

Trivialement, un planétarium est défini comme « une salle hémisphérique spécifiquement appropriée à la reconstitution du ciel nocturne » (Abraham et Mauguin, 2007 : 143). Néanmoins, le terme « planétarium » désigne tantôt l'institution elle-même, tantôt l'installation en tant que telle, ou le dispositif de médiation (Acker, 2009). Au sens défini par Jean Davallon (2000), nous pouvons appréhender l'« installation planétarium » comme un média au même titre que l'exposition. Ils sont un fait social (ils instaurent une relation entre les visiteurs et le médiateur), un fait sémiotique (les images générées par le logiciel et « manipulées » par le médiateur sont capables de communiquer un message), et un fait instrumental (ils mettent en jeu une technologie et des savoir-faire au niveau de leur conception et de leur utilisation en situation de médiation). Dans ce texte, nous les considérons plus précisément comme des dispositifs de médiation. Pour Yves Jeanneret, un dispositif (au sens large) est « un artefact industriellement produit qui configure les conditions matérielles de la communication et préfigure [...] la manière dont elle peut être pratiquée » (Jeanneret, 2019 : 119). Nous basant sur cette définition, un planétarium est donc une installation technique produite industriellement par des sociétés comme RSA Cosmos, qui configure les conditions matérielles de la communication (salle circulaire, écran-dôme, son, projections

¹ Constructeur de planétariums et développeur d'un logiciel de planétarium.

d'images) et préfigure la façon dont elle peut être pratiquée. De plus, les planétariums, comme structure de culture scientifique et technique s'inscrivent dans une médiation des sciences qui tente d'être au plus près des sciences astronomiques. Dès lors, nous considérons le planétarium comme un **dispositif de médiation scientifique par l'image**.

Les premières technologies de projection d'images des planétariums étaient les systèmes opto-mécaniques. Ils consistaient en des formes de lampes opaques percées de trous lumineux pour représenter les étoiles et les mouvements du ciel en deux dimensions (Ruiz et Acker, 2006). À partir des années quatre-vingt, l'injonction au numérique qui a cours dans le champ muséal s'observe aussi dans les planétariums (Lecourt, 1996 ; Acker, 2009). Les systèmes opto-mécaniques cèdent la place à des systèmes informatiques. On passe alors de points de lumières projetées sur un écran en deux dimensions à des images virtuelles de l'univers en trois dimensions, manipulables grâce aux fonctionnalités intégrées aux logiciels. On parle de planétariums numériques.

Développement de la réalité virtuelle dans les logiciels de planétariums

Plus qu'une simple évolution technologique, le numérique des planétariums met en jeu la *réalité virtuelle*. Il s'agit de pénétrer dans un *monde virtuel* qui représente l'univers. Le monde virtuel désigne la génération d'images en trois dimensions, dont d'*entités 3D* (Fuchs, 2003). Les entités 3D qui nous intéressent regroupent principalement les objets célestes (planètes, étoiles, nébuleuses).

Celles-ci doivent être en « interaction en temps réel² entre elles ou avec un ou des utilisateurs » (Fuchs et al., 2003 : 8). En réalité virtuelle, *l'interaction 3D* permet aux utilisateurs d'exécuter des fonctions qui se traduisent « par [des] changements de l'état du système dans lequel [ils] évolue[nt] » (Ouramdane et al. 2009 : 8). Dans notre cas, les utilisateurs du logiciel sont aussi des médiateurs scientifiques qui conçoivent et animent des médiations pour des publics. Pour cette raison, nous employons le vocable *utilisateur-médiateur* pour les désigner. Ainsi, pour l'utilisateur-médiateur, les interactions 3D permises amènent à des changements d'états dans le monde virtuel. Dans la suite du texte, nous conservons le vocable d'interaction 3D pour désigner les actions réalisables par l'utilisateur-médiateur sur les entités 3D du monde virtuel.

Les chercheurs du domaine de la réalité virtuelle ont classifié les techniques d'interactions 3D. Nous appuyant sur l'état de l'art des travaux en réalité virtuelle, nous nous sommes alors posé la question des familles d'interactions 3D permises par *SkyExplorer*. Le tableau 1, les classe de façon synthétique.

² Absence de décalage temporel entre l'action demandée par l'utilisateur dans le monde virtuel et la réponse de ce dernier.

Interactions 3D permises dans le monde virtuel du logiciel <i>SkyExplorer</i>		
Grandes familles d'interactions 3D	Détails ce qu'il est possible de faire pour chaque famille	
Observer le monde virtuel (Coquillart et al. 2003)	Direction de la caméra / du regard (Bowman, 1999)	
Se déplacer dans le monde virtuel (Coquillart et al. 2003)	Choix de la cible (Bowman, 1999)	
	Vitesse de déplacement (Bowman, 1999)	
Agir sur le monde virtuel (Coquillart et al. 2003)	Temporalité	Vitesse de défilement du temps
		Esthétique de défilement du temps
	Interaction avec les entités 3D	Sélection (Mine, 1995 ; Bowman, 1999)
		Manipulation (Mine, 1995 ; Bowman, 1999) dont changer l'échelle (Mine, 1995).

Tableau 1 (simplifié) – Familles d'interactions 3D possibles dans et sur le monde virtuel de *SkyExplorer*.

La conception des logiciels de planétariums : une transformation des images

Un point important, est que le monde virtuel est défini par l'état des savoirs en astrophysique. Pour appréhender ce qui se joue dans cette mobilisation d'images scientifiques, nous proposons de convoquer le concept de *transposition médiatique* (Triquet, 1993). Ce processus correspond au déplacement et aux transformations qui accompagnent ces images depuis leurs lieux de production (les laboratoires de recherche) vers des espaces médiatiques (les planétariums). Les transformations sont inhérentes aux contraintes du dispositif et à la situation médiatique en jeu. Quelles sont ces contraintes ? Dans une approche *a priori*, nous identifions des contraintes externes (de compatibilité à l'environnement de l'institution « planétarium ») et internes, c'est-à-dire propre au média planétarium et à la situation de médiation. Les contraintes externes sont guidées par : la nécessité de soutenir la concurrence avec les autres fournisseurs de logiciels de planétariums ; l'exigence de tenir un discours le moins éloigné possible de celui des scientifiques et de coller à l'actualité de la recherche³. Les contraintes internes, sont doubles : le logiciel doit pouvoir proposer des images qui entretiennent un fort rapport de ressemblance avec l'objet céleste référent, ou bien avec les images proposées par les scientifiques si l'objet céleste ou le phénomène est invisible ; la technologie de réalité virtuelle impose de rendre ces images « manipulables » en situation de médiation par l'intermédiaire des interactions 3D. Par ailleurs, une condition est requise : la possibilité pour les médiateurs de maîtriser le dispositif et notamment les images présentées. Dès lors, deux questions de recherche se dégagent.

- Comment les transformations induites par ces différentes contraintes affectent-elles la signification scientifique des images convoquées ?
- Quels effets l'activation des interactions 3D produit-elle sur ces significations ?

En premier lieu, nous faisons l'hypothèse que les transformations sur les images modifient certaines formes, couleurs, ou textures, et avec elles, les phénomènes astrophysiques afférents.

En second lieu, nous supposons qu'agir sur les images via les interactions 3D génère une variation dans ses formes et ses couleurs dans le moment même où l'interaction 3D est activée. Cette situation implique une redéfinition des phénomènes physiques visualisables au cours de l'interaction.

³ Pour des raisons de crédibilité scientifique essentielles d'une part dans leurs relations aux scientifiques, d'autre part pour les publics qui leur accordent leur confiance.

La méthode d'analyse sémio-scientifique

Pour répondre à ces questionnements, nous développons une méthode que nous nommons « **analyse sémio-scientifique** ». Cette analyse repose sur une sémiologie de l'image dont l'objectif est précisément d'inférer les significations en lien avec des phénomènes physiques⁴ - et les concepts scientifiques sous-jacents - à partir de *signes visuels* identifiables.

Elle s'appuie sur le principe de monosémie des images qui implique que les signes correspondent à des significations précises et réfléchies en amont (Bertin, 2013). Catherine Allamel-Raffin (2016) remarque que c'est aussi selon ce principe que travaillent les astrophysiciens lorsqu'ils produisent des images.

Précisons ce que nous entendons par signes visuels. Nous considérons ici les *signes plastiques* en nous référant au vocable employé par le Groupe μ . Le collectif les classe en trois catégories : les couleurs, les formes et les textures (Groupe μ , 1992). Chacun de ces signes plastiques doit nous permettre d'inférer un phénomène physique précis.

Cependant, les signes plastiques sont insuffisants pour analyser sémiologiquement les images de *SkyExplorer*. En effet, nous avons dit que le logiciel fournit des entités 3D en temps réel sur lesquelles l'utilisateur-médiateur est capable d'agir grâce aux interactions 3D (tableau 1 p.4). Nous partons ici du postulat que ces dernières font varier les signes plastiques de l'image et donc, peut-être, les significations. Il nous faut alors les prendre en compte dans l'analyse.

Les étapes de l'analyse sémio-scientifique

L'analyse se déroule en deux temps. En premier lieu, nous réalisons une analyse d'image d'une entité 3D du logiciel. Pour cela, nous commençons par analyser seulement les signes plastiques sans considérer les interactions 3D. Nous considérons l'image telle qu'elle apparaît dans sa configuration initiale (comme si elle était fixe). Cette étape consiste à inférer des phénomènes physiques à partir des signes plastiques.

Le tableau 2, montre la matrice d'analyse de cette première étape. La première colonne désigne les variables de notre tableau, directement issues des signes plastiques tels que définis par le Groupe μ . La deuxième colonne nous permet dans un premier temps de repérer les signes plastiques visuellement identifiables dans l'image. Dans un second temps, dans la troisième colonne, il s'agit d'inférer le phénomène physique à partir de chacun des signes plastiques repérés.

Signes plastiques de l'image		
Signes plastiques	Signes plastiques identifiables dans l'image étudiée	Phénomènes physiques que renseignent chaque signes plastiques
Couleurs	<i>Quelles couleurs sont identifiables dans l'image ?</i>	<i>A quels phénomènes physiques correspondent ces couleurs ?</i>
Textures	<i>Quelles textures sont identifiables dans l'image ?</i>	<i>A quels phénomènes physiques correspondent ces textures ?</i>
Formes	<i>Quelles formes sont identifiables dans l'image ?</i>	<i>A quels phénomènes physiques correspondent ces formes ?</i>

Tableau 2 (simplifié) – Matrice d'analyse qui met en relation les signes plastiques avec les phénomènes physiques.

⁴ Au sens des sciences astrophysiques.

Puis, nous actionnons les interactions 3D du logiciel pour visualiser leurs effets dans l'image et de là, identifier les modifications subies par les signes plastiques. À partir de cette identification, il s'agit d'en inférer les significations scientifiques ajoutées ou supprimées.

Le tableau 3, montre la grille d'analyse de cette seconde étape. La colonne « Familles d'interactions 3D du logiciel » désigne les variables de notre tableau en nous appuyant sur le tableau 1 (p.4). La deuxième colonne nous permet de décrire plus précisément les actions réalisées dans l'image à partir des interactions 3D activées. La troisième colonne nous permet d'identifier les variations des signes plastiques en rapport avec les actions réalisées dans l'image. La dernière colonne, vise à inférer les significations scientifiques produites à mesure que les signes plastiques varient selon les actions réalisées dans l'image.

Signes plastiques de l'image en mouvement				
Familles d'interactions 3D du logiciel		Actions sur les interactions 3D	Variations des signes plastiques visualisables	Effets sur les phénomènes physiques visualisables
Observer	Direction de la caméra	Description des actions réalisées par famille d'interactions 3D	La couleur, la texture ou la forme changent-elles si j'observe l'image différemment que dans la configuration initiale ? Si oui, comment changent-elles ?	Redéfinition du phénomène physique par rapport à la variation de la couleur, de la forme ou de la texture.
	Cible à observer			
Se déplacer	Choix de la cible		La couleur, la texture ou la forme changent-elles à mesure que je me déplace dans l'image ? Si oui, comment changent-elles ?	Redéfinition du phénomène physique par rapport à la variation de la couleur, de la forme ou de la texture.
	Type de déplacement			
	Vitesse de déplacement			
Agir	Agir sur le temps (activation et vitesse)		La couleur, la texture ou la forme changent-elles à mesure que j'agis dans l'image ? Si oui, comment changent-elles ?	Redéfinition du phénomène physique par rapport la variation de la couleur, de la forme ou de la texture.
	Interaction avec les entités 3D			

Tableau 3 – Matrice d'analyse qui met en relation l'effet des interactions 3D sur les signes plastiques et les phénomènes physiques afférents.

Nous proposons d'illustrer notre analyse sémio-scientifique par un exemple concret : le cas d'une image de trou noir du logiciel *SkyExplorer*.

L'analyse sémio-scientifique d'une image de trou noir

La figure 1 présente une capture d'écran d'un trou noir dans *SkyExplorer*. Celle-ci montre le trou noir dans sa configuration initiale : le regard de l'observateur est dirigé vers le centre du trou noir, il se situe à environ 20 degrés en-dessous de l'équateur et à 50 000 kilomètres de rayon de celui-ci. Initialement, le temps ne défile pas, le trou noir apparaît immobile.

Démarrons l'analyse de la figure 1 ci-après en la considérant comme une image fixe. Puis, nous la poursuivrons en considérant certaines interactions 3D qui permettent d'agir sur le trou noir.



Figure 1. Capture d'écran⁵ (457x253 pixels). Trou noir stellaire entouré d'un disque d'accrétion visualisé à 40° par rapport à son équateur. ©SkyExplorer, RSA Cosmos-Konica Minolta.

Le tableau 4 ci-dessous présente la matrice d'analyse complétée pour la figure 1. Il est significativement simplifié par rapport à l'analyse réelle effectuée dans le travail de thèse.

Signes plastiques de l'image fixe du trou noir stellaire de <i>SkyExplorer</i>		
Signes plastiques	Signes plastiques identifiables dans l'image étudiée	Phénomènes physiques que renseignent chaque signes plastiques
Formes	Sphère au centre.	Horizon des événements. Forme de sphère car la gravité attire les éléments à égales distances.
	Disque d'accrétion semble déformé au-dessus de l'horizon des événements.	C'est une manifestation de l'effet de lentille gravitationnelle.
Couleurs	Sphère noire au centre.	Horizon des événements. Noir car rien ne peut en échapper, y compris la lumière.
	Dégradé du rouge au blanc depuis les bords externes vers les bords internes du disque d'accrétion.	C'est une manifestation des différences de température dans le disque d'accrétion. Les bords externes (rouges) sont moins chauds que les bords internes (blancs).
Textures	Le disque d'accrétion semble posséder des granularités.	Nous ne voyons pas ici de phénomènes physiques particuliers associé à cette granularité. Peut-être est-ce un effet esthétique, ou bien, une manifestation de la nature de la matière du disque (composé de gaz et poussières).

Tableau 4 (simplifié) – Matrice d'analyse complétée pour l'image du trou noir de *SkyExplorer*.

Remarquons d'abord que, dans la figure 1, la partie centrale de couleur noire est l'horizon des événements : frontière à partir de laquelle rien ne peut s'échapper du trou noir, y compris la lumière (Riazuelo, 2016). Ensuite, notons que le disque d'accrétion est représenté plat au-devant de l'horizon et courbe au-dessus. Il s'agit d'un effet selon lequel les rayons lumineux, qui proviennent de l'arrière du trou noir, sont déviés à cause de son intense gravité (Luminet, 2006) : effet de lentille gravitationnelle. Puis, le disque d'accrétion présente un dégradé coloré qui représente des variations de température : les zones blanches sont les plus chaudes et les zones orangées les plus

⁵ Pour des raisons de visibilité sur cette capture, nous sommes situés à 20 000 km de rayon du trou noir et non, 50 000 km comme c'est le cas dans la configuration initiale.

froides. Néanmoins, l'effet Doppler est omis. Il s'agit d'un effet selon lequel un objet lumineux qui s'approche rapidement d'un observateur voit sa couleur virer vers le blanc, tandis que s'il s'éloigne, elle vire au rouge (Luminet, 2006). Sur le disque d'accrétion on devrait donc observer, non pas un dégradé depuis les bords externes vers les bords internes, mais un dégradé depuis la gauche vers la droite (ou inversement). Cet effet donnerait alors une indication du sens de rotation du disque autour de l'horizon. Cet exemple nous paraît symptomatique des choix visuels que les concepteurs du logiciel ont réalisé pour le cas du trou noir au regard des contraintes externes à l'institution du planétarium et aux contraintes internes du planétarium comme dispositif de médiation.

À la suite de cette première analyse, nous prenons en compte l'activation des interactions 3D sur l'image du trou noir. Pour cela, nous nous centrons sur les familles "observer" et "se déplacer" dans le monde virtuel ainsi que sur la dimension temporelle de la famille "agir dans le monde virtuel" (tableau 1 p.4). Les figures 2 à 4 montrent des captures d'écran - tirées de *SkyExplorer* - du trou noir visualisé sous trois perspectives par rapport à son équateur : 0° (fig. 2), 40° (fig.3) et 90° (fig.4). Toutefois, ces captures d'écrans ne remplacent pas la séquence d'images observable en situation de médiation.

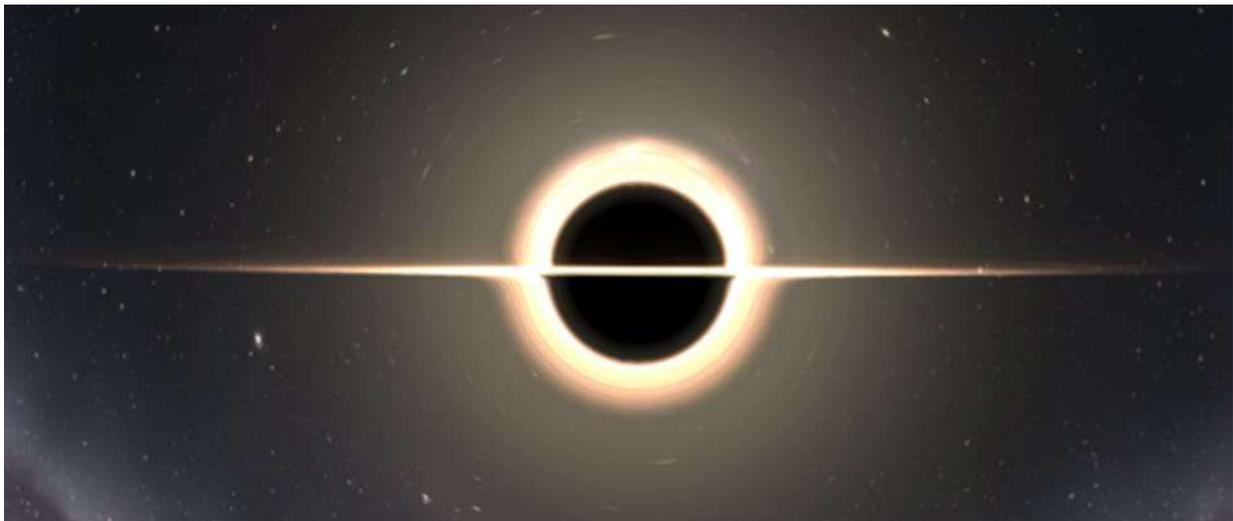


Figure 2- Capture d'écran (664x280 pixels). Trou noir entouré d'un disque d'accrétion visualisé à 0° par rapport à son équateur ©SkyExplorer, RSA Cosmos-Konica Minolta.

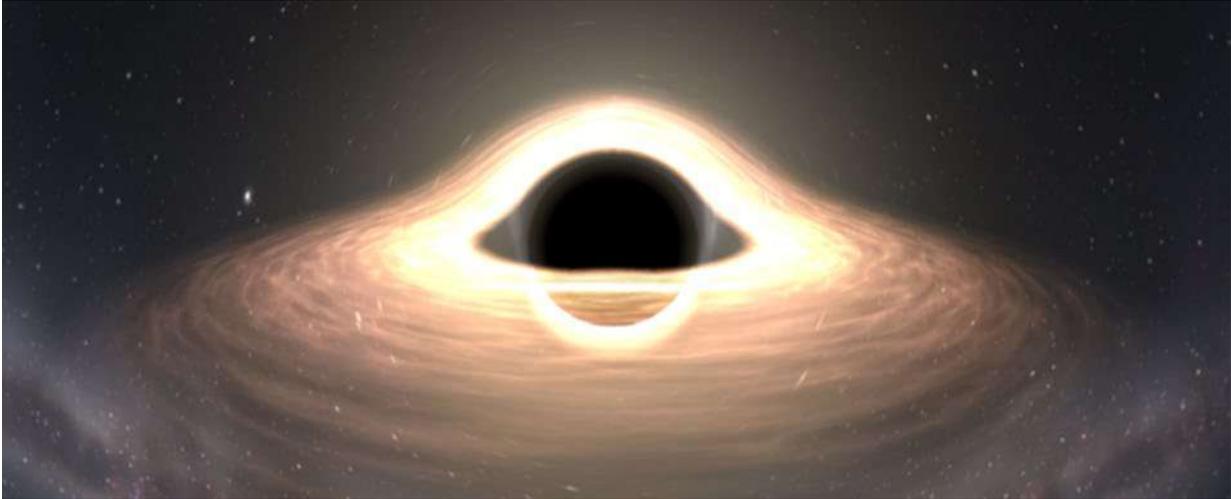


Figure 3- Capture d'écran (693x281 pixels). Trou noir entouré d'un disque d'accrétion visualisé à 40° par rapport à son équateur ©SkyExplorer, RSA Cosmos-Konica Minolta.

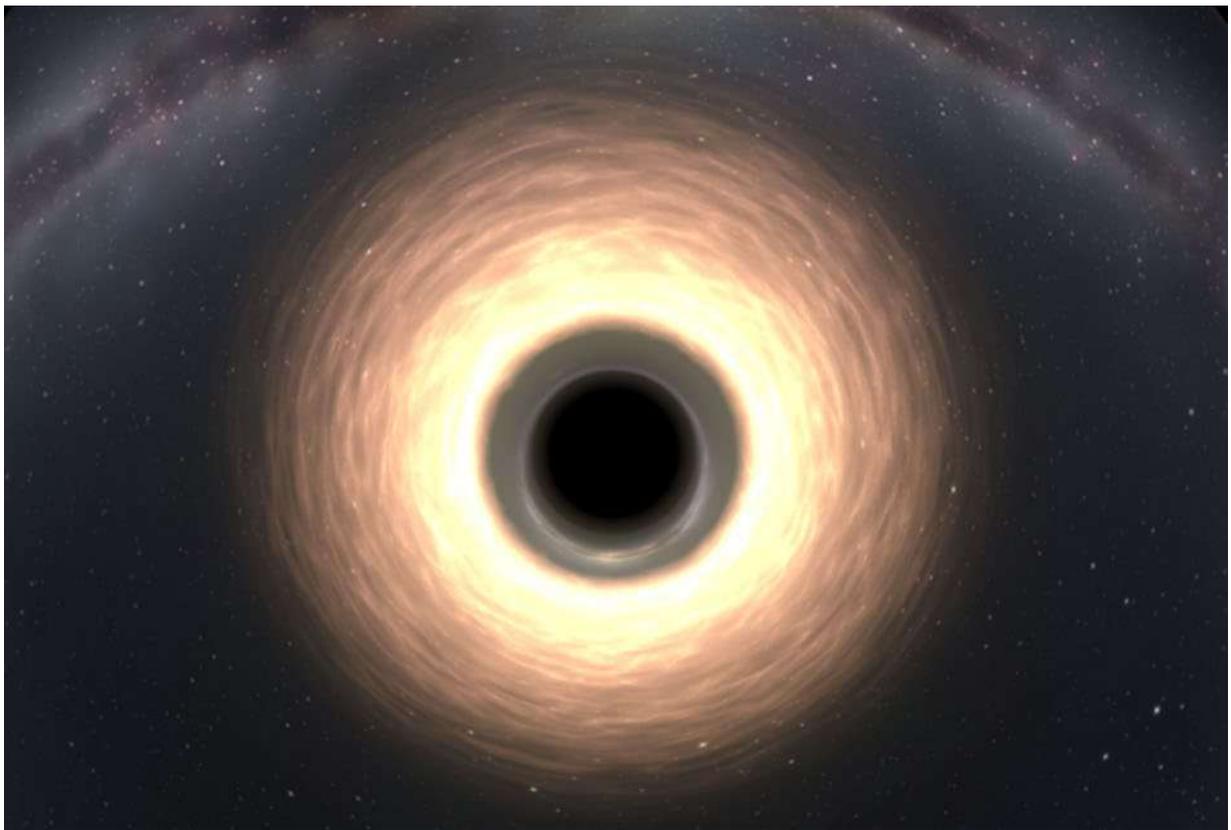


Figure 4- Capture d'écran (718x485 pixels). Trou noir entouré d'un disque d'accrétion visualisé à 90° par rapport à son équateur ©SkyExplorer, RSA Cosmos-Konica Minolta.

Le tableau ci-dessous présente la matrice d'analyse complétée pour les figures 2 à 4. Elle est simplifiée par rapport à l'analyse réelle effectuée dans le travail de thèse.

Signes plastiques de l'image en mouvement				
Familles d'interactions 3D du logiciel	Actions sur les interactions 3D	Variation des signes plastiques visualisables	Effets sur les phénomènes physiques visualisables	
Observer	Direction de la caméra	La direction de la caméra et la cible sont inchangées. Pour l'exemple, nous choisissons de regarder vers le centre du trou noir (en cohérence avec la configuration initiale).	En se déplaçant autour du trou noir en conservant la direction de la caméra fixe, c'est surtout la forme du disque qui varie. Situé à 20° au-dessus de l'équateur, la lumière déviée du disque forme comme un "chapeau" qui passe en-dessous de l'horizon des événements et forme un arc de cercle au-dessus. À 0° par rapport à l'équateur la déviation de la lumière du disque semble former un cercle quasi-parfait autour de l'horizon. À 90°, aucune déformation n'est visible. Le disque apparaît plat.	On s'aperçoit que le fait de se déplacer de façon verticale autour du trou noir (de 0° à 90° par rapport à l'équateur) impacte la façon dont l'effet de lentille gravitationnelle subit par le disque d'accrétion se manifeste autour de l'horizon des événements. Cet effet dépend donc de la position d'un observateur par rapport au trou noir.
	Cible à observer			
Se déplacer	Choix de la cible	Le trou noir stellaire.		
	Type de déplacement	De façon verticale pour se positionner à 90° au-dessus du trou noir.		
	Vitesse de déplacement	On ne la prend pas en compte pour l'exemple.		
Agir	Agir sur le temps	On active le défilement du temps.	Activer et faire défiler le temps mettent le disque d'accrétion en mouvement. Il tourne autour du trou noir. On observe la partie externe du disque tourner plus lentement que la partie interne.	La différence de vitesse de rotation de la vitesse est un indicateur d'un effet qui s'appelle la rotation différentielle (la vitesse de rotation d'un corps varie selon sa distance par rapport à l'axe de rotation).
	Vitesse de défilement du temps	On fait défiler le temps seconde par seconde.		
	Interaction avec les entités 3D	On ne le prend pas en compte pour cet exemple.		

Tableau 5 – Matrice d'analyse complétée pour le trou noir de SkyExplorer sur lequel on active les interactions 3D.

Pour commencer, si l'on s'intéresse aux catégories « observer » et « se déplacer », on se rend compte que c'est un changement de perspective qui est en jeu. En visualisant les figures 2 à 4, on s'aperçoit que ce changement de perspective modifie les modalités de manifestation de l'effet de lentille gravitationnelle. Lorsque l'observateur se situe à 90° au-dessus de l'équateur du trou noir, l'effet de lentille gravitationnelle ne se manifeste pas et le disque d'accrétion est plat (fig. 4). À l'inverse, s'il se situe exactement au niveau de l'équateur (fig. 2), cet effet se manifeste sur les parties supérieures et inférieures du disque. L'effet de lentille gravitationnelle est donc un effet qui est relatif à la position d'un observateur. Ensuite, « agir dans le monde » à partir de la dimension temporelle permet d'observer le disque d'accrétion tourner autour de l'horizon. On constate alors que les bords internes du disque tournent plus rapidement que les bords externes : c'est la rotation différentielle. Ce mouvement ne peut pas être visualisable sous la forme de captures d'écrans fixes. Faire défiler le temps pour montrer cet effet physique permet en partie d'expliquer les variations de températures qui se manifestent par le dégradé de couleurs : plus le disque s'approche de l'horizon, plus sa rotation augmente, ainsi, les frottements de la matière (gaz, poussières) s'intensifient et donc la température s'échauffe.

Conclusion

La première partie de l'analyse de l'image du trou noir de *SkyExplorer* met au jour les transformations des signes plastiques réalisées sur l'image scientifique du trou noir lors de la conception du logiciel. Nos analyses montrent que ces transformations exercent une influence sur les phénomènes physiques visualisables dans l'image. Par exemple, l'effet Doppler est absent des phénomènes physiques identifiables dans l'image du trou noir.

La seconde partie considère l'activation des interactions 3D sur le trou noir du logiciel. Nous avons observé que l'activation de ces dernières implique une variation des signes plastiques (la forme notamment) dans les figures 2 à 4. Mais surtout, la variation de ces signes amène à redéfinir les phénomènes physiques visualisables. Autrement dit, elle invite à reformuler, voire, préciser l'interprétation de la manifestation visuelle du phénomène physique.

La méthode d'analyse sémio-scientifique nous invite à nous interroger sur la nature des significations scientifiques qui sont en jeu dans les mondes virtuels des logiciels de planétariums. Elle permet de repérer les transformations imprimées à ces images lors de leur transposition médiatique, puis dans la situation de médiation.

Cette analyse doit dès lors être complétée par une analyse de la conception du logiciel de façon à comprendre les logiques qui sont à l'œuvre dans ces transformations. En aval, elle nous invite à appréhender la façon dont les médiateurs vont effectivement se saisir du logiciel. Nous avons choisi dans cet article de nous centrer sur les significations potentiellement permises par *SkyExplorer*, il reste à savoir quelles sont celles qui sont effectivement proposées en situation de médiation. Il s'agit là de travaux en cours dans notre thèse que nous n'avons pu présenter dans le cadre limité de cet article.

Bibliographie

- Abraham, P., & Mauguin, B. (2007). L'arrivée du numérique dans le domaine des planétariums : une avancée astronomique. *Atala*, (10), 143-155. Consulté sur [Atala10Abraham.pdf \(lycee-chateaubriand.fr\)](#).
- Acker, A. (2009). Planetariums, theatres of the Universe [communication]. *Actes du symposium IAU 260*, 19-23 janvier 2009, Paris, 465-474. Consulté sur <http://dx.doi.org/10.1017/S1743921311002687>.
- Bertin, J. (2013). *Sémiologie graphique. Les diagrammes, les réseaux, les cartes*. Éditions de EHESS, coll. « Les réimpressions ».
- Bowman, D. A., & Hodges, L. F. (1999). Formalizing the Design, Evaluation, and Application of Interaction Techniques for Immersive Virtual Environments. *Journal of Visual Languages & Computing*, 10(1), 37-53. Consulté sur <https://doi.org/10.1006/jvlc.1998.0111>.
- Coquillart, S., Grosjean, J., & Paljic, A. (2003). Interaction 3D : paradigmes et métaphores. Dans P. Fuchs, *Le Traité de la réalité virtuelle*. Presses de l'École des Mines de Paris.
- Davallon, J. (2000). *L'Exposition à l'œuvre. Stratégies de communication et médiation symbolique*. L'Harmattan, coll. « Communication et civilisation ».
- Fuchs, P. (2018). *Théorie de la réalité virtuelle. Les véritables usages*. Presses de l'École des Mines de Paris.
- Groupe μ (1992). *Traité du signe visuel. Pour une rhétorique de l'image*. Seuil, coll. « La couleur des idées ».

- Jeanneret, Y. (2019). Recouvrir à la démarche sémio-communicationnelle dans l'analyse des médias. *Médias et médiatisation*, 105-135. Consulté sur <https://doi.org/10.3917/pug.lafon.2019.01.0105>.
- Lecourt, D. (1996). L'injonction technologique. *Culture & recherche*, (56), 6-8. Ministère de la Culture. Consulté sur [Culture et recherche n° 56, janvier 1996](#).
- Luminet, J.-P. (2006). *Le destin de l'Univers, II*. Gallimard.
- Mine, M. R. (1995). *Virtual Environment Interaction Techniques* [rapport technique]. Université de Caroline du Nord (États-Unis). Consulté sur <https://dl.acm.org/doi/book/10.5555/897820>.
- Ouramdane, N., Otmane, S., & Mallem, M. (2009). Interaction 3D en réalité virtuelle. État de l'art. *Revue des Sciences et Technologies de l'Information*, 28(8), 1017-1049. DOI 10.3166/tsi.28.1017-1049.
- Riazuelo, A. (2016). *Les trous noirs. À la poursuite de l'invisible*. De Boeck Supérieur, coll. « Sciences et plus ».
- Ruiz, L., & Acker, A. (2006). Les systèmes de projection des planétariums : de l'optomécanique au numérique. *La Lettre de l'OCIM*, (108), 14-19. Consulté sur <https://doi.org/10.4000/ocim.1316>.
- Triquet É. (1993). *Analyse de la genèse d'une exposition de science. Pour une approche de la transposition médiatique* [thèse de doctorat dirigée par J. Davallon]. Université Claude-Bernard Lyon 1, 490 p.