

Zemax OpticStudio

Simulations optiques pour les détecteurs d'ondes gravitationnelles

Design, optimisation, analyses, tolérancement et compréhension

Christelle Buy

1. Contexte



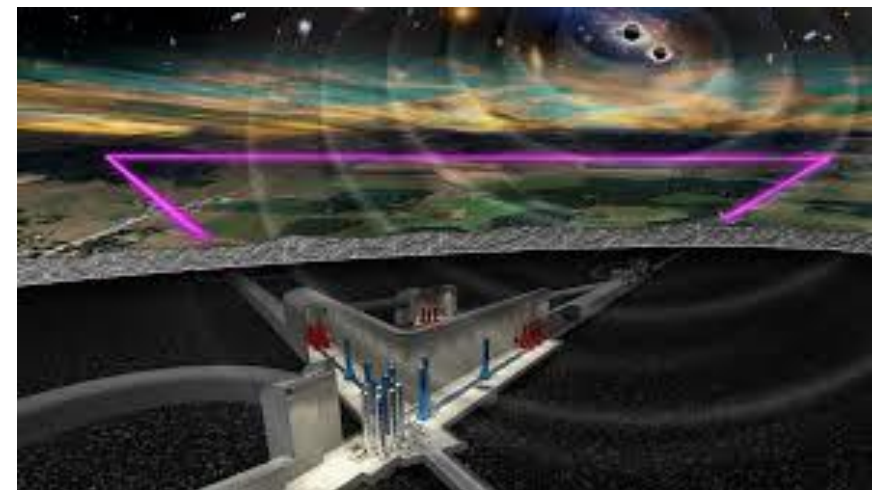
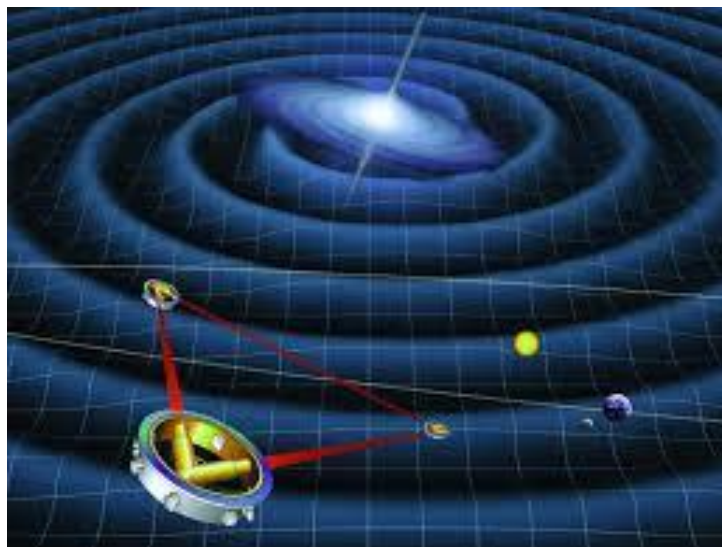
Virgo

En prise de données et phase d'upgrade



LISA

Post-adoption
Phase B2 – co-ingénierie/construction



Einstein Telescope

En cours de définition – amélioration
considérable des détecteurs terrestres



G. Gemme – LVK sept. 2023

WHAT WENT WRONG?



- The current crisis is, in part, a result of choices made in the past (marginally stable cavities) and the sum of different causes at different levels
- The internal discussion has already begun. Some "scattered" considerations:
 - Competition with other projects
 - Insufficient hiring/replacement of retiring staff in some labs with crucial hardware responsibilities → too many single points of failure
 - Good results in O2 and O3 could have contributed to put the limitations associated with marginally stable recycling cavities in the background and no clear showstopper for going on with MSRC
 - Insufficient effort in simulations to predict the behavior of complex systems and providing guidance for commissioning
 - Insufficient effort in QA/QC and system engineering
 - Issues in the current organization/management
- EGO Council will set up a committee to review the current Virgo/EGO organization

C. Buy – Rencontres PIGES sept. 2023



R&Ds – en cours et en préparation

- Lumière parasite
 - o Facteur limitant des détecteurs d'ondes gravitationnelles
 - Développement d'outils permettant des calculs plus précis – mesures et contrôle - Institut Fresnel/APC
- Simulations optiques
 - o Nécessité de comprendre, contrôler, améliorer les détecteurs d'ondes gravitationnelles
 - o Mettre en œuvre des outils de simulations fiables et robustes
 - o Simulations linéaires : étudier les effets linéaires, les effets opto-mécaniques, l'impact des fortes puissances
 - o Time-domain simulations pour étudier les bruits de contrôles
 - o 3D simulation
 - Communauté française qui se met en place sur ce domaine – APC/L2IT/LMA/LAPP

L2IT-APC-ARTEMIS-LPCCaen-CNES – Réunions régulières « Simulations optiques »

Pages / ... / IDS Optical Model Analytics

2025-05-16-Réunion Simulations optiques

Created by Buy Christelle (CNRS), last modified on May 16, 2025
 Scroll page details

Participants + diffusion

@ Buy Christelle (CNRS)

@ Halloin Hubert (APC)-EXT

@ Vincent Maxime (APC)-EXT

@ Laporte Matthieu (APC)-EXT

@ Phuong Eric (APC)-EXT

@ Arguel Romain

@ Lemiere Yves (LPC Caen)-EXT

Yohann Brelet (LPC Caen)

@ Llorca-Cejudo Roger

@ Mas Guillaume

@ Riviere Emmanuelle

@ Nardello Marco (ARTEMIS)-EXT

@ Lintz Michel (ARTEMIS)-EXT



Simulations optiques : sujet majeur et critique pour les détecteurs terrestres et spatiaux!

- Design de cavités interférométriques (Virgo, ET)
- Design de bancs optiques complexes (Virgo, LISA, ET)
- Optimisation des performances (Virgo, LISA, ET)
- Analyses : lumière diffusée, réflexions parasites, performances, air-vide, etc (Virgo, LISA, ET)
- Tolérancement : lien avec l'Architecture Mécanique et Thermique – aménagement – contrôleurs (Virgo, LISA, ET)
- Compréhension fine des détecteurs : ex. problème d'astigmatisme sur Virgo – bruit mystérieux sur Virgo – évaluation des impacts TTL (WFE) sur LISA

Défis en simulations optiques

- Design de cavités interférométriques (Virgo, ET)
- Design de bancs optiques complexes (Virgo, LISA, ET)
- Optimisation des performances (Virgo, LISA, ET)
- Analyses : lumière diffusée, réflexions parasites, performances, air-vide, etc (Virgo, LISA, ET)
- Tolérancement : lien avec l'Architecture Mécanique et Thermique – aménagement – contrôleurs (Virgo, LISA, ET)
- Compréhension fine des détecteurs : ex. problème d'astigmatisme sur Virgo – bruit mystérieux sur Virgo – évaluation des impacts TTL (WFE) sur LISA



Plusieurs outils à disposition, dont AZOS : Ansys Zemax OpticStudio



2. Présentation d'AZOS

Logiciel complet 3D de conception optique

2 modes de fonctionnement



Sequential ray tracing

- Les rayons sont tracés selon une séquence pré-définie de surfaces, ils n'interceptent chaque surface qu'une seule fois, et transite d'un point objet vers un point image.
- Ce mode permet une analyse rapide en terme de temps de calcul.
- Il est extrêmement utile pour la conception de systèmes optiques, le tolérancement et l'optimisation de performances.



Non-sequential ray tracing

- Ce mode permet aux rayons de se propager à travers les composants optiques dans n'importe quel ordre et d'être divisés, diffractés, diffusés et réfléchis vers un objet qu'ils ont déjà rencontré.
- Cette propriété rend le mode non séquentiel idéal pour l'analyse de la lumière parasite, de la diffusion et de l'éclairage pour tout type de système.
- Les détecteurs peuvent être modélisés comme des surfaces planes, des surfaces courbes et même des volumes tridimensionnels.

Lancer de rayons

- Utilisation d'algorithmes avancés de lancer de rayons afin de simuler le comportement de la lumière au sein d'un système optique (complexe).
- Analyse et optimisation de performances

Conception de lentilles, miroirs et systèmes optiques complexes

- Facilite la conception de systèmes optiques complexes, y compris l'optimisation des formes, des matériaux et des revêtements des lentilles/miroirs pour obtenir les caractéristiques d'imagerie souhaitées

Tolérancement

- Analyse de tolérance pour évaluer l'impact des variations de fabrication sur les performances du système optique, assurant ainsi que les conceptions sont robustes et manufacturables

Optimisation

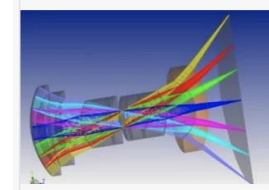
- Ansys Zemax OpticStudio inclut des outils d'optimisation pour ajuster automatiquement les paramètres de conception afin de répondre aux critères de performance spécifiés, aidant les ingénieurs à trouver la meilleure solution pour leurs systèmes optiques

Inter-opérabilité

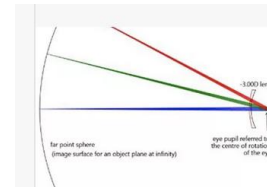
- Ansys Zemax OpticStudio est interopérable avec d'autres outils d'ingénierie, permettant une intégration transparente dans le processus global de conception et de développement du produit

Simulation multiphysique

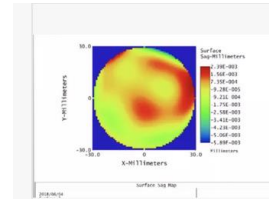
- Simulation simultanément possible de multiples phénomènes physiques, tels que les effets thermiques sur l'optique, assurant une compréhension plus complète des performances réelles



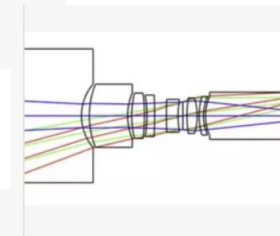
Lancer de rayons



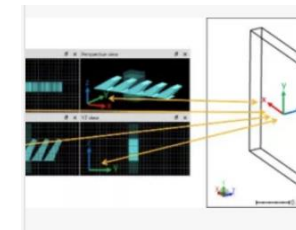
Conception de lentille



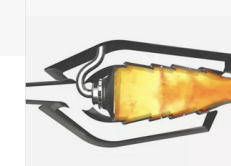
Analyse de tolérance



Optimisation



Interopérabilité



Simulation multiphysique

Impact du vide_sequentiel.ZOS - Zemax OpticStudio 24.1 Premium - L118774

File Setup Analyze Optimize Tolerance Libraries Part Designer Programming STAR Help

System Explorer

Update: All Windows

- Aperture
- Fields
- Wavelengths
- Environment
- Polarization
- Advanced
- Ray Aiming
- Material Catalogs
- Title/Notes
- Files
- Units
- Cost Estimator

System Explorer

Update: All Windows

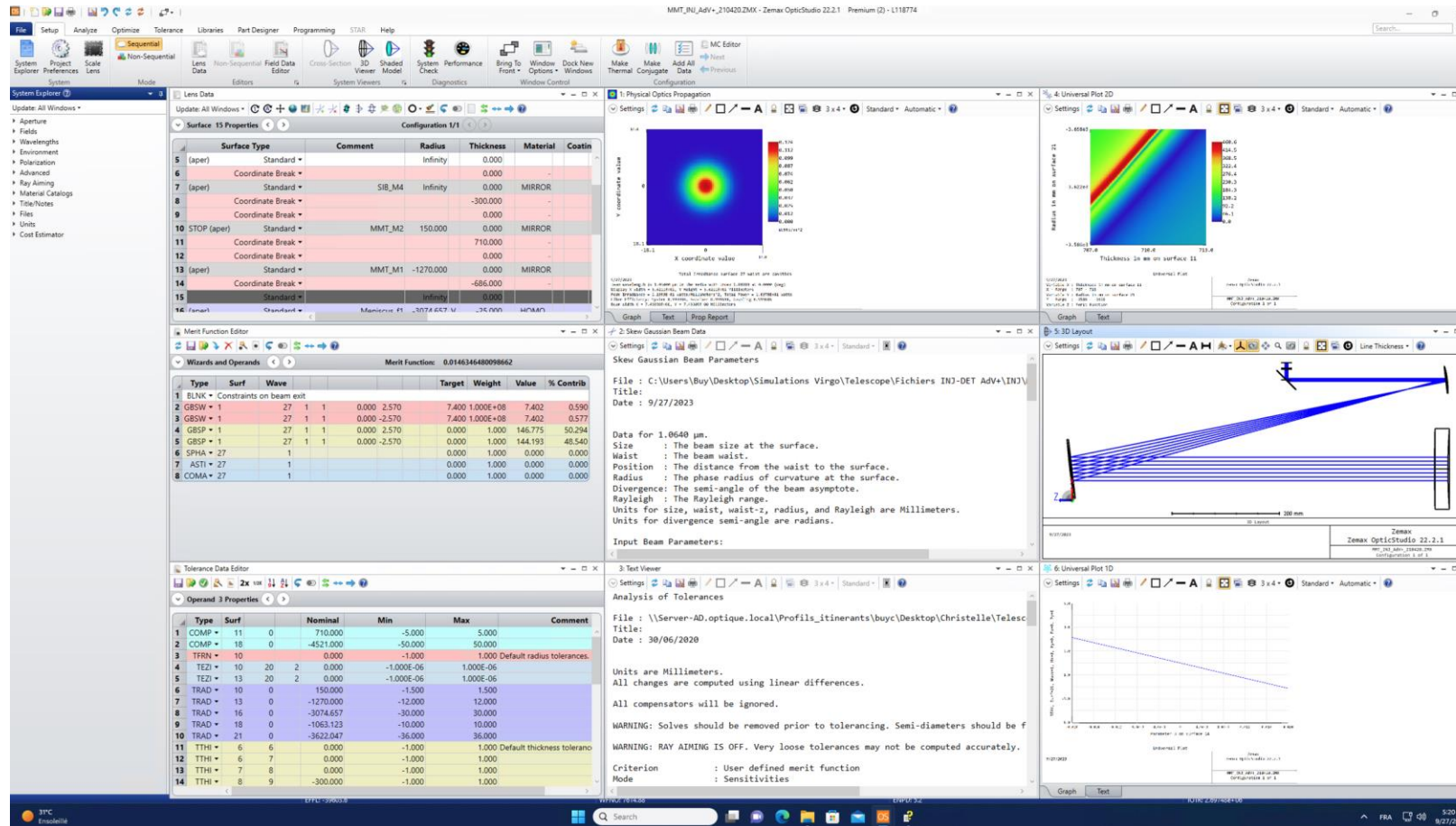
Surface 1 Properties

Configuration 1/1

	Surface Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coating	Semi-Diameter	Chip Zone	Mech Semi-Dia	Conic	TCE x 1E-6
0	OBJECT	Standard	Infini...	1.00000...			0.0000000	0.0000...	0.0000000	0.0...	0.0000...
1	Coordinate Break			0.0000000	-		0.0000000	-	-	-	-
2	STOP (aper)	Standard	Infini...	10.0000...	SILICA		25.4000000 U	0.0000...	25.4000000	0.0...	-
3	(aper)	Standard	Infini...	50.0000...			25.4000000 U	0.0000...	25.4000000	0.0...	0.0000...
4	Coordinate Break			0.0000000	-		0.0000000	-	-	-	-
5	Coordinate Break			0.0000000	-		0.0000000	-	-	-	-
6	IMAGE	Standard	Infini...	-			10.0000000 U	0.0000...	10.0000000	0.0...	0.0000...

EFFL: 1e+10 WFOV: 10000 ENPD: 2 TOTR: 60

3. Utilisation dans les détecteurs d'OG



- Définition du design optique
- Optimisation: limitation des aberrations, compacité, facilité d'alignement et d'intégration (fonction de mérite)
- Propagation physique: paramètres gaussiens, diffraction
- Efficacité de couplage
- Tolérancement: spécifications et design mécanique, actuations, courses



- SIB1/SDB1/SPOB/SNEB/SWEB télescopes pour AdV
- SNEB/SWEB télescopes pour les O5/masses de test »larges «
- SIB1/SDB1/SPRB télescopes pour l'upgrade O5 – cavités stables

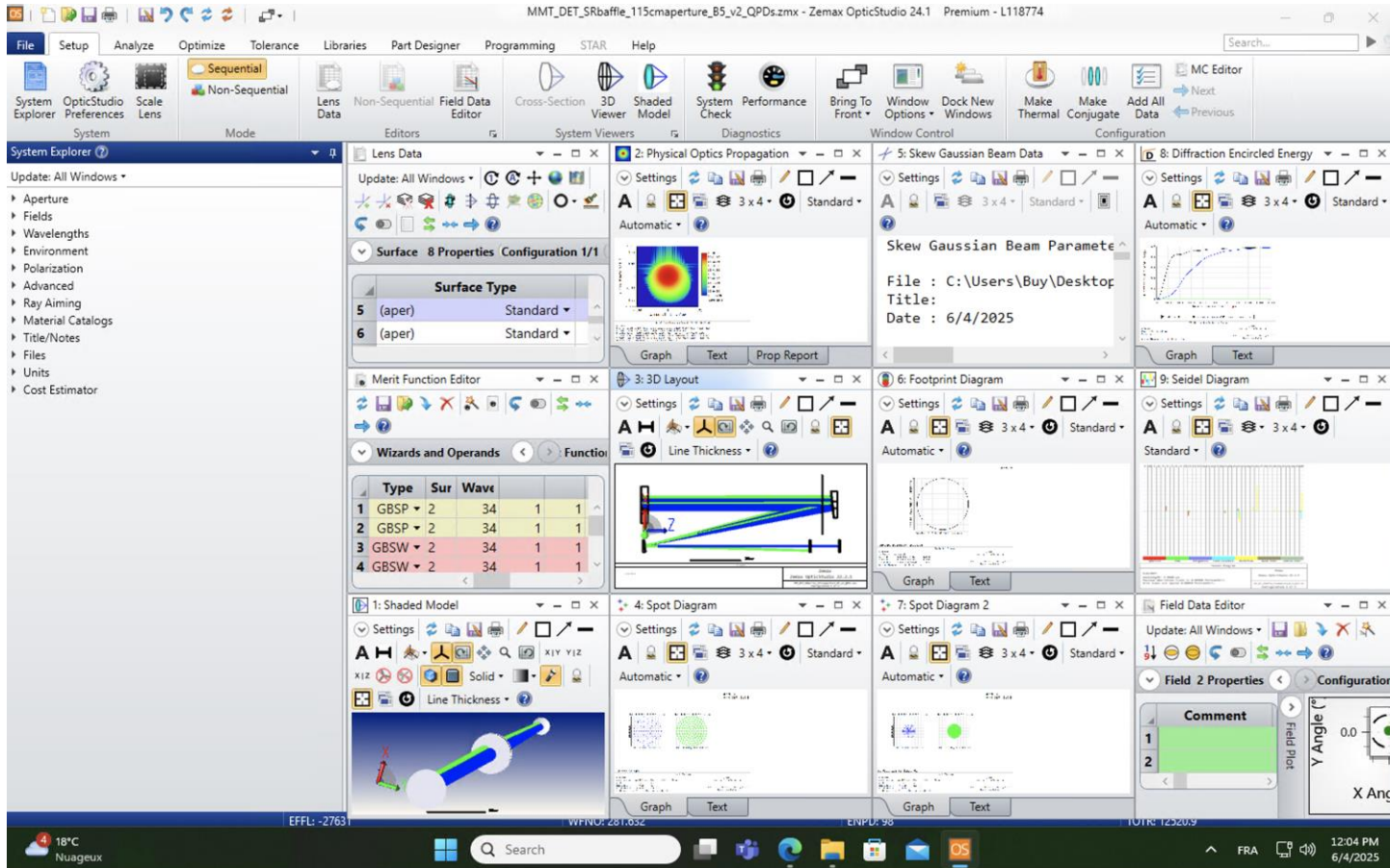
L2IT – APC – LAPP



- Design optique et comparaison avec d'autres modèles (matrices ABCD) : taille de waist, position de waist, AOI des miroirs
- Optimisation : compensation de l'astigmatisme (fonction de mérite), longueur des bras, AOI
- Analyses et propagation physique : aberrations, paramètres gaussiens, front d'onde, phase de Gouy
- Efficacité de couplage



- Préparation et cross-check du design des cavités stables pour AdV upgrade O5

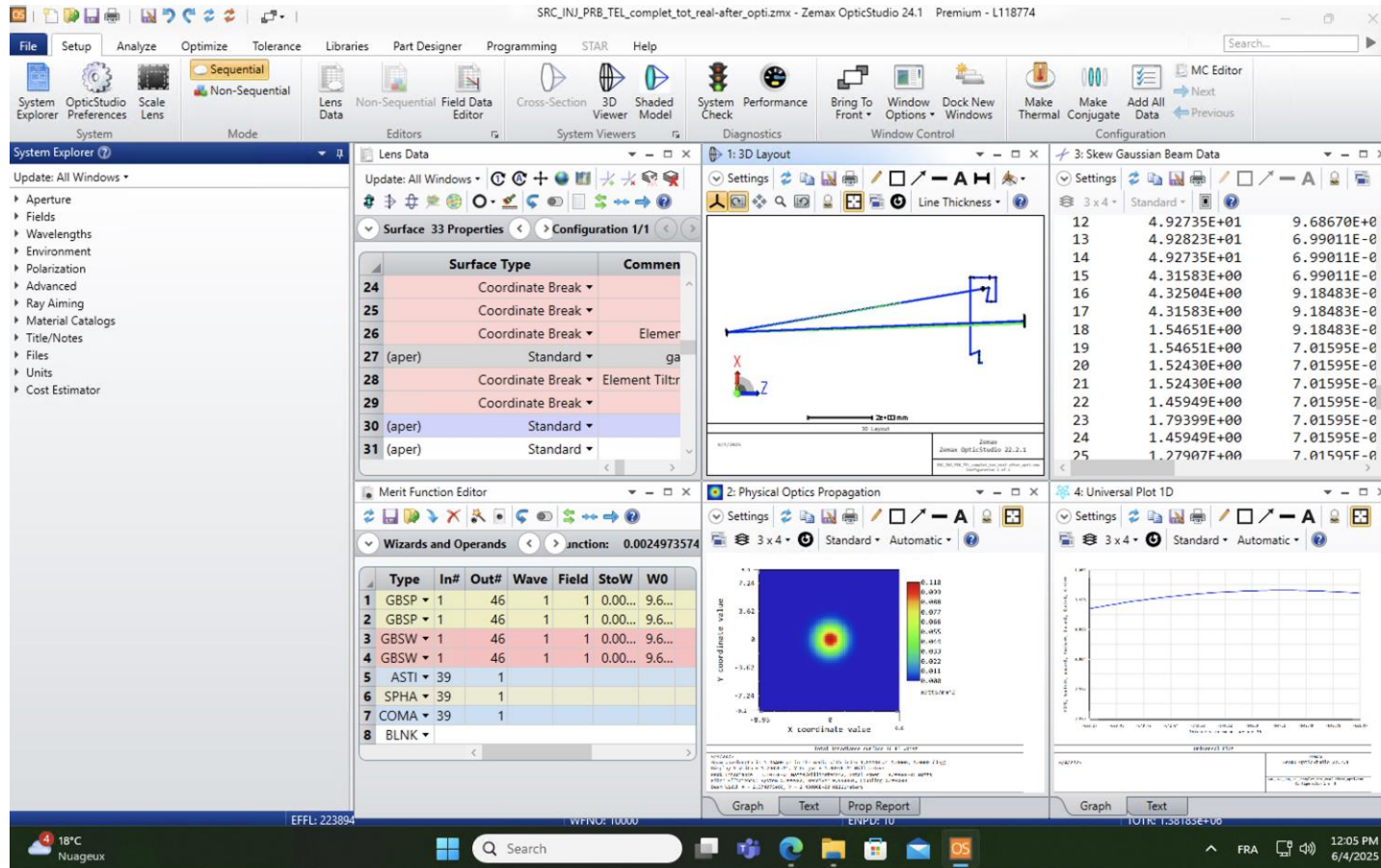


- Définition de la position optimale et des ouvertures min/max
- Effets de la diffraction
- Analyses et propagation physique : aberrations, paramètres gaussiens, front d'onde



- Impact de la dimension du baffle SR sur Virgo/O4
- Position de baffles sur le banc SDB1

L2IT – APC - LAPP



APC – L2IT - LAPP

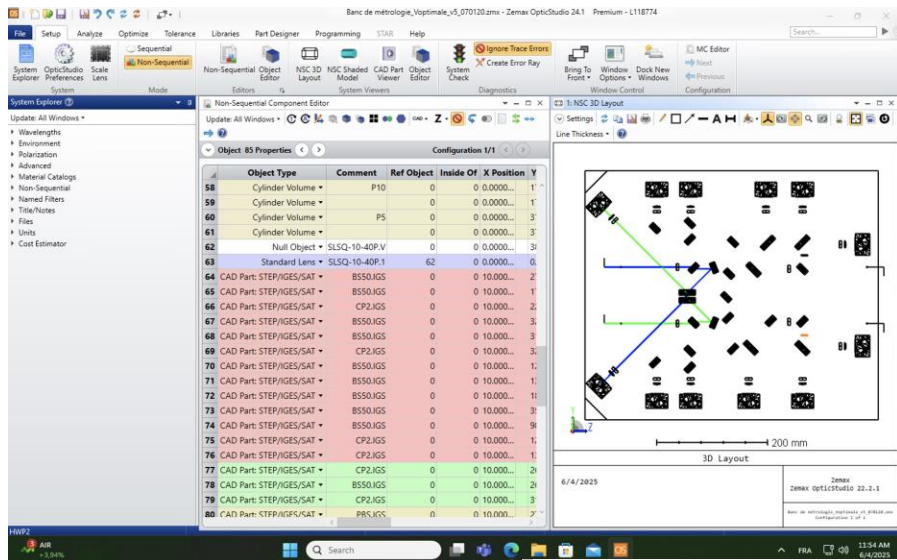
- Définition du design optique : contraintes d'espaces
- Optimisation : position des optiques, RoC des optiques (fonction de mérite), AOI
- Analyses et propagation physique : aberrations, paramètres gaussiens, front d'onde
- Efficacité de couplage



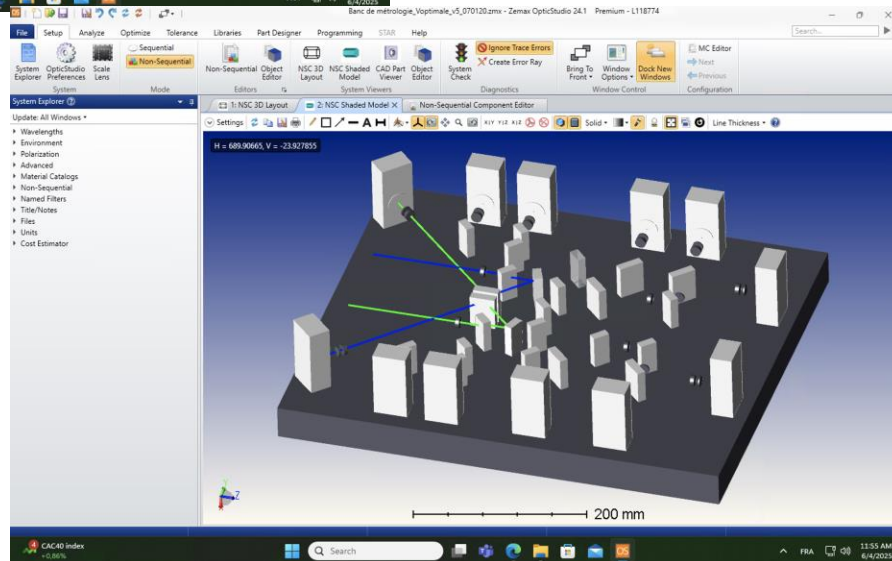
➤ Définition des bancs optiques INJ/SRB pour l'upgrade O5



Simulations de bancs complets et complexes



APC – L2IT - CNES



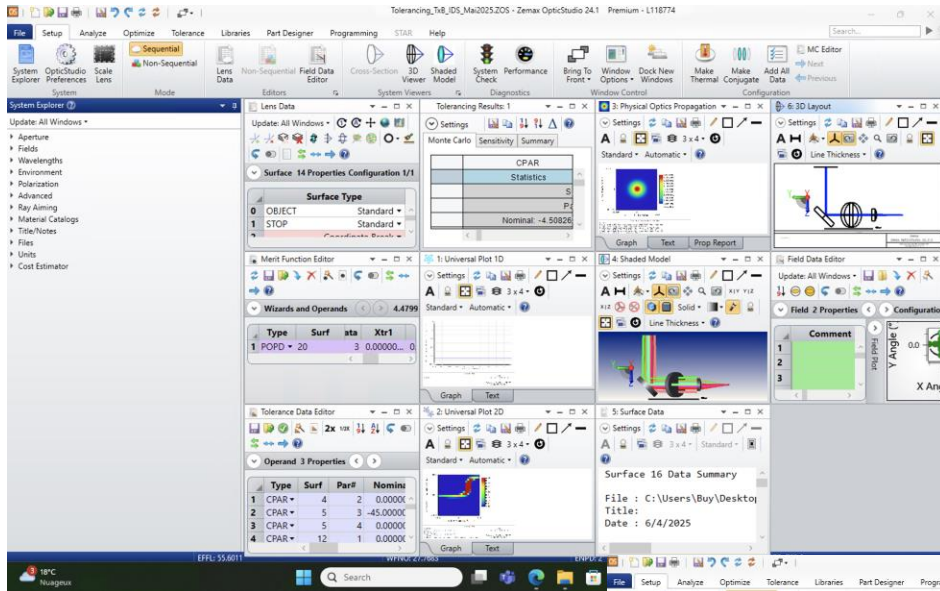
- Définition du design optique : contraintes d'espace
- Optimisation : position des composants, longueur de bras des ITF, AOI
- Analyses de faisceaux en non-séquentiel : limitation de Zemax à la propagation physique
- Faisceaux parasites/ghosts



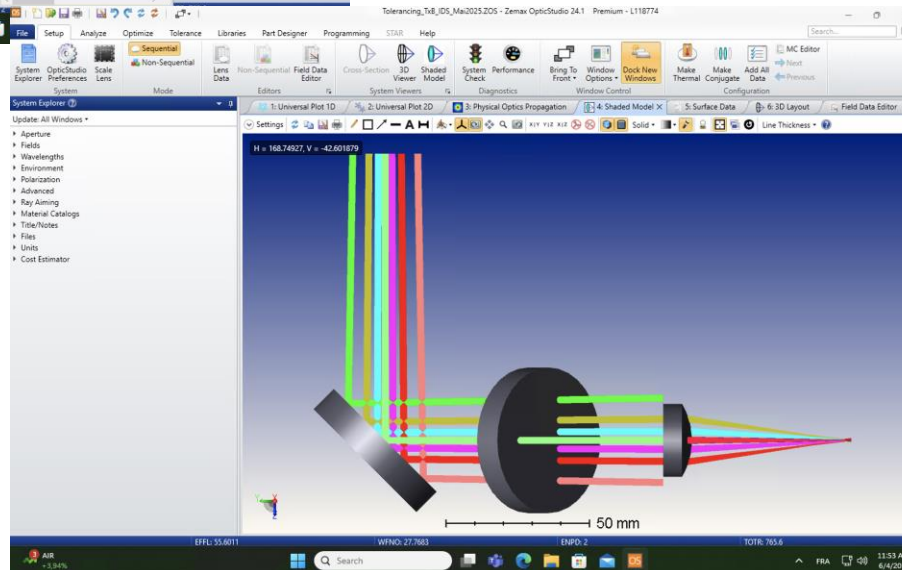
- Définition du banc ZIFO (Zerodur InterFerOmeter)
- Préparation de l'OGSE BSim



Design de beam dump



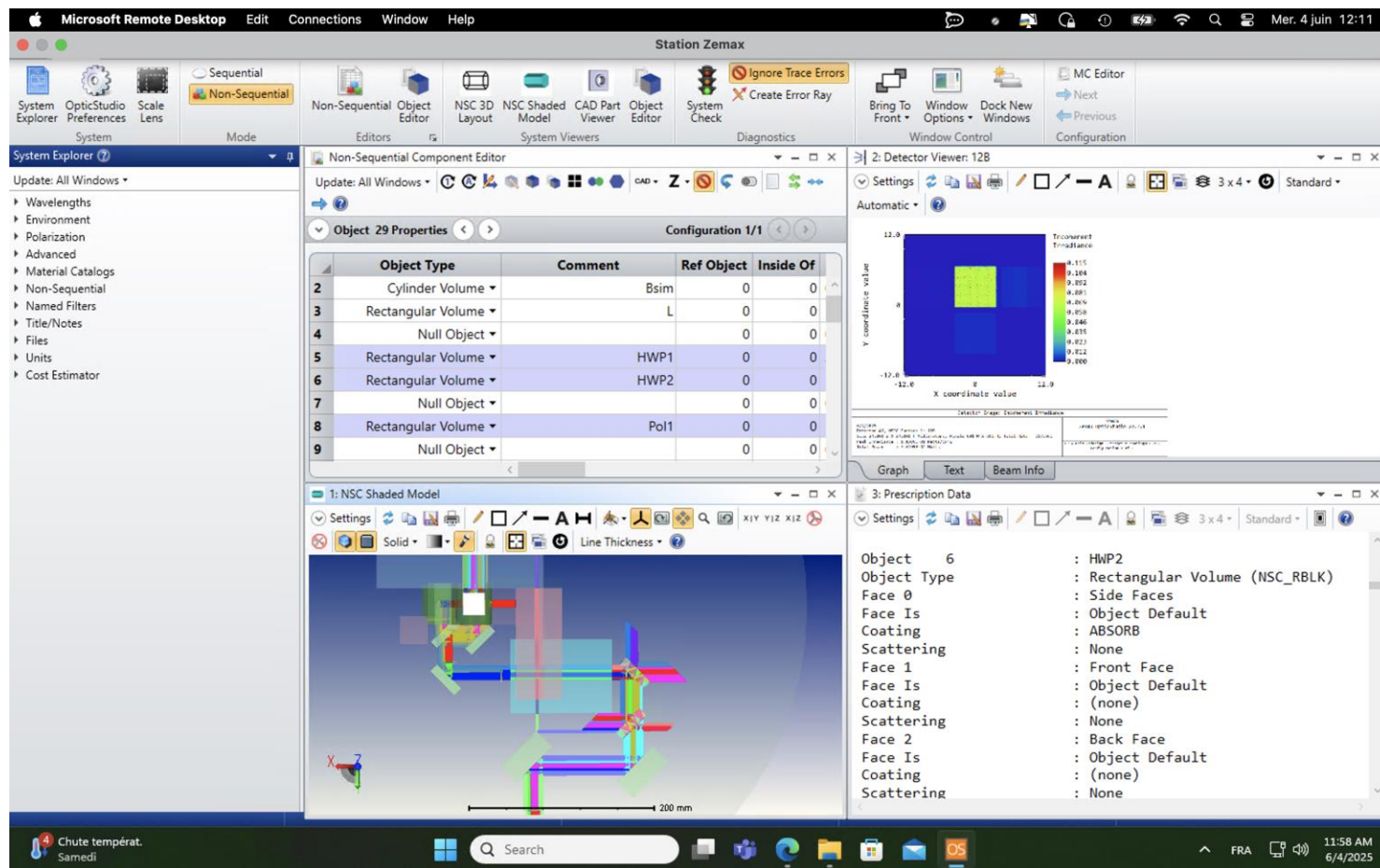
L2IT – APC – ARTEMIS - CNES



- Définition du design optique
- Optimisation : position des composants, traitement des composants
- Analyses et propagation physique : aberrations, paramètres gaussiens, front d'onde
- Tolérancement : lien avec l'aménagement mécanique, l'encombrement, la course des actuations



➤ Beam dump Haute Puissance en sortie de BSim/OB



- Trajet des ghosts : évaluation de l'impact des coatings
- Optimisation des composants pour limiter l'impact : épaisseur, position
- Analyse du recouvrement faisceau principal/faisceaux parasites
- Cross-check avec d'autres méthodes analytiques

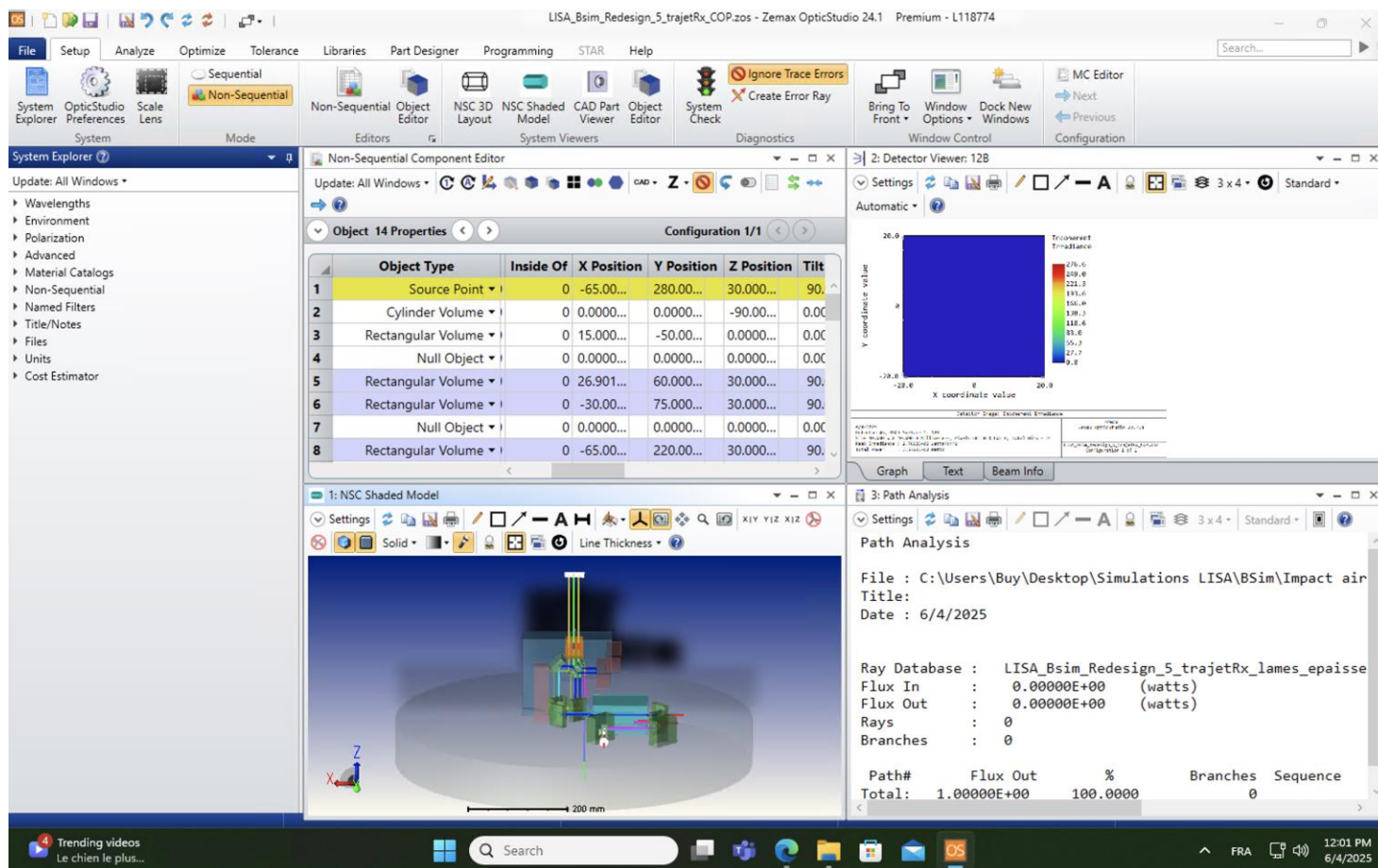


➤ Définition du banc BSim et optimisation

L2IT – APC - CNES



Analyse de l'impact air-vide



- Calcul des modifications de trajet optique en air et sous vide
- Analyse : impact des épaisseurs des composants

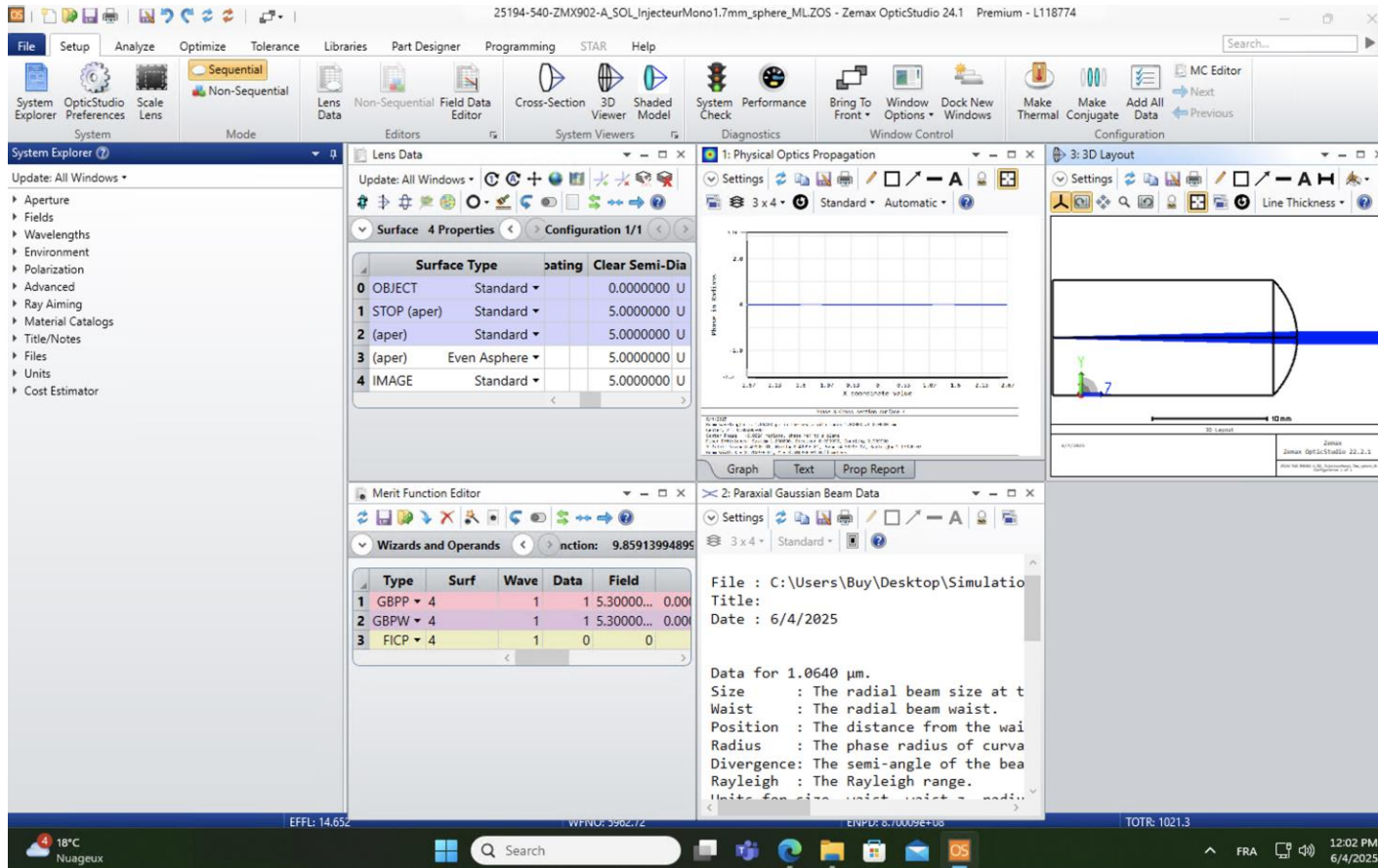


➤ Préparation du banc BSim et optimisation

L2IT – APC - CNES



Design d'injecteurs monolithiques

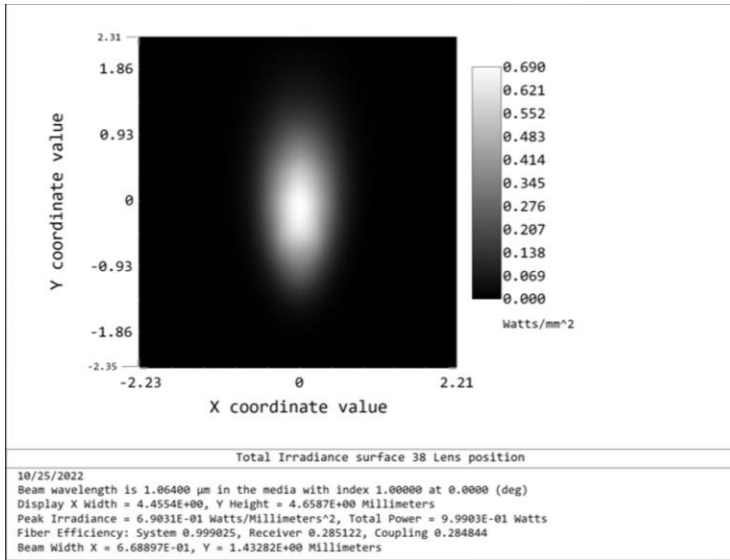


- Design optique : analyse et comparaison de différents choix (co-ingénierie industrielle et partenariat UKATC)
- Optimisation : compensation des aberrations, stabilité, impact thermique, impact air-vide
- Analyses et propagation physique : aberrations, paramètres gaussiens, front d'onde
- Efficacité de couplage

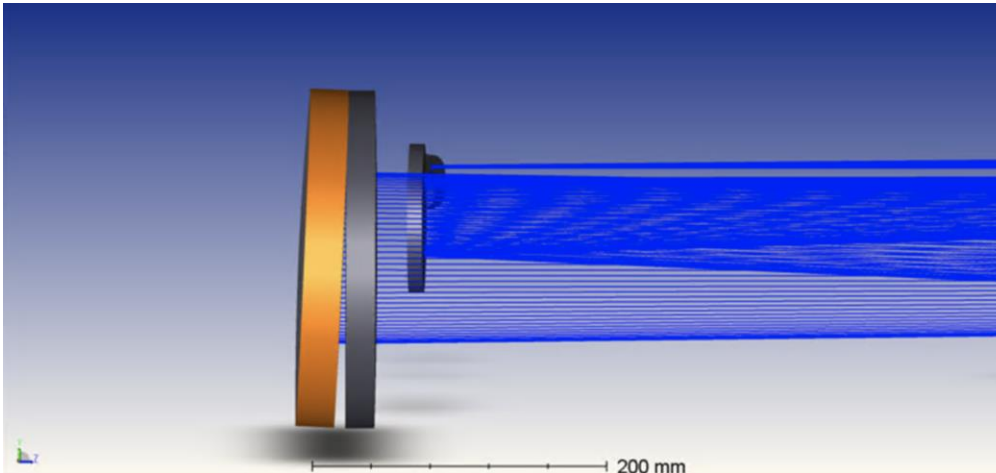


➤ Préparation du design des injecteurs du BSim

APC – L2IT - CNES



L2IT – APC - LAPP



- Analyse d'anomalies : aberrations, désalignements, caractéristiques de paramètres optiques et mécaniques
- Compréhension des phénomènes et résolution



➤ Astigmatisme B4 Virgo

- Définition de systèmes optiques simples et complexes : télescopes à 2 miroirs, beam dump, cavités optiques
 - Simulations de bancs optiques complexes et complets
 - Optimisation des performances : définition de fonction de mérite, utilisation d'operand
 - Tolérancement : analyse Monte Carlo globale, études indépendantes, lien avec AMT pour les aménagements - l'équipement mécanique - la stabilité thermique/vibratoire
 - Analyse des impacts air-vide
 - Simulations de lumière diffusée / ghosts / réflexions parasites
 - Compréhension de détecteurs
-
- Préparer le travail et les analyses pour les détecteurs futurs : Einstein Telescope
 - Limitation de l'outil sur la propagation physique en mode non-séquentiel : lien avec des codes annexes (Python), utilisation de multi-configuration