Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería Industrial

Diseño de Máquinas y Vehículos

Diseño de una Cámara de Vacío para medidas acopladas de Campos Térmicos y de Desplazamientos

Tomo 1/2

Andrés Malo Estepa

Junio 2013

Director: Eric Charkaluk
Ponente: Jesús Cuartero Salafranca

Departamento de Ingeniería Mecánica
Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Zaragoza

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería Industrial

Diseño de Máquinas y Vehículos

Diseño de una Cámara de Vacío para medidas acopladas de Campos Térmicos y de Desplazamientos

Andrés Malo Estepa

Junio 2013

Director: Eric Charkaluk
Ponente: Jesús Cuartero Salafranca

Departamento de Ingeniería Mecánica
Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Zaragoza

Diseño de una Cámara de Vacío para medidas acopladas de Campos Térmicos y de Desplazamientos

RESUMEN

Este proyecto se realiza con el Departamento de Mecánica de la École Centrale de Lille y el Laboratorio de Mecánica de Lille (ambos en Francia).

El estudio de los mecanismos de deterioro en el interior de los materiales reviste una especial dificultad, en tanto que no es posible aproximarse al estado real de el material en su seno. No obstante, es conocido que los mecanismos de generación de fisuras comienzan por una separación de las fronteras de grano del material (caso de los metales o cerámicas) o de los elementos que constituyen al material (caso de los materiales compuestos). La generación de fronteras libres en el seno del material conlleva la aparición de una energía ligada a las superficies libres, que se traduce en ligeros aumentos de temperatura. En el caso de los metales, estos incrementos de temperatura pueden ser observados mediante una observación rigurosa con captación de infrarrojos. La comparación del campo térmico con el campo de desplazamientos - medido por correlación de imágenes - a que se somete al material permite establecer hipótesis acerca del estado de degradación del material. No obstante, la escasa magnitud de las variaciones de temperatura hace que su medida sea difícil, debiendo confinar el ensayo en un espacio aislado del exterior, en una atmósfera de vacío, donde no existan corrientes de convección natural que puedan perturbar la medida, ni radiación externa alguna. Dentro de dicho vacío se dispondría de la muestra a evaluar y del dispositivo de ensayo: una máquina de tracción-compresión a pequeña escala.

Los objetivos de este proyecto son:

- Realizar el diseño de una cámara de vacío que permita la toma de datos para el experimento descrito anteriormente, tomando como base un trabajo anterior que establece la estructura general del experimento.
- Evaluar la factibilidad del diseño, previendo los procesos de fabricación y montaje, así como los costes derivados de la construcción de la cámara de vacío.
- Evaluar el estado de la micromáquina de tracción-compresión junto con el personal de laboratorio, y efectuar los reglajes y puesta a punto para el experimento.
- Elaboración de una memoria global del trabajo, a entregar al Departamento de Mecánica de la École Centrale de Lille y Laboratorio de Mecánica de Lille (Francia).

Este proyecto se realizó entre Mayo y Septiembre de 2012 en el Departamento de Mecánica de la École Centrale de Lille. Quiero agradecer expresamente a mi tutor, Eric Charkaluk, el haberme ofrecido este proyecto, así como por su apoyo y la gran libertad a la hora de realizar el diseño de la cámara, que ha enriquecido mi formación como ingeniero.

Deseo extender mi agradecimiento a Christophe Niclaeys y a François Lesaffre, por haberme dado la oportunidad de vivir la experiencia "de la experimentación" durante el calibrado de la micromáquina - con todos los problemas que fueron apareciendo -, así como por su entera disponibilidad para discutir cualquier aspecto del proyecto y sus aportaciones, que me han permitido encontrar soluciones mucho más eficientes de lo que había imaginado en un principio.

Gracias también a Jean-François Witz, por sus aclaraciones acerca de la óptica y el desarrollo del experimento, a Laurent Patrouix y al Taller de Mecánica de la École Centrale de Lille, especialmente a Alain Deparcy, por sus consejos acerca de la fabricación y la factibilidad de mis ideas.

Quiero expresar mi agradecimiento a Jesús Cuartero, por su atención desde España a lo largo del desarrollo del proyecto y su disponibilidad para revisar cualquier aspecto relevante.

Finalmente, gracias a los que me han acompañado a lo largo de esta experiencia: mi familia "lilloise", Albert, Anna, Laia, Belén, los Pablos... Y sobre todo a mi familia española, siempre presente, que siguió el devenir de "la caja" por Skype cada semana, y a mis abuelos, presentes y ausentes, a los que este proyecto hace casi más ilusión que a mí mismo.

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería Industrial

Diseño de Máquinas y Vehículos

Diseño de una Cámara de Vacío para medidas acopladas de Campos Térmicos y de Desplazamientos

Andrés Malo Estepa

Junio 2013

Director: Eric Charkaluk
Ponente: Jesús Cuartero Salafranca

Departamento de Ingeniería Mecánica
Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Zaragoza

Índice

Resumen **III**

Índice de figuras **V**

1. Introducción **1**
1.1. La École Centrale de Lille y el Laboratoire de Mécanique de Lille 1
1.2. Antecedentes 2
1.2.1. Tesis Doctoral de Laurence Bodelot 2
1.2.2. Proyecto IMPACT de Romain Desbats 3
1.3. Alcance del Proyecto y Condiciones 4
1.3.1. Condiciones Técnicas 4
1.3.2. Condiciones de Utilización 5
1.3.3. Condiciones de Fabricación 5

2. Plan de Diseño **7**
2.1. Estado del Arte 7
2.1.1. Diseño del Experimento 7
2.1.2. Materiales Disponibles 9
2.2. Propuesta de Soluciones 11
2.2.1. Reflexión sobre el Estado del Arte 11
2.2.2. Diseño de la Cámara 12
2.2.3. Evaluación de Materiales a emplear 14
2.3. Solución Propuesta 19
2.3.1. Arquitectura de la Cámara 19
2.3.2. Elección de los materiales 20
2.4. Validación de la Solución 22
2.4.1. Estudio de la Resistencia Mecánica 23
2.4.2. Estudio del Comportamiento Óptico 25
2.4.3. Evaluación de las Condiciones Técnicas 26

3. Plan de Fabricación **29**
3.1. Obtención de las Partes 29
3.1.1. Corte 29
3.1.2. Mecanizado 30
3.2. Soldadura de los Componentes 32
3.2.1. Cuerpo de Aluminio 33

3.2.2. Tapa de Acero . . . 34
3.3. Ensamblaje de la Cámara de Vacío . . . 35
3.4. Montaje de los Anexos . . . 35
3.4.1. Pórtico . . . 36
3.4.2. Raíles de Guiado . . . 36
3.4.3. Sistemas de Control y Servicio . . . 37

4. Estimación Económica **39**

5. Conclusiones **41**
5.1. Acerca de la Cámara . . . 41
5.2. Acerca del Experimento . . . 42
5.3. Consideraciones Finales . . . 42

Bibliografía **43**

A. Desviaciones Angulares **45**
A.1. Principio Geométrico . . . 45
A.2. Cálculo de las Desviaciones . . . 46

B. Cálculo de la Unión por Bulones **49**
B.1. Fundamentos Técnicos . . . 49
B.2. Cálculo de la Unión . . . 50
B.2.1. Aproximación mediante Elementos Finitos . . . 50
B.2.2. Cálculo Teórico . . . 52

C. Evaluación a Abolladura de las paredes **55**
C.1. Introducción . . . 55
C.2. Cálculo de la Cámara . . . 56

D. Estudio de reducción de peso **59**

E. Ensayos y Puesta a Punto **61**
E.1. Puesta a punto de la Micromáquina . . . 61
E.1.1. Características . . . 61
E.1.2. Calibrado del captador LVDT . . . 62
E.1.3. Calibrado de la Galga . . . 64
E.1.4. Problemáticas encontradas . . . 66
E.1.5. Estado Actual . . . 68
E.2. Calibrado del Montaje . . . 69
E.2.1. Evaluación del Vacío . . . 69
E.2.2. Calibrado Óptico . . . 69

Índice de figuras

1.1. Diseño del experimento de la Dra. Bodelot. 2
1.2. Estructura del experimento de Romain Desbats. 3

2.1. Estructura del experimento de la Dra. Bodelot. 8
2.2. Estructura del experimento de Romain Desbats. 8
2.3. Montaje interior del experimento de Romain Desbats. 9
2.4. Pórtico actual disponible en el laboratorio. 10
2.5. Micromáquina de ensayos de tracción-compresión. 11
2.6. Propuesta de arquitectura modular. 13
2.7. Propuesta de arquitectura integral. 14
2.8. Análisis de la pared en PMMA. 16
2.9. Análisis de la tapa en PMMA. 16
2.10. Análisis de la tapa en aluminio. 17
2.11. Análisis de la tapa en acero. 18
2.12. Diseño propuesto para la cámara de vacío. 20
2.13. Piezas de la tapa diseñada. 21
2.14. Diseño final de la cámara de vacío. 22
2.15. Desplazamientos sobre los elementos base finales. 24
2.16. Tensiones sobre los elementos base finales. 25
2.17. Esquema de la óptica de la cámara. 27

3.1. Piezas de aluminio sobre una placa en bruto. 30
3.2. Pared lateral de la cámara. 31
3.3. Puerta de acceso a la cámara. 32
3.4. Despiece del alojamiento del espejo dicroico. 33
3.5. Detalle de los chaflanes para soldar. 34
3.6. Detalle de soldadura en el alojamiento del espejo. 35
3.7. Evolución del diseño del pórtico. 36
3.8. Dispositivos de guiado. 37

A.1. Esquema del alojamiento del espejo. 46
A.2. Esquema del alojamiento bajo carga. 47
A.3. Tabla de desviaciones angulares en la tapa original. 48
A.4. Tabla de desviaciones angulares en la tapa diseñada. 48

B.1. Simulación de una junta tórica. 51
B.2. Simulación del plano de junta según el diseño. 52

B.3. Esquema de esfuerzos en la unión por bulones. 53

C.1. Tabla de esfuerzos críticos a abolladura. 56
C.2. Tabla de espesores críticos a abolladura. 57

D.1. Tabla de peso para fabricación mixta acero/aluminio. 60
D.2. Tabla de peso para fabricación en acero. 60

E.1. Captador de desplazamientos LVDT. 63
E.2. Gráfica de calibrado del sensor LVDT. 64
E.3. Galgas montadas sobre la máquina. 65
E.4. Probeta de aluminio calibrada por HBM. 65
E.5. Gráfica de dos ciclos de carga y descarga. 66
E.6. Gráfica comparativa de desplazamientos frente a deformaciones. 67

1. Introducción

1.1. La École Centrale de Lille y el Laboratoire de Mécanique de Lille

La Escuela Central de Lille (École Centrale de Lille) es una institución de enseñanza superior situada en el campus científico de Villeneuve d'Ascq, a escasos kilómetros de Lille (departamento del Norte, Francia). Es heredera de una rica tradición formativa que arranca en el antiguo Instituto Industrial del Norte (IDN), que nace a mediados del siglo XIX con el auge industrial del norte de Francia y de la vecina Bélgica, fundamentado en la minería del carbón, la siderurgia y la industria textil.

La oferta formativa de la École Centrale de Lille ha evolucionado desde las especialidades de tecnologías mecánicas y textiles de sus orígenes hasta una ofertada adaptada a las necesidades actuales, abandonando el textil y potenciando disciplinas de mayor proyección: electricidad, automática, producción, logística... Al mismo tiempo, la formación generalista de la École Centrale de Lille se enriquece con una especialización en el último año de sus estudios y los acuerdos con otras escuelas que permiten programas conjuntos de ingeniería y gestión (Skema).

En la actualidad, la École Centrale de Lille se encuentra inmersa en el proceso de adaptación de sus estudios al Espacio Europeo de Educación Superior (EEES), acogiendo cada año unos 200 estudiantes procedentes del concurso de acceso a las escuelas superiores de Francia. Poseedora de una gran reputación dentro de Francia, forma parte del grupo de Écoles Centrales ("Escuelas Centrales") junto a París, Lyon, Nantes, Marsella y Pekín. Además, comparte numerosos lazos tanto docentes como de investigación con las principales escuelas y universidades de la región (Escuela de Artes y Oficios ENSAM-Paris Tech, Minas de Douai, Polytech de Lille, etc.), con diversos actores industriales (asociación AIP-Primeca) y laboratorios de investigación (LML, Onera...).

Por su parte, el Laboratorio de Mecánica de Lille (Laboratoire de Mécanique de Lille, LML) es una institución de investigación de alto nivel, adscrita al CNRS (Centre National pour la Recherche Scientifique), equivalente en Francia del CSIC español. Seis son las líneas de investigación del LML en la actualidad, entre las cuales se pueden destacar Flujos Turbulentos, Tribología y Tecnologías de Frenado, Mecánica de la Ruptura y Fatiga de Materiales, o Materiales Compuestos.

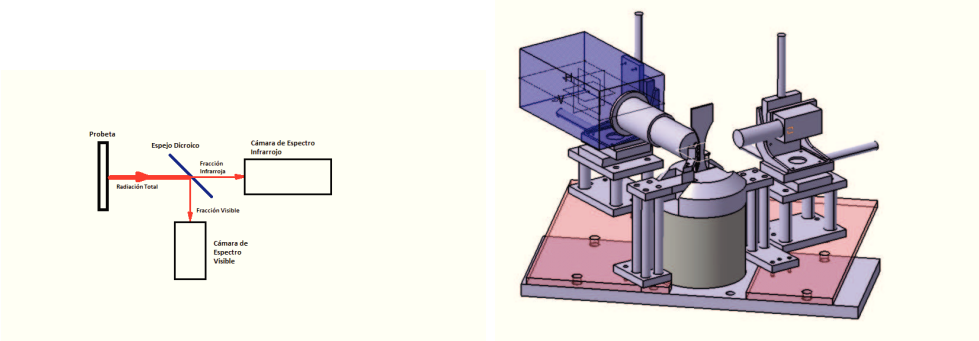


Figura 1.1: Esquema del montaje diseñado por la Dra. Bodelot (izda.) y diseño sobre CATIA del experimento. *Imágenes extraídas de la tesis de la Dra. Bodelot.*

1.2. Antecedentes

El objeto del presente proyecto surge a través de varios trabajos realizados en el seno de la École Centrale de Lille desde el año 2005, siendo la tesis de la Dra. Laurence Bodelot el punto de partida. Esta línea de investigación continúa en desarrollo en la actualidad, y dio lugar, durante el curso 2011-2012, a un proyecto de un alumno de la École Centrale de Lille que ha servido de base al desarrollo del proyecto.

1.2.1. Tesis Doctoral de Laurence Bodelot

La tesis "Estudio conjunto de campos Cinemáticos y Térmicos a escala de la microestructura de los materiales metálicos" de la Dra. Laurence Bodelot es, como se ha comentado, el punto de partida del presente proyecto. En su tesis, la Dra. Bodelot toma como punto de partida el estudio del comportamiento termomecánico de los materiales metálicos y los sistemas de análisis de imagen. A partir de ellos, elabora un método de observación de campos de deformación y de temperatura sobre las probetas del material a analizar [1].

Durante los ensayos de tracción-compresión, la formación de fisuras a escala microscópica se traducen en concentraciones de energía ligadas a las superficies libres. A su vez, dichos aumentos de energía comportan aumentos de temperatura a escala local. Estos incrementos de temperatura pueden ser observados mediante un sistema de medida infrarroja y, en paralelo, se complementan con la observación del campo de desplazamientos mediante un sistema de correlación de imágenes.

La medida en paralelo de las dos magnitudes, desplazamientos y temperatura, junto con la monitorización de la carga aplicada, permite al ingeniero establecer una relación empírica entre el comportamiento del material, la carga aplicada y sus efectos sobre la resistencia a fatiga, gracias a la observación de los campos térmicos en el material.

Para la realización del experimento, se dispone de una máquina de tracción-compresión sobre la que se monta la probeta del material a analizar. La superficie de observación, convenientemente preparada, es iluminada por una fuente de radiación y observada

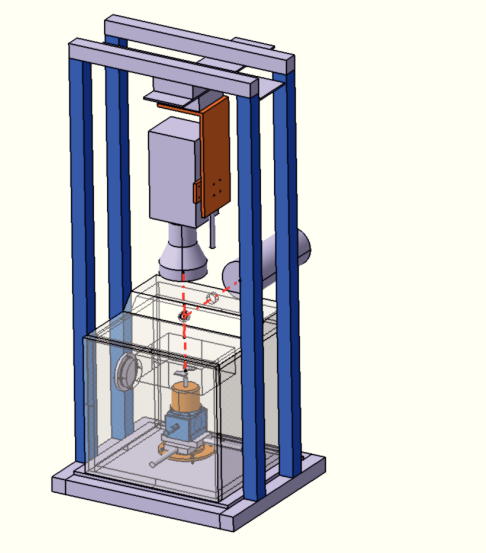


Figura 1.2: Esquema del montaje diseñado por Romain Desbats.*Imágen extraída del informe IMPACT de Romain Desbats.*

mediante dos cámaras: una cámara infrarroja y una cámara de radiación visible. Estos dos dispositivos permiten captar, de manera sincronizada, los campos térmico y de desplazamientos (este último se procesa mediante correlación de imágenes).

1.2.2. Proyecto IMPACT de Romain Desbats

La línea de investigación comenzada por la Dra. Laurence Bodelot continúa siendo objeto de trabajo de otros doctorandos de la École Centrale de Lille, que han profundizado en el objeto de estudio y en el método experimental descrito anteriormente. A través de estos trabajos posteriores se ha constatado una serie de inconvenientes a corregir dentro de la metodología planteada originalmente.

La obtención de una buena medida térmica de la probeta es vital para poder establecer una relación fiable entre el estado del material y los desplazamientos a que se ha sometido. No obstante, la radiación infrarroja que se obtiene directamente de la probeta no procede de los mecanismos de deterioro del material: una fracción es atribuible al fenómeno de fatiga, otra a la reflexión de radiaciones parásitas procedentes de cuerpos cercanos, y una última fracción corresponde al calor asociado a las corrientes de convección natural en el entorno de la probeta. Conocido este problema, se decide diseñar un entorno de trabajo controlado en el que el ensayo no pueda ser perturbado por factores ambientales [2].

En el marco de la formación de la École Centrale de Lille, el estudiante Romain Desbats llevó a cabo un primer diseño y adaptar el experimento a los nuevos condicionantes. Así, se decide emplear como máquina de ensayos un dispositivo de tracción-compresión a pequeña escala, dotarla de una cámara fabricada en PMMA y de forma aproximadamente cúbica para aislar el experimento. Así mismo, se decide emplear un pórtico disponible

en el laboratorio para anclar uno de los sistemas de observación, que captará la fracción infrarroja procedente del interior de la cámara. Finalmente, se definen los equipos necesarios para llevar a cabo el experimento y se efectúa una estimación de los costes de dichos equipamientos.

No obstante, el diseño propuesto no resuelve una serie de interrogantes técnicos como la justificación de la elección del material o la resolución técnica y la ejecución práctica del diseño. Ésta serie de interrogantes se convierte en el punto de partida del presente proyecto.

1.3. Alcance del Proyecto y Condiciones

A partir de los trabajos efectuados previamente, el Laboratorio de Mecánica de Lille y el Departamento de Mecánica de la École Centrale de Lille desean obtener un diseño preciso de la cámara de vacío para el experimento. Se deberá partir de la configuración actual del diseño del experimento para llegar a una solución concluyente, en la que las decisiones sobre el diseño, material empleado, etc., estén respaldados por una base teórica. Son varios los puntos claves a tratar:

- Estado del arte. Análisis crítico del diseño base del experimento y estudio de la geometría mediante un análisis por elementos finitos.
- Propuesta de soluciones prácticas al problema y evaluación de cada una de ellas en base a criterios técnicos.
- En base a la solución que se propondrá, prever un plan de fabricación. Revisión del diseño en base a los condicionantes de fabricación y establecer una estimación de costes.
- Evaluar, con el personal del Departamento de Mecánica de la École Centrale de Lille, el estado de los materiales disponibles y realizar una puesta a punto de la máquina de ensayos.

Tras una primera toma de contacto con el personal implicado en el proyecto, se establece una serie de condicionantes generales para el diseño de la cámara de vacío, clasificados en varios apartados: condicionantes técnicos, de utilización o ergonómicos, de fabricación.

1.3.1. Condiciones Técnicas

- **Cámara de Vacío estable frente a solicitaciones mecánicas:** dado que la toma de medidas por correlación de imágenes requiere de un enfoque sobre una pequeña porción de la superficie de la probeta, es de vital importancia que el recinto donde se dispone la muestra, así los sistemas de separación de radiación visible e infrarroja, no sufran alteraciones (deformaciones, desplazamientos) a lo largo del experimento.

- **Buen comportamiento óptico:** puesto que el objetivo del experimento es reducir la radiación infrarroja parásita, creando un entorno estable y aislado, se buscará que las superficies internas de la cámara tengan un comportamiento lo más parecido al de un emisor de cuerpo negro.
- **Buen comportamiento térmico:** se procurará que la cámara de vacío sea estable frente a cambios en el ambiente. No obstante, y como se prevé que en el laboratorio el entorno de trabajo esté controlado, no es un aspecto prioritario para el personal implicado en el experimento.

1.3.2. Condiciones de Utilización

- **Bajo peso:** el laboratorio no ha previsto un emplazamiento definitivo para la cámara, por lo que a lo largo de su vida útil podría tener que ser desplazada dentro de las instalaciones. Es deseable que la cámara sea lo más ligera posible dentro de las limitaciones que imponga el diseño, y que se prevea un sistema de anclaje que favorezca su manipulación en las operaciones de transporte.
- **Estructura flexible:** el diseño de la cámara corresponde, en esencia, a un cubo de 400 milímetros de arista. Dado el tamaño, se considera interesante que la cámara tenga un diseño flexible, que deje la posibilidad de efectuar posibles modificaciones en su estructura y poderla reutilizar en experimentos posteriores.
- **Estructura del experimento sencilla:** se impone como condición que el experimento requiera el menor número de operaciones de calibrado y preparación posibles, procurando eliminar toda manipulación del interior de la cámara una vez puesta bajo vacío.

1.3.3. Condiciones de Fabricación

- **Diseño sencillo:** se busca un diseño sencillo, con piezas simples y con un montaje fácil.
- **Fabricación propia:** se intentará realizar un diseño que pueda ser realizado por los propios talleres del Departamento de Mecánica de Lille o por un proveedor habitual a subcontratar. Se deberá consultar con el personal de taller la factibilidad del diseño, las posibles mejoras y una estimación de los costes.

2. Plan de Diseño

2.1. Estado del Arte

Bajo este epígrafe se desea recoger el trabajo previo que ha servido de punto de partida para el proyecto, llevando a cabo una descripción detallada de los aspectos clave a tener en cuenta.

2.1.1. Diseño del Experimento

2.1.1.1. Geometría y Montaje

La disposición geométrica del experimento ha permanecido invariable desde el trabajo realizado por la Dra. Bodelot en su tesis. La probeta de ensayo se dispone en una máquina de tracción-compresión de forma que una de sus dos caras, convenientemente tratada, quede bien expuesta hacia el sistema de observación. Dicho sistema de observación está compuesto por un espejo dicroico colocado a 45 grados con respecto a la superficie de la probeta. El espejo deja pasar a través de él la radiación infrarroja, reflejando el espectro visible. Así pues, la cámara infrarroja se colocará de forma frontal a la superficie observada, mientras que la cámara para correlación de imágenes estará dispuesta en paralelo a dicha superficie y alineada con el espejo, como se muestra en la figura 2.1.

La principal modificación en el emplazamiento de los dispositivos de captación surge de la idea de dotar al experimento de una cámara de vacío. Al colocar la probeta sobre la micromáquina, su eje pasa de ser vertical al plano de apoyo (y al suelo) para ser paralelo a éste, como se observa en la figura 2.2. Ello obliga a disponer la cámara infrarroja en una posición vertical, y la cámara de espectro visible pasa a estar colocada en paralelo al plano de apoyo. Por otro lado, el diseño previo decide colocar los sistemas de observación fuera de la cámara de vacío, eliminando cualquier manipulación o reglaje del instrumental dentro de la cámara una vez ésta se encuentra bajo vacío.

Esta disposición encuentra una justificación en el "Efecto Narciso". Este defecto está asociado a la observación directa de una superficie tratada con un objetivo muy preciso, que captará la radiación emitida por dicha superficie más una radiación parásita correspondiente a su propio reflejo. El empleo del espejo dicroico como intermediario permitirá evitar este problema. Para facilitar la ausencia de reglajes sobre el espejo, éste se integra en la propia estructura de la cámara, y será la base de la micromáquina la que podrá ajustar su posición con respecto a las ventanas de observación. Ello será posible

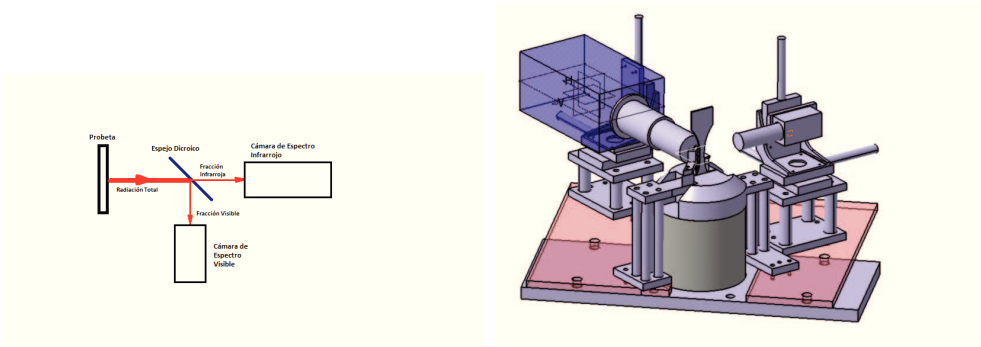


Figura 2.1: Esquema del montaje diseñado por la Dra. Bodelot (izda.) y diseño sobre CATIA del experimento.*Imágenes extraídas de la tesis de la Dra. Bodelot.*

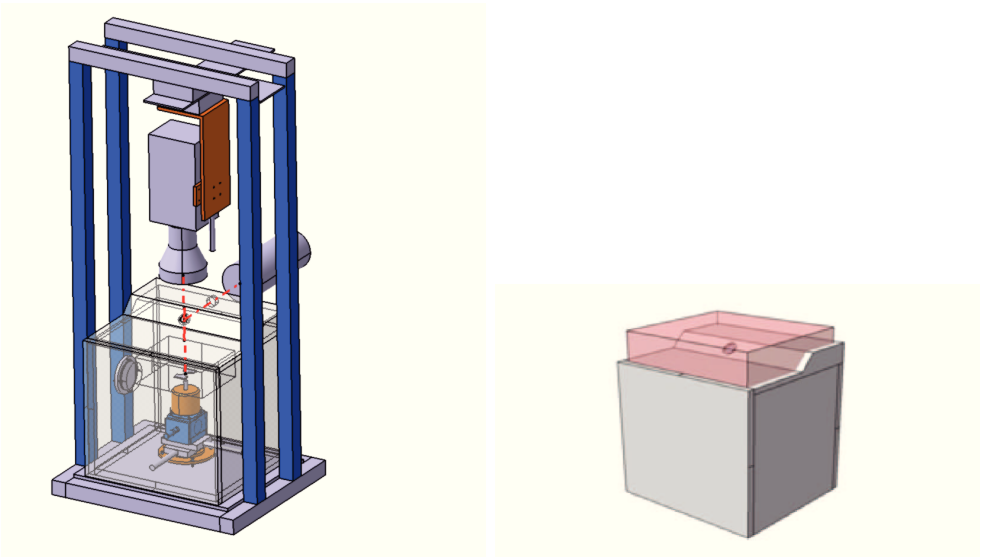


Figura 2.2: Esquema del montaje diseñado por Romain Desbats (izda.) y detalle de la cámara, diseñado con CATIA.*Imágenes extraídas del informe IMPACT de Romain Desbats.*

gracias a su anclaje sobre un apilamiento de tres mesas micrométricas, dotándola de movilidad en los tres ejes del espacio, como se observa en la figura 2.3.

La ejecución práctica de la cámara se prevé en PMMA, tratado con negro de carbono en su interior para permitir la opacidad del recinto y un comportamiento lo más próximo posible al de un cuerpo negro.

2.1.1.2. Elección de Dispositivos

En los desarrollos previos se prevé la utilización de una serie de componentes tanto para la estructura del experimento en sí, como para los anexos destinados a proveer el vacío y efectuar el control del experimento.

- **Micromáquina y sistema de control:** la micromáquina de tracción-compresión es un dispositivo capaz de realizar ensayos de fatiga sobre probetas, pero fabricado a escala reducida. En origen se utilizó para la observación de este tipo de ensayos bajo

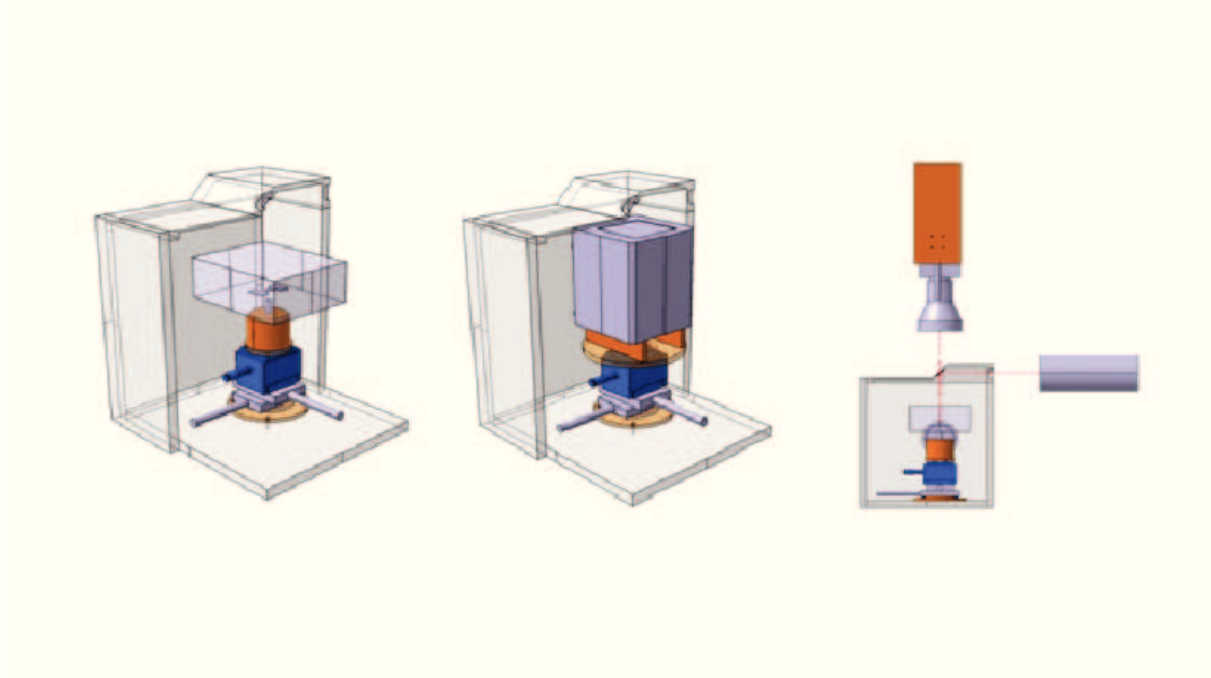


Figura 2.3: Emplazamiento de la micromáquina sobre el conjunto de mesas micrométricas. Calibrado óptico mediante un cuerpo negro comercial. Esquema de radiación del sistema hacia las cámaras.*Imágenes extraídas del informe IMPACT de Romain Desbats.*

un microscopio de barrido electrónico (MEB) existente en el laboratorio. Está dotada de un adaptador para el cableado que sirve de interfaz entre el exterior y la cámara de vacío del MEB.

- **Mesas micrométricas:** para regular la posición de la micromáquina con arreglo a las ventanas de observación, se prevé el uso de tres mesas micrométricas que permitan ajustar su posición antes del experimento.
- **Fuente de radiación/Cuerpo negro:** se prevé este dispositivo para efectuar el calibrado de la cámara de radiación infrarroja como paso previo a la realización del experimento.
- **Compresor:** aunque el laboratorio dispone de una red de distribución de aire comprimido/vacío, se juzgó conveniente adoptar un compresor individual que genere el vacío en el interior de la cámara.

2.1.2. Materiales Disponibles

2.1.2.1. Pórtico y Cámaras de Captación

En estos momentos, el Laboratorio de Mecánica de Lille dispone de una primera estructura en forma de pórtico sobre la que se podría habilitar el montaje para el experimento. El pórtico está construido a base de perfiles estándar de Bosch. Consta de una base rectangular de 600 x 500 mm sobre la que se montan cuatro pilares de 810 mm de alto. Éstos están, a su vez, unidos dos a dos transversalmente mediante unas

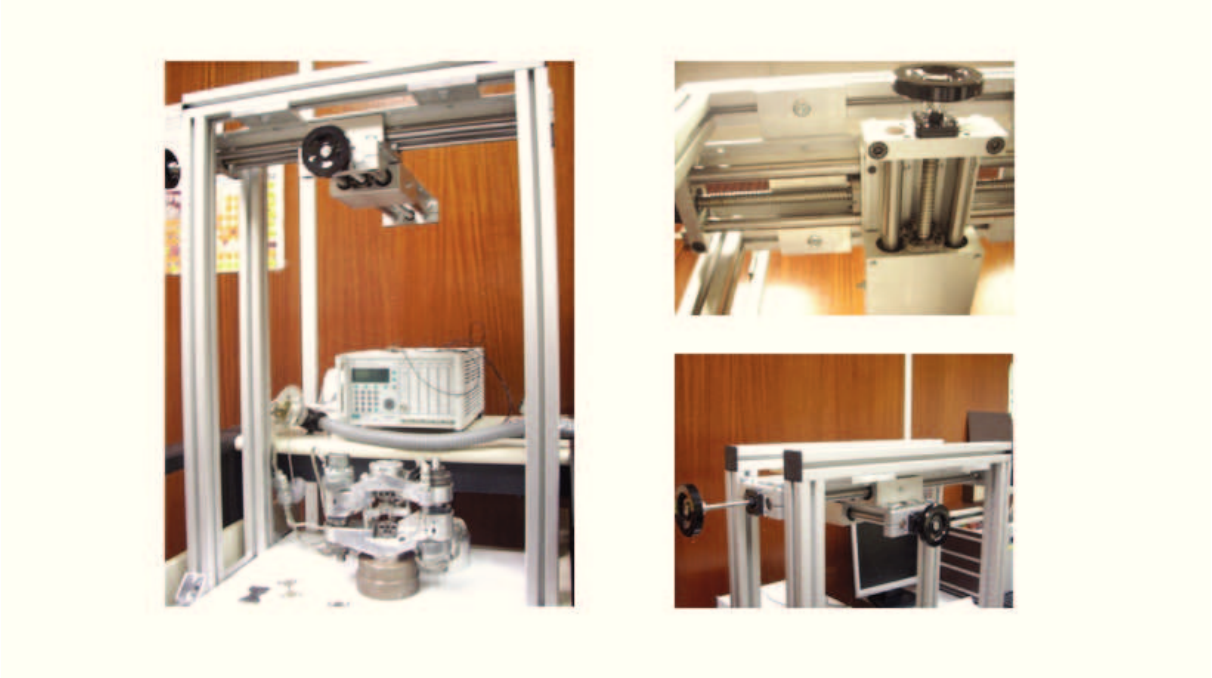


Figura 2.4: De izquierda a derecha, de arriba a abajo: aspecto del pórtico actual; detalle del sistema de tornillos para el movimiento en el plano XY; dintel del pórtico que se conservará.

traviesas. Colgando de ellas, se dispone de un sistema de desplazamiento lineal accionado por tornillos de potencia que permite el posicionamiento del sistema de observación en el plano XY.

2.1.2.2. Micromáquina de Tracción-Compresión

El dispositivo de ensayo de las probetas es una máquina de tracción-compresión miniaturizada, capaz de desarrollar hasta 7 kN de esfuerzo máximo. Su estructura se fundamenta en dos traviesas unidas entre sí mediante dos tornillos de potencia. Dichos tornillos están accionados mediante un sistema de motores piezoeléctricos paso a paso y un mecanismo de reducción. Dichos motores se encuentran colocados de forma antisimétrica, cada uno en un lado de la micromáquina. Cada traviesa monta un sistema de rodamientos axiales que sirve de base a las mordazas sobre las que se montan las probetas a ensayar.

La máquina dispone de dos posibilidades de colocación: en posición "horizontal", con el plano de observación paralelo al plano de base, y "vertical", con el plano de observación vertical o de frente al usuario. En el primer caso, la máquina apoya su peso sobre un vástago vertical gracias a un sistema de apoyo elástico. Dicho vástago se apoya a su vez sobre una base cilíndrica, en un alojamiento mecanizado a tal efecto. En el segundo caso, el apoyo se efectúa sobre una de las cajas de rodamientos de los extremos, que encaja en un segundo mecanizado sobre la base citada anteriormente.

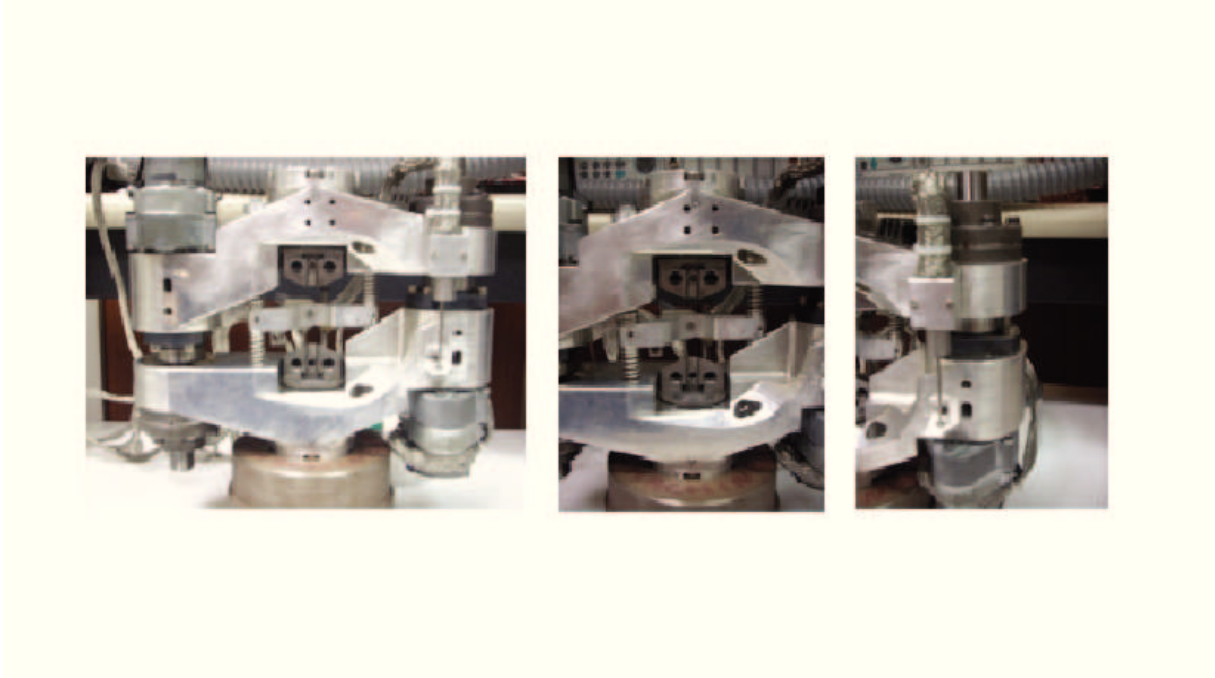


Figura 2.5: De izquierda a derecha: micromáquina montada en vertical; detalle del sistema de mordazas; tornillo de potencia, junto con un motor-reductor y el captador LVDT (la varilla situada en primer plano).

2.2. Propuesta de Soluciones

Una vez recopilada toda la documentación relacionada con el proyecto y revisados todos los dispositivos y materiales disponibles, se ha llevado a cabo una reflexión acerca de los trabajos anteriores, como paso previo a la propuesta de varias arquitecturas para la cámara de vacío y a la elección de los materiales a emplear.

2.2.1. Reflexión sobre el Estado del Arte

2.2.1.1. Diseño previo

El diseño previo del experimento ha sido objeto de un análisis cuidadoso para entender las razones técnicas que han llevado a proponer la geometría de base en la que se fundamenta el presente trabajo. Esta reflexión se ha enfocado sobre dos puntos: por un lado, la disposición general del experimento y la arquitectura propuesta para la cámara; por otro, la geometría escogida para la tapa de la cámara de vacío, considerada como la pieza más relevante en tanto que debe permitir la correcta transmisión de las imágenes del ensayo.

- En cuanto a la **arquitectura general**, se considera que la disposición actual del experimento permite un mayor grado de compacidad que el planteamiento inicial de la Dra. Bodelot, y que debería conservarse. No obstante, la estructura de la cámara, tal cual se plantea, presenta el inconveniente de ser demasiado rígida y poco adaptable frente a necesidades futuras. Un cambio en el dispositivo de ensayo o en la estructura del experimento requeriría la perforación de nuevas aberturas

para permitir la correcta interconexión de los nuevos dispositivos y, por ende, la necesidad de taponar las aberturas practicadas con anterioridad. Así mismo, el hecho de disponer el espejo dicroico como un elemento fijo en la tapa supone que la micromáquina no puede ser utilizada más que en una disposición en paralelo al plano de base.

- Por otro lado, el **diseño de la tapa** es uno de los puntos clave a tener en cuenta. El espejo dicroico está encastrado en ella, y constituye el elemento crítico a la hora de transmitir correctamente los dos haces de radiación hacia las cámaras de captación. Es por ello que se debe conocer de forma precisa el comportamiento del alojamiento del espejo, para así garantizar la correcta transmisión de la imagen.

  No obstante, la elección de la geometría de base no ha sido objeto de justificación alguna en este aspecto, entendiendo que el comportamiento en trabajo no debería suponer una variación sobre la situación estática del conjunto. Así pues, se hace necesario estudiar el comportamiento del emplazamiento del espejo dicroico en función de la geometría general de la tapa y del material empleado. Ello permitirá realizar las modificaciones oportunas en cualquiera de los dos aspectos para garantizar, sobre una base fiable, el buen comportamiento del sistema de observación durante la realización del experimento.

  Hay que observar que, de hecho, el diseño propuesto constituye en sí mismo un condicionante a la hora de fabricarlo: la geometría propuesta puede mecanizarse muy fácilmente a partir de un bloque de PMMA en bruto, como se propone en los trabajo previos; un mecanizado en aluminio o acero es, en cambio, inviable, por las fuertes pérdidas de material, y una fabricación por piezas requeriría de un ensamblaje cuidadoso para garantizar un resultado final dentro de tolerancias.

2.2.1.2. Necesidades materiales

En general, la mayoría de los elementos ya disponibles se reutilizarían en la nueva arquitectura prevista para el experimento. El pórtico se rehará alargando los pilares, guardando el dintel con el sistema de movimiento en el plano XY paralelo a la base. La micromáquina y su sistema de control se reutilizarán en el estado actual. La base de la micromáquina es compatible con las mesas micrométricas previstas, y la interfaz con el exterior mediante el "tapón" estará garantizada en el diseño.

2.2.2. Diseño de la Cámara

En el trabajo previo realizado, el diseño de la cámara no está detallado más allá de las dimensiones generales del conjunto y de la forma de la tapa. Por lo tanto, se decide proponer varios tipos de arquitectura al personal responsable del proyecto, buscando cumplir con las exigencias planteadas en las condiciones del proyecto.

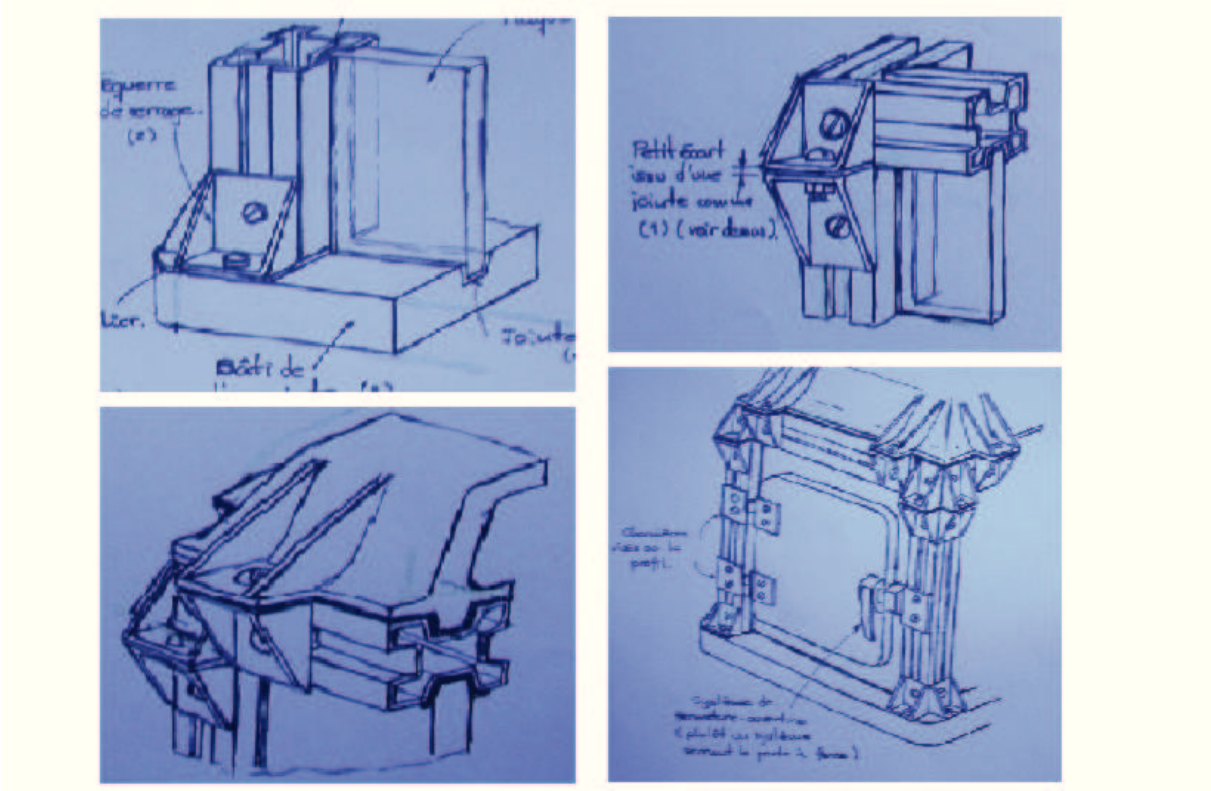


Figura 2.6: Bocetos a mano alzada de la propuesta modular basada en perfiles Bosch estandardizados.

2.2.2.1. Propuesta Modular

Tomando como punto de partida la premisa de flexibilidad, se decide integrar en una primera arquitectura la flexibilidad de mecanizado del PMMA con las posibilidades de adaptación de los perfiles Bosch estándar. La base de esta arquitectura es una estructura de base construida con perfiles Bosch. La estructura sigue siendo aproximadamente cúbica, con las caras de PMMA insertadas en las ranuras de los perfiles, convenientemente guarnecidas con una serie de juntas de estanqueidad en elastómero, como se observa en la figura 2.6. El acceso al interior podría garantizarse mediante el deslizamiento de los módulos de pared o desplazando la tapa, cuya geometría mantiene la forma prevista anteriormente. El uso de piezas estandardizadas o fáciles de fabricar permite una gran flexibilidad y facilita cualquier modificación futura.

No obstante, el principal punto débil de este planteamiento es el gran número de juntas previstas, que no permite garantizar la calidad del vacío. Más aún, cualquier imprecisión en el montaje supondría un defecto difícil de localizar dentro de la estructura. Es por ello que este planteamiento fue rápidamente abandonado en favor de otras soluciones más precisas.

2.2.2.2. Propuesta Integral

En contraposición a la propuesta anterior, se plantea una arquitectura fuertemente simplificada, donde el número de piezas estructurales se reduce a seis, una por cada cara

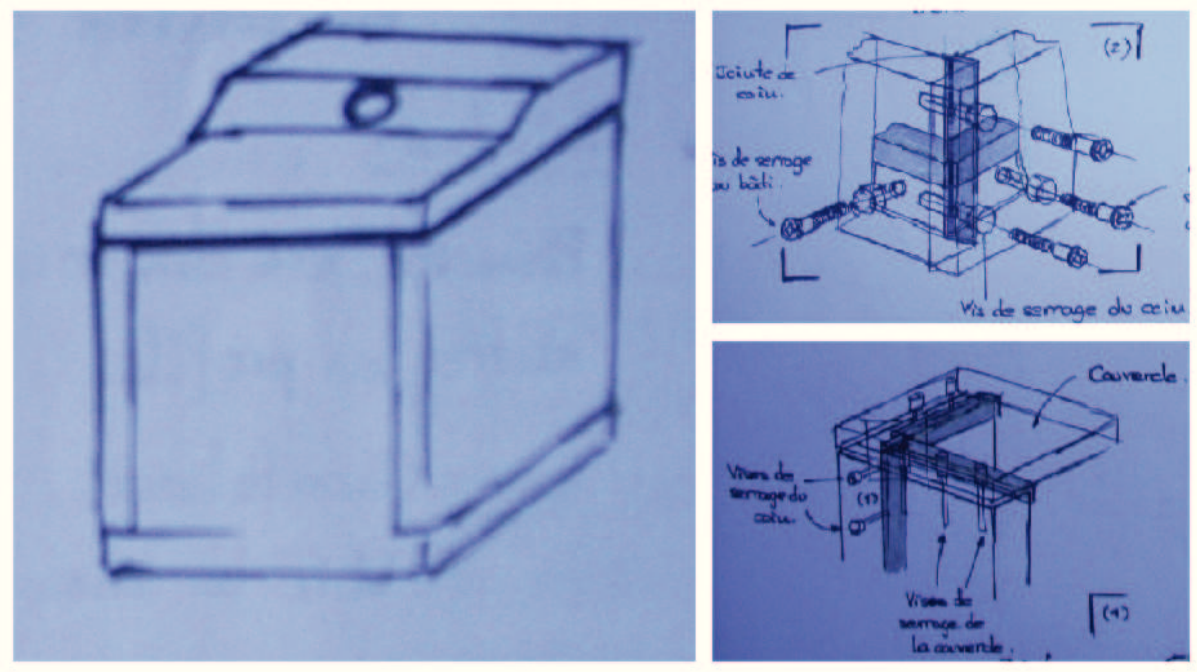


Figura 2.7: Bocetos a mano alzada de la propuesta integral basada en placas de PMMA u otro material.

de la cámara, como se observa en la figura 2.7. El ensamblaje del conjunto se realizaría mediante uniones macho-hembra entre las distintas piezas, asegurando la unión mediante un sistema de tornillos. Este planteamiento ya se ha implementado con éxito en un pequeño tribometro, en el mismo Laboratorio de Mecánica de Lille. La comunicación entre el interior y el exterior de la cámara se efectúa mediante la parte frontal y el alojamiento para la interfaz cableada de la micromáquina.

Este planteamiento, basado en los diseños previos, se ha considerado como robusto y sencillo, permitiendo cumplir con las premisas de fabricación en los talleres de la École Centrale de Lille, facilidad en el mecanizado y montaje, y ser ligero y barato. Sin embargo, la flexibilidad frente a futuras modificaciones queda fuertemente condicionada.

2.2.2.3. Propuesta Integral Flexible

Puesto que ambas propuestas anteriores no alcanzan a satisfacer todas las exigencias, se decide integrar lo mejor de ambos planteamientos en un mismo diseño: por una parte, se guardara la solidez del diseño integral, con piezas simples y grandes, pero se añaden más trampillas de acceso en los laterales y una placa de conexiones en la parte trasera. Estas placas móviles se adaptarán a los experimentos a realizar, permitiendo una flexibilidad en la utilización.

2.2.3. Evaluación de Materiales a emplear

La elección del material empleado en la estructura de la cámara está fundamentada, de acuerdo con el trabajo previo, en la facilidad de mecanizado del PMMA y su menor densidad frente a otros materiales estructurales como aluminio o acero. Sin embargo, es

necesario verificar que la elección de este material no compromete el buen comportamiento de la cámara en carga, especialmente en lo referente a los desplazamientos del alojamiento del espejo dicroico.

A partir del diseño previo, se han elaborado dos modelos tridimensionales: uno de la tapa original y otro de la pared donde se acopla la interfaz cableada de la micromáquina. Estos modelos han sido evaluados mediante el software de elementos finitos Abaqus. Tanto la pared como la tapa han sido simuladas con los tres materiales (PMMA, aluminio y acero).

El objetivo ha sido verificar el buen comportamiento del material tanto en tensiones como en desplazamientos, especialmente en la posición del alojamiento del espejo dicroico, casi en el centro de la tapa. Así, se ha considerado que el desplazamiento más significativo en ese punto es en dirección vertical, perpendicular al plano de base. Teniendo en cuenta que los extremos más alejados del alojamiento del espejo sufren distintos desplazamientos, es posible considerar que el espejo sufriría una rotación y, por lo tanto, producirá inexactitudes en la observación de la probeta. El fundamento geométrico para evaluar estar desviaciones se detalla en el anexo A. Las suposiciones tomadas para los modelos empleados se detallan a continuación.

- **Modelo de Pared:** se considera que la pared está sometida a una presión homogénea externa igual a la presión atmosférica (101300 Pa) y a una presión homogénea interna de 100 Pa (lo que se considera un vacío "fuerte"); las paredes están encastradas en los puntos de unión con el resto de la cámara. Se modeliza como una placa que tiene unas dimensiones de 420 mm de base, 400 mm de altura y 15 mm de profundidad.

- **Modelo de Tapa:** se considera que la tapa está sometida a una presión homogénea externa igual a la presión atmosférica (101300 Pa) y a una presión homogénea interna de 100 Pa (lo que se considera un vacío "fuerte"); se considera que el apoyo sobre las paredes laterales de la cámara es un encastramiento que restringe todos los grados de libertad. El modelo es una corona rectangular de 400 mm de ancho, 420 mm de fondo, con dos planos unidos por una superficie a 45 grados, cada uno a una altura de 20 mm y 50 mm respectivamente. El espesor global en la pieza es de 30 mm.

2.2.3.1. PMMA

El análisis por elementos finitos de los dos modelos de pieza para el PMMA se ha efectuado considerando este material como lineal, homogéneo e isótropo, con un Módulo de Young de 3300 MPa y un Coeficiente de Poisson de 0,43.

- **Ensayo de la pared:** para el modelo de pared anteriormente descrito, se ha obtenido una tensión de Von Mises máxima de 10 MPa, y un desplazamiento máximo de 0,45 mm en el centro de la placa, en dirección perpendicular al plano.

- **Ensayo de la tapa:** el análisis del comportamiento de la tapa ha dado como resultados una tensión de Von Mises máxima de unos 2 MPa, con un desplazamiento

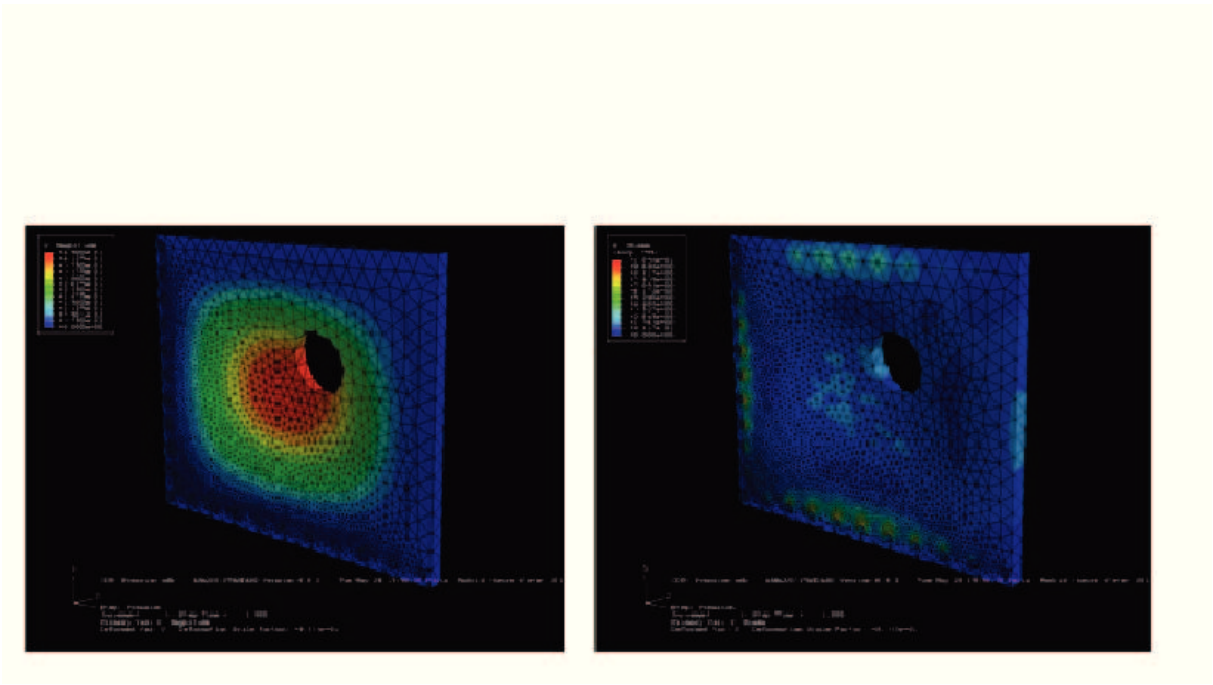


Figura 2.8: A la izquierda, campo de desplazamientos en la pared. A la derecha, tensiones de Von Mises.

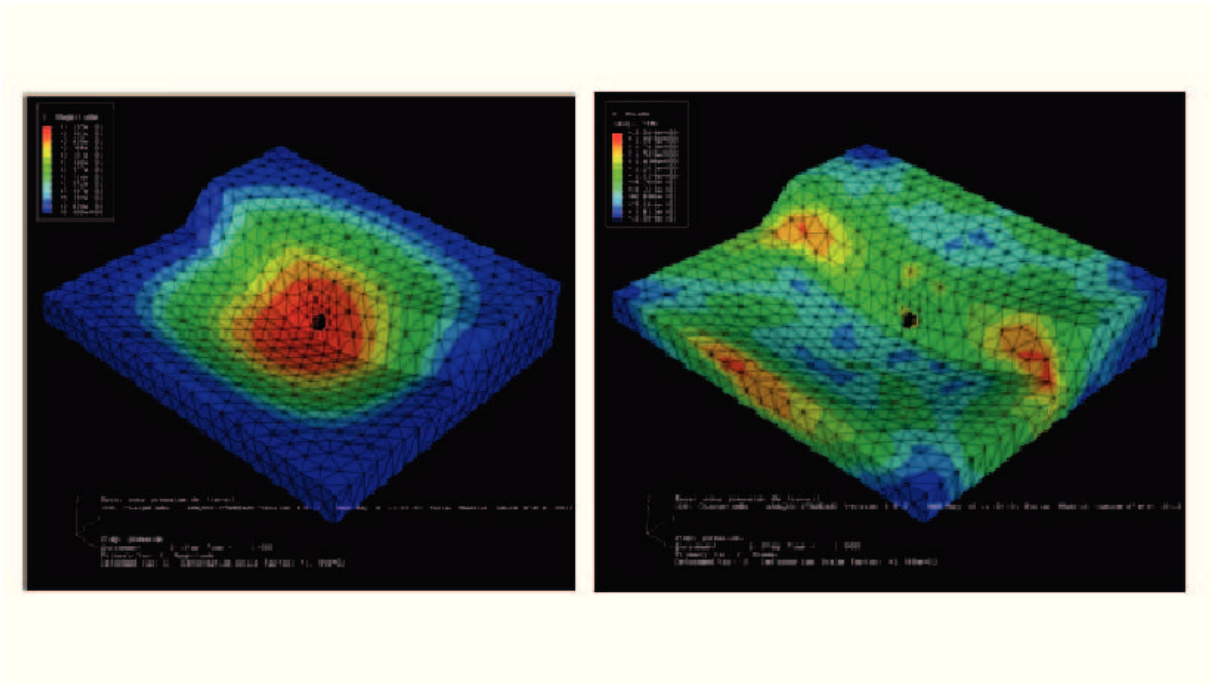


Figura 2.9: A la izquierda, campo de desplazamientos en la tapa original con PMMA. A la derecha, tensiones de Von Mises.

máximo de 0,32 mm en el área del alojamiento del espejo, en la dirección perpendicular al plano. No obstante, según el nodo observado, los distintos puntos correspondientes al alojamiento del espejo sufre diferencias en su desplazamiento, lo que induciría una rotación en el espejo y posibles desviaciones en el comportamiento óptico. En base a las consideraciones geométricas explicadas en el anexo A, se ha estimado una desviación positiva de 0,11 grados sexagesimales. Esta desviación se convierte, para un rayo incidente, en una desviación con respecto a la línea de reflexión de 0,22 grados. Tomando un campo de visión de 13 mm sobre la probeta, y una distancia de 20 mm entre el espejo y la ventana de observación, esto se traduce en una pérdida de unos 0,3 mm del campo de visión.

2.2.3.2. Aluminio

El análisis por elementos finitos de los dos modelos de pieza para el aluminio se ha efectuado considerando este material como lineal, homogéneo e isótropo, con un Módulo de Young de 70000 MPa y un Coeficiente de Poisson de 0,33.

- **Ensayo de la pared:** para el modelo de pared anteriormente descrito, pero modificado a un espesor de 5 mm, dada la mayor resistencia del aluminio, se ha obtenido una tensión de Von Mises máxima de 20 MPa, y un desplazamiento máximo de 0,35 mm en el centro de la placa, en dirección perpendicular al plano.
- **Ensayo de la tapa:** el análisis del comportamiento de la tapa ha dado como resultados una tensión de Von Mises máxima de unos 5 MPa, variando la posición del espejo en una desviación positiva de 0,0056 grados sexagesimales.

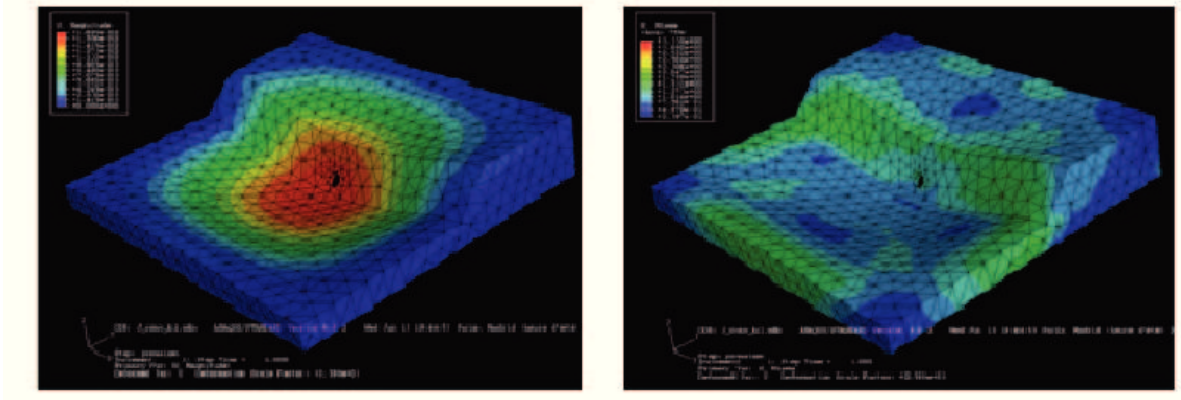


Figura 2.10: A la izquierda, campo de desplazamientos en la tapa original con aluminio. A la derecha, tensiones de Von Mises.

A pesar de los buenos resultados del aluminio, no se considera como un material interesante para la tapa. El diseño previsto por los trabajos previos es complejo. El mecanizado a partir de un bloque en bruto es inviable, y el plegado a partir de planchas no es posible con los medios disponibles en el taller de la École Centrale de Lille. El soldado de las plaquetas que formarían los laterales es también complejo, es inviable con los medios de que dispone la escuela y cualquier intento no garantizaría la calidad del vacío en el interior de la cámara.

2.2.3.3. Acero

El análisis por elementos finitos de los dos modelos de pieza para el acero se ha efectuado considerando este material como lineal, homogéneo e isótropo, con un Módulo de Young de 210000 MPa y un Coeficiente de Poisson de 0,27.

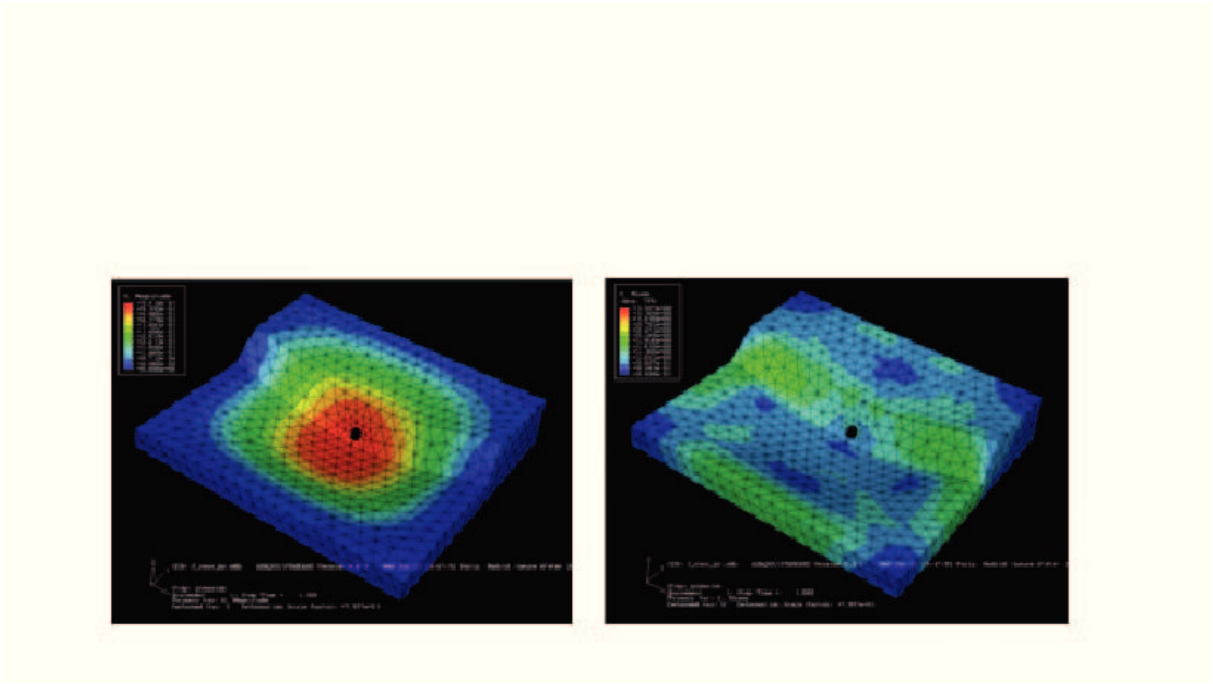


Figura 2.11: A la izquierda, campo de desplazamientos en la tapa original con acero. A la derecha, tensiones de Von Mises.

- **Ensayo de la pared:** para el modelo de pared usado con el aluminio, se han mejorado los resultados obtenidos; la resistencia en tensiones está ampliamente garantizada, y el desplazamiento máximo es de 0,1 mm en el centro de la placa, en dirección perpendicular al plano.
- **Ensayo de la tapa:** el análisis del comportamiento de la tapa ha dado como resultados una tensión de Von Mises máxima de unos 5 MPa, variando la posición del espejo en una desviación positiva de 0,0019 grados sexagesimales.

A pesar de los buenos resultados del acero, el mecanizado a partir de un bloque en bruto es inviable por tiempo y costes, así como el plegado a partir de planchas. Una posible opción a contemplar sería el empleo de la soldadura, siempre que ésta fuera de suficiente calidad como para garantizar el mantenimiento del vacío en la cámara.

2.3. Solución Propuesta

El proceso de evaluación de las distintas opciones tanto en diseño como en materiales permitieron proponer una solución concreta a los responsables del proyecto. Sucesivas reuniones a lo largo del proceso han servido para encaminar el proceso hacia una solución considerada como la más satisfactoria.

2.3.1. Arquitectura de la Cámara

El espíritu original del diseño de la cámara ha sido conservado en la propuesta final. Se conservan las dimensiones del espacio interior, que garantizan el montaje del experimento en las condiciones previstas por los trabajos previos. Además, la estructura diseñada para la cámara seguirá guardando relación con las modificaciones previstas de los anexos del experimento.

Sin embargo, se ha puesto especial hincapié en la posibilidad de flexibilizar la estructura de la cámara, de forma que tanto el acceso al interior como la adaptación a futuros montajes sean lo más libres posible. Ello ha comportado una pequeña pérdida de la simplicidad de los componentes, que se justifica por la mejora de la funcionalidad.

- **Diseño de las Paredes:** de acuerdo con el diseño "integral flexible" mencionado, se dotará a la cámara de cuatro puertas de acceso en sus caras laterales. Se practicarán cuatro aberturas en forma de cuadrilátero de bordes redondeados, en las que encajarán otras tantas trampillas. Éstas tendrán una forma semejante, con un centrado coincidente con las dimensiones de la abertura correspondiente. En el espacio alrededor del centrado, se practicará un alojamiento para una junta de estanqueidad. La trampilla frontal y las laterales están destinadas a servir de acceso al interior, mientras que la trampilla trasera servirá de raccord para las tomas de vacío, entradas de gases, tomas de corriente, sensores, etc. Las puertas de acceso se montarán sobre bisagras, atornilladas a la pared de la cámara, asegurando el cierre mediante un mecanismo de presión que precargue la junta antes de la puesta en vacío. El raccord estará ensamblado de forma semi-permanente, mediante una serie de tornillos en todo su perímetro.

  Esta arquitectura permite separar los accesos de uso habitual durante los experimentos de las conexiones de la cámara, emplazadas en el raccord trasero. Así mismo, toda adaptación de la cámara a un nuevo experimento sólo requerirá la adaptación de las puertas o, directamente, el desmontado de las mismas y el acoplado de una nueva puerta que responda a las necesidades del nuevo ensayo.

- **Diseño de la Tapa:** de acuerdo con el estudio del comportamiento de la tapa, ha quedado mostrado que el PMMA no es el material más indicado para su realización práctica. Por otro lado, aunque tanto el aluminio como el acero resultarían indicados, la ejecución práctica de la tapa resultaría complicada. Más aún: la forma de la tapa

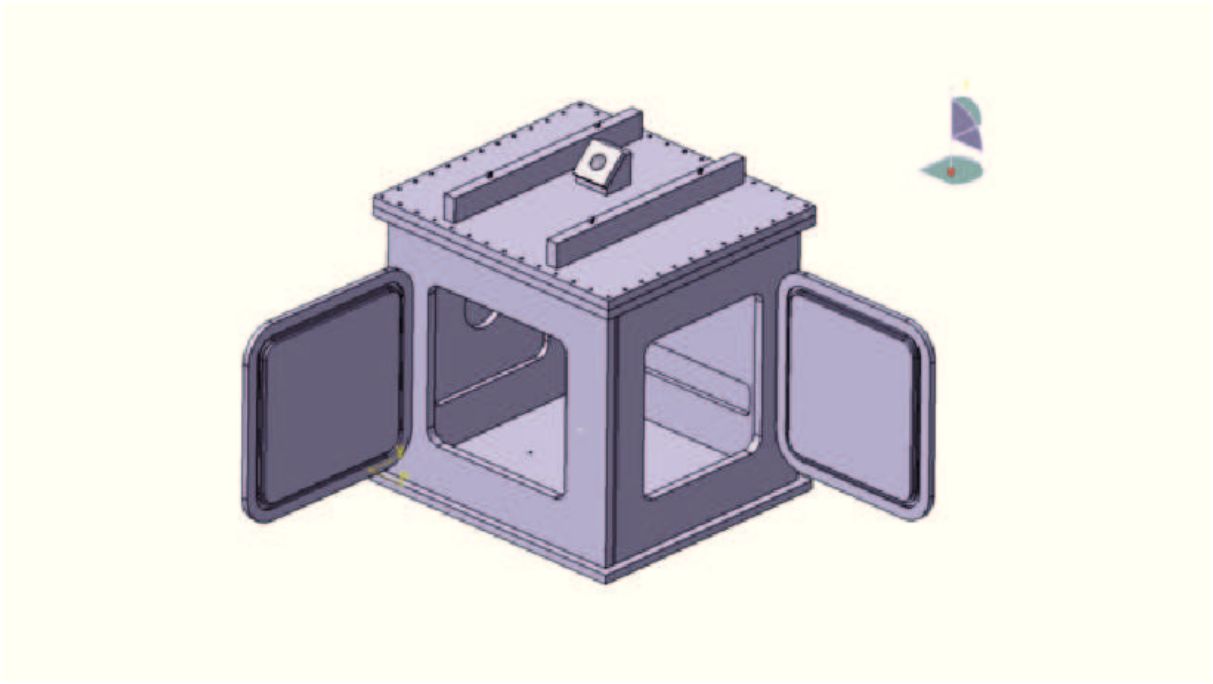


Figura 2.12: Vista global de la cámara, con las puertas abiertas.

no permite adaptaciones ulteriores debido a su forma "hueca" y con dos planos distintos. Así pues, surge la siguiente reflexión: ¿sería posible reducir la complejidad de la tapa, creando un alojamiento distinto para el espejo dicroico? Por lo tanto, se decide separar la estructura de la tapa en dos piezas distintas: una plancha de base y un alojamiento para el espejo dicroico con una geometría algo más compleja.

- La **plancha de base** es, en esencia, una placa en la que se mecanizará un centrado para el ajuste sobre las paredes de la cámara, un alojamiento para una junta de estanqueidad, y una serie de taladrados pasantes para los bulones de fijación con el resto de la cámara. Así mismo, se taladraría una mirilla de observación sobre la posición de la probeta de ensayo. Sobre la superficie superior se mecanizaría un rehundido o un centrado para encastrar en él el alojamiento del espejo dicroico.
- El **alojamiento del espejo dicroico** es una pieza prismática, con forma de cubo truncado diagonalmente a 45 grados. Consta de una base mecanizada a partir de una pieza en bruto y, apoyada sobre ésta, una plaqueta plana sobre la que se efectúa el mecanizado del alojamiento del espejo propiamente dicho.

2.3.2. Elección de los materiales

A la luz de los resultados obtenidos en el análisis por elementos finitos, se considera que el PMMA, a pesar de su facilidad de mecanizado, no es el material más apropiado para construir la cámara. El acero, pese a su gran resistencia, es muy pesado. El aluminio parece ser un buen compromiso entre peso y resistencia, si bien podría resultar problemático desde el punto de vista del montaje final.

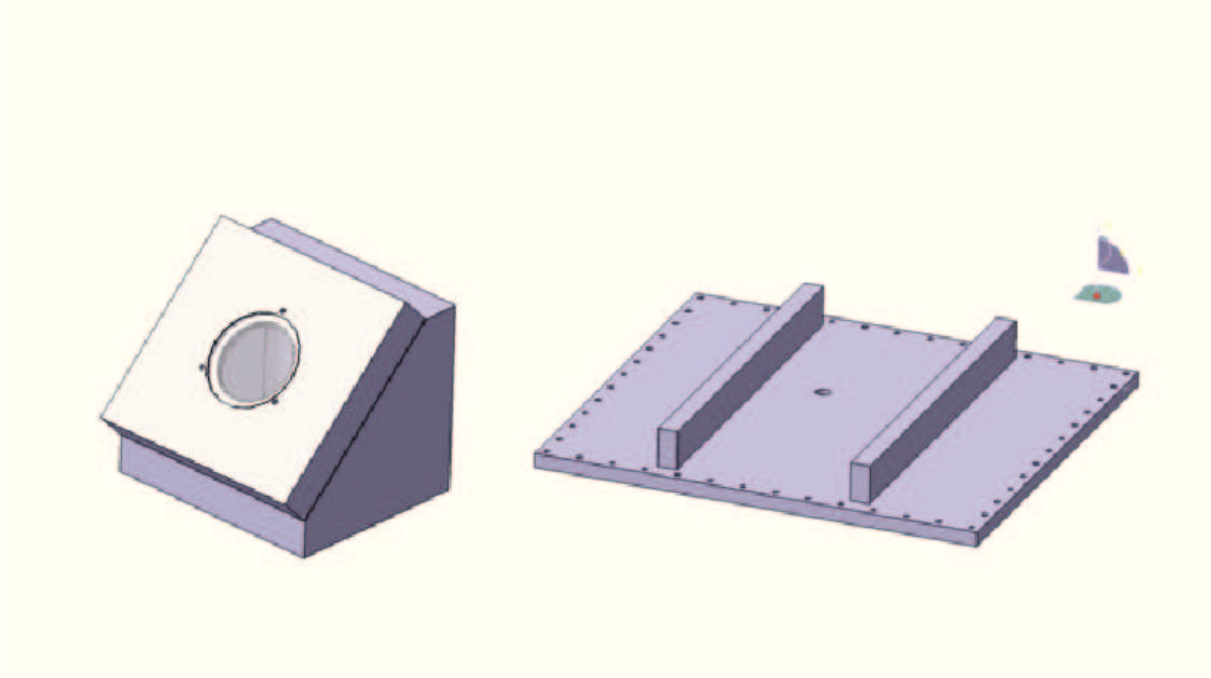


Figura 2.13: Alojamiento del espejo dicroico (izquierda) y placa de base (derecha).

Es precisamente el montaje la fase que más peso ha tenido a la hora de considerar la idoneidad de los materiales a emplear. El PMMA requeriría un ensamblaje mediante tornillería (y por ende, toda una serie de juntas de estanqueidad) o bien mediante resinas (lo que convertiría la estructura en un montaje indeformable). El acero puede ser cortado mediante láser, plegado en láminas, soldado... aunque su elevada densidad desaconseja un uso excesivo. Por otro lado, el aluminio presenta dificultades importantes desde el punto de vista de la soldadura, aunque su buena relación densidad-resistencia hace que resulte especialmente atractivo.

El diseño final aprovecha las cualidades de aluminio y acero, integrando ambos en la estructura en aquellas piezas que mejor se adaptan al uso de cada material:

- Se fabricarán en **aluminio** la base de la cámara, las paredes, las trampillas de acceso y un collarín de fijación de la tapa, que irá soldado a la parte superior de las paredes. Aunque la soldadura del aluminio es compleja, se considera que la ligereza del material respecto al acero hace que su uso generalizado en la estructura de la cámara sea atractivo. El conjunto de piezas que se prevé fabricar en aluminio supone unos 37 kg de masa de los 70 que pesará el conjunto de la cámara de vacío.

  Consultando la literatura disponible [3], el aluminio escogido para la soldadura será del tipo 5000, que permite combinar una buena soldabilidad dentro del aluminio junto con una buena resistencia mecánica.

- La única pieza fabricada en **acero** será la tapa. Dado que se trata del elemento crítico dentro del diseño de la cámara, la rigidez del acero resulta apropiada para evitar la deformación del alojamiento del espejo. Por otro lado, puede ser mecanizado con una cierta facilidad y, además, soldado mediante los medios disponibles en los

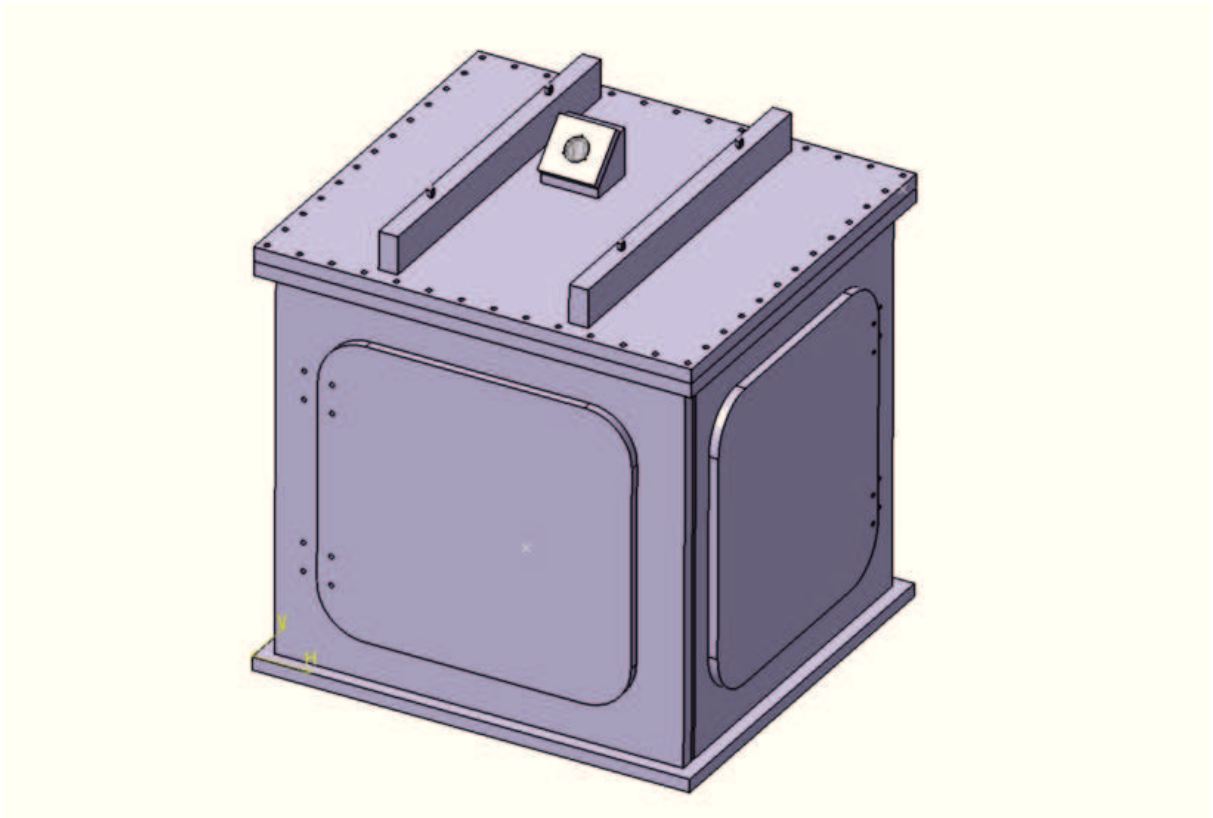


Figura 2.14: Arquitectura de base para la cámara de vacío.

talleres de la École Centrale de Lille. La masa de esta pieza asciende a unos 33 kg de los 70 que pesaría el conjunto global.

Respecto del acero a emplear, se tomará una referencia comercial que permita satisfacer las necesidades de buena soldadura y resistencia adecuada. El acero será del tipo SJ235.

2.4. Validación de la Solución

La propuesta final de la arquitectura de la cámara de vacío fue presentada a los responsables del proyecto durante una reunión informativa. En ella se justificó el cumplimiento, a nivel teórico, del pliego de condiciones dado al comienzo del proyecto, así como las modificaciones y consideraciones añadidas a lo largo del proceso de diseño.

Bajo los epígrafes siguientes se recogen los resultados de la evaluación de los aspectos críticos en el diseño de la cámara. El resultado final se considera positivo, y la propuesta fue aprobada como arquitectura de base y punto de partida para un estudio más detallado de su fabricación.

2.4.1. Estudio de la Resistencia Mecánica

El estudio de la resistencia mecánica no ha requerido - en el caso de este proyecto - un estudio exhaustivo de la resistencia frente a esfuerzos, sino del comportamiento en desplazamientos y la influencia de éstos sobre el estado global de la cámara.

2.4.1.1. Evaluación de la Abolladura

El *pandeo* y la *abolladura* son comportamientos inscritos dentro de la familia de las Grandes Deformaciones, fuera del dominio de la elasticidad lineal. La abolladura de placas suele producirse cuando el espesor de la misma es muy delgado en relación con las otras dos dimensiones, y se encuentra sometida a un esfuerzo axial en alguna de las direcciones del plano. En el anexo C se recoge una explicación más detallada del fenómeno.

La estructura de la cámara posee varios elementos susceptibles de sufrir este fenómeno debido a su delgadez relativa. Es importante determinar si el comportamiento de dichos elementos será lineal o no, de cara a efectuar un análisis correcto de la arquitectura de la cámara. A partir de las formulaciones teóricas del fenómeno de abolladura, es posible determinar un "umbral de abolladura" que dé una noción del espesor mínimo a partir del cual se produciría este comportamiento. No obstante, dicha formulación es un planteamiento teórico, sujeto a hipótesis de homogeneidad en el material y que no tiene en cuenta los posibles defectos en la superficie del material. Dichas hipótesis de perfección no son posibles en la realidad; de hecho, la existencia de defectos en el material (internos o superficiales) puede desencadenar la abolladura de la placa mucho antes de haber alcanzado el nivel de carga crítico dado por la formulación teórica.

Los elementos que podrían sufrir este comportamiento son, principalmente, las paredes laterales de la cámara y las trampillas de acceso encajadas en ellas. Cuando la cámara se encuentra trabajando en vacío, sus paredes laterales están sometidas a una presión homogénea de magnitud casi igual a la atmosférica (101200 Pa, ya que el interior trabaja en el entorno de los 100 Pa). Esta presión inducirá una flexión hacia el interior del recinto, a sumar a los efectos de la carga axial inducida por la tapa (que engloba su propio peso y la acción de la atmósfera). La combinación de estas dos cargas podría desencadenar, según su magnitud, la abolladura de las paredes de la cámara.

La aplicación de la formulación teórica (ver el anexo C) ha permitido considerar que el rango de trabajo de la cámara está lejos de alcanzar valores que pudieran desencadenar fenómenos de inestabilidad como la abolladura. Para las paredes de aluminio de 15 mm de espesor previstas en el diseño, el "umbral de abolladura" está fijado en 5535 N/mm de canto. Suponiendo una tapa infinitamente rígida que transmitiera toda la carga de la atmósfera a las paredes, su contribución sería de 12,16 N/mm de canto; añadiendo la propia masa de la tapa (0,26 N/mm de canto), la carga global (12,42 N/mm de canto) se encuentra muy lejos del umbral hallado. Así, se considera que la arquitectura prevista puede absorber la reducción del "umbral de abolladura" atribuible a la acción de la presión externa sobre la pared y a los defectos superficiales en el material. Por otro lado, ello permite aplicar, en un análisis por elementos finitos, las hipótesis habituales de linealidad, sin necesidades de hacer uso de las consideraciones de Grandes Deformaciones.

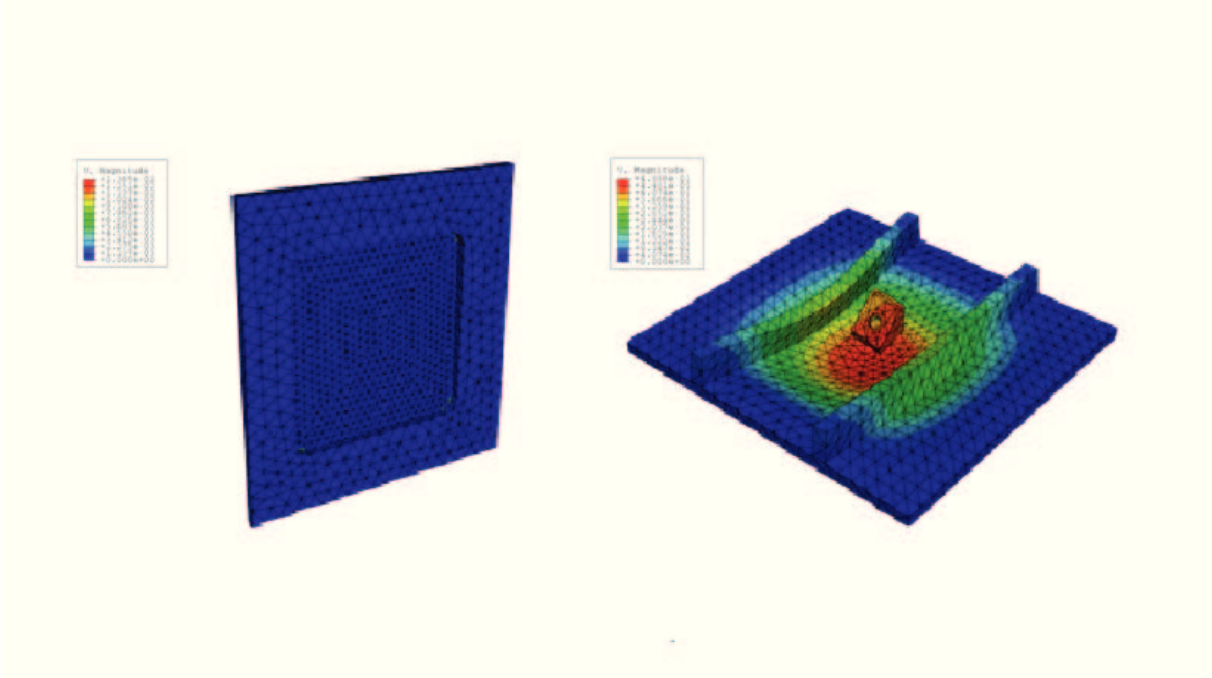


Figura 2.15: Desplazamientos en los elementos de base pared (izquierda) y tapa (derecha).

2.4.1.2. Evaluación en Desplazamientos

El estudio del comportamiento de los elementos de la cámara bajo las suposiciones de carga en vacío ha permitido concluir que la estabilidad de la estructura bajo desplazamientos quedaría garantizada.

El desplazamiento máximo en las paredes queda restringido a las esquinas de la abertura de acceso (0,5 mm), siendo la flexión general de las placas de 0,05 mm. Se ha simulado una pared lateral con su correspondiente trampilla insertada en la abertura, sometido el conjunto a una presión externa de 101300 Pa, presión interna de 100 Pa y una carga lineal en el canto igual a la carga prevista en el epígrafe anterior. La base y las esquinas se han considerado como empotradas para simular el efecto de la unión soldada con el resto de componentes del conjunto.

Por su parte, la utilización de acero en la tapa permite obtener un bajo nivel de desplazamientos. El punto de mayor desplazamiento registra 0,014 mm, y la desviación de la posición angular del espejo es de +0,0017 grados sexagesimales, lo que garantizaría la precisión de las observaciones. La simulación ha aplicado una presión homogénea por el interior y el exterior de la pieza (100 Pa y 101300 Pa respectivamente), así como un empotramiento en el contacto entre la tapa y el collarín sobre las paredes (simulando las condiciones de la unión por bulones entre tapa y paredes).

2.4.1.3. Evaluación en Tensiones

El comportamiento bajo tensiones de la cámara es ampliamente satisfactorio: las paredes no están sometidas a una tensión de Von Mises mayor de 6 MPa, para un límite

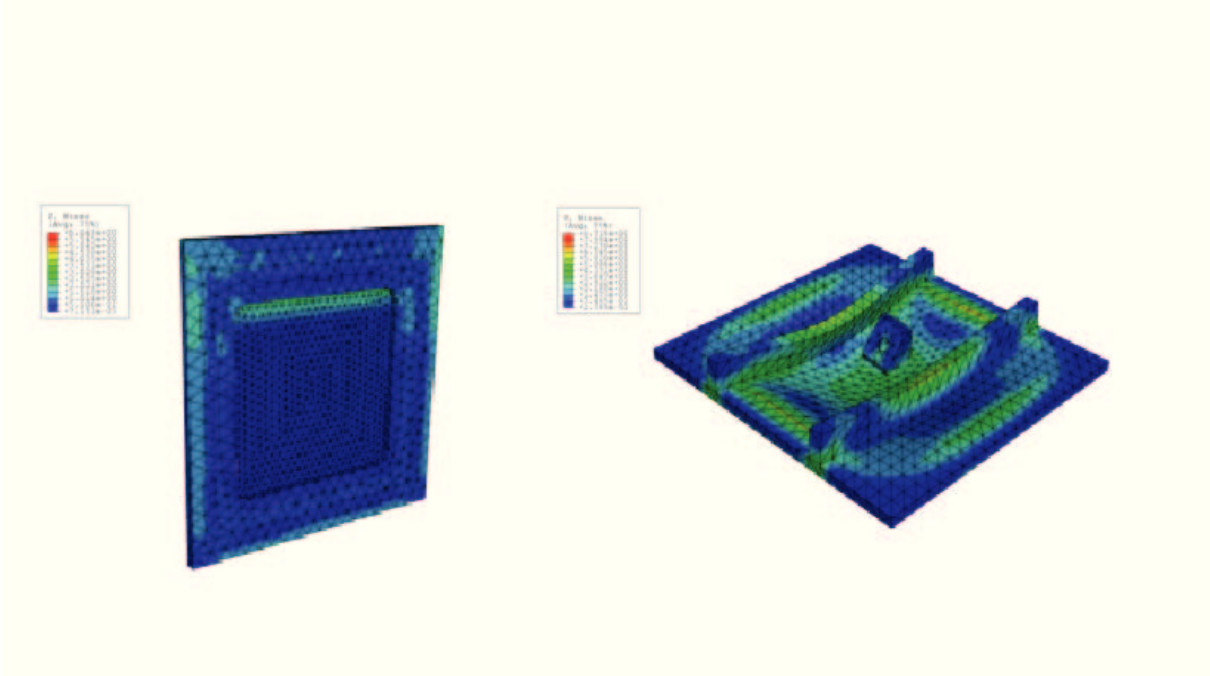


Figura 2.16: Tensiones en los elementos de base pared (izquierda) y tapa (derecha).

elástico de 137 MPa en el caso del aluminio; en la tapa, las mayores tensiones de Von Mises registradas están en el entorno de los 9 MPa, siendo el límite del acero de 260 MPa. Por lo tanto, se considera que la elección de los materiales es satisfactoria y que cumple las necesidades especificadas en el pliego de condiciones.

2.4.1.4. Evaluación de la Unión por Bulones

El modo de trabajo de la unión por bulones entre tapa y paredes es, en este caso, muy favorable. Dado que la cámara trabaja en vacío, la aplicación de una presión por parte de la atmósfera añade un efecto adicional de compresión sobre la junta de estanqueidad que incorpora la tapa. Así, la precarga de la unión mediante los tornillos permite garantizar el buen contacto entre de la tapa y la junta con el collarín de la unión, imprescindible para garantizar la estanqueidad al comenzar el proceso de vaciado de la cámara. Conforme el vacío se incremente, también lo hará la presión atmosférica, actuando sobre la tapa de la cámara. Estos esfuerzos adicionales podrían "sustituir" una pequeña fracción del esfuerzo de compresión de los bulones, que se "relajarían" ligeramente, pero no se estima que ello pueda afectar a la calidad del vacío. De acuerdo con las estimaciones dadas en el anexo B, se prevén 50 bulones en la unión entre la tapa y el collarín de base, que deberán aplicar un esfuerzo de 74000 N sobre el plano de junta para garantizar la estanqueidad de la unión.

2.4.2. Estudio del Comportamiento Óptico

El comportamiento óptico del recinto sólo podrá ser evaluado completamente una vez se haya construido la cámara de vacío. No obstante, a partir del diseño de base, es posible efectuar una aproximación a este comportamiento y predecir en cierto modo la influencia de la arquitectura prevista en el comportamiento óptico, así como las posibles

modificaciones para mejorarlo.

La observación de la probeta se hace mediante el enfoque de los sistemas de captación sobre el espejo dicroico. No obstante, la imagen transmitida por éste debe reflejar el estado real del experimento, sin interferencias. La radiación captada por el espejo pasa previamente por la mirilla de 15 mm de diámetro y 30 mm de profundidad, situada en la tapa de la cámara. Esto permite trazar un conoide que determina el lugar geométrico de los puntos capaces de radiar directamente sobre el espejo y falsear las medidas térmicas. Este planteamiento se muestra de forma esquemática en la figura 2.17.

En base a este planteamiento es posible considerar que la radiación de un punto fuera de este cono no alcanzaría el espejo sin ser previamente reflejada en alguna superficie. Por lo tanto, para garantizar una buena absorción de estas radiaciones y evitar su re-emisión, las paredes de la cámara serán tratadas con una pintura de alta emisividad, tratando de aproximarse al comportamiento de un cuerpo negro. Para favorecer la adherencia de la pintura, se procederá a dotar a las paredes de una cierta rugosidad mediante un tratamiento con arena a presión.

No obstante, el trabajo de la cámara a baja presión (100 Pa) conlleva una serie de fenómenos poco habituales que afectan a los revestimientos. De acuerdo con [4], [5] y [6], una disminución fuerte de la presión interna supone alcanzar el rango de la presión parcial de los revestimientos en relación a la atmósfera. Este fenómeno, que puede producir la evaporación de partículas metálicas en los casos de vacío ultra-fuerte (ver [5] y [7]), puede afectar a la calidad del vacío. Si bien el objetivo del experimento no requiere de un vacío muy pronunciado, sí que es posible que determinados componentes de la pintura interior sufran este fenómeno de vaporización por efecto del vacío. Será necesario, pues, observar este aspecto y consultar al proveedor o al fabricante de la pintura la posibilidad de evaporación de alguno de los componentes, así como su posible potencial de degradación de la pintura y toxicidad.

La anodización del aluminio se consideró una posible opción, ya que las superficies que reciben este tratamiento tienen un comportamiento prácticamente equivalente al del cuerpo negro. Este proceso consiste en la creación, centro de un baño galvánico, de una capa de óxido de aluminio Al_2O_3. Por desgracia, este proceso debería aplicarse, bien con el conjunto ya soldado y montado, con el coste que ello supondría (a más piezas, mayor intensidad de corriente y mayor dificultad debido a la geometría de la estructura), o bien sobre las piezas individuales, antes de soldar, lo que dificultaría el proceso (la capa superficial de alúmina Al_2O_3 debería romperse en las zonas de soldadura, y las temperaturas que se alcanzarían podrían deteriorar otras partes del tratamiento).

2.4.3. Evaluación de las Condiciones Técnicas

Como último paso de la propuesta de una solución a las necesidades del Laboratorio de Mecánica de Lille (LML), se desea hacer especial hincapié en el grado de cumplimiento de los requerimientos formulados en el pliego de condiciones, así como de las condiciones aparecidas a lo largo del proceso de diseño y que han sido incorporadas a la solución final.

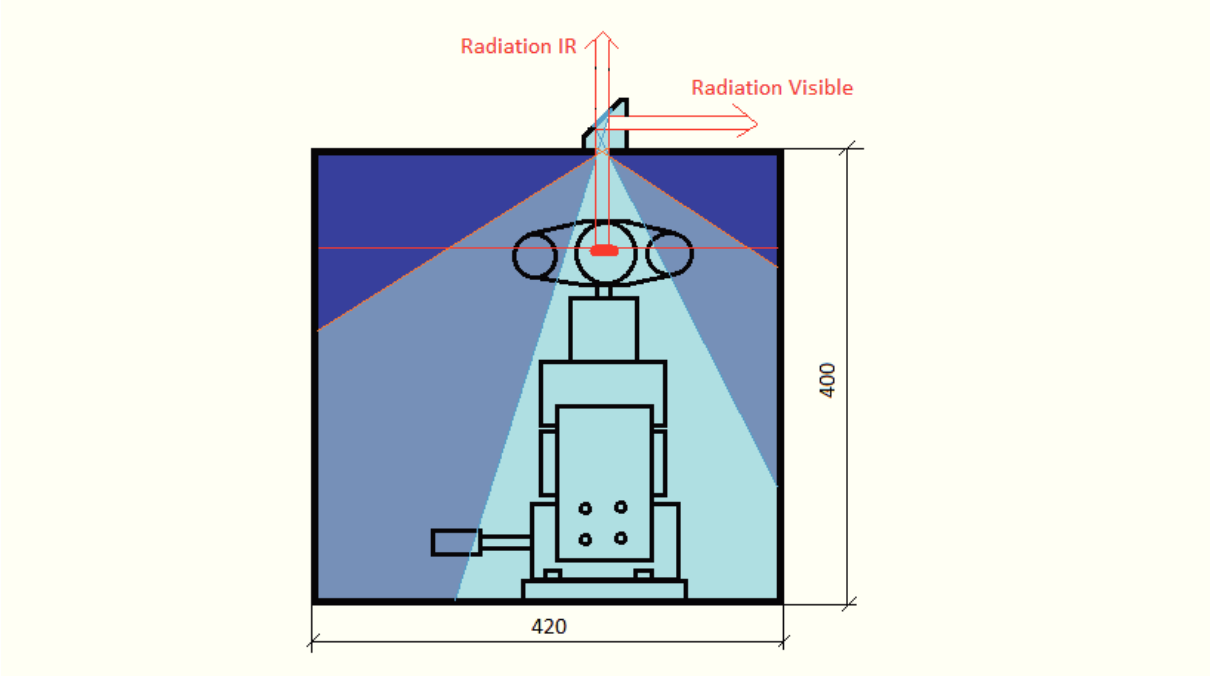


Figura 2.17: Estimación de las zonas de radiación dentro de la cámara: en rojo, imagen radiada directamente; en azul celeste, cono de irradiación directa sobre el espejo dicroico; en añil, cono de irradiación directa al espacio bajo el espejo dicroico; en azul marino, zonas de irradiación directa imposible.

- **Condiciones Técnicas:** se considera que el diseño de la cámara permite una *estabilidad frente a solicitaciones mecánicas* derivadas de un uso normal, reduciendo la influencia del comportamiento mecánico sobre la calidad de las imágenes a captar. El *comportamiento óptico* ha sido evaluado de forma cualitativa, considerándose que las hipótesis planteadas dan una idea aproximada del funcionamiento de la cámara y de los pasos a seguir para garantizar la buena obtención de imágenes.

- **Condiciones de utilización:** el criterio de obtener una *estructura ligera* no ha podido ser respetado, puesto que la elección de aluminio y acero para poder garantizar otros condicionantes ha supuesto un aumento importante de la masa. Es discutible si el empleo integral de acero y unos espesores menores habría reducido la masa final. Como se explica en el anexo D, la reducción de masa es escasa (unos 2,5 kg menos), y comportaría problemas a la hora del montaje de puertas, etc., que van atornilladas en las placas laterales. No obstante, se ha conseguido mantener la premisa de *flexibilidad*, ya que el diseño permite adaptaciones futuras, y se mantiene también la *estructura del experimento*, más compacta que en el planteamiento de la Dra. Bodelot.

3. Plan de Fabricación

La finalización de la etapa de diseño no supone el fin del trabajo sobre la arquitectura de la cámara. Si bien se han tratado de prever durante esta etapa las necesidades de la fabricación y el montaje del conjunto, es durante la elaboración del plan de fabricación cuando se deberán efectuar ciertas adaptaciones del diseño para facilitar la labor de ensamblado al personal de taller. Es por ello que se ha mostrado el diseño al personal de fabricación de los talleres de la École Centrale de Lille, para obtener su opinión acerca del mismo y poder recoger sus aportaciones al proyecto, mejorando el diseño de base.

3.1. Obtención de las Partes

Como se ha desarrollado anteriormente, la arquitectura de la cámara de vacío diseñada se compone de varias piezas simples a mecanizar a partir de preformas en bruto de los materiales escogidos. Bajo este epígrafe se desea recoger el conjunto de operaciones necesarias para la obtención de las piezas de la cámara, así como las modificaciones y adaptaciones del diseño que permitan la ejecución real de las mismas.

3.1.1. Corte

El punto de partida de la mayoría de las piezas a emplear en la cámara son planchas del material escogido, que serán cortadas en una serie de piezas en bruto, a partir de las cuales obtener los componentes definitivos. Las preformas de partida que se han previsto son: una placa de aluminio, otra placa de acero y un bloque de acero de pequeñas dimensiones.

- **Componentes de aluminio:** para la fabricación de los componentes en aluminio tipo 5000, se partirá de una placa de este material de 2 m^2. Esta placa permite el corte de las piezas necesarias con una sobredimensión de cara al mecanizado final, siempre dejando un espacio libre entre las mismas de cara a la operación de corte. Esta operación sería realizada mediante un banco de corte por láser, disponible en el taller del Departamento de Mecánica de la École Centrale de Lille. Este sistema presenta la ventaja de poder practicar los cortes interiores para dar lugar a las trampillas de acceso en los laterales de la cámara. En la figura 3.1 se muestra una posible disposición de las piezas sobre una plancha de 2 m^2.

- **Componentes de acero:** la única pieza en acero de la cámara es la tapa, que se compone a su vez de la placa de base y del alojamiento del espejo dicroico. La placa de base se fabricará a partir de una plancha de acero de unas dimensiones de 500

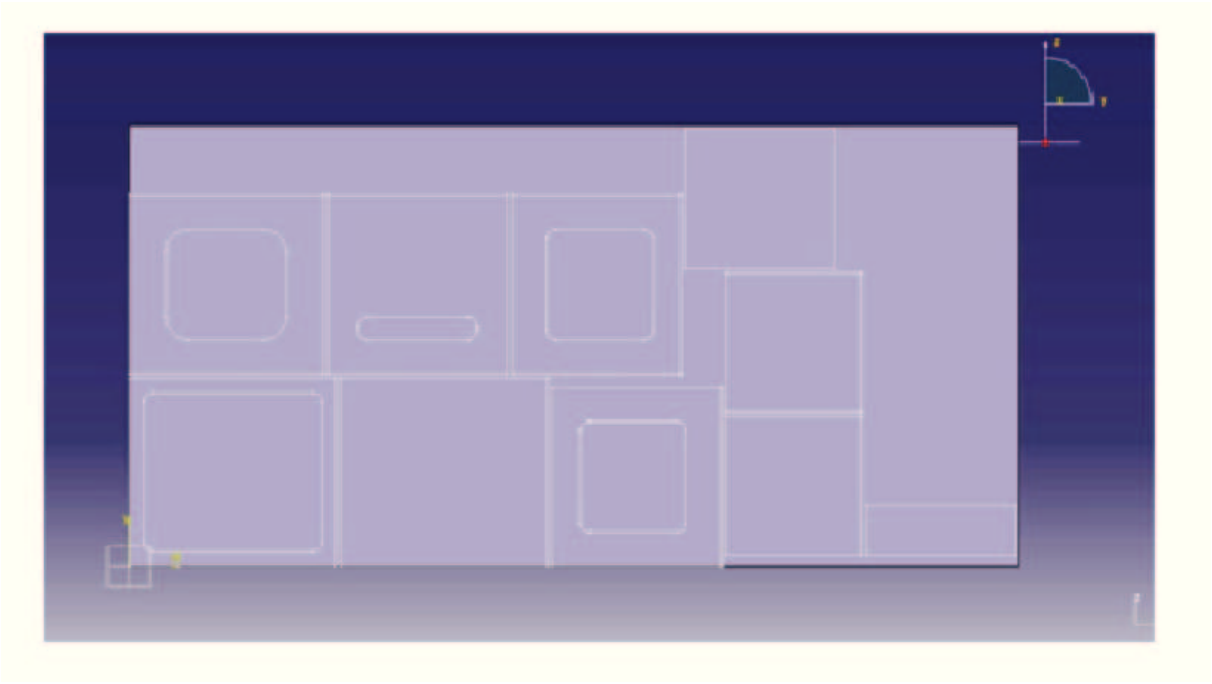


Figura 3.1: Posible colocación de las piezas de aluminio sobre una plancha en bruto de 2 m^2.

x 500 mm aproximadamente, y 20 mm de espesor. Para el alojamiento del espejo, se debería partir de un bloque de acero cúbico o similar, de unos 60 mm de arista como mínimo. Se empleará el tipo de acero SJ235.

3.1.2. Mecanizado

Una vez obtenidas las piezas en bruto, se procederá al mecanizado de las mismas para obtener las dimensiones requeridas en los planos, así como al acabado de las superficies de contacto para garantizar un correcto ensamblaje.

3.1.2.1. Componentes de aluminio

- **Paredes laterales:** se procederá a un acabado en todos los cantos de las placas de pared, para obtener las dimensiones previstas. Este acabado se aplicará también sobre las aberturas interiores. Así mismo, se mecanizarán chaflanes en las zonas de unión entre placas laterales, para aplicar en ellos el cordón de soldadura. Finalmente, se practicarán los roscados para las bisagras de las puertas y de los mecanismos de cierre. La figura 3.2 permite observar los detalles sobre la pieza.

- **Base:** la base será objeto de un mecanizado en todas sus superficies para garantizar un buen apoyo de las piezas durante el montaje. Además, se realizará un rebaje alrededor del centro, que permitirá fijar la posición de las paredes como paso previo a su soldadura. Por último, se deberán practicar los roscados para el sistema de mesas micrométricas sobre las que se asentará la máquina de ensayos, y los anclajes del sistema de apoyo de la cámara.

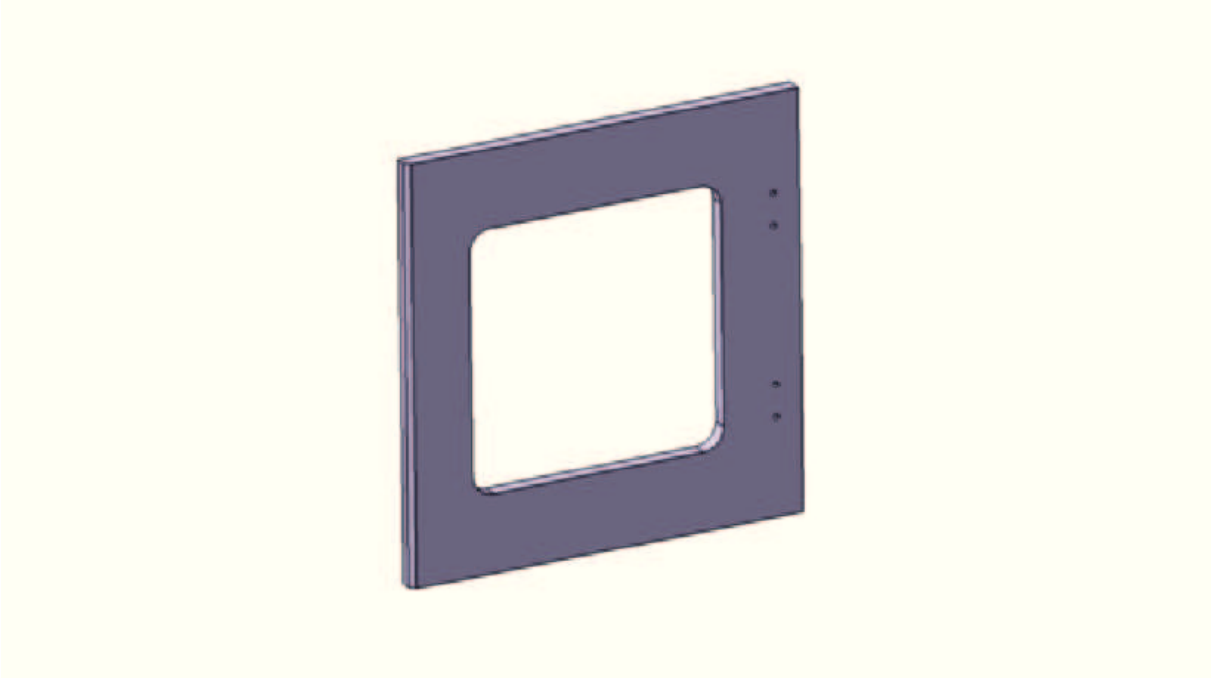


Figura 3.2: Vista de una pared lateral. El chaflán sirve para practicar la soldadura con la otra pared concurrente. Se observan los roscados para el sistema de bisagras de la puerta.

- **Collarín de anclaje:** montado sobre las paredes laterales, el collarín tiene como función servir de superficie de anclaje de la tapa, ofreciendo la superficie necesaria para la unión atornillada entre aquella y el resto de la cámara. Deberá ser mecanizado cuidadosamente para garantizar un buen apoyo sobre el canto superior de las paredes, además de incorporar los taladros pasantes para el alojamiento de los bulones.

- **Puertas de acceso:** las placas correspondientes a las trampillas de acceso recibirán un mecanizado para formar el centrado de las mismas dimensiones que la abertura que han de sellar. También se mecanizará la ranura de alojamiento de la junta de estanqueidad, y los roscados para las bisagras y el sistema de anclaje. En el caso de la portezuela izquierda también se practicará la abertura para el "tapón" de interfaz de la micromáquina. El raccord trasero recibirá también los taladros necesarios para la inserción de la válvula de conexión y puesta en vacío, y los conectores eléctricos. Un detalle de las puertas laterales se muestra en la figura 3.3

3.1.2.2. Componentes de acero

El conjunto de la cámara sólo implica una pieza en acero: la tapa. ésta se compone, a su vez, de un plano de base y del alojamiento del espejo dicroico, que deben ser tratados por separado como paso previo a su ensamblaje final.

- **Plano de base:** el plano de base será mecanizado a partir de una placa de acero de aproximadamente las dimensiones finales de la pieza. Las operaciones a realizar sobre la pieza serán, en esencia, los mecanizados de ambas superficies, dejando un centrado en la parte inferior que encaje en el hueco del collarín de anclaje, y una

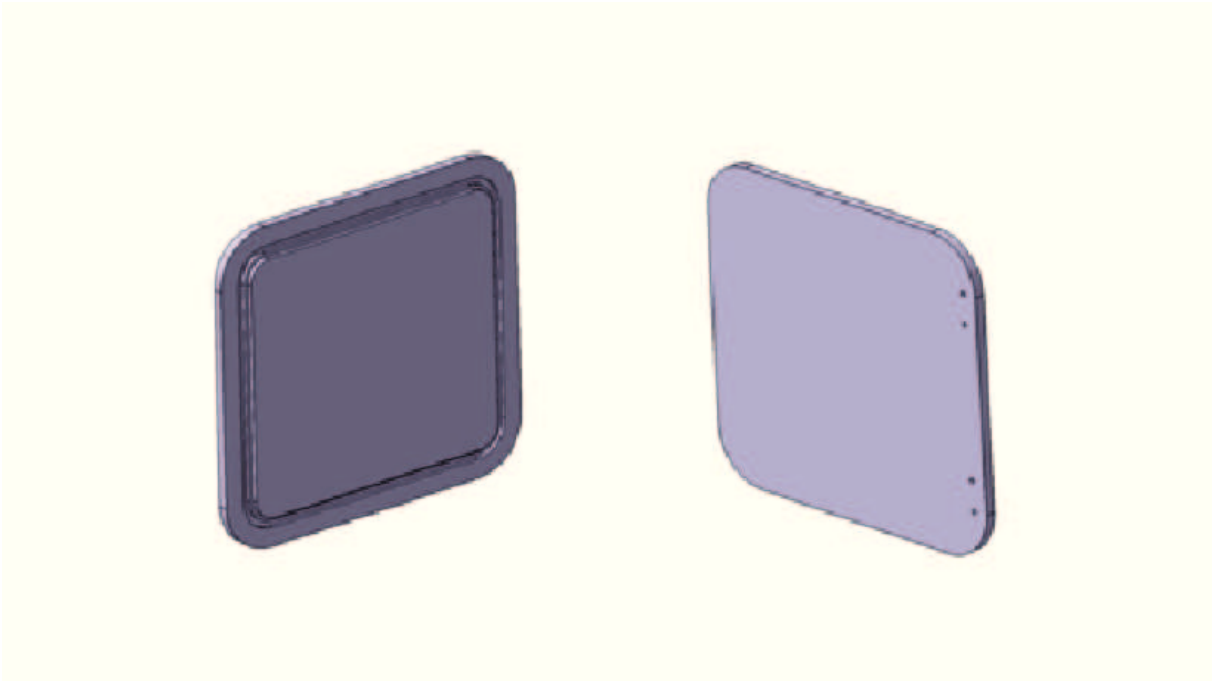


Figura 3.3: A la izquierda, lado interior de una puerta. Nótese el centrado de la puerta y el alojamiento de la junta de estanqueidad. A la derecha, lado exterior, con los roscados para la fijación de las bisagras.

sobreelevación rectangular en la posición del alojamiento del espejo dicroico, para favorecer el ajuste de la pieza durante el montaje. Con este mismo fin, se prevé un ligero marcado en la posición de los dos nervios de refuerzo. Finalmente, se prevé el taladrado de la mirilla de observación y de los alojamientos para los bulones de anclaje al resto de la cámara.

- **Alojamiento del espejo:** la base del alojamiento del espejo será mecanizada a partir de un bloque en bruto de acero, al que se le practicarán las aberturas de entrada desde la cámara, y de salida de la radiación visible. El bloque será vaciado y mecanizado, formando un plano a 45 grados con la placa de base; sobre dicho plano se dispondrá una plaqueta con el alojamiento del espejo dicroico ya mecanizado.

3.2. Soldadura de los Componentes

El ensamblaje global de la cámara se efectuará, para la mayoría de los componentes, mediante una serie de soldaduras. A pesar de la dificultad que puede revestir esta operación, especialmente en el caso de la soldadura del aluminio, se ha escogido como solución por su fuerte rigidez y por dar una garantía de estanqueidad en las uniones. No obstante, es necesario prever la forma en que se realizará cada una de las operaciones para poder adaptar el diseño y facilitar el trabajo en la medida de lo posible.

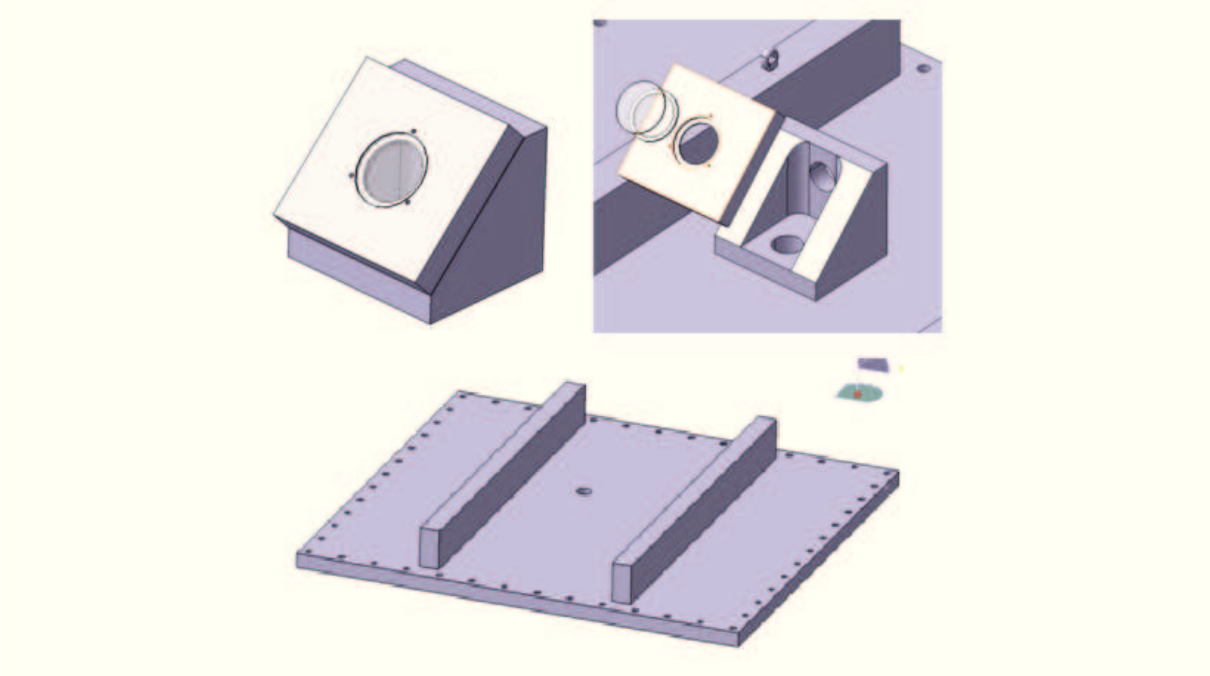


Figura 3.4: De arriba a abajo, de izda. a dcha., alojamiento del espejo dicroico; estallado del alojamiento del espejo; plano de base de la tapa.

3.2.1. Cuerpo de Aluminio

La soldadura de la estructura de base y las paredes laterales se realizará mediante aporte de material a la unión, en los chaflanes previstos en el diseño de las piezas. Hay que destacar que la soldadura en aluminio es especialmente compleja debido a la baja soldabilidad del material, siendo necesario escoger las aleaciones apropiadas para la operación. Como paso previo a la operación, es necesario un decapado y un desengrasado de las superficies a soldar, para evitar la formación de intrusiones de hidrógeno en el cordón de soldadura. Además, es necesario emplear una atmósfera de gas inerte sobre la zona de soldadura para evitar la formación de óxidos indeseados. La fuerte conductividad térmica del aluminio supone también un problema, ya que una sobreexposición al calor de la soldadura podría comportar deformaciones incontroladas en las piezas.

Las soldaduras entre las paredes y la base se efectuarán siguiendo la base de las primeras, en el ángulo de 90 grados que forman con el rebaje de la base, por el exterior de la cámara. Esta disposición permite realizar una soldadura cómoda, y además aporta un chaflán donde depositar el material de aporte, pudiendo inspeccionarse la soldadura con facilidad. La unión de las paredes laterales entre sí se efectuará mediante cordones de soldadura verticales, aportando el material en los chaflanes dispuestos a tal efecto en los bordes de las placas. La placa frontal tendrá dos cordones, uno en cada lado (en cada uno de los chaflanes correspondientes); la placa trasera se une a las placas laterales del mismo modo, ver en la figura 3.5. Por último, la soldadura del collarín de unión con la tapa se practicará de forma análoga a la de la base: aprovechando el ángulo entre la coronación de las paredes y el saliente del collarín, se efectuará en él el aporte de material a la soldadura.

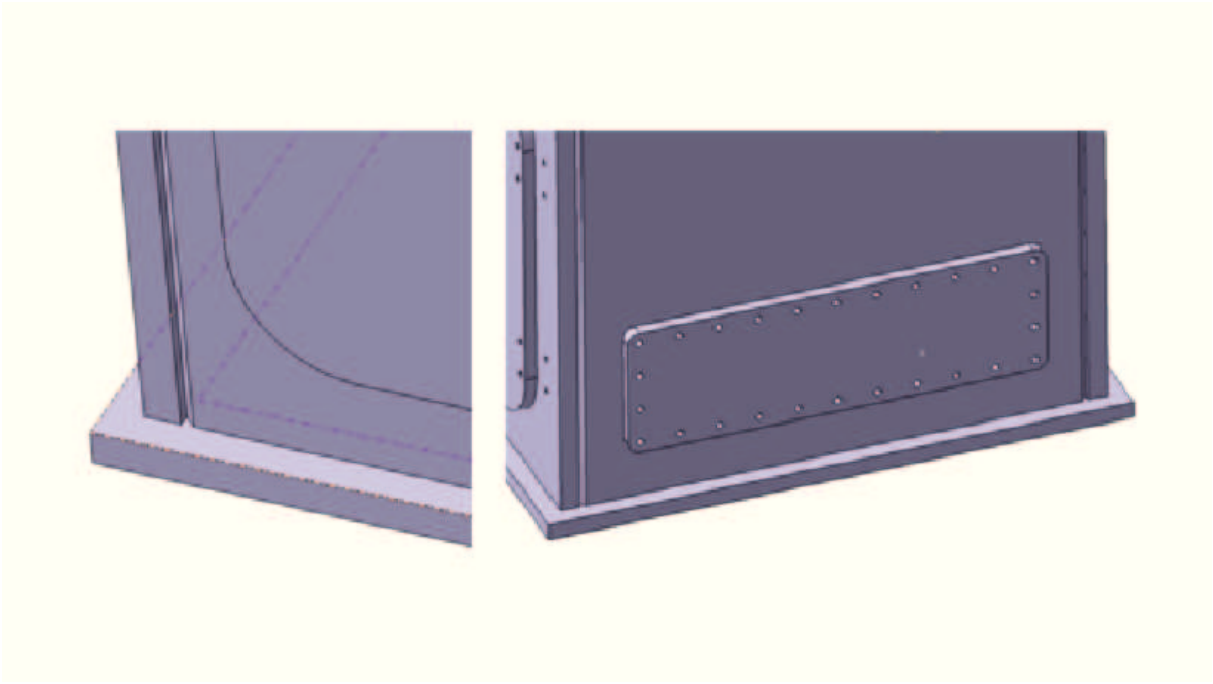


Figura 3.5: De izquierda a derecha, detalle del chaflán de soldadura en una esquina y vista de ambos chaflanes en la placa trasera, a los lados del "raccord".

3.2.2. Tapa de Acero

La unión de las piezas de acero se efectuará también mediante un aporte de material a la soldadura. Dado que el alojamiento del espejo dicroico es el punto a ejecutar con la mayor precisión posible, se prevé el uso de registros o alguna adaptación de la geometría, de modo que el ensamblaje de la plaqueta del alojamiento con el bloque mecanizado no esté sujeto a grandes deformaciones durante el proceso de soldadura.

Así pues, la plaqueta con el emplazamiento del espejo será soldada en dos etapas: primero se soldarán los extremos superior e inferior de la plaqueta, en los que ésta forma un ángulo con el bloque de base. Cuando la posición de la pieza esté asegurada, se soldarán los laterales de la plaqueta, donde ésta se apoya en el bloque de base (ver en la figura 3.6).

Cuando el bloque del alojamiento del espejo esté preparado, se colocará sobre el registro previsto en la superficie superior de la placa de base. Una vez asegurada la posición, de practicarán los cordones de soldadura alrededor de la base. Como último paso, de plantea un procedimiento similar para los nervios situados en la parte superior de la tapa: colocación en los registros para asegurar su posición y aplicación del cordón de soldadura para fijarlos.

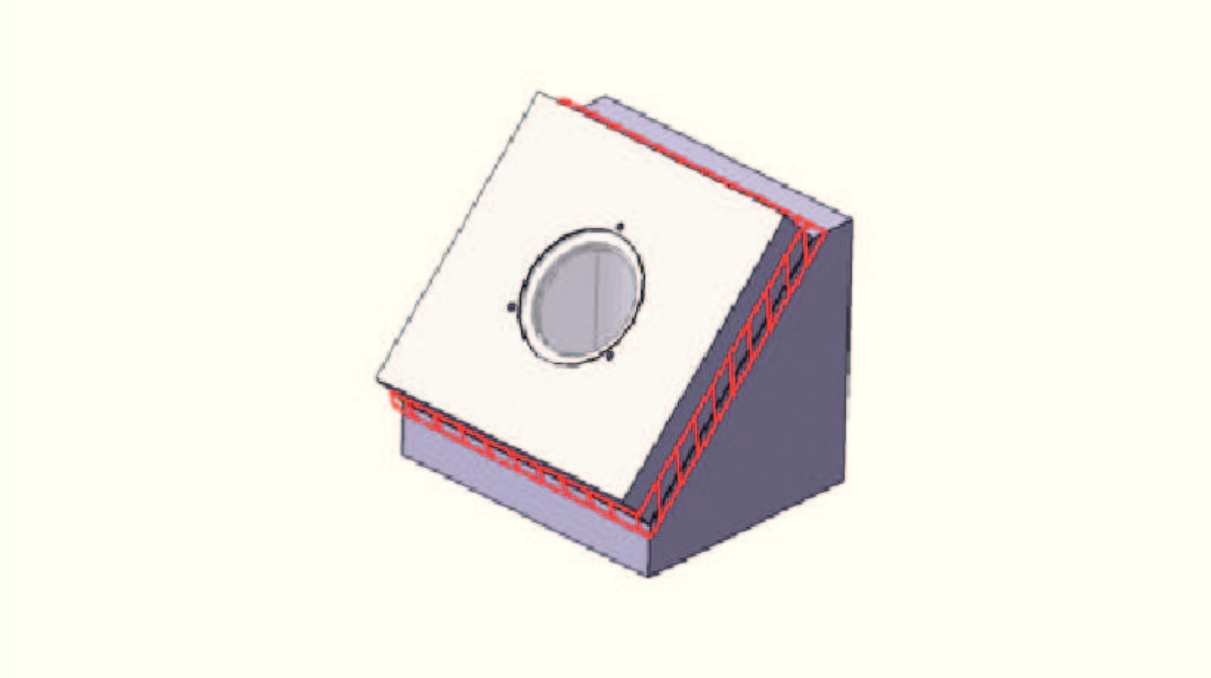


Figura 3.6: En rojo, cordones de soldadura para el montaje del alojamiento del espejo dicroico.

3.3. Ensamblaje de la Cámara de Vacío

El montaje final de la cámara requiere de una operación previa de preparación de las superficies internas y del revestimiento de pintura de alta emisividad. En una primera fase, se tratarán las superficies mediante la inyección de arena a presión, para obtener una cierta rugosidad que favorezca la adherencia de la pintura. Una vez hecho esto, se aplicará de forma cuidadosa la pintura de alta emisividad. Este tratamiento superficial debería proporcionar un buen comportamiento óptico de la cámara, reduciendo la radiación de fondo y evitando las reflexiones parásitas sobre la probeta a ensayar.

Una vez se ha realizado el revestimiento, sólo resta equipar los componentes más pequeños y efectuar el ensamblaje del conjunto. Para ello, se montarán sobre las trampillas de acceso y la tapa las juntas de estanqueidad; se instalarán los sistemas de cierre y las bisagras, y se procederá al montaje de las trampillas en sus posiciones correspondientes. El ensamblaje de la cámara termina con la unión de la tapa de acero al resto de la estructura de aluminio, y la instalación del espejo dicroico y de la ventana de observación de radiación visible en sus respectivos alojamientos en la tapa.

3.4. Montaje de los Anexos

La configuración final del experimento requiere de una serie de anexos que permiten facilitar el posicionamiento y la manipulación de la cámara de vacío, de los sistemas de observación, así como los sistemas de control y de puesta en vacío de la cámara. Bajo este epígrafe se detallan las disposiciones finales respecto a su ejecución práctica y los materiales empleados.

3.4.1. Pórtico

El diseño previsto inicialmente para el pórtico se ha considerado como apropiado, ya que garantiza la compacidad del experimento. No obstante, dada la masa de la cámara, la presencia del pórtico hace difícil su colocación. Es por ello que se ha previsto un sistema de desplazamiento que permita colocar la cámara bajo el pórtico, desplazándola desde una posición anexa, que sirva a la vez como zona de trabajo. Ello implicará unas pequeñas modificaciones en la estructura original del pórtico.

Como estaba previsto, los pilares del pórtico deberán cambiarse por otros más largos que permitan la holgura necesaria para acoplar el sistema de captación infrarroja. Las traviesas transversales junto con el par de tornillos de potencia que permiten el desplazamiento en el plano XY se guardarán en el estado actual. No obstante, la necesidad de poder acceder libremente a los laterales de la cámara e introducirla bajo el pórtico requiere una modificación de la estructura original: los pilares del pórtico pasarán a situarse en las esquinas de la base, y se reciclarán dos de los antiguos pilares para crear dos traviesas-dintel adicionales que servirán de apoyo al sistema de desplazamiento original, como se muestra en la figura 3.7.

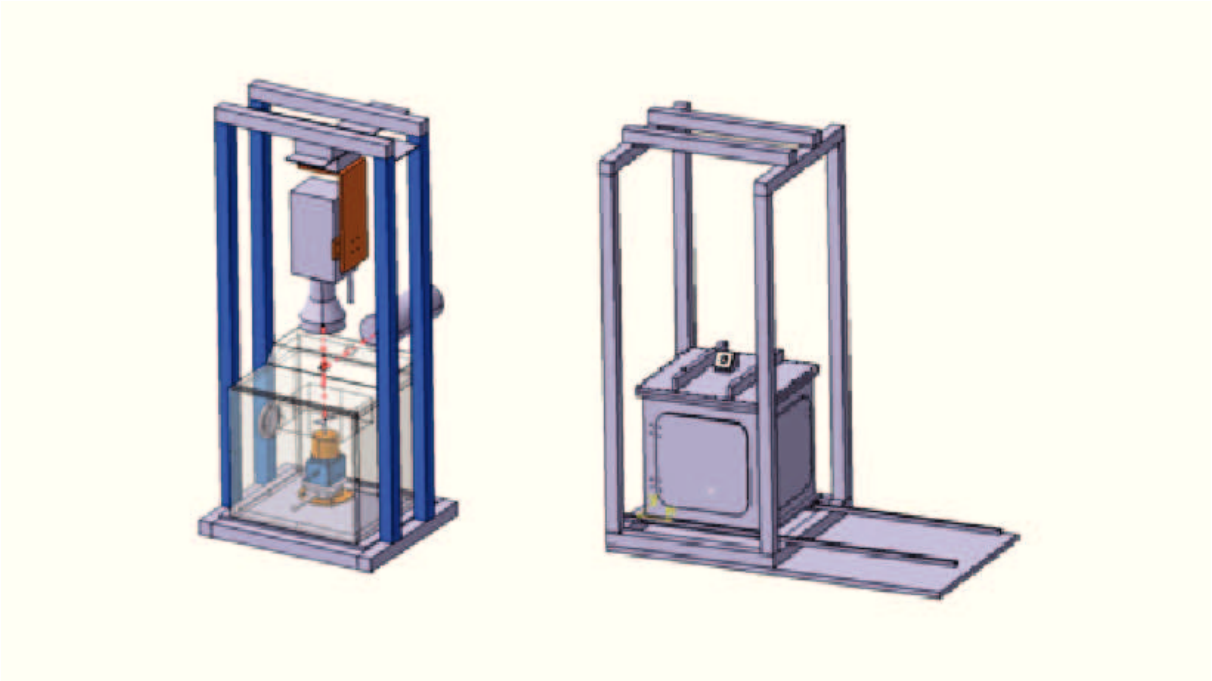


Figura 3.7: A la izquierda, pórtico inicial (*figura tomada del informe IMPACT de Romain Desbats*). A la derecha, nuevo diseño de la estructura del pórtico.

3.4.2. Raíles de Guiado

Uno de los resultados obtenidos a partir del diseño en 3D ha sido la estimación del peso de la cámara en vacío, que se sitúa en el entorno de los 70 kg. Dado que las leyes de seguridad e higiene en el trabajo en Francia prohíben que una persona manipule más de

30 - 35 kg por sí sola, y que la cámara de vacío se sitúa bajo un pórtico, el manejo de la misma es complicado.

Para facilitar este trabajo, se han previsto dos adaptaciones: la primera es el aprovechamiento de los nervios de refuerzo de la tapa para usarlos como base de un posible sistema de izado o elevación (sea con taladros pasantes para introducir barras o eslingas, sea atornillando unos "ojos" con el mismo propósito). La segunda adaptación es un sistema de raíles de guiado empleando un producto estandardizado de la marca Bosch. Estos raíles estarían embutidos en la mesa/bancada, y sobre ellos se apoyan unos carros portadores a base de rodamientos. Estos carros poseen una cualidad interesante: admiten una regulación de la altura sobre el carril, lo que permitiría corregir las desviaciones en la posición angular de la cámara bajo el pórtico (ángulos de cabeceo y alabeo).

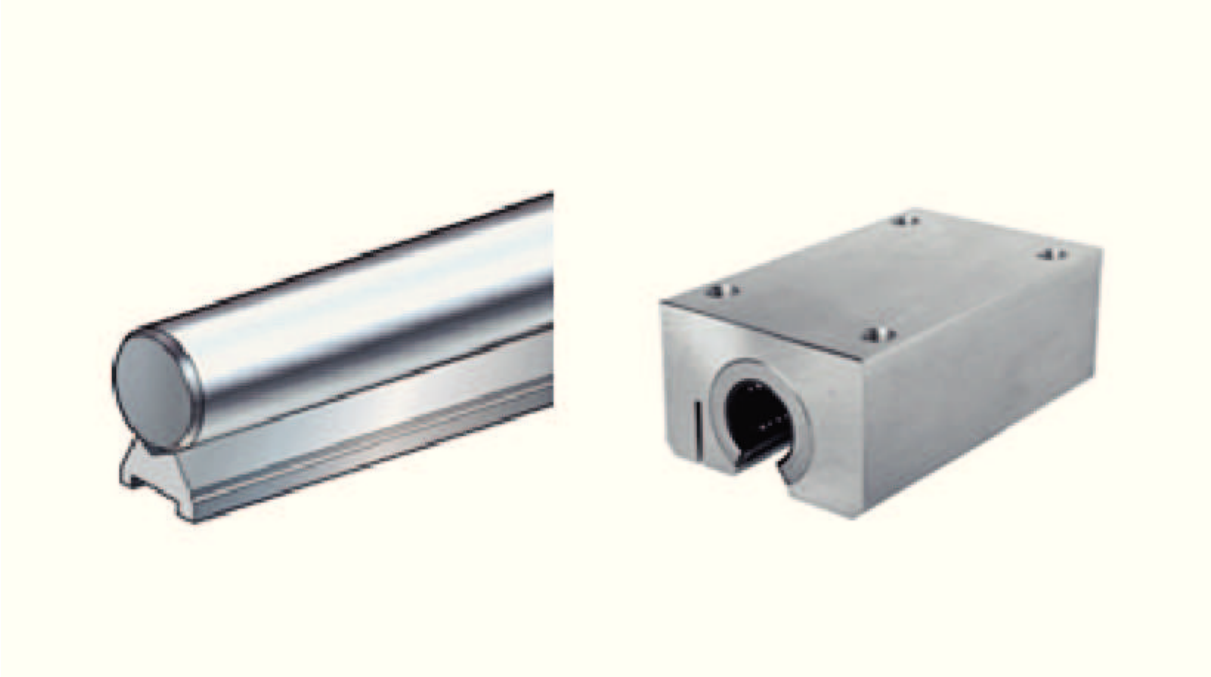


Figura 3.8: A la izquierda, raíl Bosch propuesto. A la derecha, ejemplar de patín portador.

3.4.3. Sistemas de Control y Servicio

La cámara de vacío estará acompañada de una serie de sistemas de control anexos, que regularán tanto el funcionamiento de la cámara de vacío como el ensayo en la micromáquina. A excepción del acceso por el lateral izquierdo de la interfaz de la micromáquina, todas las conexiones se efectúan a través del raccord colocado en la parte trasera de la cámara.

Se prevé la colocación de una toma de vacío del tipo DN 25, que unirá la cámara al compresor de servicio. Se prevé una segunda válvula de vacío en el caso de que se disponga de un sistema con regulación que monitorice permanentemente el nivel de vacío

dentro de la cámara. Este sistema podría ser completado con una válvula de tres vías en caso de prever la realización de ensayos bajo atmósfera controlada de gas inerte (argón, nitrógeno...). En este último caso, sería necesario verificar la estanqueidad de los sistemas de cierre para garantizar un buen funcionamiento durante los ensayos. Por último, se instalará un manómetro sobre la tapa, en la parte frontal, para obtener la lectura de la presión interior. En función de las necesidades, se podrían instalar otros manómetros en las conexiones de la parte trasera en entradas de gas, salidas de vacío, etc.

Finalmente, se prevé la entrada de una alimentación eléctrica para el sistema de iluminación del experimento. Para facilitar el paso del cableado, se ha previsto el uso de conectores BNC (usados muy habitualmente en osciloscopios y otros instrumentos de laboratorio), insertándolos en alojamientos dispuestos a tal efecto. Las holguras entre el conector y su emplazamiento se rellenarían con una resina estructural. Este montaje ya ha sido empleado con éxito en el tribometro existente en las instalaciones del Departamento de Mecánica.

4. Estimación Económica

Una vez finalizada la fase de diseño, y habiendo previsto de forma cualitativa el proceso de fabricación de la cámara, se consideró oportuno obtener un primer presupuesto y evaluar los costes de fabricación. Para ello, son dos los talleres a los que se plantean las necesidades del proyecto: el taller de mecánica de la École Centrale de Lille y la compañía Dassonville (radicada en Wattrelos, área metropolitana de Lille), proveedor habitual de la École Centrale.

Cada uno de los talleres consultados proporcionó un presupuesto en base a las directrices generales del diseño, dando una estimación del tiempo necesario para la fabricación.

- El *taller de mecánica de la École Centrale de Lille* cifra el coste de fabricación de la cámara entre **4000** y **5000** Euros. Este coste no comprende materias primas ni las operaciones de soldadura en aluminio, a realizar externamente o por un profesor de la École Centrale de forma altruista, previa preparación. El tiempo estimado para la ejecución del encargo se estima en **4 semanas** más los plazos de aprovisionamiento de materias primas.
- La compañía de fabricaciones mecánicas *Dassonville* ha estimado un coste de fabricación (soldaduras incluidas) de **7700** Euros. El tiempo de ejecución se estima en **8 semanas** más los plazos de aprovisionamiento de las materias primas.

A los costes aportados por los dos talleres arriba mencionados hay que añadir los costes de los dispositivos anexos para complementar el equipamiento del experimento. De acuerdo con los trabajos previos [2], estos costes de desglosan en los siguientes apartados.

- El conjunto de **mesas micrométricas** de base para la máquina de ensayos se estima de unos **850** Euros.
- Para la **instalación y dispositivos de vacío SIN regulación** se valora un coste de **3040** Euros.
- En el caso de contemplar un **sistema de vacío CON regulación**, el precio asciende a **4260** Euros.

Se estima que el coste de fabricación de la cámara de vacío más todos los componentes para la realización del experimento se sitúan en la horquilla entre **8400** Euros, para un dispositivo fabricado en la École Centrale de Lille y sin regulación en el sistema de vacío, y **12800** Euros, para una cámara construida por Dassonville e implantando un sistema de regulación para la instalación de puesta en vacío.

5. Conclusiones

Tras el desarrollo de las etapas de diseño, previsión de la fabricación y de los ensayos sobre los componentes involucrados en el proyecto, se desea aportar, bajo este epígrafe, el estado actual de los trabajos y grado de cumplimiento de los objetivos iniciales, así como unas breves consideraciones acerca del desarrollo del proyecto.

5.1. Acerca de la Cámara

En este apartado se desea recoger, de forma sucinta, el estado actual en el diseño de la cámara, así como algunos detalles acerca del desarrollo del proyecto en lo que a ella se refiere.

El proyecto ha culminado con un nuevo diseño de la cámara. Partiendo de los trabajos previos, se ha realizado una revisión de los mismos, y se ha desarrollado una solución que cumple, de forma mayoritaria, los aspectos básicos expresados en el pliego de condiciones. El diseño incorpora un estudio de la estructura de la cámara, justificando tanto la arquitectura como los materiales utilizados en base a consideraciones técnicas y cálculos. Así mismo, se ha trabajado sobre la fase de fabricación de la cámara, previendo las operaciones necesarias para el ensamblaje, e intentando adelantar posibles problemas para acomodar el diseño a la fase de ejecución práctica. Además, se han podido obtener dos estimaciones de coste de fabricación de la cámara, para poder dar una idea del coste global del experimento. Todo este proceso ha estado acompañado de una labor de información y puesta al día de los responsables del proyecto, que han recibido información actualizada cada dos semanas acerca de los avances en cada una de las áreas.

Sin embargo, se desea hacer hincapié en el hecho de que, si bien el diseño está terminado de forma "cualitativa", se prevé un trabajo posterior de preparación de planos, estimación de tolerancias de fabricación, etc., una vez que el proyecto pase de forma efectiva a la fase de fabricación. Ello requerirá nuevos contactos con el personal de taller, para adecuar los planos a sus necesidades. Este aspecto cobra más importancia aún si la fabricación se desarrolla en una empresa externa a la École Centrale de Lille y al Laboratorio de Mecánica de Lille, en cuanto no es posible establecer un contacto permanente con sus talleres y operarios.

5.2. Acerca del Experimento

El desarrollo del experimento ha quedado bien precisado desde los trabajos precedentes, y con las consignas relativas a los ensayos y comprobaciones con las modificaciones aportadas a la arquitectura de la cámara y de los anexos. No obstante, el apartado de los dispositivos a emplear queda abierto, por cuanto la máquina de ensayos no está, actualmente, en condiciones de desempeñar sus funciones de forma exacta.

Los problemas encontrados en la puesta a punto no permiten prever, de forma inmediata, su utilización, hasta que se esclarezca la fuente de los fenómenos de no linealidad y relajación de esfuerzos. Corresponde a los responsables del proyecto, así como al Laboratorio de Mecánica de Lille, la decisión de continuar los ensayos y aprovechar el material existente, o bien desecharlo y adquirir una máquina de prestaciones similares, pero comercial.

5.3. Consideraciones Finales

Se desea, finalmente, hacer un balance final acerca del proyecto. De acuerdo con el pliego de condiciones, se ha conseguido un diseño que se ajusta a la mayoría de los requisitos. Además, éste diseño incorpora las mejoras y sugerencias surgidas a lo largo de las sesiones informativas con los responsables del proyecto, así como del personal de taller en lo que se refiere a las adaptaciones de cara al ensamblaje del conjunto.

Por otro lado, si bien el proyecto no renueva el concepto ya existente de cámara de vacío dentro de la tecnología, sí que aporta una solución ajustada a las necesidades del Laboratorio de Mecánica de Lille, permitiendo una adaptación posterior de la arquitectura e, incluso, la reutilización de ciertos componentes de cara a otros montajes o experimentos.

Bibliografía

[1] L. BODELOT. *Étude couplée des champs cinématiques et thermiques à l'échelle de la microstructure des matériaux métalliques.* 2008.

[2] R. DESBATS. Réalisation d'essais sous vide sur micromachine de traction avec des mesures optiques dans le visible et l'infrarouge. Technical report, École Centrale de Lille, 2012.

[3] M. COLOMBIÉ et coll. *Matériaux Industriels - Matériaux Métalliques.* Ed. DUNOD, 2000.

[4] J. LECLERC. *Techniques du Vide: Introduction.* Ed. Techniques Ingénieur, 1997.

[5] J. LECLERC. *Nature et Qualité du Vide.* Ed. Techniques Ingénieur, 1997.

[6] J. LECLERC. *Vide et Environnement.* Ed. Techniques Ingénieur, 1983.

[7] L. MAURICE. *Pompes à Vide.* Ed. Techniques Ingénieur, 1983.

[8] G. DROUIN et all. *Éléments de Machines.* Ed. École Polytechnique de Montréal, 1986.

[9] M. AUBLIN et all. *Systhèmes Mécaniques.* Ed. DUNOD, 2004.

Anexo A.
Desviaciones Angulares

La arquitectura de la cámara de vacío prevé la utilización de dos dioptrios para transmitir las imágenes del interior de la cámara a los sistemas de observación infrarroja y visible. Para ello, se emplea un espejo dicroico y una ventana de observación. El objetivo de esta disposición es, como se explica en el desarrollo del diseño, evitar el "Efecto Narciso", es decir, el reflejo especular del objetivo sobre la superficie de observación, que es captado junto con la imagen deseada. Además, la integración del sistema de dioptrios en la estructura de la cámara permite evitar el colocar mecanismos de manipulación, que complicarían la estructura al necesitar de una interfaz entre el interior y el exterior.

Esta disposición requiere una gran rigidez de la estructura, ya que se ha de garantizar que durante el trabajo en vacío, las deformaciones inducidas sobre los alojamientos de los dioptrios son mínimas, y no comprometen la transmisión de las imágenes hacia el sistema de observación. El alojamiento del espejo dicroico es el más conflictivo si cabe, puesto que al encontrarse en una posición casi central en la tapa, es el área que puede sufrir las mayores deformaciones.

A.1. Principio Geométrico

El alojamiento del espejo es una superficie inclinada a 45 grados, con una mirilla y un alojamiento. El espejo se fija mediante tres tornillos de pequeño diámetro, apoyado sobre una arandela de goma que sirve a la vez de junta de estanqueidad. En el diseño de base, planteado por el trabajo del alumno Romain Desbats, la superficie a 45 grados pertenece a la estructura básica de la tapa, como se muestra de forma esquemática en la figura A.1.

Al someter a la cámara a una puesta en vacío, los desplazamientos en el área del alojamiento del espejo tienen una componente principal vertical, siendo los desplazamientos en los otros dos ejes unos dos órdenes de magnitud menores. Suponiendo que el espejo es "aproximadamente rígido", es posible considerar que, debido a las diferencias en los desplazamientos verticales de sus extremos, experimentará una ligera rotación. Una rotación incontrolada podría suponer una mala transmisión de la imagen, ya que el ángulo de incidencia y reflexión de la imagen no sería el mismo.

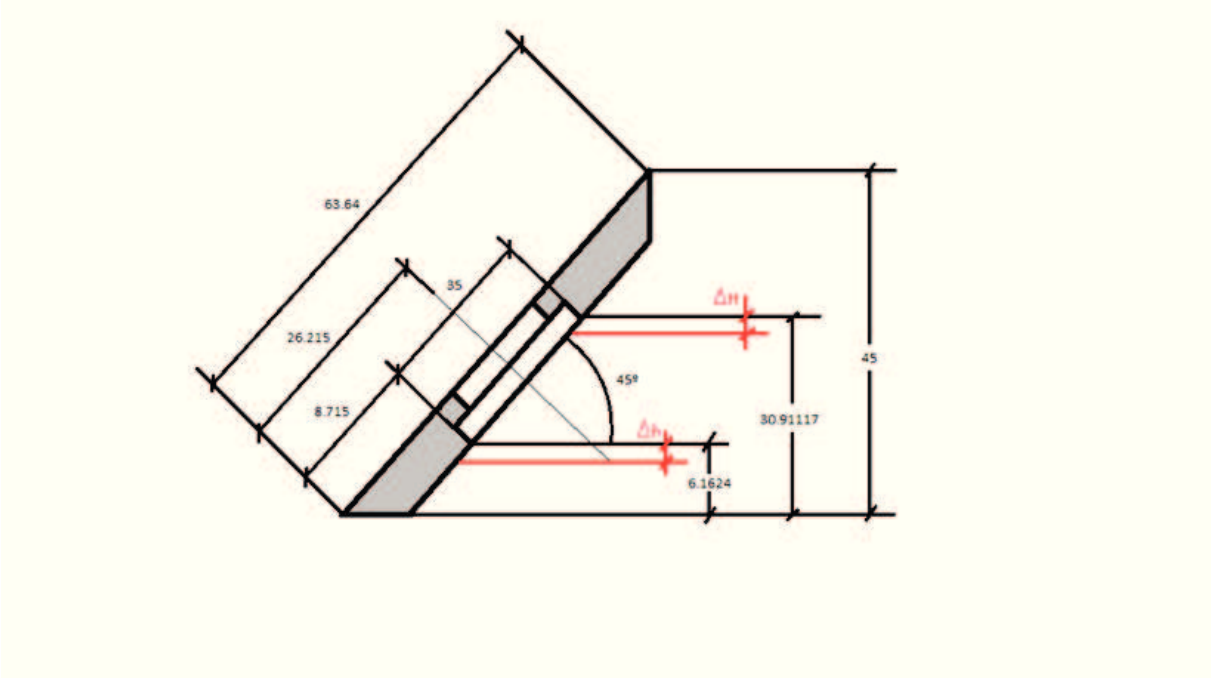


Figura A.1: Detalle esquemático con la geometría del alojamiento del espejo dicroico.

La desviación en la posición angular del espejo puede describirse en función de la variación de la posición de los puntos extremos del alojamiento, proporcionada como un desplazamiento mediante un análisis por elementos finitos. Si se toma el espejo como "aproximadamente indeformable", se puede tomar su diámetro como fijo, y obtener el ángulo final tras someter al conjunto al vacío, como se muestra en la figura A.2.

$$\alpha' = arcsin(\frac{H'}{35}); H' = (30,91117 - \Delta\mathrm{H}) - (6,1694 - \Delta\mathrm{h})$$

Por tanto, la desviación global es:

$$\Delta\alpha = \alpha' - 45^{\mathrm{o}} \rightarrow \Delta\alpha = arcsin(\frac{(30,91117 - \Delta\mathrm{H}) - (6,1694 - \Delta\mathrm{h})}{35}) - 45^{\mathrm{o}}$$

A.2. Cálculo de las Desviaciones

Teniendo en cuenta los desplazamientos de los puntos extremos, tomados de un análisis de la arquitectura de la tapa realizado mediante elementos finitos, ha sido posible caracterizar, para las distintas geometrías y materiales, las desviaciones sobre la posición angular deseada.

Los resultados recogidos en la tabla de la figura A.3 han permitido caracterizar el comportamiento del espejo dicroico cuando la cámara es puesta bajo vacío, dando una estimación de la desviación angular que se podría producir.

Para el nuevo diseño, el ensayo se reprodujo siguiendo el mismo principio. El

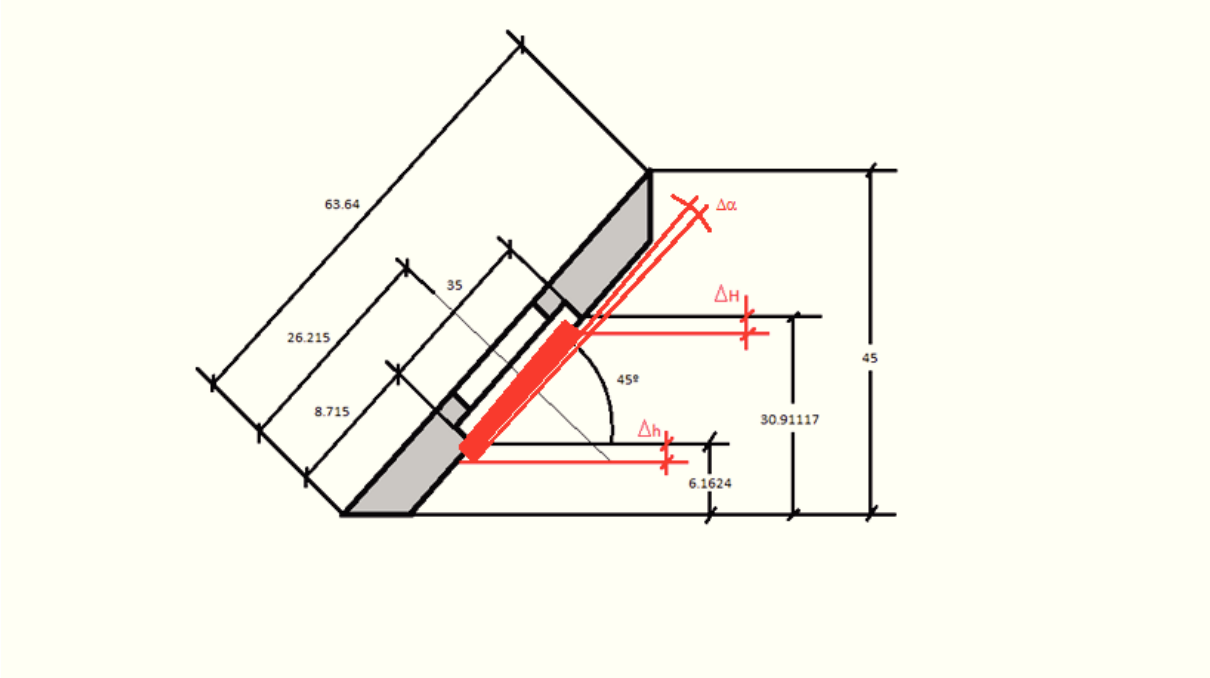


Figura A.2: Representación de la desviación sufrida por el espejo dicroico durante el trabajo en vacío.

resultado obtenido ha permitido evaluar las desviaciones hipotéticas en la orientación del alojamiento del espejo. La tabla de la figura A.4 muestra las estimaciones encontradas a partir de la simulación.

Material	$U_{superior}$	$U_{inferior}$	H'	α	$\Delta\alpha$
PMMA	-0,56049	-0,60971	24,79799	45,1141385	0,11413855
Aluminio	-0,028815	-0,031218	24,751173	45,0056391	0,00563907
Acero	-0,0097971	-0,010593	24,7495659	45,0019182	0,00191823

Figura A.3: Tabla de cálculo de las desviaciones en la posición angular del espejo dicroico para la geometría planteada en los trabajos de Romain Desbats.

Material	$U_{superior}$	$U_{inferior}$	H'	α	$\Delta\alpha$
Aluminio	-0,0321358	-0,0318297	24,7496061	45,0020113	0,0020113
Acero	-0,0115831	-0,012881	24,7480021	44,9982979	-0,00170213

Figura A.4: Tabla de cálculo de las desviaciones en la posición angular del espejo dicroico para la nueva geometría planteada en el presente proyecto.

Anexo B.
Cálculo de la Unión por Bulones

Las uniones mediante bulones forman parte de los mecanismos de unión más comunes en ingeniería. Su utilización permite uniones rígidas y resistentes, pero al mismo tiempo desmontables de forma esporádica a lo largo de la vida del montaje. El caso que ocupa al presenta proyecto recoge una unión clásica de este tipo, testa a testa, entre la tapa y el collarín de unión soldado sobre la coronación de las paredes de la cámara. Las uniones de este tipo tienen como objetivo más habitual el de garantizar la estanqueidad del ensamblaje, procurando el contacto de las dos partes. Dicho contacto queda garantizado por la acción de los bulones, precargados durante el montaje; durante el funcionamiento, son los bulones los que resisten las acciones tratando de separar las dos partes de la unión y garantizan el mantenimiento de una presión en el área de contacto.

Sin embargo, la unión tratada en el presente proyecto comporta un objetivo distinto. En este caso, la unión no está destinada a resistir una carga de origen interno que trate de separar ambas partes, sino a garantizar la estanqueidad de la cámara cuando ésta trabaja en vacío, impidiendo la entrada de aire a través de posibles fugas.

B.1. Fundamentos Técnicos

Una unión bulonada se compone [8] [9], típicamente, de tres elementos básicos: los collarines o bases a unir, los bulones y una interfaz entre ambas superficies, habitualmente una junta, que permite flexibilizar el contacto y garantizar una buena estanqueidad. El objeto del cálculo de la unión es el de garantizar que, en el peor de los casos, los esfuerzos a que se somete a la unión no provocan una pérdida de estanqueidad de la misma. En el caso que ocupa este informe, se requiere una garantía de buen contacto entre la junta de estanqueidad y los collarines de la unión (en este caso, tapa y collarín de anclaje de la cámara).

El buen funcionamiento de una junta está dado por un valor de presión mínima a aplicar sobre la superficie efectiva de contacto. Este valor de presión asegura la correcta adhesión de la junta a la superficie de los collarines, garantizando la estanqueidad. Se distinguen dos tipos de apriete en la unión, según el grado de intensidad del mismo: una unión *fuerte* es aquella en la que los collarines entran en contacto, estando bajo presión; un apriete *débil* es aquel que aplasta la junta, garantizando la estanqueidad, pero que no

fuerza el contacto metal-metal.

Es posible encontrar, entre la literatura técnica, valores típicos de presión efectiva a aplicar en función del material, que garantizan el contacto entre las superficies. Para la unión tapa-collarín, el material previsto es un elastómero de la familia de los cauchos. De acuerdo con la bibliografía consultada [8], un elastómero de dureza Shore mayor que 75 requiere una presión de unos 1,4 MPa en la interfaz para garantizar un contacto óptimo. Tomando esta dureza como la opción más restrictiva, se buscará obtener una presión en la interfaz de este orden.

B.2. Cálculo de la Unión

El cálculo de la unión ha implicado dos aproximaciones al problema: una teórica y otra "empírica", buscando obtener información suficiente antes de determinar la unión.

B.2.1. Aproximación mediante Elementos Finitos

Como paso previo al cálculo analítico de los esfuerzos necesarios, se ha realizado una aproximación al comportamiento de la unión mediante un análisis de elementos finitos con el software Abaqus. El objetivo era conocer, de forma tentativa, los valores de presión en la interfaz de la junta con su alojamiento. En un primer paso, se consideró el alojamiento como infinitamente rígido. Después, se ha intentado obtener los valores de presión en la interfaz mediante un esfuerzo aplicado sobre una geometría "realista".

Antes de desarrollar los resultados obtenidos en ambos casos, se desea hacer hincapié en las condiciones de realización de ambos ensayos. El material escogido para modelar el comportamiento de la junta no se corresponde, de forma consciente, con un caucho. Los datos para estimar el comportamiento hiperelástico de estos materiales son numerosos, y la puesta en marcha del análisis, compleja. Como el objetivo es estimar los esfuerzos necesarios para efectuar el cierre de la unión, se consideró que se podía prescindir de un modelo perfecto, y efectuar una aproximación conservadora. Para ello, se tomó como modelo una curva experimental de un caucho, y se introdujeron el primer tramo curvo, más la zona central ligeramente lineal. En lo demás, se supuso que el material era homogéneo e isótropo, con un coeficiente de Poisson de 0,5. Se estimó que esta aproximación aumentaría los esfuerzos necesarios respecto al análisis de un caucho, pero que resultaría útil al propósito del proyecto.

B.2.1.1. Comportamiento en la interfaz

Tomando el modelo de alojamiento infinitamente rígido, se efectuó un análisis dinámico para el material descrito anteriormente. En él, el plano superior desciende, aplastando progresivamente la junta. En el estado final, en el que el contacto entre ambas partes del alojamiento es inminente, la presión de contacto en la interfaz de la junta es de unos 9 a 15 MPa, como se observa en la figura B.1. Nótese que este valor es varias veces más elevado que los 1,4 MPa propuestos por la literatura, lo cual era esperable, pues el modelo de material empleado "rigidiza" las propiedades verdaderas del caucho.

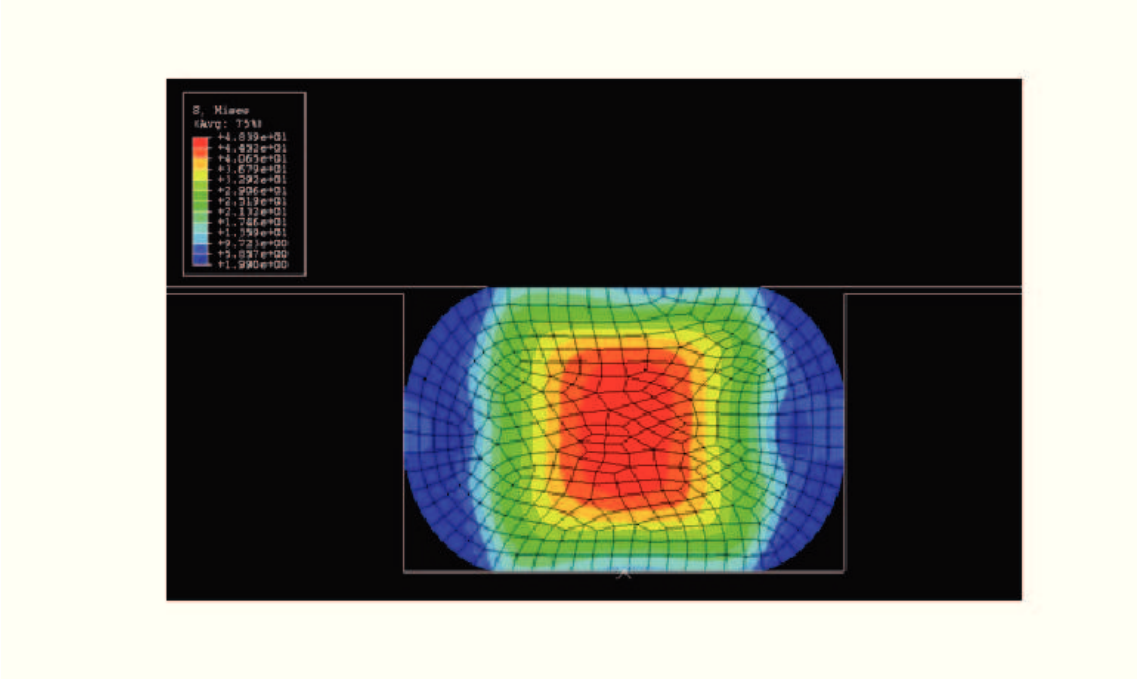


Figura B.1: Simulación de una junta tórica en un alojamiento infinitamente rígido. Los valores de tensión en las zonas de contacto se encuentran entre los 5 y los 13 MPa.

Por mor de una aproximación más realista, se realizó un análisis en el que los alojamientos de la junta simulaban los materiales reales: aluminio y acero. El objetivo era recoger un comportamiento veraz en la interfaz, con materiales cuya rigidez no es infinita. La mecánica del análisis fue la misma: inducir un desplazamiento de la tapa, con el objetivo de que ambas partes de la unión queden en contacto. Como se observa en la figura B.2, los valores de presión obtenidos en el contacto entre la junta y las piezas se sitúan en el orden de los 3 a 5 MPa. Más elevados que el valor teórico de 1,4 MPa, pero se consideran interesantes de cara a la realización de un cálculo de esfuerzos conservador.

B.2.1.2. Esfuerzos a aplicar

Si se toma una superficie de contacto hipotética entre la junta y las piezas de la unión, es posible encontrar un valor de esfuerzo aplicado hipotéticamente sobre aquella. La transferencia de este esfuerzo a las piezas que forman la unión muestra, claramente, que la hipótesis de rigidez infinita no es verdadera. Dado que tapa y collarín son elásticos, absorberán una parte de los esfuerzos aplicados para el apriete de la unión.

Por otro lado, el comportamiento no hiperelástico del modelo añade una rigidez suplementaria al problema, aumentando los esfuerzos necesarios para obtener un cierre de la unión. En suma, se considera que el análisis de elementos finitos permite una primera aproximación a las presiones de contacto requeridas, pero el tiempo requerido para obtener un análisis exacto de la junta desaconseja el continuar esta vía de análisis. No obstante, los valores de presión en la interfaz servirán de punto de partida en la aproximación analítica del cálculo de la unión.

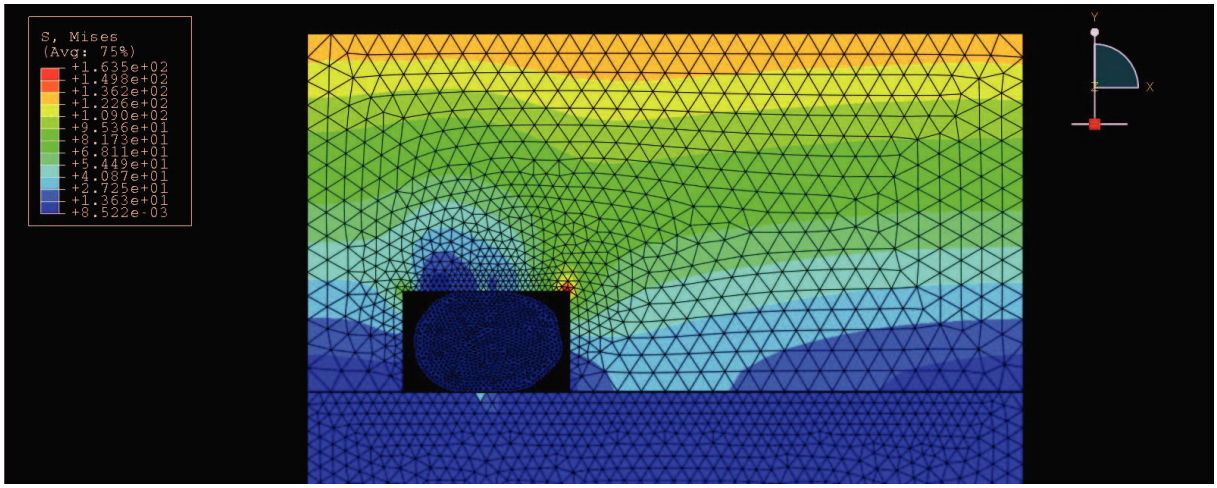


Figura B.2: Simulación de una junta tórica entre dos piezas de acero (el alojamiento de la tapa) y de aluminio (el collarín de base).

B.2.2. Cálculo Teórico

El cálculo teórico de la unión sigue el proceso clásico que se sugiere en la literatura técnica (ver [8] [9]). La unión está caracterizada por la rigidez de sus elementos constituyentes (collarines, junta y bulones). Los esfuerzos sobre el sistema se muestra en la figura B.3: se observan dos presiones, interna y externa, y los esfuerzos sobre bulones y juntas, más un posible esfuerzo de contacto (si éste se produce).

Tomando el caso en el que la presión interna es menor que la externa, el balance de fuerzas se define de la siguiente forma.

$$\Sigma F_{bulones} = F_{contacto} + F_{junta}$$

En una primera instancia, el apriete va aplastando la junta, pero no se produce el contacto entre las superficies metálicas. Trasladando éste dato al balance, y suponiendo que se ejerce una presión homogénea sobre la junta de 5 MPa (caso extremo observado anteriormente en las simulaciones), se puede calcular el esfuerzo a aplicar sobre los bulones. Se considera una superficie de contacto de 2,5 mm de ancho, con un eje medio en forma de rectángulo de bordes redondeados, de segmentos rectos de 360 mm y 400 mm y radio de esquinas 7,5 mm.

$$\Sigma F_{bulones} = F_{junta}$$

$$\Sigma F_{bulones} = 2,5MPa \cdot [2,5mm \cdot (360mm \cdot 2 + 400mm \cdot 2 + 2 \cdot \pi \cdot 7,5mm)]$$

$$\Sigma F_{bulones} = 24589N$$

Suponiendo que dicho esfuerzo permite la compresión de la junta hasta el contacto metal-metal entre la tapa y el collarín, cualquier esfuerzo adicional aplicado sobre la unión será soportado por el contacto entre las dos piezas, mientras que la junta garantizará la

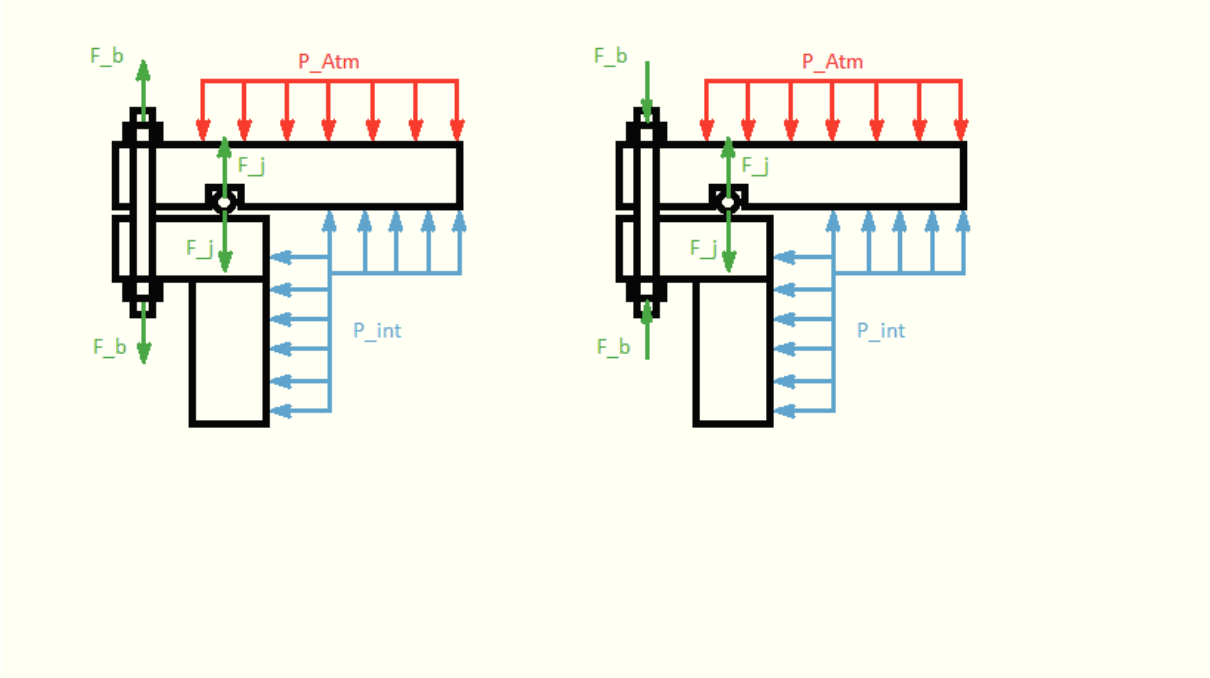


Figura B.3: Esfuerzos sobre una unión mediante bulones en función de las presiones interna y externa: a la izquierda, presión interna mayor que en el exterior; a la derecha, el caso inverso, que ocupa el presente desarrollo.

estanqueidad del montaje. El esfuerzo aplicado por la atmósfera contribuirá al trabajo sobre la unión, pero comporta una ligera relajación de los bulones. Como no se desea que los bulones sufran una relajación excesiva, se decide añadir un esfuerzo adicional que garantice una presión de contacto entre las piezas metálicas de 1 MPa. Tomando un collarín de dimensiones externas de 460 x 420 mm, e internas de 400 x 360 mm, se dedujo el siguiente esfuerzo.

$$F_{contacto} = 1MPa \cdot (460mm \cdot 420mm - 400mm \cdot 360mm)$$

$$F_{contacto} = 49200N$$

Por lo tanto, la suma de ambas magnitudes, esfuerzo sobre la junta y esfuerzo de contacto, sería posible garantizar, teóricamente, el contacto entre ambas placas durante el trabajo bajo vacío de la cámara. Sumando ambos esfuerzos, se determina un esfuerzo inicial a aplicar sobre la unión.

$$F_{union} = F_{junta} + F_{contactounion} = 73789 \text{ N} \sim 74000 \text{ N}$$

Por otro lado, una vez conocido el esfuerzo necesario para llevar a cabo la unión, es necesario estimar el número de bulones a emplear. Para ello, se tienen en cuenta varios aspectos derivados de la geometría de la unión, así como de la mecánica de la misma. La anchura disponible para la ejecución de los alojamientos de los bulones es de 15 mm (voladizo del collarín). Además, la superficie equivalente a la que un bulón transfiere su acción tiene como diámetro tres veces el de aquel. Ello permite fijar

un diámetro máximo en el entorno de los 6 mm. Además, para evitar el encabalgamiento de las zonas de acción de cada bulón, tres veces el diámetro será la distancia entre ejes de cada bulón con los adyacentes. Tomando una longitud patrón sobre la que se reparten los bulones siguiendo este criterio, se obtiene el número máximo a colocar.

$$L = n_{bulones bulon} + (n_{bulones} - 1)_{bulon} + 2_{bulon}$$

$$L = D_{bulon} \cdot (4 \cdot n_{bulones} - 1)$$

Tomando unos lados de 460 mm y 420 mm, y sabiendo que los bulones de las esquinas se comparten entre dos lados concurrentes, se puede obtener un número de bulones máximo.

$$n_{bulones} = (\frac{460}{D_{bulon}} - 1) \cdot \frac{1}{2} + (\frac{420}{D_{bulon}} - 1) \cdot \frac{1}{2} - 4$$

$$n_{bulones} = 68 \text{ bulones}$$

Para el máximo número de bulones admisible, se puede evaluar la carga máxima que soportarían todos ellos, verificando que se encuentra dentro de la norma.

$$F_{bulón} = \frac{F_{bulones}}{n_{bulones}} = \frac{74000}{68} = 1088,2 \text{ N}$$

$$\sigma_{bulon} = \frac{F_{bulon}}{S_{bulon}} = \frac{4_{bulon}}{\pi \cdot 6^2} = 38,5 \text{ MPa}$$

Se observa que la carga por bulón está lejos de la carga crítica de un acero estándar (260 MPa). Por lo tanto, cabe la posibilidad de reducir ligeramente el número de bulones, o su diámetro, si se considerara oportuno. Finalmente, durante la fase de estudio de la fabricación, se ha decidido reducir su número a 50. Ello permite un ahorro en costes y tiempos, y no supone una pérdida en las prestaciones de estanqueidad. Así mismo, se sigue garantizando el buen comportamiento del material, que se cargaría con 52,34 MPa.

Anexo C.

Evaluación a Abolladura de las paredes

El diseño de la cámara de vacío a sido realizado tomando en consideración que su comportamiento se inscribe dentro de los supuestos de la mecánica lineal, ya que los esfuerzos a que está sometida no alcanzan un orden de magnitud que pudiera resultar preocupante. No obstante, la geometría de la cámara tiene ciertos aspectos que merecen ser analizados para confirmar la corrección de las suposiciones. Ello permite, además, fijar una serie de líneas rojas a partir de las cuales no es posible cumplir con el pliego de condiciones inicial.

C.1. Introducción

La abolladura es un fenómeno de inestabilidad elástica que puede ser modelizado mediante las ecuaciones de los modelos de grandes deformaciones, como ocurre con el pandeo en las vigas. Este fenómeno se produce cuando una placa es sometida a una solicitación axial, es decir, cuando los esfuerzos se aplican en paralelo a los ejes del plano. No obstante, si los esfuerzos aplicados no sobrepasan un cierto límite, no supone el deterioro irreversible de la placa. El esfuerzo umbral de abolladura para una placa de dimensiones principales "a" (anchura), "b" (altura) y "t" (espesor), viene dado por la siguiente expresión.

$$N_{critico} = k_m \cdot \frac{\pi^2}{b^2}$$

$$N_{critico} = \frac{k_m \cdot \pi^2 \cdot \mathrm{E} \cdot \mathrm{t}}{12 \cdot (1-\nu^2)} \cdot (\frac{t}{b})^2$$

En ella, "E" es el módulo de Young, "ν" el coeficiente de Poisson, y "k_m" es el coeficiente asociado a los modos propios de abolladura para "m" semiondas. Este coeficiente está dado por la siguiente expresión.

$$k_m = (\frac{b}{a} + \frac{a}{b}) \geq 4$$

Dicho valor de $N_{crítico}$ es siempre mayor o igual que un umbral, que viene determinado por la siguiente expresión.

$$N_{critico} \geq \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t}{3 \cdot (1-\nu^2)} \cdot (\frac{t}{b})^2$$

C.2. Cálculo de la Cámara

Aplicando el desarrollo anterior a las dimensiones dadas a los componentes del diseño es posible saber si este fenómeno puede producirse o no. Las placas analizadas son la frontal y la placa de lateral. Cada una de ellas ha sido analizada según su geometría y el material de que están fabricadas. La tabla de la figura C.1 muestra los esfuerzos críticos que desencadenarían la abolladura de la placa para el primer modo (una semi-onda), con el espesor de 15 mm fijado en el diseño y los tres materiales ensayados: PMMA, aluminio y acero.

PMMA	Puerta	Lateral	Unidades	ALUMINIO	Puerta	Lateral	Unidades	ACERO	Puerta	Lateral	Unidades
E	3300	3300	MPa	E	70000	70000	MPa	E	210000	210000	MPa
v	0,43	0,43		v	0,35	0,35		v	0,3	0,3	
a	430	375	mm	a	430	375	mm	a	430	375	mm
b	400	400	mm	b	400	400	mm	b	400	400	mm
t	15	15	mm	t	15	15	mm	t	15	15	mm
m	1	1		m	1	1		m	1	1	
k_m	2,01	2,00	> tomar 4	k_m	2,01	2,00	> tomar 4	k_m	2,01	2,00	> tomar 4
N_cr	280,95	280,95	N/mm	N_cr	5535,84	5535,84	N/mm	N_cr	16014,38	16014,38	N/mm
N_act	12,16	12,16	N/mm	N_act	12,16	12,16	N/mm	N_act	12,16	12,16	N/mm

Figura C.1: Esfuerzos críticos para desencadenar el fenómeno de abolladura sobre una placa de 15 mm de espesor.

A la vista de los resultados, se considera que el diseño propuesto permite garantizar que no se producirá un fenómeno de abolladura. No obstante, hay que recordar que este planteamiento no deja de ser una hipótesis teórica, que supone una superficie ideal en las placas, y que el material constituyente es perfectamente homogéneo. De hecho, la presencia de defectos en la superficie de las placas es una de las causas por las que se puede producir el fenómeno de abolladura, ya que el material queda debilitado. Es por ello que los valores de carga crítica han de ser tratados de forma cuidadosa, y se ha de guardar el mayor margen de seguridad posible respecto a ellos.

Además del esfuerzo axial crítico, también es posible determinar un espesor mínimo a partir del cual cabría esperar este comportamiento, tomando el esfuerzo al que se verán

sometidas las paredes. Así, se ha obtenido una tabla (ver figura C.2) con los espesores mínimos que podrían alcanzarse (en teoría), para los tres materiales contemplados en la fase de diseño.

PMMA	Puerta	Lateral	Unidades	ALUMINIO	Puerta	Lateral	Unidades	ACERO	Puerta	Lateral	Unidades
E	3300	3300	MPa	**E**	70000	70000	MPa	**E**	210000	210000	MPa
v	0,43	0,43		**v**	0,35	0,35		**v**	0,3	0,3	
a	430	375	mm	**a**	430	375	mm	**a**	430	375	mm
b	400	400	mm	**b**	400	400	mm	**b**	400	400	mm
N_cr	12,16	12,16	mm	**N_cr**	12,16	12,16	mm	**N_cr**	12,16	12,16	mm
k_m	4	4		**k_m**	4	4		**k_m**	4	4	
t_cr	5,27	5,27	**mm**	**t_cr**	1,95	1,95	**mm**	**t_cr**	1,37	1,37	**mm**

Figura C.2: Espesores críticos para desencadenar el fenómeno de abolladura sobre una placa, para las cargas previstas en el diseño de la cámara de vacío.

Anexo D.
Estudio de reducción de peso

A lo largo del proceso de diseño, surge la idea de reducir la masa de la cámara de vacío, valiéndose de la mayor resistencia del acero (3 veces superior al aluminio). Ello podría permitir, mediante una disminución del espesor inicial (15 mm) de las chapas a un tercio (5 mm), obtener una masa menor. Para ello, se han tabulado las piezas básicas, junto con sus dimensiones principales, encontrando el volumen de las piezas. Multiplicando por la densidad de cada material, se obtiene una estimación de la masa para cada uno de los supuestos (ver la figura D.1 y la figura D.2).

El resultado final no difiere en gran medida entre ambos casos. Con una mejora de 2 kg al cambiar al acero. Esta escasa mejora comporta una serie de dificultades derivadas del uso de acero: mayores tiempos de mecanizado por su mayor dureza, y un espesor muy pequeño, que plantearía dificultades para efectuar los roscados en los anclajes a las planchas o los alojamientos de las juntas de estanqueidad.

D. Estudio de reducción de peso

ALUMINIO	Bruto			Huecos			Volumen	Huecos Grandes
Pieza	Anchura	Altura	Espesor	Anchura	Altura	Espesor	mm^3	
Placa base	460	420	15	0	0	0	2898000	
Placa Frontal	430	400	15	270	250	15	1567500	
Placa Lateral	375	400	15	240	250	15	1350000	
Placa Lateral	375	400	15	240	250	15	1350000	
Placa Fondo	400	400	15	270	50	15	2197500	
Collarín	460	420	15	400	360	15	738000	
Puerta frontal	330	310	10	***270***	***250***	***5***	1360500	
Puerta lateral	300	310	10	***240***	***250***	***5***	1230000	
Puerta tapón	300	310	10	***240***	***250***	***5***	1209218,36	20781,6354
Raccord	330	110	10	***270***	***50***	***5***	430500	
				Centrados en cursiva y negrita				
TOTAL							38,6656271	kg Aluminio

ACERO	Bruto			Huecos			Volumen	Huecos Grandes
Pieza	Anchura	Altura	Espesor	Anchura	Altura	Espesor	mm^3	
Tapa plana	460	420	15	***400***	***360***	***5***	3618000	
Refuerzo	380	40	20	0	0	0	304000	
Refuerzo	380	40	20	0	0	0	304000	
Espejo	*	*	*	*	*	*	104400	
				Centrados en cursiva y negrita				
TOTAL							33,99364	kg Acero

TOTAL CÁMARA (estimación grosera)	72,6592671	kg

Figura D.1: Pesos estimados para las piezas básicas de la cámara de vacío, con una elección de materiales en aluminio y acero.

ACERO	Bruto			Huecos			Volumen	Huecos Grandes
Pieza	Anchura	Altura	Espesor	Anchura	Altura	Espesor	mm^3	
Placa base	460	420	5	0	0	0	966000	
Placa Frontal	430	400	5	270	250	5	522500	
Placa Lateral	375	400	5	240	250	5	450000	
Placa Lateral	375	400	5	240	250	5	450000	
Placa Fondo	400	400	5	270	50	5	732500	
Collarín	460	420	5	400	360	5	246000	
Puerta frontal	330	310	1	***270***	***250***	***5***	439800	
Puerta lateral	300	310	1	***240***	***250***	***5***	393000	
Puerta tapón	300	310	1	***240***	***250***	***5***	384687,346	8312,65416
Raccord	330	110	1	***270***	***50***	***5***	108800	
				Centrados en cursiva y negrita				
TOTALE							36,8030557	kg Acero

ACERO	Bruto			Huecos			Volumen	Huecos Grandes
Pieza	Anchura	Altura	Espesor	Anchura	Altura	Espesor	mm^3	
Tapa plana	460	420	15	***400***	***360***	***5***	3618000	
Refuerzos	380	40	20	0	0	0	304000	
Refuerzos	380	40	20	0	0	0	304000	
Espejo	*	*	*	*	*	*	104400	
				Centrados en cursiva y negrita				
TOTAL							33,99364	kg Acero

TOTAL CÁMARA (estimación grosera)	70,7966957	kg

Figura D.2: Pesos estimados para las piezas básicas de la cámara de vacío, con una elección de materiales totalmente en acero.

Anexo E.

Ensayos y Puesta a Punto

Como última fase de trabajo antes de la realización de los experimentos, es necesario llevar a cabo una puesta a punto de la cámara de vacío, evaluando la capacidad de la misma para mantener el vacío, la duración del mismo sin llevar a cabo una extracción de aire de forma permanente, el aislamiento óptico del interior, y el comportamiento según el rango de temperatura ambiental. Así mismo, se deberá llevar a cabo una puesta a punto de la micromáquina de ensayos y de los sistemas de observación.

E.1. Puesta a punto de la Micromáquina

La micromáquina de tracción-compresión es, como se ha mencionado anteriormente, un dispositivo de ensayos miniaturizado, disponible desde hace un tiempo en las instalaciones del Laboratorio de Mecánica de Lille (LML). Se desea hacer hincapié en el hecho de que, a pesar de la aparición "tardía" en el desarrollo de la presente memoria, los trabajos de puesta a punto de este dispositivo han tenido lugar en paralelo al proceso de diseño de la cámara.

E.1.1. Características

La micromáquina de ensayos de tracción-compresión ha sido utilizada en numerosas ocasiones por el personal del Laboratorio de Mecánica de Lille, especialmente en trabajos y tesis acerca de la fatiga de materiales, realizándose los ensayos bajo vacío en el microscopio electrónico de barrido (MEB) del laboratorio. No obstante, la máquina ha permanecido almacenada durante un cierto periodo de tiempo; de ahí la necesidad de llevar a cabo una revisión de sus componentes, así como una puesta a punto para garantizar las mejores condiciones de trabajo posibles. El plan de trabajo seguido sobre la máquina ha sido, en líneas generales, el siguiente:

- Desmontado de los elementos mecánicos, limpieza, lubricado y montaje.
- Verificación del funcionamiento en vacío (i.e. sin carga).
- Reglaje del sensor de posición LVDT.
- Reglaje del sistema de captación de esfuerzos.

- Ensayo de la máquina en carga.

La fase de desmontaje se realizó al comienzo del presente proyecto. El objetivo de la misma era, por una parte, verificar el buen estado de los rodamientos axiales que sirven de anclaje a las mordazas, el lubricado de los mismos y su reinserción con un buen ajuste. Esta operación se ha efectuado también con las mordazas de ensayo. Por otro lado, se ha revisado el estado de los sistemas de accionamiento: motores piezoeléctricos, reductores y tornillos.

E.1.1.1. Características y Prestaciones

La micromáquina de tracción-compresión es un dispositivo con unas dimensiones de 56 x 190 x 220 mm. Su estructura se basa en dos traviesas acopladas entre sí por dos tornillos de potencia. Dichos tornillos están accionados por un sistema de motores piezoeléctricos y un reductor, situados de forma antisimétrica, cada uno en una traviesa. Las probetas a ensayar se disponen de forma centrada, entre los dos tornillos, ancladas a dos mordazas, cada una acoplada a un sistema de rodamientos axiales. El peso del conjunto es de 3,84 kg.

Respecto a sus prestaciones, la máquina es capaz de desarrollar hasta 10 kN de esfuerzo. Posee una carrera máxima de 20 mm, desplazándose en pasos de 0,13 μm, a una velocidad máxima de 40 μm/s.

E.1.1.2. Captadores

La micromáquina posee dos captadores: por un lado, un sistema de detección de la posición, consistente en un captador LVDT con una varilla acoplada a la traviesa opuesta; el segundo sistema capta los esfuerzos de forma indirecta, mediante una galga extensiométrica. Dado que el tamaño de la máquina y su fabricación "artesanal" en el laboratorio no permiten la integración de una célula de carga, la medida de los esfuerzos se realiza mediante una galga extensiométrica situada en el punto de mayor deformación de una de las traviesas. Dicha galga se complementa mediante una galga de compensación térmica. Ambas están acopladas a un sistema de medida formando un puente de Wheatstone.

E.1.1.3. Operación sin carga

Como paso previo al calibrado de los sensores, se ha efectuado una prueba de la máquina en vacío, verificando que la máquina no presentaba problema alguno a la hora de realizar su carrera completa. Esta operación se ha realizado tanto en modo manual como bajo control del software de control incorporado en un ordenador anexo.

E.1.2. Calibrado del captador LVDT

El captador LVDT es el sistema que permite determinar la posición de la micromáquina durante el ensayo, con respecto a su carrera. Su estructura es la de un cilindro instrumentado, con una pequeña varilla conectada sobre la traviesa opuesta. Al desplazarse, genera una señal eléctrica que es recogida por un sistema electrónico

de control de la micromáquina. Para conocer el desplazamiento de la micromáquina, es suficiente con disponer ésta en el origen geométrico (considerado como el punto de montaje de una probeta sin que ésta esté sometida a carga alguna, antes de someterla a ensayo). Este punto tiene asociada una tensión concreta del sensor LVDT, a la que se puede asociar un "0" artificial en el software de control que sirva de referencia. Una vez obtenido, basta con observar el sentido del movimiento y la evolución de la tensión para conocer el valor del desplazamiento, tomando la diferencia entre el potencial en origen y el nuevo potencial tras el movimiento.

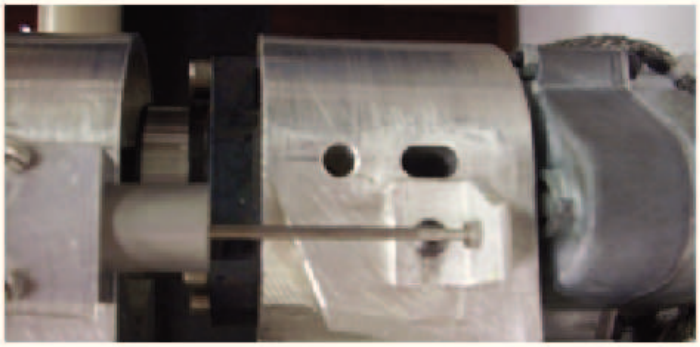


Figura E.1: Captador de desplazamientos LVDT, montado sobre la micromáquina. El cilindro con los sensores se acopla a una traviesa, y la varilla móvil sobre la opuesta.

No obstante, algunos sistemas de sensores están sometidos a fenómenos de histéresis, en los que la aplicación de una magnitud creciente e inmediatamente después decreciente da como resultado la obtención de resultados con una desviación, alejados del comportamiento lineal. Para verificar el comportamiento no histerético del sensor se efectuó un ensayo partiendo de la posición inicial de la probeta a ensayar.

Tomando la posición de referencia y el valor de la tensión en ese punto, se montaron dos bloques de referencia sobre las mordazas. Uno de los bloques se equipó con un micrómetro, instalado en la posición correspondiente a desplazamiento nulo y en contacto con el bloque referencia opuesto. Así, se efectuaron dos ensayos: uno correspondiente a tracción (separando las mordazas, acercándolas después), el otro a una compresión (el proceso inverso al primero). Durante el mismo, se tomaron parejas de datos de desplazamiento y tensión, tratando de replicar las medidas en el recorrido de vuelta a la posición inicial, para verificar que se encontraran en el mismo rango.

El resultado del ensayo ha sido positivo, como se muestra en las gráficas de la figura E.2. Por lo tanto, se considera que el sensor LVDT funciona adecuadamente, y puede ser empleado como referencia en los ensayos sobre la micromáquina.

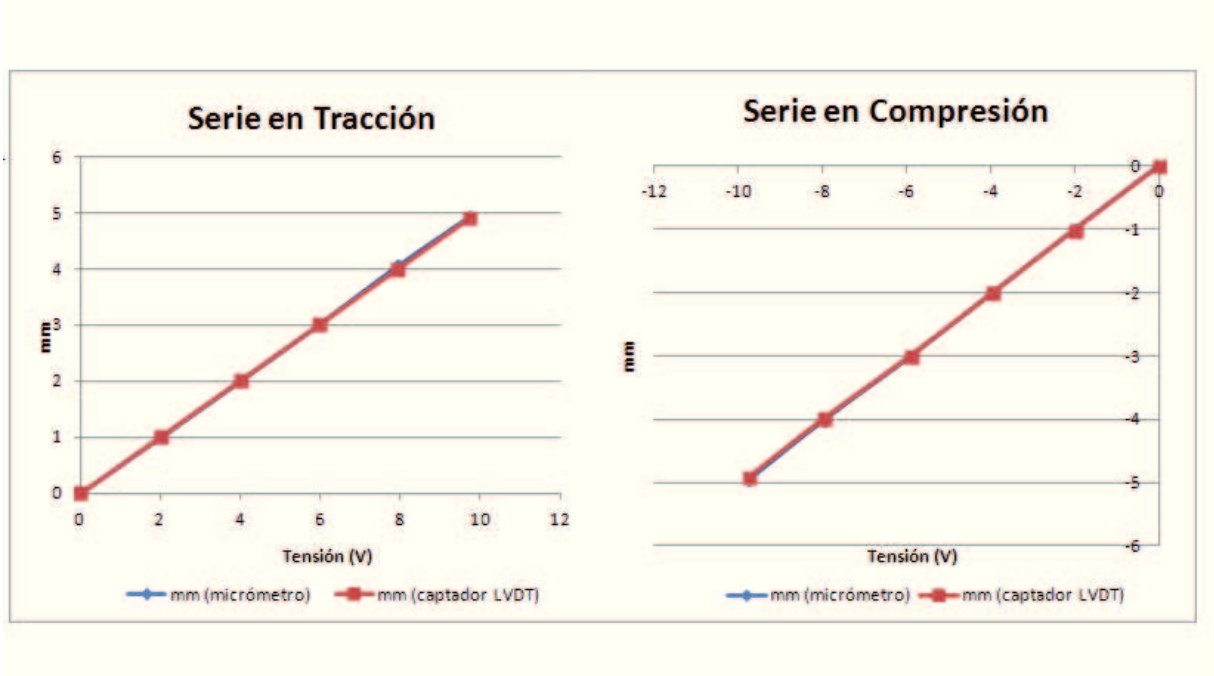


Figura E.2: Representación de los valores de distancia en mm obtenidos por el captador LVDT y el micrómetro insertado en las mordazas, frente a la tensión eléctrica en la salida del captador LVDT.

E.1.3. Calibrado de la Galga

Como se ha adelantado, la miniaturización de la máquina de tracción-compresión hace complejo el incorporar una célula de carga para captar los esfuerzos aplicados en los ensayos. La solución implementada en la micromáquina es una galga extensiométrica en el punto de mayor deformación de una de las dos traviesas (ver la figura E.3). La tensión aportada por esta galga se envía a un puente de Wheatstone situado dentro del sistema electrónico que controla la micromáquina. El funcionamiento del puente es sencillo: se alimenta a una tensión constante por dos de sus extremos y, cuando la resistencia de la galga extensiométrica varía, también lo hace la tensión en los bornes libres del puente, lo que permite obtener una noción de la deformación sufrida por la traviesa.

Suponiendo que la rigidez del conjunto traviesa-mordaza es mucho mayor que la de la probeta, y que el sistema trabaja siempre en un rango lineal, es posible relacionar las deformaciones de la galga con los esfuerzos de tracción o compresión, lo que permite trazar una recta "empírica" con el comportamiento de la máquina. La electrónica de control incorpora un sistema de introducción de medidas que permite construir una recta experimental a partir de una serie de parejas de valores. Una vez introducida, el sistema es capaz de interpolar un resultado a partir de cualquier valor entrante desde la galga.

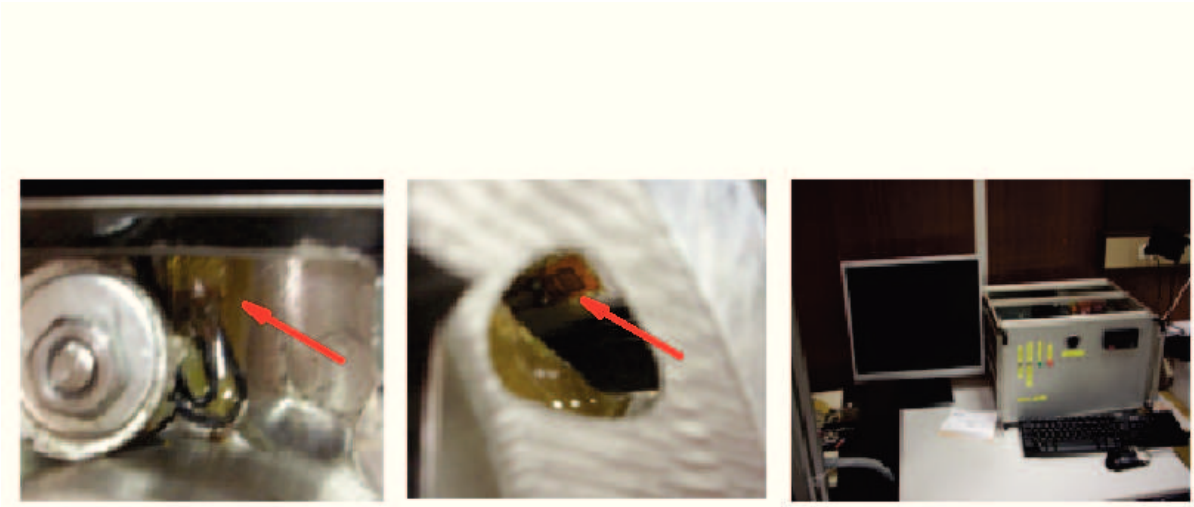


Figura E.3: De izquierda a derecha: galga extensiométrica; galga de compensación térmica; sistema de control por ordenador y sistema electrónico de accionamiento.

Para construir esta recta, se envió una probeta de aluminio a la compañía de instrumental HBM. Dicha probeta fue equipada con varias galgas calibradas hasta 7 kN, y se reenvió junto con un sistema electrónico que permite obtener el valor del esfuerzo aplicado sobre la probeta en cada instante (ver figura E.4). Así pues, colocando la probeta instrumentada sobre la micromáquina, y realizando un ensayo de tracción, debería ser posible realizar un ensayo en el que los valores de tensión salidos de la galga se relacionaran con los valores de esfuerzo obtenidos gracias al sensor incorporado en la probeta.

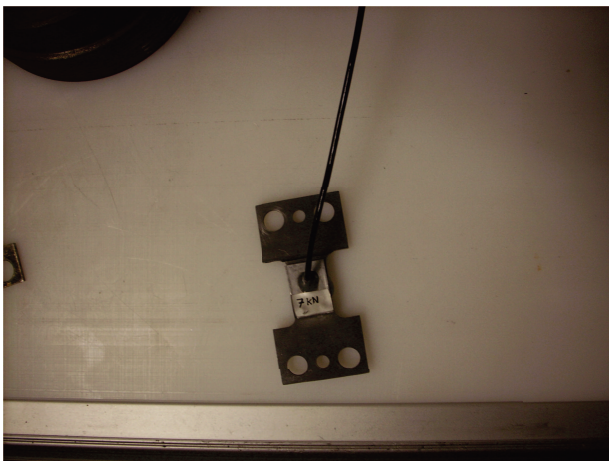


Figura E.4: Probeta de aluminio equipada con un sistema de medida de esfuerzos calibrado por HBM. El cable negro está conectado con el sistema electrónico que provee el valor del esfuerzo aplicado.

E.1.4. Problemáticas encontradas

Sobre la base anterior, se procedió a una serie de ensayos para calibrar la galga y evaluar su funcionamiento. No obstante, el comportamiento observa dista mucho de ser el previsto: se observaron problemas de no linearidad, relajación de esfuerzos...

- **Problema de No Linearidad:** se observa este comportamiento anómalo durante los ensayos de tracción-compresión. Se realiza una primera curva experimental mediante un ensayo de tracción, elevando el esfuerzo aplicado de forma paulatina, y anotando pares de datos "esfuerzo en la probeta" versus "tensión eléctrica" a la salida del puente de galgas. Con las parejas obtenidas en la subida en tracción, se traza una recta experimental, que queda introducida en el sistema electrónico asociado al control de la micromáquina. Al realizar la toma se datos durante la descarga de la probeta, se observa una fuerte anomalía: para deformaciones "análogas" de la micromáquina (i.e. valores próximos a las tensiones eléctricas halladas anteriormente en el ensayo de carga), el sistema electrónico devuelve valores de esfuerzo incoherentes, que siguen una curva de descarga histerética (ver la figura E.5). Ante este fenómeno, surgen dos preguntas: ¿es el sistema electrónico la fuente de los fallos, o se trata de un problema más profundo? Se decide realizar un ensayo con más puntos de resolución, en el que el fenómeno de la histéresis vuelve a manifestarse.

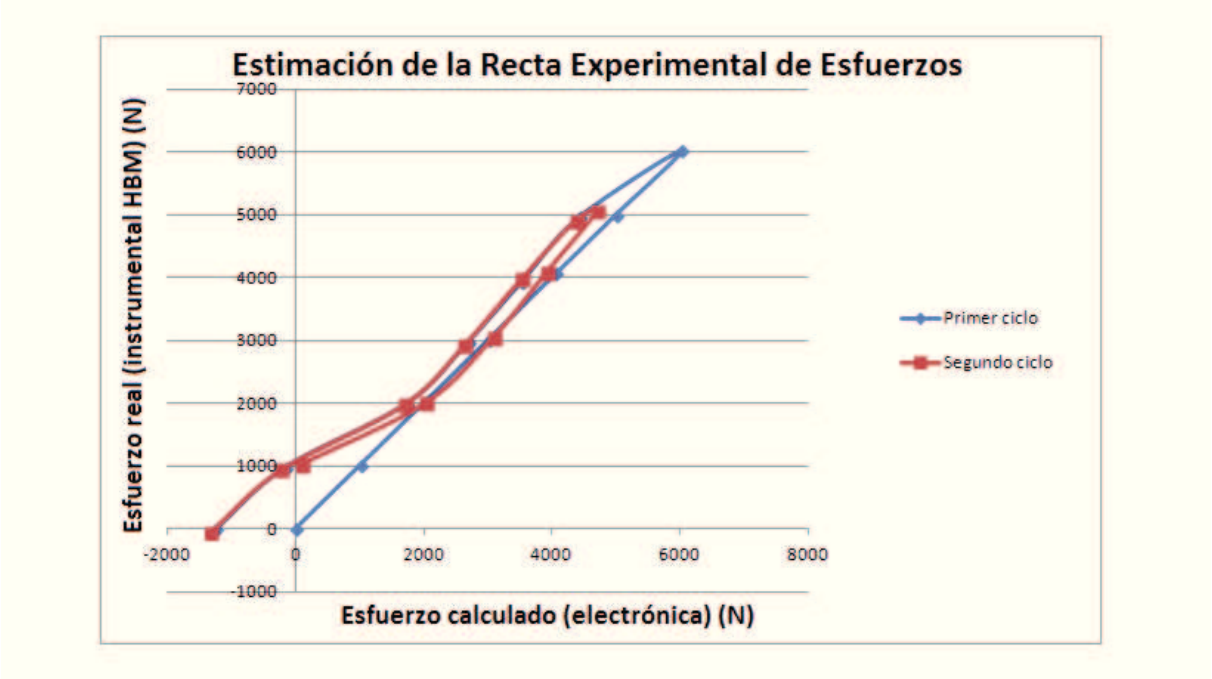


Figura E.5: Representación de dos ciclos consecutivos de carga y descarga en tracción. En el primero, se traza una recta, asignando al sistema electrónico el mismo valor que en la probeta de HBM. Se observa la desviación respecto de la recta al efectuar la descarga: por ejemplo, para un valor real en el entorno de los 5000 N, la recta calcula 4430 N; o para -1,3 N, la recta calcula -1230 N. Paradójicamente, el segundo ciclo en carga se ajusta bien a la primera curva de descarga; no obstante, se repite el comportamiento histerético.

Para comprobar la veracidad de este comportamiento, se decidió comparar los valores de deformación en la galga (tensión en el puente de Wheatstone) con los esfuerzos dados por el instrumental conectado a la probeta. Desgraciadamente, este ensayo no permitió corregir el problema o esclarecer sus causas: el fenómeno de histéresis se reprodujo, confirmando la no linearidad. Teniendo en cuenta que el método de cálculo del sistema electrónico es la comparación de los valores de tensión eléctrica del puente de galgas con su recta interna, se decide observar el comportamiento de dicha tensión a lo largo de un ensayo de tracción siguiendo una curva de carga y descarga. Se decide efectuar una comparación entre la deformación a que se somete a la galga, y los valores de desplazamiento de las traviesas (dado por el sensor LVDT, que se considera bien calibrado).

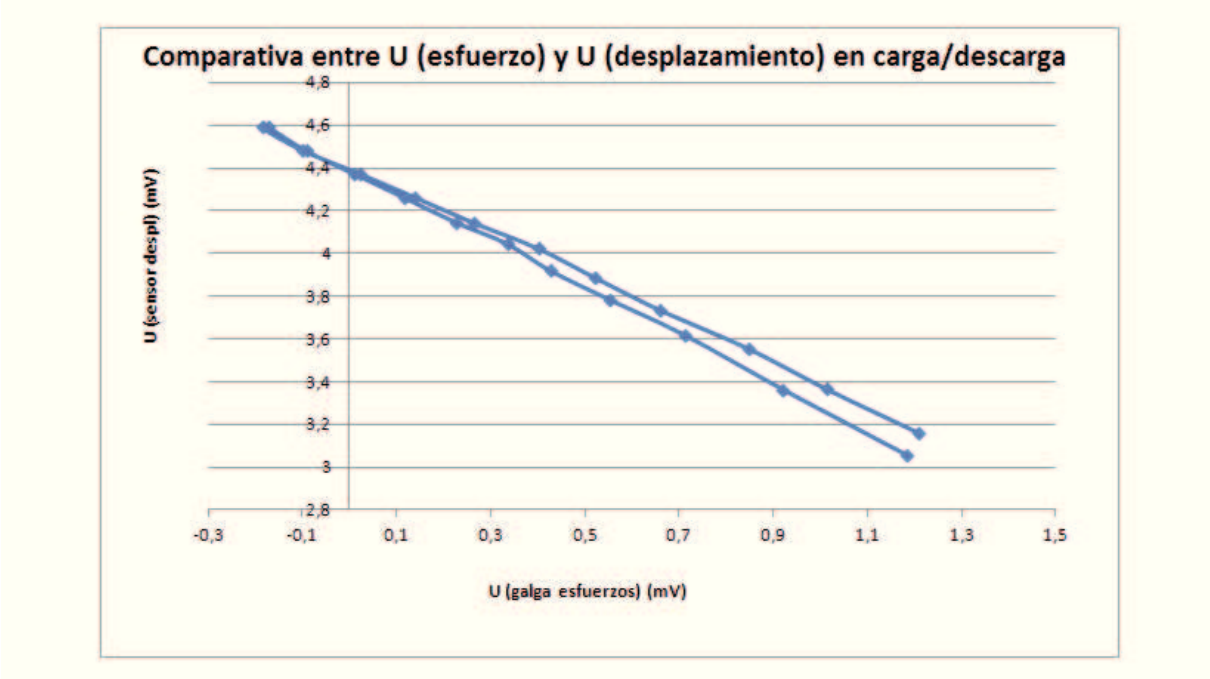


Figura E.6: Representación de la evolución de las tensiones sobre el sensor LVDT y la galga extensiométrica, para un ciclo de carga y descarga. El sentido del ciclo es, partiendo de la recta inferior, ascender en sentido de X negativo hasta el máximo, descendiendo por la recta superior.

Se realizó un ensayo de carga-descarga de la probeta, mostrándose que cada uno de los grupos de valores sigue, por separado, un comportamiento lineal. No obstante, al aumentar la resolución, se observa una ligera desviación en el entorno de unas pocas fracciones de milivoltio (ver la figura E.6). No se encontró una razón estricta que permita saber el por qué de este comportamiento, habida cuenta de que se presupone un comportamiento lineal, ya que el rango de trabajo no debería desencadenar fenómenos de plastificación, fatiga o relajación de tensiones sobre la probeta. No obstante, se sabe que el cálculo a través de la recta experimental sigue la siguiente fórmula.

$$F(N) = K \cdot \mathrm{U}(V)$$

Dado que el valor de la tensión está en el rango de los milivoltios (mV), con ligeras diferencias en el orden de los microvoltios (μV), y que la respuesta del sistema está en el orden de los miles de newtons, es posible que la constante de conversión sea de un gran orden de magnitud, y que el producto de la misma oscile de forma notable frente a pequeñas variaciones.

- **Problema de Relajación de Esfuerzos:** como se ha avanzado, los ensayos de puesta a punto de la galga permitieron encontrar otro comportamiento inesperado. Al someter la probeta con sensores a un esfuerzo constante, se observa una relajación del esfuerzo de 30-50 N por debajo del valor objetivo. Esta relajación se observa sobre la probeta, pero no sobre las traviesas, que no se desplazan, ni sobre la galga, que no observa cambios en la deformación de la traviesa. Se considera que la fuente de este comportamiento puede ser la propia probeta, el sistema de mordazas, o el anclaje de las mismas mediante rodamientos axiales.

  Para comprobar el comportamiento de la probeta, se sometió a ensayo sobre una máquina de tracción de 400 kN que posee su propia célula de carga e instrumental de control. Sin sobrepasar el límite de esfuerzo sobre la probeta (7 kN), se efectuó una carga constante en tracción, que se mantuvo durante medio día. El resultado del ensayo permitió constatar el fenómeno de relajación en ambas máquinas: el software de la máquina de 400 kN mostró una relajación de 400-500 N a lo largo del día, que se correspondía con el dato de esfuerzo dado por la probeta. Sin embargo, la traviesa de la máquina no había sufrido desplazamiento alguno.

  La causa de esta relajación ha quedado como un aspecto a resolver. El proceso de ensayos estuvo acompañado de múltiples consultas a otros profesores e investigadores de la École Centrale de Lille, que aportaron algunas ideas que deberán ser estudiadas en desarrollos posteriores.

  - **Hipótesis de los Sensores:** los sensores de la probeta suelen estar adheridos a ella con una resina de alta resistencia. No obstante, podría producirse una fluencia a nivel local, y que ello repercutiera sobre la medida dada por el instrumental.
  - **Hipótesis Mecánicas:** se sugieren una rigidez de las mordazas inferior a la estimada en el diseño, o un cierto juego en los sistemas de accionamiento, que se recuperaría durante la aplicación de un esfuerzo constante.

E.1.5. Estado Actual

Debido a los problemas descritos, el proceso de calibrado de la micromáquina fue suspendido, a la espera de una comprensión más exacta de los fenómenos detectados y su incidencia sobre la mecánica de los ensayos. En caso de considerarse obsoleta, o su puesta a punto demasiado onerosa, el Laboratorio de Mecánica de Lille deberá decidir si es necesario disponer de un nuevo instrumental.

E.2. Calibrado del Montaje

Una vez realizada la puesta a punto de los componentes, se prevé efectuar una serie de ensayos y de ajustes para asegurar la correcta disposición de todos los elementos de cara al experimento. Ello comporta la puesta en vacío de la cámara, la observación del nivel de presión obtenido y de su duración. Así mismo, será necesario determinar la correcta alineación de los componentes del ensayo y de los sistemas de observación, para poder diseñar una metodología de montaje del experimento que permita reducir los errores derivados de la preparación.

E.2.1. Evaluación del Vacío

La calidad del vacío proporcionado por la cámara se evaluará en tres aspectos considerados de interés. En primer lugar, se comprobará el nivel de vacío que se puede proporcionar con el sistema previsto, efectuándose el vaciado de la cámara y tomando lecturas en el manómetro dispuesto a tal efecto en la cámara. Por otro lado, se ensayará la puesta en vacío y el retorno a presión atmosférica de la cámara con el fin de observar el comportamiento de los sistemas de trampillas y juntas, y poder evaluar su respuesta a varios ciclos de funcionamiento. Finalmente, se observará con atención la capacidad de la cámara para mantener el vacío en su interior, revisando las posibles fugas que pudieran producirse, así como el tiempo de mantenimiento del vacío dentro de un rango aceptable.

E.2.2. Calibrado Óptico

El calibrado óptico de la cámara es complejo y requiere de una serie de operaciones de colocación de los distintos elementos: cámara de vacío, pórtico, sistemas de observación. Estas operaciones están seguidas, a continuación, por la colocación de los sistemas de observación, su calibrado y la puesta a punto mediante una probeta testigo.

La colocación de la cámara de vacío bajo el pórtico está asegurada mediante el uso del sistema de raíles previsto por el diseño. Una vez colocada bajo el pórtico, es necesario garantizar el mayor grado de paralelismo posible entre la tapa (y los dioptrios de transmisión de imagen) y el dintel del pórtico, del que colgará el sistema de medición infrarroja. Para ello, se deberá tomar una medida del nivel del dintel y replicarla en la cámara, empleando para ello los reguladores de altura de los cuatro apoyos, que permitirán una ligera adaptabilidad en cabeceo y alabeo.

Una vez asegurado el posicionamiento de la cámara, se procederá a montar en su interior la base de mesas micrométricas, así como la micromáquina, con el objetivo de colocarla en la posición del ensayo. En esta posición, la micromáquina llevará montada una probeta testigo con marcadores que permitan observar, mediante las cámaras visible e infrarroja, el correcto posicionamiento del área de observación. Una vez ajustada la posición de cada una de las cámaras, se procederá al calibrado de la cámara infrarroja. Para ello, se sustituirá la micromáquina por un cuerpo negro de referencia, y se cerrará la cámara. Dicho cuerpo negro permitirá establecer una referencia para la radiación de

fondo. Una vez efectuado este proceso, se podrá pasar a efectuar el ensayo, montando la micromáquina en su emplazamiento y colocando entre las mordazas la probeta a ensayar.

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería Industrial

Diseño de Máquinas y Vehículos

Diseño de una Cámara de Vacío para medidas acopladas de Campos Térmicos y de Desplazamientos

Tomo 2/2

Andrés Malo Estepa

Junio 2013

Director: Eric Charkaluk
Ponente: Jesús Cuartero Salafranca

Departamento de Ingeniería Mecánica
Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Zaragoza

Conception d'une Enceinte sous Vide

Mesure couplée des champs cinématiques et thermiques

Rapport de Stage de 3ème Année
École Centrale de Lille

Année Universitaire 2011 – 2012

Andrés Malo Estepa

Remerciements

Ce rapport est le résultat du stage effectué de Mai à Septembre 2012 au sein du Département de Mécanique de l'École Centrale de Lille. Je veux remercier tout d'abord Eric Charkaluk, qui m'a offert ce sujet de stage et qui, avec son encadrement, m'a encouragé à développer le travail en me laissant une très grande liberté pour la conception et la réflexion sur le projet, ce qui a fortement enrichi ma formation comme ingénieur.

Je voudrais aussi remercier Christophe Niclaeys et François Lessafre, parce que c'est grâce à eux que j'ai pu vivre l'expérience « de la recherche » avec le réglage de la micromachine et tous les petits soucis qui sont apparus au long des essais, et par leur entière disponibilité pour toutes discussions concernant la conception de l'enceinte et certains points où leurs avis m'ont aidé à trouver des solutions beaucoup plus intéressantes que ce que j'imaginais en principe.

Je remercie Jean-François Witz par son encadrement, ses conseils et ses commentaires éclairants sur l'optique de l'enceinte et de l'expérience à mettre en œuvre en général ; à Laurent Patrouix par sa disponibilité pour discuter sur la fabrication et répondre à des petits doutes ; et à Denis Le Picart pour son aide avec les aspects optiques et CATIA.

Je veux adresser mes remerciements à l'atelier de l'École Centrale de Lille, et à Alain Deparcy, toujours disponible pour discuter la faisabilité de mes idées et pour m'aider à donner une résolution réelle à certaines approches et solutions de la conception.

Finalement, je tiens à remercier à tous ceux qui m'ont accompagné au long de cette expérience : ma famille lilloise avec Albert, Anna, Laia, Belén, les Pablos... et à ma famille espagnole, loin mais proche, qui ont suivi mes avancements avec « la boîte » par Skype chaque semaine.

0. Sommaire

1.1. Cadre de Réalisation du Stage 5

1.1.1. L'École Centrale de Lille 5

1.1.2. Le Laboratoire de Mécanique de Lille 5

1.2. Objectifs 6

2.1. Travaux Précédents 7

2.1.1. Travaux de Laurence Bodelot 7

2.1.2. Travaux de Romain Desbats 8

2.2. Cahiers des Charges 9

2.2.1. Contraintes Physiques 9

2.2.2. Contraintes d'Utilisation/Adaptation 9

3.1. Analyse de l'Existant 11

3.1.1. Matériaux disponibles 11

3.1.1.1. Portique/Enceinte 11

3.1.1.2. Micromachine 12

3.1.2. Conception antérieure 13

3.1.2.1. Géométrie générale 13

3.1.2.2. Montage/Assemblage 14

3.1.2.3. Choix techniques/Matériaux 14

3.2. Réflexion sur l'Existant 15

3.2.1. Matériaux disponibles 15

3.2.2. Géométrie 15

3.2.2.1. Géométrie Générale 15

3.2.2.2. Géométrie du Couvercle 15

3.2.3. Choix Techniques 16

3.3. Proposition de Solutions 17

3.3.1. Solutions Géométriques 17

3.3.1.1. Solution dite « Modulaire » 17

3.3.1.2. Solution dite « Intégrale » 17

3.3.2. Solutions en Matériaux 18

3.3.2.1. Solution en PMMA 18

3.3.2.2. Solution en Aluminium 20
3.3.2.3. Solution en Acier 20
3.3.3. Choix d'une Solution 21
3.3.3.1. Géométrie 21
3.3.3.2. Matériaux 23
3.3.3.3. Solution Finale 24
3.4. Validation de la Solution 25
3.4.1. Résistance Mécanique 25
3.4.1.1. Vérification face au Voilement 25
3.4.1.2. Vérification des Déformations 26
3.4.1.3. Vérification des Contraintes 26
3.4.1.4. Vérification de l'Assemblage Boulonné 27
3.4.2. Comportement Optique 27
3.4.3. Choix Techniques 29
4.1. Mise en œuvre 30
4.1.1. Découpe des parties 30
4.1.1.1. Éléments de Base 30
4.1.1.2. Opérations d'Usinage 31
4.1.2. Opérations de Soudage 34
4.1.2.1. Soudage des Composants en Aluminium 34
4.1.2.2. Soudage des Composants en Acier 35
4.1.3. Assemblage 35
4.2. Mise en œuvre des Annexes 36
4.2.1. Portique 36
4.2.2. Rails de Guidage 36
4.2.3. Asservissements 37
4.3. Assemblage Totale 38
4.4. Requête de Devis 38
5.1. Mise à Point de la Micromachine 39
5.1.1. Introduction 39
5.1.2. Fonctionnement à Vide 39
5.1.3. Réglage du capteur de Position LVDT 40
5.1.4. Réglage des Capteurs d'Efforts 41

5.1.4.1. Le système de Mesure 41
5.1.4.2. Problème de Non-Linéarité 42
5.1.4.3. Problème de Relâchement 42
5.1.5. État Actuel 43
5.2. Tests de l'Enceinte 43
5.2.1. Tests des Asservissements 43
5.2.2. Tests du Vide 44
5.2.3. Tests de l'Optique 44
6.1. État de l'Art à l'heure actuelle 45
6.2. Bilan du Rôle de l'Ingénieur 45
A.1. Calcul des Écarts Angulaires 46
A.1.1. Principe Géométrique 46
A.1.2. Calculs 47
A.1.2.1. Géométrie Première 48
A.1.2.2. Géométrie Modifiée 48
A.2. Calcul de l'Assemblage Boulonné 49
A.2.1. Introduction 49
A.2.2. Base Technique 49
A.2.3. Calcul de l'Assemblage 50
A.2.3.1. Approche Éléments Finis 50
A.2.3.2. Calcul Théorique 51
A.3. Vérification du Voilement 54
A.4. Évaluation des gains en masse selon le matériau. 56
A.4.1. Masse de l'enceinte en Aluminium et Acier 56
A.4.2. Masse de l'enceinte en Acier 57
A.5. Essais de réglage de la Micromachine 58
B.1. Bibliographie 60
B.1.1. Bases Théoriques de l'Expérience 60
B.1.2. Technique du Vide 60
B.1.3. Technique des Assemblages 60
B.1.4. Technique des Soudures 60
B.2. Indice des Images 61

1. Introduction

1.1. Cadre de Réalisation du Stage

1.1.1. L'École Centrale de Lille

Au cœur de la Cité Scientifique de Villeneuve d'Ascq (Nord), partagée avec l'université Lille I, depuis les années 1968, l'École Centrale de Lille est l'héritière de la tradition de l'Institut Industriel du Nord (I.D.N.), vénérable institution d'enseignement supérieur, ayant démarré ses activités au milieu du XIXème siècle, sur des bâtiments actuellement situés rue Jeanne d'Arc sur Lille, maintenant désaffectés de l'activité d'enseignement. Les études, tout d'abord fondées sur les activités mécaniques et textiles, pilier de l'économie du Nord-Pas-de-Calais depuis le XIXème siècle, furent renouvelées au cours du XXème siècle. Le textile est abandonné, mais les formations généralistes, avec des branches en électricité et automatique, s'imposent.

La fin du XXème siècle maintient la formation généraliste de l'École, sans pour autant renoncer à une spécialisation à la fin de la troisième année des études Centraliennes. L'I.D.N. devient l'École Centrale de Lille, et s'attaque à de nouveaux domaines en partenariat avec d'autres acteurs de la métropole lilloise et de la région : la branche de télécommunication et informatique de Lens devient l'IG2i et le partenariat avec l'École de Business Skèma donne lieu à l'ITEEM, formant des élèves avec un profil technique et manageur.

Actuellement, l'École Centrale de Lille entreprend l'adaptation de ses études aux nouveaux cadres d'éducation supérieure européenne (EEES), et continue à accueillir chaque année un peu plus de 200 élèves issus des concours pour les Grandes Écoles, ainsi que des étudiants étrangers au travers de ses partenariats avec de nombreuses universités et écoles techniques autour du monde. Réputée comme une des plus grandes Écoles d'ingénieurs françaises, elle fait partie du réseau des Écoles Centrales (comprenant aussi Paris, Lyon, Marseille, Nantes et Pékin) et reste toujours en liaison avec les acteurs de l'éducation supérieure de la région du Nord-Pas-de-Calais (branche de l'ENSAM à Lille, Polytech Lille, Mines de Douai, etc.), avec des partenariats comme l'association AIP-Primeca.

1.1.2. Le Laboratoire de Mécanique de Lille

Associé au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), le Laboratoire de Mécanique de Lille (LML) est un établissement de recherche scientifique de haut niveau, menant des projets et recherches sur plusieurs domaines techniques. Six lignes de recherche font partie du LML, parmi lesquelles on peut trouver les domaines des Écoulements Turbulents, Tribologie et Technologies du Freinage, Mécanique de la Rupture et Fatigue et Endommagement des Matériaux, ou Matériaux Composites.

1.2. Objectifs

La formation offerte par l'École Centrale de Lille est fondée sur une approche de l'élève aux métiers de l'ingénieur et à son environnement. C'est dans le cadre de la dernière année des études que les élèves partent en entreprise ou dans une institution de recherche pour mettre en pratique leurs connaissances dans le cadre d'une vraie expérience du métier. Dans le cadre de l'entreprise ou de l'institution d'accueil, l'élève est confronté à une mission de stage à développer pendant la durée de celui-ci. Encadré par un responsable senior, l'élève devra montrer une performance d'ingénieur junior en accord avec les capacités issues de sa formation.

Ce stage, déroulé entre les mois de Mai et Septembre 2012 au Laboratoire de Mécanique de Lille (LML), a suivi deux lignes de travail sur le sujet de l'analyse couplée des champs de déformation et thermiques.

- Étude de l'état de l'art et des travaux existants pour l'observation des champs de déformations et thermiques, ainsi que les projets au sein de l'École Centrale de Lille en liaison avec le LML. Révision des travaux et conception d'une enceinte sous vide pour la réalisation des expériences sur le domaine mentionné ci-dessus.

- Révision de la Micromachine d'Essais de Traction-Compression avec les responsables. Mise à jour du montage et de l'état de la machine. Réglage des capteurs et vérification de son fonctionnement.

2. Approche au Sujet

2.1. Travaux Précédents

2.1.1. Travaux de Laurence Bodelot

Les travaux de base qui ont conduit à ce stage ont commencé avec la thèse de doctorat de Laurence Bodelot, « Étude couplée des champs cinématiques et thermiques à l'échelle de la microstructure des matériaux métalliques », soutenue en Novembre 2008. [1]

Dans son travail, Mlle. Bodelot part de l'étude du comportement thermomécanique des matériaux et des systèmes et technologies d'analyse d'image pour développer une méthode d'observation des champs de déformation et de température sur une éprouvette. Les amorçages de fissures ou des défauts à l'échelle microscopique sont reliés à des concentrations plus énergétiques que la structure originale, entrainant une augmentation de la température de façon locale. C'est en observant le champ de déformation avec un système de corrélation d'images, et prenant en parallèle des mesures thermiques que l'ingénieur chercheur peut établir des liaisons entre les déformations et les comportements du matériau à l'échelle microscopique, par le biais de la température.

Les travaux de Mlle. Bodelot ont eu comme conclusion une méthode expérimentale pour l'étude couplée de ces champs, ainsi qu'un montage permettant de faire des essais. Celui-ci comporte deux systèmes d'observation : visible pour les déformations et infrarouge pour les températures. L'éprouvette, placée sur une machine d'essais de traction-compression, est la source d'une radiation (voir Figure 1) composée d'une partie visible et d'une partie infrarouge. Pour pouvoir observer les deux en même temps, on se sert d'un miroir dichroïque ; ceci décompose la radiation dans les deux parties qu'on vient de citer, en laissant passer une à travers sa surface, la deuxième étant réfléchie.

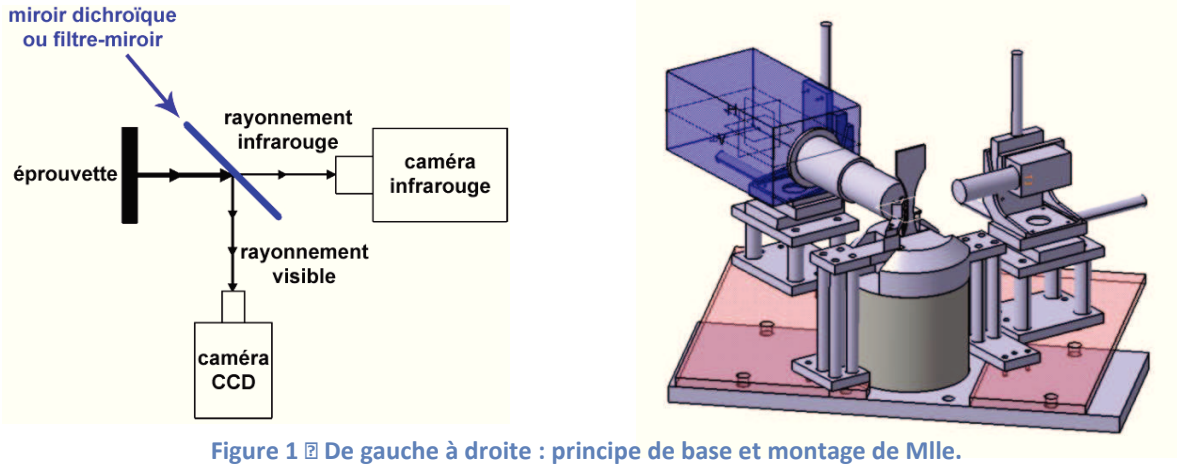


Figure 1 – De gauche à droite : principe de base et montage de Mlle. Bodelot pour mesure couplée des champs cinématiques et thermiques.
(Figures issues des travaux de Mlle. Bodelot et M. Desbats)

[1] Voir l'annexe B.1. « Bibliographie ».

2.1.2. Travaux de Romain Desbats

La ligne de recherche issue de la thèse de Mlle. Bodelot a continué à être l'objet d'attention du LML avec d'autres étudiants de doctorat qui ont repris le sujet et approfondi la recherche. L'état actuel du sujet a permis de montrer que l'observation couplée, telle qu'elle est conçue dans la thèse de Mlle. Bodelot, présente des petits soucis, nécessitant une amélioration de la mesure thermique.

L'observation d'un champ de température comporte l'obtention par infrarouge de la radiation issue de l'éprouvette. Cependant, ce qu'on vient observer n'est pas la vrai image infrarouge de la surface objective, mais le rayonnement de la surface plus des réflexions des radiations issues de l'environnement, plus une radiation « de fond » correspondant aux courants d'air, dues aux phénomènes de convection naturelle. Il s'agit, donc, de garantir un environnement de travail bien contrôlé afin de minimiser les nuisances extérieures sur l'expérience.

M. Desbats a reçu comme mission[2], de la part du LML, de concevoir une enceinte sous vide capable de fournir les conditions de travail citées ci-dessus (absence de radiation parasite, absence de courants d'air), ainsi que les annexes nécessaires pour la mise en œuvre de l'expérience. Ce travail a permis de chiffrer les coûts des instruments et asservissements annexes à l'enceinte, avec une proposition de géométrie pour l'ensemble. Ces travaux ont permis de mettre en évidence des problèmes reliés aux besoins de l'expérience à incorporer dans les solutions qu'on veut proposer.

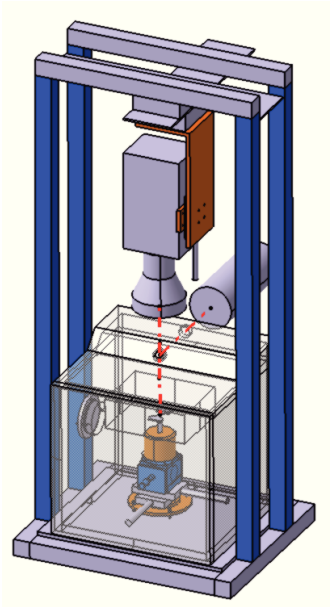


Figure 2 – Montage de M. Desbats pour la mesure couplée des champs cinématiques et thermiques. *(Figure issue de la CAO de M. Desbats).*

[2] Mission effectuée dans le cadre de l'activité Projet IMPACT de 3ème année à l'École Centrale de Lille. Voir l'annexe B.1. « Bibliographie ».

2.2. Cahiers des Charges

D'après l'étude des travaux faits préalablement par Mlle. Bodelot et M. Desbats, ainsi que des acteurs concernés par le projet, un cahier de charges a été établi comme point de départ, puis modifié au fur et à mesure que l'avancement du projet mettait en évidence des réalités inattendues ou des nouveaux besoins reliés aux nouvelles propositions.

Les contraintes issues de l'analyse de la situation peuvent être classifiées, grosso modo, en deux groupes : contraintes physiques et contraintes d'utilisation et d'adaptation.

2.2.1. Contraintes Physiques

Les contraintes physiques sont reliées aux points clés de l'enceinte : comportement envisagé d'un point de vue mécanique, optique, etc. Elles constituent la base de la conception et des choix principaux pour le système à concevoir.

- **Enceinte stable par rapport aux sollicitations mécaniques.**

  L'enceinte doit tenir par rapport aux efforts mais, principalement, par rapport aux déformations qui vont être induites sur sa géométrie. Le travail d'observation étant très précis, il faut absolument garantir des bonnes performances de l'ensemble afin de garantir que ce qu'on observe est bien ce qu'on souhaite.

- **Bon comportement optique.**

  L'enceinte est censée empêcher les rayonnements et les nuisances sur les mesures de rayonnement. Néanmoins, il est toujours possible que les sources de radiation au sein de l'enceinte génèrent des problèmes à cause des phénomènes de réflexion. L'étude des rayonnements et des formes à l'intérieur doit assurer un bon comportement.

- **Bon comportement thermique.**

  Puisqu'on veut trouver un comportement précis de l'éprouvette et du matériau, il est nécessaire que le système soit stable par rapport à l'extérieur, et que son comportement ne dépende pas de l'environnement.

2.2.2. Contraintes d'Utilisation/Adaptation

En relation avec l'utilisation de l'enceinte, son placement dans le laboratoire et sa liaison avec les équipements annexes, ainsi que sa mise en uvre, il est possible d'établir une série de contraintes additionnelles.

- **Enceinte légère.**

  Le placement de l'enceinte n'est pas définitif, et selon les besoins du LML devrait pouvoir être déplacée, même au sein du laboratoire. Une conception plutôt légère est à envisager, afin de permettre des déplacements aisés, même pour la manipulation de l'enceinte lors des expériences.

- **Conception simple.**

  La réalisation de l'enceinte devra être faite, soit dans les ateliers de l'École Centrale de Lille, soit en sous-traitance. En tout cas, une géométrie complexe, avec des pièces encombrantes ou difficiles à usiner, est à éviter. Une bonne conception peut rendre la mise en œuvre beaucoup plus aisée et largement moins chère.

- **Flexibilité dans l'utilisation.**

  L'enceinte n'est pas un instrument du laboratoire à un seul propos. Il est envisageable que ce soit un système avec vocation, à être utilisé et adapté selon les besoins du LML. La simplicité mentionnée ci-dessus devra être harmonisée avec une certaine flexibilité dans la géométrie et les adaptations, afin de permettre une transition rapide entre deux expériences différentes, même si elles comportent des annexes ou asservissements différents.

3. Démarche de Conception

3.1. Analyse de l'Existant

L'ensemble des travaux réalisés avant le projet actuel ont généré une série d'objets, instruments et connaissances à intégrer dans la nouvelle démarche de conception. Cette intégration devra profiter des fonctionnalités existantes et renouveler ou actualiser, si besoin, les éléments dont les performances ne sont plus à jour.

3.1.1. Matériaux disponibles

Dans cette épigraphe on veut faire référence aux éléments physiques issus des travaux antérieurs et qu'on pourra adapter aux nouveaux besoins du projet.

3.1.1.1. Portique/Enceinte

Le LML dispose d'une table avec un portique fabriqué avec des profilés standard de la marque Bosch. Largement flexibles, ces profilés permettent une adaptation rapide et aisée de la structure aux besoins de l'expérience. La structure possède un cadre de base rectangulaire, de mesures 60 x 50 cm, où on vient placer quatre poteaux de 81 cm d'hauteur à l'aide d'équerres vissées aux profilés. Les poteaux sont reliés deux à deux par deux traverses de longueur 60 cm, qui servent de base pour un système de positionnement fait par deux tables à vis, permettant le balayage sur le plan XY (plan parallèle à la base).

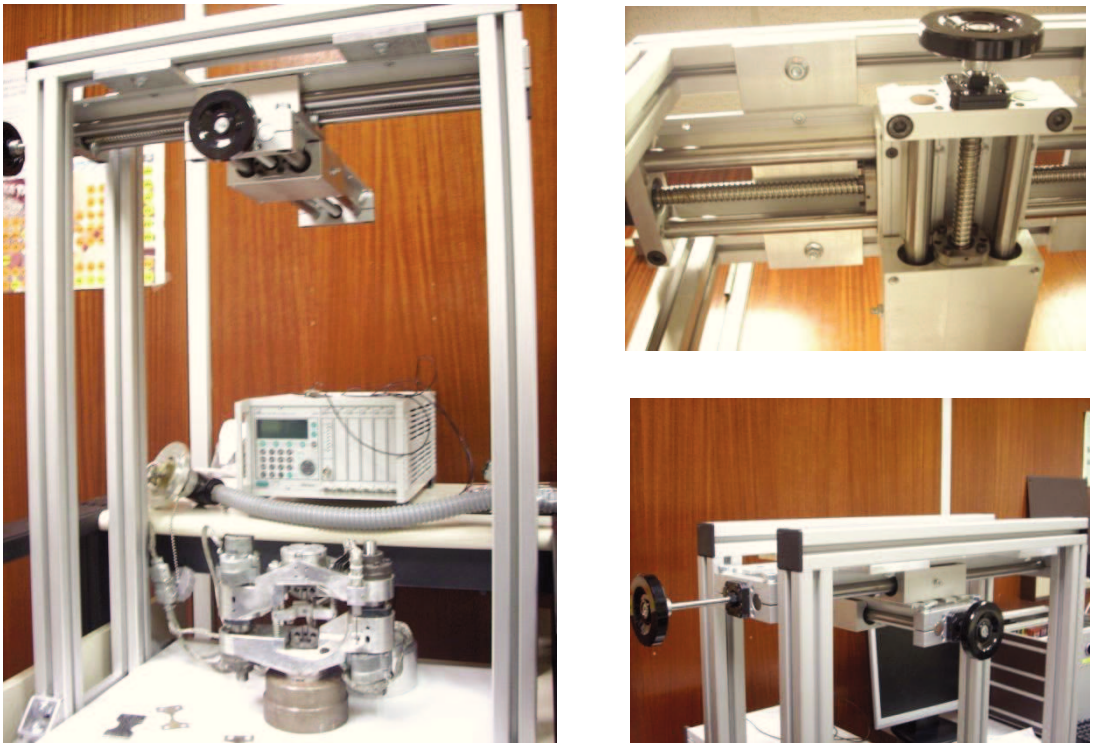


Figure 3 – De gauche à droite, de haut en bas : portique actuel, détail du dispositif de balayage, traverses du portique à garder.

L'enceinte est une structure à fabriquer entièrement. Les seuls éléments à intégrer dans l'enceinte et qui sont déjà fabriqués sont le miroir dichroïque et le bouchon de câblage que permettra l'entrée des asservissements pour la micromachine à l'intérieur de l'enceinte. Ce dernier a déjà été utilisé pour des observations dans le MEB du département de mécanique de l'EC Lille.

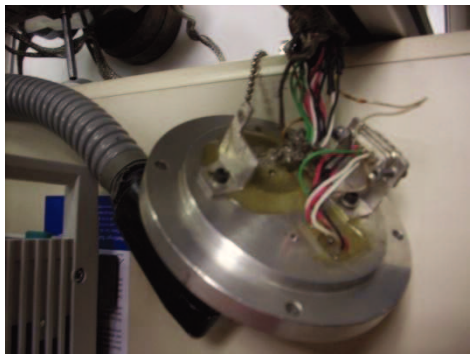


Figure 4 – Bouchon de câblage de la micromachine, intégrable dans la nouvelle conception.

3.1.1.2. Micromachine

La micromachine pour les essais de traction-compression est un instrument déjà employé dans quelques expériences et thèses au long des années à l'École Centrale de Lille et au LML. Il s'agit de deux traverses avec des mors pour placer les éprouvettes à tester, reliées par l'intermédiaire de deux vis. Ces dernières sont actionnées par deux moteurs pas-à-pas piézoélectriques, placés de façon antisymétrique de chaque côté. Elle est capable de fournir des efforts jusqu'à 7000 N.

On dispose de deux bases pour la micromachine, permettant de la placer en « horizontale » (c'est-à-dire, avec les mécanismes d'actionnement en horizontale, observant l'éprouvette depuis la partie supérieure) o en « verticale » (la machine est appuyée sur une de ses traverses au niveau du boîtier des roulements d'une des mors, avec les mécanismes d'actionnement en position verticale).

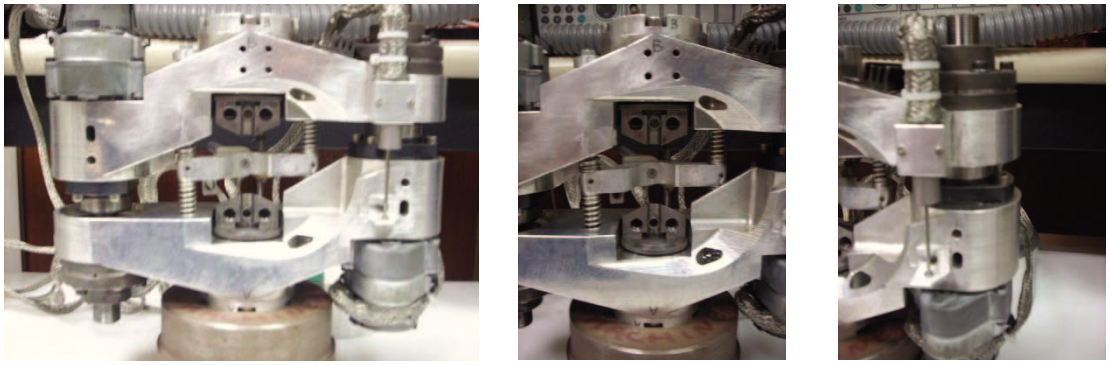


Figure 5 – De gauche à droite : micromachine en verticale, détail des mors de serrage, détail de la vis de déplacement et capteur LVDT.

3.1.2. Conception antérieure

Cette épigraphe veut rassembler les travaux faits en termes de CAO par les projets précédents, en permettant une approche du problème et un point de départ de la nouvelle démarche.

3.1.2.1. Géométrie générale

Les travaux de CAO précédents ont permis de donner une structure assez précise de l'ensemble de l'expérience. Depuis les travaux de Mlle. Bodelot, on trouve bien une disposition où l'éprouvette est la source de rayonnement ; par le biais du miroir dichroïque on obtient les rayonnements séparés, analysés dans les capteurs correspondants. Les travaux de M. Desbats ont transformé cette disposition « horizontale » sur une table, donnant un arrangement un peu plus complexe, mais plus compacte : le rayonnement est séparé à l'intérieur de l'enceinte, et on n'a plus besoin d'un montage encombrant, tout est aménagé sur le portique et derrière l'enceinte.

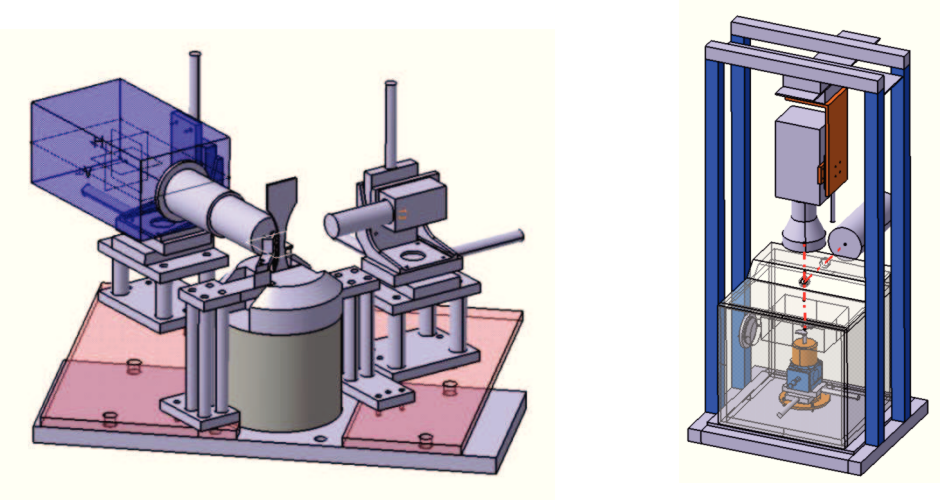


Figure 6 – À gauche, montage de Mlle. Bodelot, à droite, montage de M. Desbats.
(Figures issues des travaux de Mlle. Baudelot et M. Desbats).

L'enceinte en soi même est constituée par six parois, attachées les unes aux autres. L'encombrement est à peu près celui d'un cube de 40 x 40 x 40 cm. L'accès à l'intérieur est fait par le panneau frontal, et le bouchon de câblage est placé sur la paroi gauche. Le miroir est attaché au couvercle. Cette disposition permet de résoudre un défaut de réflexion des objectifs sur les surfaces d'observation, connu comme Effet Narcisse, où on capte l'image de la surface plus la réflexion de l'objectif sur le matériau.

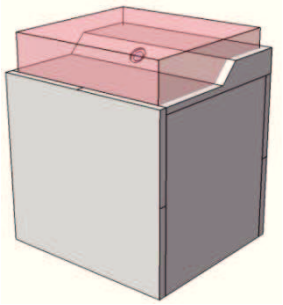


Figure 7 – Aspect générale de la conception de M. Desbats.
(Figure issue des travaux de M. Desbats).

3.1.2.2. Montage/Assemblage

Le montage du système est fondé sur le placement de l'enceinte sous le portique. La micromachine est placée dans l'enceinte, sur son système de base et un empilement constitué par trois tables micrométriques. Cet arrangement est réglé afin de garantir le bon positionnement de la machine sous le miroir, avec une éprouvette d'étalonnage et les caméras d'observation, bien alignées avec les fenêtres d'observation. Le réglage des caméras est assuré par un étalonnage avec un corps noir, placé à la position de la micromachine.

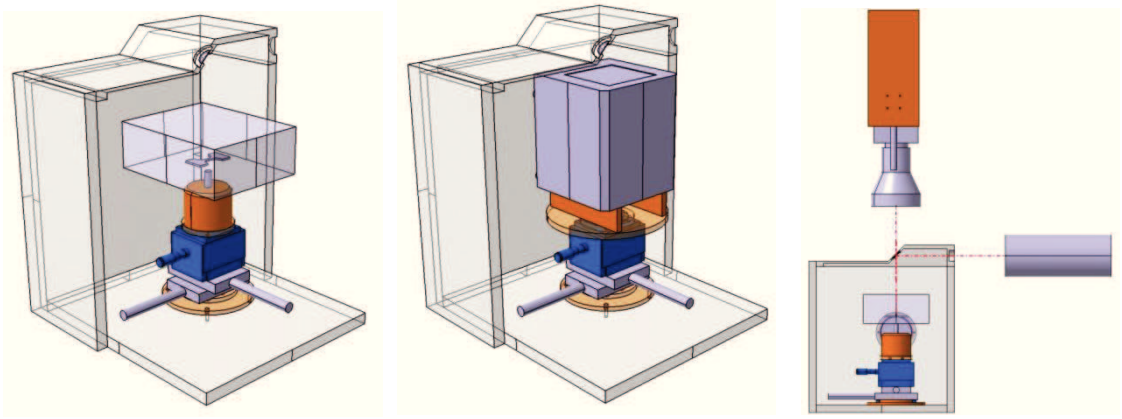


Figure 8 – De gauche à droite : placement de la micromachine sur sa position exacte ; réglage optique par le biais d'un corps noir ; rayonnement du système vers les capteurs. *(Figures issues des travaux de M. Desbats).*

Une fois le réglage fini, l'expérience peut être mise en place. Lorsqu'on fait travailler la machine, on observe que le rayonnement infrarouge sort par la partie supérieure, où il va aboutir sur le capteur attaché au système de balayage du portique, et le rayonnement visible, une fois réfléchi par le miroir, sort à l'extérieur par une fenêtre, puis capté par son microscope.

3.1.2.3. Choix techniques/Matériaux

Les travaux faits préalablement ont défini les choix de tous les systèmes d'asservissement et d'observation. Pour l'enceinte, il a été décidé d'utiliser le PMMA comme matériau de base, par sa faible masse volumique et sa facilité d'usinage. L'opacité à l'intérieur devrait être garantie par un revêtement à base de noir de carbone, sauf aux fenêtres d'observation.

3.2. Réflexion sur l'Existant

A partir de l'analyse des matériaux disponibles et des travaux réalisés, une réflexion a été faite. Le but de cette réflexion a été d'approfondir la connaissance du problème, des défis à résoudre, et de pouvoir améliorer, avec un raisonnement critique, les idées existantes.

3.2.1. Matériaux disponibles

Les matériaux déjà disponibles parmi les ressources du LML sont à réutiliser dans le cadre du nouveau projet. Pour le portique, les poteaux sont à rallonger, mais les anciens seront raccourcis et réutilisés dans le nouveau cadre de base du portique, tout en gardant le système de balayage accroché aux traverses du portique.

Quant à la micromachine et ses adaptateurs, tout sera repris dans la nouvelle conception. Le système de base sera compatible avec les placements des tables micrométriques ; la machine rentre sans problème dans l'enceinte et l'interfaçage avec le bouchon de câblage du MEB est garanti.

3.2.2. Géométrie

La géométrie de l'ensemble, mais surtout de l'enceinte, a été l'objet de nombreuses réflexions. Quels sont les raisons qui ont déterminé certains choix ? Peut-on s'affranchir d'autres problèmes avec des nouvelles idées, tout en gardant les avantages issus de la première conception ?

3.2.2.1. Géométrie Générale

Après l'analyse, on trouve que la géométrie de l'ensemble, telle qu'elle est, permet d'assurer une compacité de l'expérience, et améliore la disposition initiale de Mlle. Bodelot en intégrant l'enceinte.

Cependant, les choix faits ne permettront pas une flexibilité future. L'idée d'interfacer la machine avec le bouchon de câblage, celui-ci étant accroché à une ouverture latérale, constitue une contrainte pour des expériences futures. Un interfaçage différent, avec d'autres câblages, besoins, etc. forcerait l'adaptation de l'enceinte avec des nouveaux perçages. L'affaire devient plus dure s'il n'est pas possible d'utiliser les perçages existants et, finalement, il est nécessaire de percer à nouveau et boucher toute ouverture qu'on n'utilise plus. Cette configuration ne permet pas de dispositions de la micromachine dans des sens autres que le placement à l'horizontale. On trouve, donc, que les choix qui ont été faits vont, malgré la résolution des besoins actuels, contraindre des utilisations futures.

3.2.2.2. Géométrie du Couvercle

Le couvercle est la pièce la plus importante pour l'ensemble de l'enceinte. Le fait d'intégrer le miroir dichroïque, la pièce garantissant l'obtention des images de l'éprouvette, oblige à être soigneux avec sa conception et son comportement. L'intégration du miroir à 45

degrés permet de garantir un bon placement de l'élément, et avec des bonnes tolérances géométriques.

Cependant, cette disposition n'est valable que dans le cas où le miroir et son hublot ne subissent pas de déformations. C'est-à-dire, on est capable de garantir une géométrie quand l'enceinte n'est pas chargé avec le vide à l'intérieur, tandis que la situation de travail va induire des déformations sur le système, dont leur impact sur le positionnement du miroir en situation de travail doit être évalué et maîtrisé. Les déformations selon le matériau et la géométrie du couvercle sont à étudier, afin de pouvoir déterminer les choix de géométrie et des matériaux à employer pour la conception de l'enceinte.

Par ailleurs, il faut observer que la géométrie du couvercle ne peut pas être faite dans tous les matériaux. Le choix original du PMMA permettait un usinage depuis un brut, tandis que l'aluminium serait très difficile à travailler, et même l'acier poserait des problèmes avec des pliages ou soudures multiples à faire.

3.2.3. Choix Techniques

Les choix techniques au niveau des matériaux ont été remis en question. Le raisonnement pour l'utilisation du PMMA est cohérent, garantissant une légèreté supérieure à une application analogue avec de l'acier ou de l'aluminium. Puis, cela facilite l'usinage et permet de réduire les temps de fabrication, et la mise en œuvre des géométries plus complexes.

Cependant, il a été considéré nécessaire d'analyser à fond les performances du PMMA afin de déterminer si ses caractéristiques vont vérifier les conditions issues du cahier des charges et des points clés issus de l'analyse critique des travaux antérieurs et de la conception.

3.3. Proposition de Solutions

On veut montrer, sous ce titre, la démarche suivie pour la proposition d'une solution satisfaisant le cahier de charges du projet. D'un côté, une démarche géométrique fût suivie pour déterminer la meilleure disposition des éléments, prenant en compte des critères de conception, mise en œuvre, fonctionnalité et ergonomie. D'autre côté, avec une structure géométrique plus définie et selon des critères de comportement du système, le choix des matériaux a été accompli.

3.3.1. Solutions Géométriques

Cette épigraphe montre les différents choix faits au long de la démarche de conception pour trouver la géométrie finale qu'on propose pour le projet.

3.3.1.1. Solution dite « Modulaire »

Partant d'une première prémisse de flexibilité, une structure mixte en aluminium et PMMA a été proposée. L'idée était d'intégrer la polyvalence d'un système comme les profilés Bosch avec la facilité d'usinage du PMMA. La structure restait cubique, avec une ossature à base des profilés, encadrant des plaques de PMMA ajustées aux rainures des profilés, le tout fournir des garnitures en élastomère comme joints d'étanchéité. L'accès pouvait être garanti avec le glissement des parois et en déplaçant le couvercle. Ceci conserve la géométrie prévue par la CAO antérieure. Cette structure à pièces standardisées et très modulaire permettait des ampliations futures et faciles à gérer.

Cependant, le grand nombre de joints d'étanchéité à mettre en place, ainsi que la difficulté pour garantir des bonnes tolérances géométriques, furent les arguments pour ne pas choisir cette solution. Des autres idées ont été considérées, pour d'une réduction du nombre des joints.

3.3.1.2. Solution dite « Intégrale »

Étant donné que le nombre de joints d'étanchéité entre les pièces démontables et les parties fixes, la solution passe par une conception plus « intégrale » avec des grandes pièces solides, à assembler avec des unions mâle-femelle ou des géométries coïncidentes. On envisage un système où les plaques en PMMA seront aussi jointes par un ensemble de vis. La solution a été déjà implémentée sur une petite chambre à vide utilisée sur le dispositif du tribomètre, dans le laboratoire de mécanique de l'École Centrale, et a été jugée comme appropriée.

Cette solution, très similaire avec la CAO antérieure, a été gardée comme base pour les conceptions futures. Sa simplicité de mise en œuvre et sa robustesse sont des caractéristiques désirables pour l'instrument final.

3.3.2. Solutions en Matériaux

En parallèle des démarches en géométrie, le choix des matériaux a été poursuivi. Les géométries originales de la première CAO ont été testées afin de bien connaître leur comportement, en testant les performances du PMMA. D'autres matériaux on été testés, et la démarche pour trouver le matériau à utiliser a vite entrainé des réflexions sur la géométrie et la conception de certaines pièces. L'ensemble des tests a été fait sur le logiciel de calcul d'éléments finis Abaqus.

3.3.2.1. Solution en PMMA

Le choix du PMMA était issu du processus de conception fait préalablement. Il a été considéré nécessaire d'évaluer ses performances. Le premier test a été fait sur la géométrie originale : la paroi avec le trou pour le câblage de la micromachine et le couvercle à deux plans et un plan incliné à 45 degrés, avec une ouverture plutôt centrée sur ce dernier plan, constituant l'hublot du miroir. Le PMMA a été considéré comme homogène et isotrope, avec un Module d'Young de 3300 MPa et un coefficient de Poisson de 0,43.

3.3.2.1.1. Paroi avec Ouverture

Le modèle pour cette analyse a été une plaque aux dimensions réelles et l'ouverture pour le bouchon de câblage. Elle a été soumise à une simulation par éléments finis sous une charge de pression atmosphérique à l'extérieur (101300 Pa) et du vide à l'intérieur (100 Pa), avec un encastrement aux points de fixation réels. Les résultats ont montré une bonne résistance en tension (maximum 10 MPa), avec des déplacements maximaux de 4,5 dixièmes de millimètre.

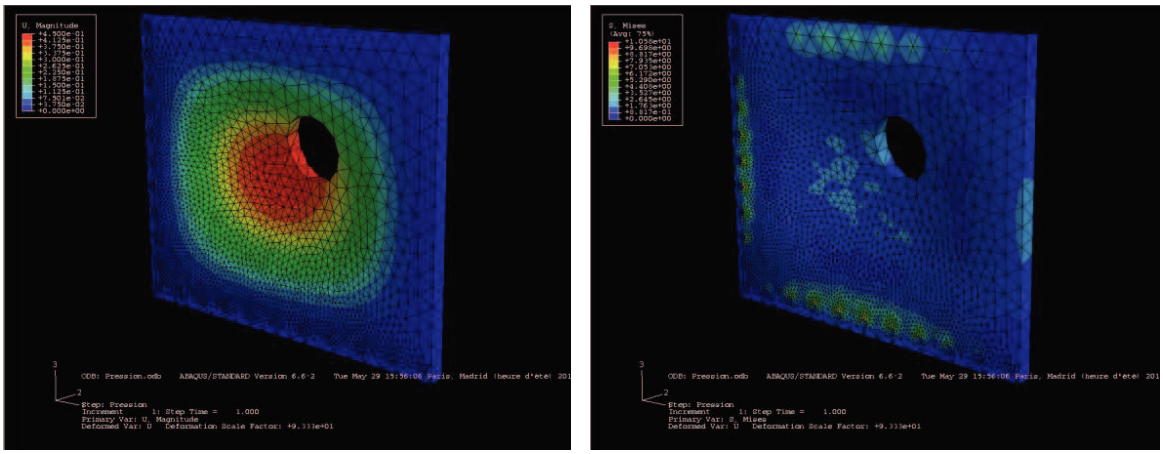


Figure 9 – À gauche, champ de déplacements sur la paroi gauche, à droite, contraintes de Von Mises.

3.3.2.1.2. Couvercle originale

Les conditions de cette analyse on été un encastrement sur le contact du couvercle avec les autres parois de l'enceinte, puis la pression atmosphérique (101300 Pa) sur la partie extérieure, et une pression de 100 Pa à l'intérieur (correspondant, grosso modo, au niveau de vide à l'intérieur de l'enceinte).

Le résultat du test a été une déformation du couvercle plus prononcé au centre, presque nulle aux bords, comme il était envisageable. Quant à la position du miroir, on a observé des déplacements principalement verticaux, avec des légers écarts dans le plan du couvercle. Cependant, les déplacements des points diamétralement opposés étaient différents. Cela entrainait une rotation du miroir, ce qui éventuellement pourrait induire des déviations de l'image du spectre visible réfléchie vers la fenêtre au fond. Cette rotation a été chiffrée en +0,11 degrés[3]. Pour une distance du miroir à la fenêtre, ça donne une perte d'environ 0,3 mm du champ d'observation, et des nuisances avec la transmission de l'image à travers la fenêtre avec des phénomènes de réfraction dus à l'incidence avec un angle écarté de la perpendicularité.

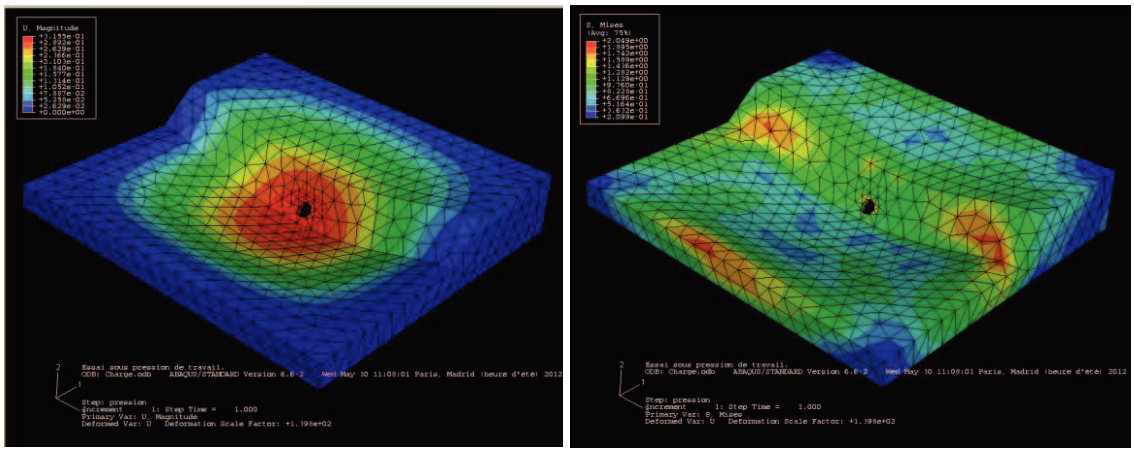


Figure 10 – À gauche, champ de déplacements sur le couvercle à géométrie originale ; à droite, contraintes de Von Mises.

On trouve donc que le choix du PMMA, avec une moindre rigidité par rapport à d'autres matériaux, peut être gênant pour l'expérience à mener dans l'enceinte à cause des écarts induits sur les rayonnements et, donc, sur la captation des images.

[3] Voir Annexe A.1. « Calcul des écarts angulaires ».

3.3.2.2. Solution en Aluminium

L'aluminium a été testé aussi comme matériau sur la géométrie originale. Les données issues de la simulation ont montré qu'une paroi plus mince que celle du PMMA (5 mm), ne subissait qu'une déformation maximale de 3,5 dixièmes de millimètre, avec des faibles contraintes (10 à 20 MPa). Pour le couvercle, les contraintes sont aussi faibles (pas plus de 5 MPa), avec des déformations sur l'hublot du miroir donnant une rotation de +0,0056 degrés.

Malgré ces résultats, beaucoup plus performants que ceux du PMMA, il n'est pas envisagé comme matériau. La géométrie est trop grande pour être usinée depuis un bloc brut, trop épaisse pour être pliée avec les moyens de l'atelier de l'École Centrale, et la soudure de l'aluminium s'avère compliquée et couteuse pour faire un assemblage avec plusieurs tôles, tout en garantissant la tenue du vide.

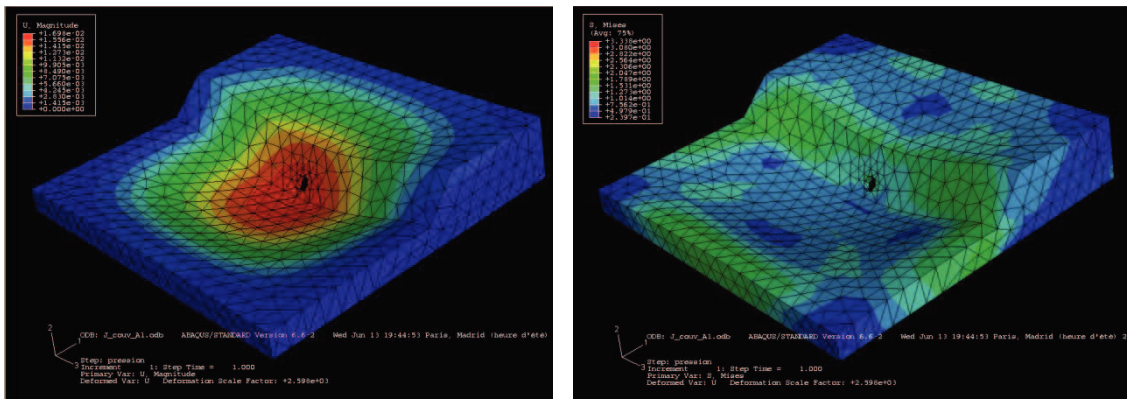


Figure 11 – À gauche, champ de déplacements sur le couvercle à géométrie originale ; à droite, contraintes de Von Mises.

3.3.2.3. Solution en Acier

Quant à l'acier, sa performance est encore meilleure, grâce à sa rigidité : le couvercle ne subit pas plus de 5 MPa sur aucun de ses points, et les écarts angulaires induits sur le hublot du miroir sont de 0,0019 degrés.

Par contre, l'acier est trop couteux pour l'usiner depuis un bloc brut, les épaisseurs ne permettent pas de le plier avec les moyens de l'atelier, et la soudure, très précise, doit garantir la tenue du vide.

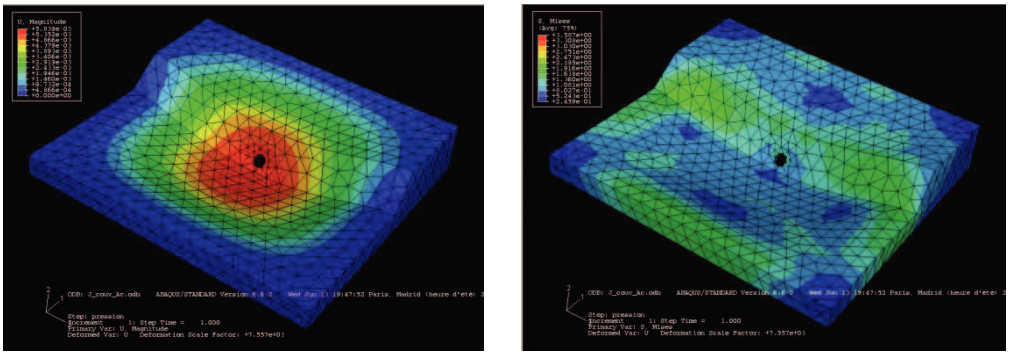


Figure 12 - À gauche, champ de déplacements sur le couvercle à géométrie originale ; à droite, contraintes de Von Mises.

3.3.3. Choix d'une Solution

Les résultats précédents, ainsi que les réflexions sur les différents choix techniques effectués, ont permis de proposer aux acteurs concernés par le projet une nouvelle solution pour l'enceinte sous vide. Elle reprend plusieurs aspects tels qu'ils étaient conçus dans la première conception, tandis que d'autres ont été modifiés pour intégrer les idées issues des réflexions et des séances de débriefing avec les acteurs et futurs utilisateurs de cet instrument.

3.3.3.1. Géométrie

La géométrie première de l'enceinte a été respectée dans son esprit. Les dimensions de l'espace intérieur ont été gardées, puisqu'elles sont suffisantes pour accueillir la micromachine et ses systèmes de placement, et sont en correspondance avec les adaptations prévues pour le portique et les équipements à placer à l'extérieur de l'enceinte.

Les prémisses de flexibilité et adaptabilité futures ont introduit les changements principaux sur la structure prévue auparavant, en ajoutant des nouveaux éléments. La simplicité originale est sacrifiée pour obtenir une grande capacité d'adaptation.

3.3.3.1.1. Parois

Les parois sont un des éléments les plus modifiés dans la nouvelle conception. Afin de ne pas les percer pour chaque adaptation aux nouvelles expériences, l'enceinte a été percée de trois trappes, dont deux latérales et une frontale. Toute adaptation comme l'insertion du bouchon de câblage sera faite sur la surface de ces portes, sans risquer l'intégrité de l'enceinte. Ensuite, la réalisation d'expériences différentes avec une disposition de la micromachine ou d'autres instruments, nécessitant d'un accès d'observation par les latérales est maintenant possible.

On trouve aussi une trappe de raccordement à l'arrière de l'enceinte, permettant de connecter tous les asservissements permanents de l'enceinte : prises de vide, vannes de relâchement, prises électriques, etc. Elle permet, avec la même philosophie que les trappes latérales, un accès flexible et adaptable aux besoins des utilisateurs.

Toutes les portes seront munies d'un joint torique d'étanchéité pour empêcher la rentrée d'air à l'intérieur de l'enceinte lors de son fonctionnement. Ce joint est à loger à l'intérieur d'une rainure usinée sur la surface des portes, et concentrique à un centrage coïncidant avec chaque trappe.

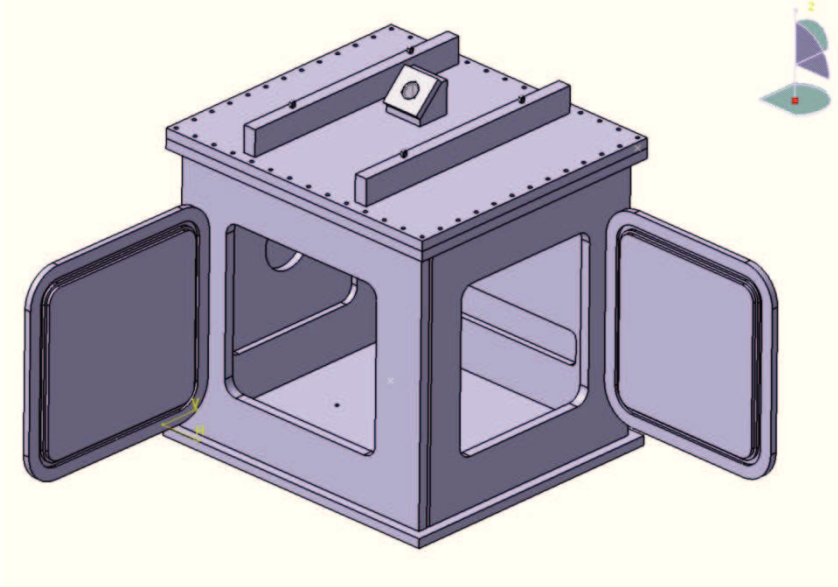


Figure 13 – Vue globale de l'enceinte, avec les portes ouvertes.

3.3.3.1.2. Couvercle

Le couvercle a été l'élément le plus largement discuté au long de la démarche de conception. La forme originale n'était valable qu'en utilisant du PMMA ; ceci a montré lors des tests d'être peu rigide. En plus, la géométrie du couvercle ne permettait pas d'adaptations futures à d'autres expériences à cause de sa forme creuse et à deux plans. En outre, une question a été lancée : peut-on séparer le miroir du reste du couvercle, le mettant sur une pièce plus rigide à accrocher sur une base ?

C'est en prenant en compte ces réflexions qu'une nouvelle disposition a été proposée : diviser le couvercle en deux parties, une plaque plane, facile à fabriquer, et une partie plus petite, rigide, plus complexe, où on viendrait placer le miroir, attachée à la plaque sur un perçage d'observation. Le but de cette idée est d'avoir un placement du miroir plus rigide et potentiellement « isolé » des efforts à subir par le couvercle ; ensuite, toute amélioration pour rigidifier l'ensemble peut être faite sur la partie plane sans modifier l'hublot.

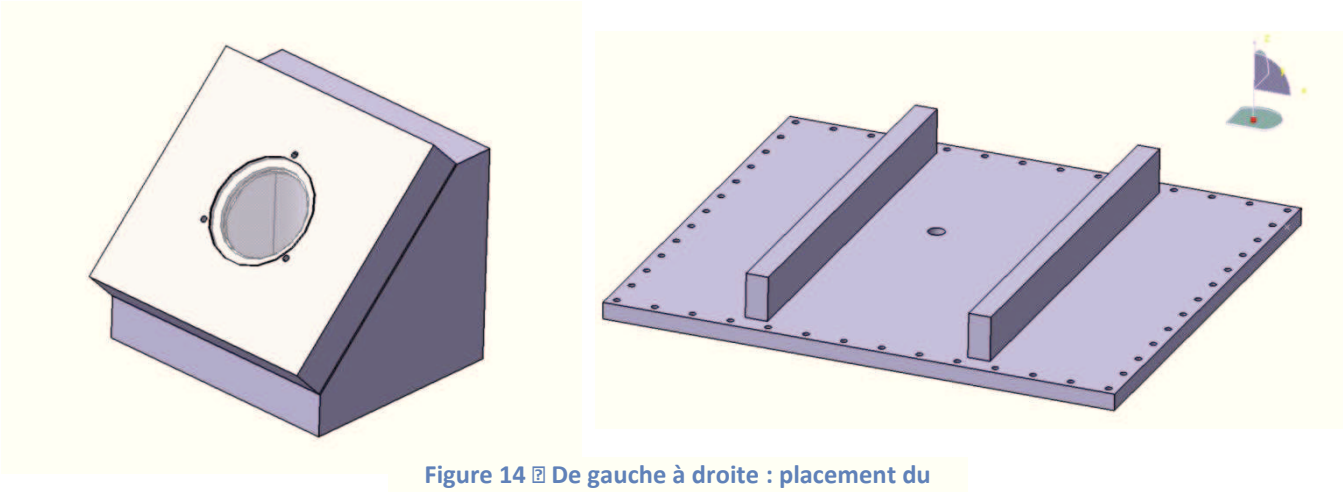


Figure 14 – De gauche à droite : placement du miroir ; plan de couvercle.

Afin de garder la flexibilité de l'enceinte, le couvercle n'est pas attaché à perpétuité sur les parois ; en haut des parois on vient mettre une collerette avec une série de perçages. Ces trous son aussi faits aux bords du couvercle, sur la partie plane. L'assemblage de ces deux éléments est fait avec des boulons, avec un joint torique entre le couvercle et la collerette. Ce joint torique est logé dans une rainure du couvercle, garantissant l'étanchéité de l'assemblage entre les deux pièces avec le serrage des boulons, tassant le joint entre son logement et la collerette.

Cet assemblage est précontraint par le serrage des boulons. La mise à vide de l'enceinte provoque une action de compression sur le couvercle, que viendra tasser le joint. Ce tassement provoquera un léger relâchement de l'effort sur les boulons, que reprendront la totalité de l'effort de serrage lors de la mise à pression atmosphérique de l'intérieur de l'enceinte. Si tel relâchement dépasse la valeur de l'effort de serrage initial, le joint ne sera tassé que par l'action de l'atmosphère, ce qui pourrait affecter la qualité de l'étanchéité.

3.3.3.2. Matériaux

Après avoir testé les performances des matériaux, il était clair que le PMMA n'était pas le matériau idéal pour la mise en uvre. Le choix de l'aluminium ou de l'acier est plus intéressant du point de vue de la rigidité de la structure, ce qui permet de garantir la stabilité du système et empêche des déformations trop fortes dans certaines parties.

Puis, le choix du matériau va contraindre les procédés de mise en uvre à utiliser : le PMMA était facilement usinable, mais son assemblage est fait avec visserie (donc entrainant des joints d'étanchéité), résines de collage (rendant l'ensemble rigide et pas démontable), etc. ; l'acier est très flexible, pouvant être soudé, plié (si l'épaisseur ne dépasse pas les 6 mm pour les moyens dont on dispose), coupé avec laser, etc., mais est toujours trop lourd ; finalement, l'aluminium est plus léger que l'acier, mais sa soudure est difficile et encombrante, son pliage est soumis aux mêmes contraintes que celui de l'acier, et il peut être coupé au laser.

Le choix final a été mixte : certaines pièces seront fournies en aluminium, d'autres en acier, puis les joints toriques en élastomère.

3.3.3.2.1. Pièces en Aluminium

Les pièces en aluminium constituent la plupart de l'ensemble de l'enceinte. Les parois, les portes, la base et la collerette. Il a été choisi en raison de sa moindre masse volumique et par son moindre temps d'usinage par rapport à d'autres matériaux comme l'acier. L'ensemble de toutes ces parties comporte un poids de presque 37 kg, soit un peu plus de la moitié de l'ensemble de l'enceinte.

3.3.3.2.2. Pièces en Acier

Les seules pièces en acier sont la partie plate du couvercle et le placement du miroir. Son utilisation pour ces pièces est justifiée par sa forte rigidité. Cependant, l'ensemble de ces deux pièces comporte presque la moitié du poids totale de l'enceinte : 33 kg de presque 70 kg pour l'ensemble.

3.3.3.3. Solution Finale

La solution issue de l'analyse et mise à jour à partir des idées faites préalablement est, à la base, une chambre cubique avec un encombrement de 460 x 420 x 400 mm. Elle est constituée par une base, quatre parois dont trois permettent l'accès avec des trappes dont un est l'accès principale, une collerette accrochée en haut des parois pour permettre l'assemblage avec le couvercle, constitué par une base plane où on accroche le placement du miroir dichroïque.

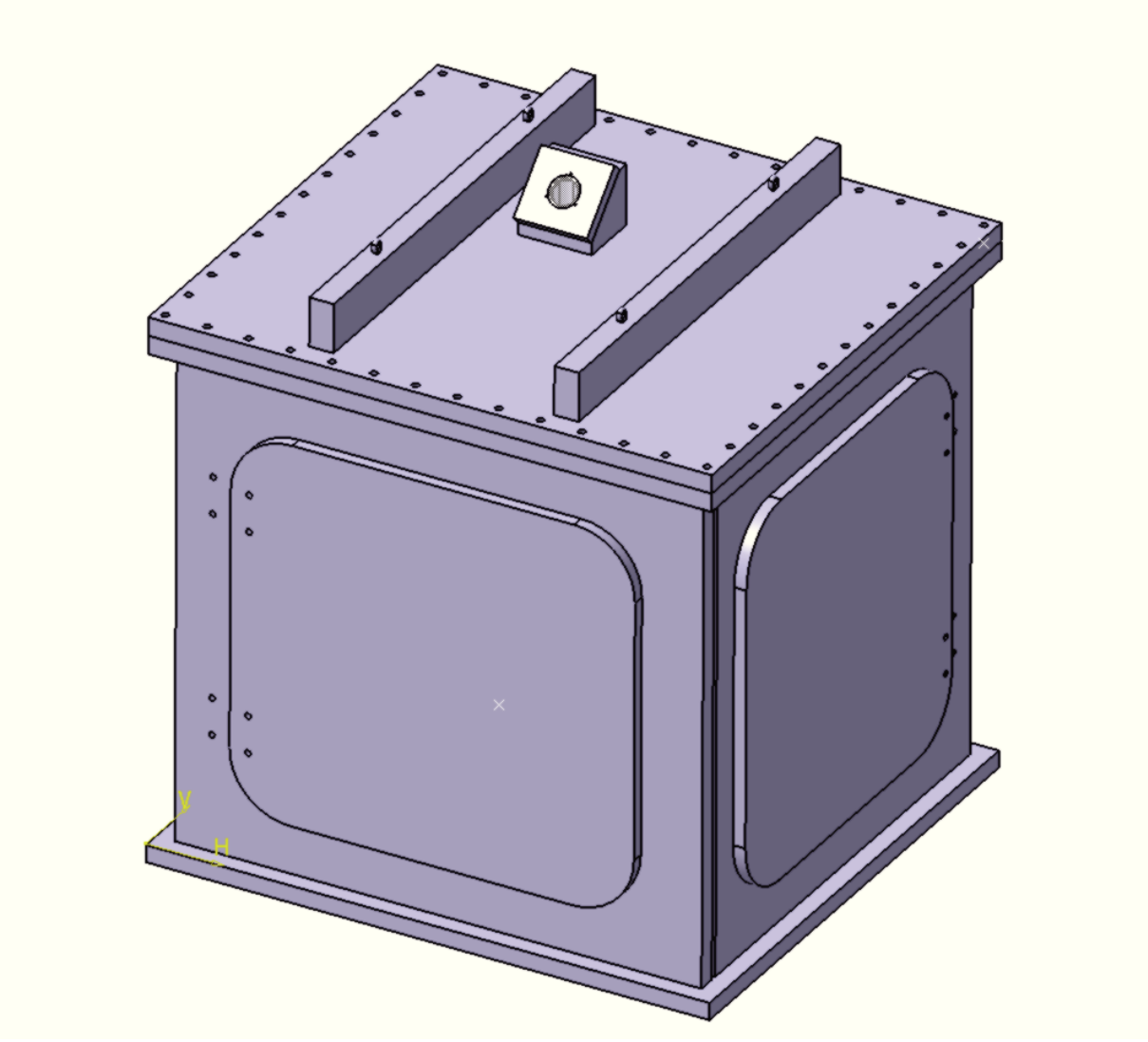


Figure 15 – Vue globale de l'enceinte.

3.4. Validation de la Solution

La proposition finale de la géométrie de base a été présentée aux acteurs du projet lors d'une séance de débriefing pour sa validation, en vérifiant que l'enceinte est capable de fournir toutes les performances exigées dans le cahier de charges initial ainsi que les conditions issues pendant la démarche de conception.

Les points clés ont été vérifiés avec les données des tests et hypothèses sur l'enceinte. Le bilan de la démarche a été positif, et la solution proposée a été validée en tant que conception de base, avant de passer à l'étude approfondie de la mise en œuvre. Les épigraphes suivants développent les raisonnements principaux pour la prise des décisions.

3.4.1. Résistance Mécanique

L'aspect résistance mécanique ne comporte pas, dans le cadre de ce projet, l'étude de la tenue en efforts de l'enceinte, mais de son comportement en tant que solide déformable et de l'influence de ces déplacements dans les performances de l'ensemble.

3.4.1.1. Vérification face au Voilement

Le nom «instabilités élastiques » définit une famille de comportements des matériaux à fortes déformations et que ne peuvent pas être encadrés dans les théories de l'élasticité linéaire classique, mais dans le domaine des grandes transformations. Le phénomène du voilement ou « flambage des plaques » est un de ces comportements. Il peut apparaître lorsqu'une plaque est très mince et est soumise à des efforts dans les directions dites « axiales », c'est-à-dire, en parallèle aux axes du plan.

La structure de l'enceinte comporte une série d'éléments dont leur minceur peut être cause d'un comportement de voilement. Il est nécessaire, donc, de garantir un comportement linéaire et pas instable de la solution pour faire une analyse correcte de la structure envisagée. Encore, la détermination d'un « seuil de voilement » donne la valeur critique de l'épaisseur où le voilement est censé d'être présent. Cependant, les formules pour trouver les valeurs critiques des phénomènes instables sont issues des hypothèses d'homogénéité et surface parfaites sur l'élément de calcul. Ceci n'est pas possible dans un contexte réel, et la présence de défauts en surface peut déclencher le voilement d'une plaque ou le flambage d'une poutre bien avant d'avoir atteint l'effort critique donné par les expressions théoriques.

Les éléments de l'enceinte qui pourraient subir des phénomènes d'instabilité sont, surtout, les parois latérales et les portes. Lors du chargement du système, quand le vide a été atteint, la chambre est soumise à une pression presque égale à celle de l'atmosphère (101200 Pa, car à l'intérieur on se trouve aux entours de 100 Pa). Cette pression s'exerce de façon perpendiculaire sur les côtés de l'enceinte, induisant une flexion vers l'intérieur, comme il a été décrit auparavant. Cependant, les parois vont subir aussi une compression sur l'axe verticale, due à l'action de la pression sur le couvercle. Ces efforts, avec la flexion induite par l'atmosphère, peuvent être une source de voilement.

Le calcul des seuils de voilement pour la géométrie de l'enceinte a donné comme résultat la validation des choix[4]. Pour une paroi d'aluminium de 15 mm d'épaisseur, le seuil de voilement est l'application d'une charge axiale égale ou supérieure à 5535 N/mm de côté. La charge appliquée par l'action de l'atmosphère est, au pire des cas, de 12,156 N/mm, très loin de l'effort critique théorique, ce qui permettrait d'absorber l'affaiblissement du seuil à cause des défauts de fabrication et l'action de la pression elle-même. En outre, l'analyse sur un logiciel d'éléments finis ne comporte pas l'utilisation des comportements en grandes transformations.

3.4.1.2. Vérification des Déformations

Le comportement de l'ensemble en déformation a été jugé comme approprié. La flexion des parois lors de la mise en charge reste faible (moindre de 0.05 mm sauf aux coins de l'hublot), ce qui permet de prévoir peu ou rien de déplacements sur la collerette d'accrochage du couvercle et, donc, du couvercle et du miroir dichroïque. Pour le couvercle les déformations sont plus réduites grâce à l'utilisation de l'acier et l'introduction de deux renforts longitudinaux. Les écarts d'angle sur le miroir sont restreints à +0.0017 degrés, garantissant la précision de l'observation.

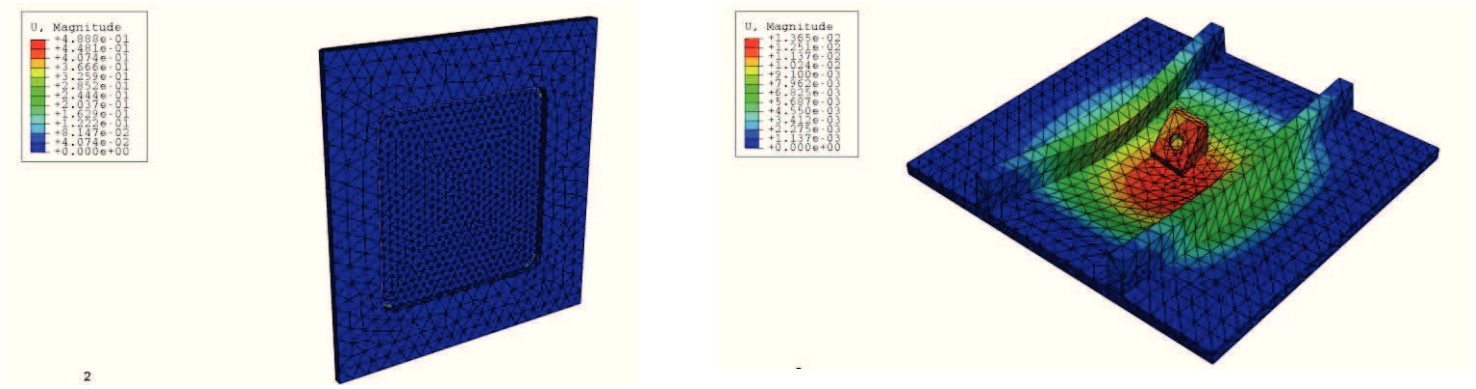


Figure 16 – À gauche, déplacements sur un ensemble paroi-porte ; à droite, déplacements du couvercle renforcé.

3.4.1.3. Vérification des Contraintes

Les sollicitations en contraintes de l'enceinte ne sont pas très élevées. L'action de l'atmosphère est d'environ 101200 Pa pour une dépression interne de 100 Pa. Les calculs ont été faits avec une supposition de vide totale à l'intérieur, soit une pression 100 Pa plus haute. Les contraintes induites sur les parois ne dépassent pas les 6 MPa, c'est-à-dire, bien loin de la limite élastique de l'aluminium (137 MPa). Pour le couvercle et l'hublot du miroir, ces contraintes sont toujours aux entours de 9 MPa, beaucoup moindres que la limite élastique de l'acier normal (260 MPa).

[4] Voir Annexe A.3. « Vérification du Voilement ».

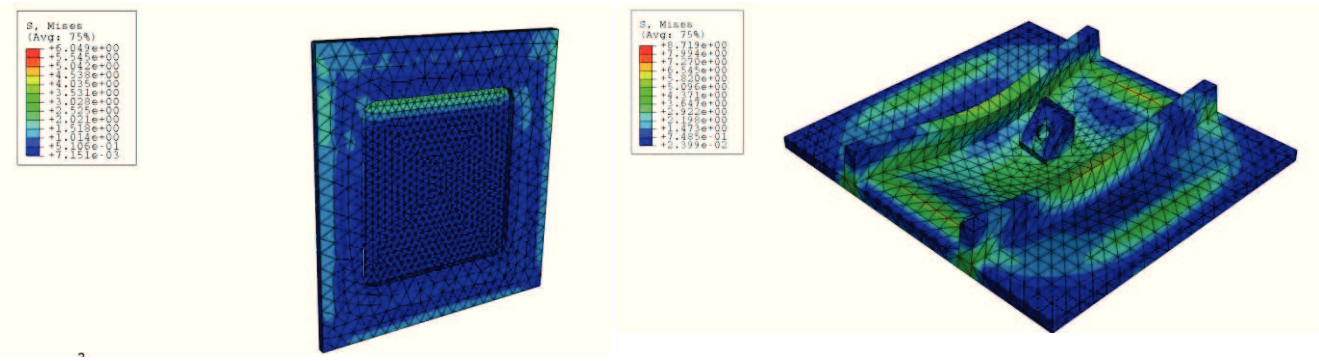


Figure 17 – À gauche, contraintes sur un ensemble paroi-porte ; à droite, contraintes du couvercle renforcé.

3.4.1.4. Vérification de l'Assemblage Boulonné

L'étude de l'assemblage boulonné n'est pas, dans ce cas, une des parties les plus critiques. Le fait de travailler sous vide ajoute une « aide » supplémentaire au serrage du couvercle : c'est la pression atmosphérique qui viendra sur-tasser le joint lors de la mise en charge. Le serrage devient donc un système pour garantir le bon contact entre le joint et la surface de la collerette, ce qui permet un bon démarrage de la mise sous vide. Au fur et à mesure que le vide s'accroît, le couvercle subira les efforts induits par la pression de l'air. Ces efforts vont remplacer partiellement l'action des boulons, que vont subir un léger relâchement.

3.4.2. Comportement Optique

Le comportement optique de l'enceinte ne pourra être vérifié véritablement qu'au moment où elle sera fournie. Cependant, à partir de la conception il a été possible d'étudier une approximation de l'incidence de la géométrie sur les rayonnements globaux, et envisager les décisions à mettre en œuvre afin d'avoir le meilleur comportement optique.

Le rayonnement incident sur le miroir dichroïque et, pour autant, l'image issue de celui-ci, doit montrer l'état de l'expérience sans nuisances. Ce rayonnement arrive au miroir depuis l'éprouvette au travers d'un perçage cylindrique entre le fond du couvercle et l'intérieur de la pièce où on vient placer le dioptre. Ce perçage a un diamètre de 15 mm et une longueur de 30 mm. Cela permet de tracer un cône délimitant le lieu géométrique des points où le rayonnement d'un corps atteindrait directement le miroir, faussant les mesures de champ thermique. Ce cône peut être défini comme il est montré dans la figure ci-dessous.

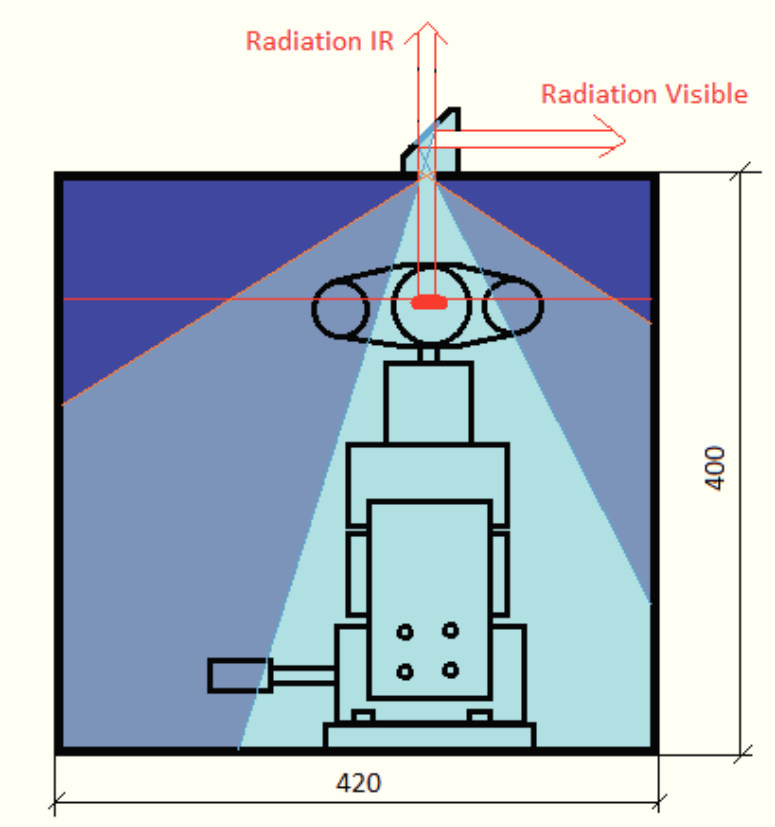


Figure 18 - Esquisse des rayonnements : en rouge, image radiée directement de l'éprouvette ; en bleu clair, cône de rayonnement direct sur le miroir ; en bleu foncé moyen, cône de rayonnement vers l'intérieur du petit espace ; en bleu très foncé, zones de rayonnement direct impossible.

Il est possible de voir que tout autre point hors de l'espace dans le cône ne rayonnera pas à travers le perçage d'observation sans faire appel aux phénomènes de réflexion. Afin de garantir le non rayonnement des surfaces intérieures, les parois seront sablées pour créer une rugosité superficielle, puis ensuite revêtues d'une peinture à haute émissivité. Le traitement de surface, malgré la maigre influence de la rugosité surfacique issue du processus, permet de favoriser l'adhérence de la peinture sur la surface de l'aluminium.

Le rayonnement pourrait être encore moindre en anodisant les surfaces intérieures, mais on trouve plusieurs problèmes face à l'application de ce système : tout d'abord, le coût est assez fort ; ensuite, l'anodisation est un procédé électrochimique, où l'immersion des pièces dans un bain électrolytique est nécessaire, et ça anodise toutes les surfaces, pas seulement la surface intérieure ; finalement, l'anodisation crée une couche d'alumine (Al_2O_3) très dure, à endommager lors du soudage, ce qui pourrait rendre le traitement inutile.

3.4.3. Choix Techniques

Sous cette épigraphe on veut assurer que les choix techniques ont été en accord avec les meilleurs critères et performances pour le système : est-ce que les matériaux sont optimaux ? Vérifie-t-on le cahier de charges ?

- **Légèreté :**

  Nous préconisons l'acier comme solution pour le couvercle, en raison de sa forte rigidité. Cependant, l'aluminium a été choisi à cause de sa masse volumique, plus faible que celle de l'acier. Pourtant, l'acier est trois fois plus rigide que l'aluminium et, en ligne avec cette idée, il pourrait être intéressant d'introduire l'acier dans toute la structure, utilisant moins de matière. Cet aspect a été pris en compte, et une géométrie complète en acier a été testée au niveau du poids, les parois trois fois moins épaisses[5]. Voilà les résultats :

  - **Solution proposée :** 72,7 kg dont 38,66 kg d'aluminium et 33,99 kg d'acier. Cette estimation a été faite avec une géométrie simplifiée, d'où l'écart de presque 2,5 kg avec l'enceinte réelle.

  - **Solution en Acier :** 70,8 kg dont 36,8 kg de la partie en aluminium reconvertie en acier et avec l'épaisseur trois fois moindre et 33,99 kg du couvercle.

  Le gain est trouvé faible. Certes, l'acier fait gagner presque 2 kg, mais il est plus coûteux à usiner, à sabler ce qui rendrait les opérations de finition de l'ensemble plus dures qu'avec l'aluminium.

- **Remarque :**

  Le fait de réduire l'épaisseur de l'enceinte ne peut pas être pris légèrement. Comme il a été exprimé auparavant, le voilement des plaques est possible si les conditions physiques et géométriques du matériau atteignent certaines valeurs. Même si on pourrait être tentés de réduire les épaisseurs pour gagner, le seuil de déclanchement n'est pas sûr à cause des incertitudes sur la qualité de la surface, et le travail en flexion lors de la mise à vide. Puis, une telle épaisseur pourrait, à la limite, rendre assez compliquée l'exécution de taraudages pour les charnières, et donner de problèmes lors du soudage.

[5] Voir l'Annexe A.4. « Évaluation des gains en masse selon le matériau ».

4. Démarche de Mise en Œuvre

La fin de la démarche de conception n'implique pas que les travaux sur la CAO de l'enceinte soient finis. Le développement de l'enceinte pendant la conception a pris en compte toutes les contraintes du cahier de charges, mais on a aussi prévu, en avance, des points remarquables où on se trouverait avec des problèmes reliés à la production et la mise en œuvre, et les problématiques avec matériaux, etc.

La CAO issue du processus de conception a été montrée au personnel de l'atelier et professeurs de l'École Centrale spécialisés en fabrication pour avoir leur conseil lors de la mise en œuvre, afin de la rendre simple et aisée. Leurs avis ont été intégrés comme adaptations et corrections, améliorant les décisions prises lors de la conception.

4.1. Mise en Œuvre

La structure envisagée pour l'enceinte part d'une série de pièces simples à usiner et adapter à la réalité de la mise en œuvre. Depuis le brut, ce sont plusieurs processus de fabrication à entreprendre avant d'avoir l'enceinte comme résultat final, et chacune des opérations doit être préparée, avec des adaptations et usinages sur les pièces tout au long du processus.

4.1.1. Découpe des parties

L'enceinte étant constituée de plusieurs plaques de différents métaux, la première partie de la démarche de fabrication est la découpe des plaques. Le point de départ est une plaque d'aluminium, une plaque d'acier et un lopin d'acier.

4.1.1.1. Éléments de Base

La plaque d'aluminium devrait comporter des dimensions de 2000 x 1000 x 15 mm, soit 2 m^2 de surface. Il est possible d'introduire sur cette surface tous les composants à découper avec une légère sur-dimension, en laissant des espaces entre chaque pièce (voir figure ci-dessous). Ces pièces seraient découpées avec un système laser comme celui dont on peut disposer à l'atelier de l'École Centrale de Lille. Ce système permettra aussi de faire les découpes intérieures pour les hublots des portes de façon rapide et aisée.

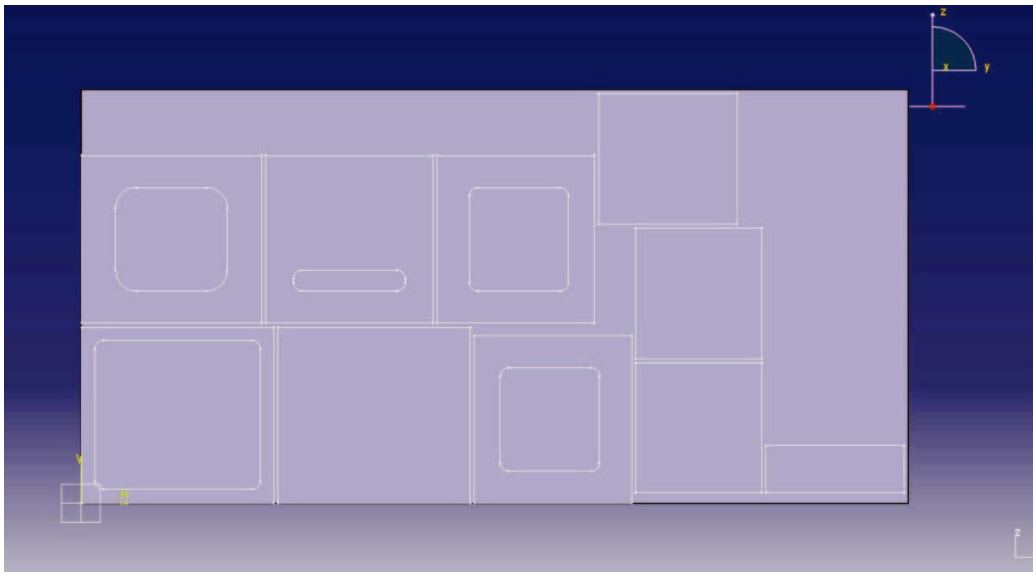


Figure 19 – Placement des composants sur une plaque d'aluminium de 2 m^2.

La plaque d'acier ne doit pas comporter des dimensions supérieures à 500 x 500 mm pour la surface, puis une épaisseur de 20 mm, car la partie plate du couvercle est le seul élément à être issu d'une plaque d'acier. Pour la base du miroir, accrochée au plan de couvercle, on partira d'un lopin d'acier d'environ 60 x 60 x 60 mm, à usiner pour se retrouver avec les dimensions réelles et les tolérances géométriques permettant le bon placement du miroir dichroïque.

4.1.1.2. Opérations d'Usinage

4.1.1.2.1. Pièces en Aluminium

Les pièces en aluminium issues du processus de découpe vont subir, ensuite, une série d'opérations d'usinage afin d'atteindre les conditions géométriques nécessaires pour l'assemblage global de l'enceinte. Selon leur fonctionnalité, l'attention est centrée sur une partie différente de la pièce ; on peut diviser l'ensemble des pièces en aluminium en deux parties : portes et parois.

- **Parois.**

  Les parois de l'enceinte vont être soudées, les unes avec les autres, aux points de contact situés aux coins, et avec la base au contact entre celle-ci et les parois, sur le côté extérieur de l'enceinte (voir figures ci-dessous). Afin de permettre une opération de soudure précise, les surfaces de contact seront usinées pour avoir un meilleur accostage entre les pièces et réduire les écarts géométriques. Ensuite, des caniveaux de soudure sont prévus sur les endroits où le contact est entre deux surfaces « planes » ; cela permet de créer la place pour ajouter le matériau d'apport lors de la soudure, sans faire apparaître des cordons de soudure.

  Les surfaces usinables seront : les bords de contact avec la base et les autres parois ; la partie extérieure de la base, autour du « centrage » (ceci sert à placer plus précisément les

parois lors de l'opération de soudure) ; les ouvertures pour les différentes trappes de la chambre, pour faire bien rentrer les centrages des portes dans les ouvertures. Finalement, des taraudages sont prévus à côté des ouvertures pour le placement des charnières et du système de pré-serrage des portes.

La collerette d'accrochage du couvercle est aussi faite en aluminium. Elle sera issue du même brut que les portes et les parois, et usiné aux surfaces de contact avec le haut des parois, pour avoir un bon contact lors de la soudure, puis aussi sur la surface de contact avec le couvercle. Elle sera aussi percée pour effectuer une Assemblage boulonné avec le couvercle en acier.

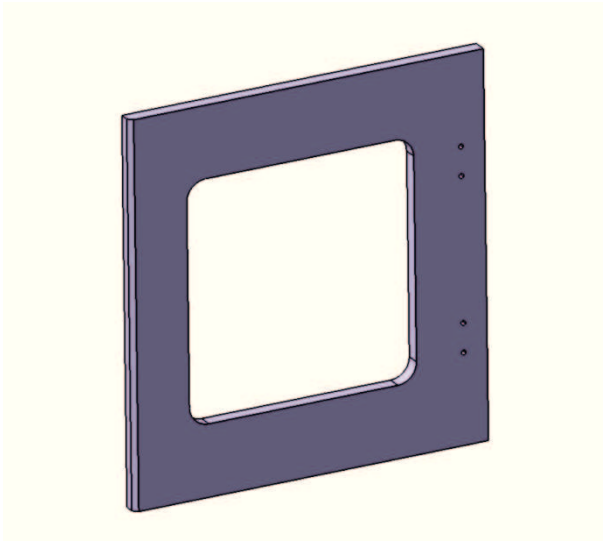


Figure 20 – Vue d'une paroi latérale. Le chanfrein sert comme caniveau de soudure. Les perçages à droite permettent l'ancrage des charnières.

- **Portes.**

Les portes sont fabriquées à partir de la même plaque que les parois de l'enceinte. Elles seront usinées pour créer un centrage de la même forme que l'ouverture des parois. Tout autour du centrage, une rainure à dimensions standardisées vient accueillir un joint d'étanchéité, garantissant l'absence de fuites lors de la mise à vide. Sur un des côtés elles seront aussi taraudées, pour le placement des charnières d'articulation avec le reste de l'enceinte, ainsi que du système de pré-serrage.

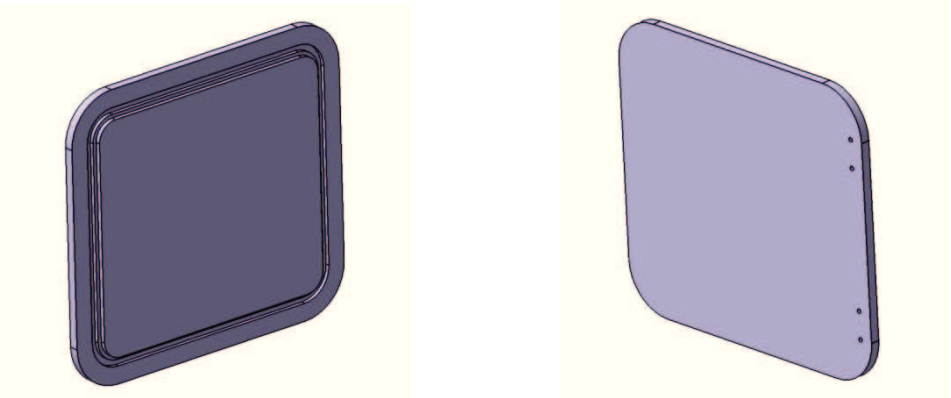


Figure 21 – À gauche, côté intérieur de une porte, avec son centrage ; à droite, côté extérieur, avec les perçages de fixation des charnières.

4.1.1.2.1. Pièces en Acier

L'ensemble de l'enceinte ne comporte que deux pièces faites en acier, composant le couvercle une fois assemblées. D'un côté, la partie plane du couvercle, puis le placement du miroir dichroïque.

- **Plan du Couvercle.**

  Le plan de couvercle est à usiner depuis une plaque d'acier brut. On trouvera un centrage de la même forme que l'ouverture intérieure de la collerette d'accrochage. La surface extérieure, percée de façon identique au couvercle, aura une rainure standardisée où on placera le joint d'étanchéité pour l'assemblage ; cette surface sera aussi l'objet d'un usinage pour garantir un bon contact avec la collerette lors de l'assemblage.

- **Placement du Miroir.**

  Pour le placement du miroir, on part de deux pièces : un lopin d'acier et une petite plaque. Le lopin sera à vider sur une machine pour donner un forme creuse où on percera deux alésages pour le passage du rayonnement depuis l'éprouvette par l'un, et de la fraction visible vers l'extérieur par l'autre. Ce deuxième sera muni d'un évidement pour placer le dioptre de fermeture et son joint d'étanchéité.

  La plaquette sera usinée sur les surfaces en contact, et aussi au niveau du perçage pour le placement du miroir dichroïque. Celui-ci est placé sur une rondelle d'étanchéité et fixé avec trois vis.

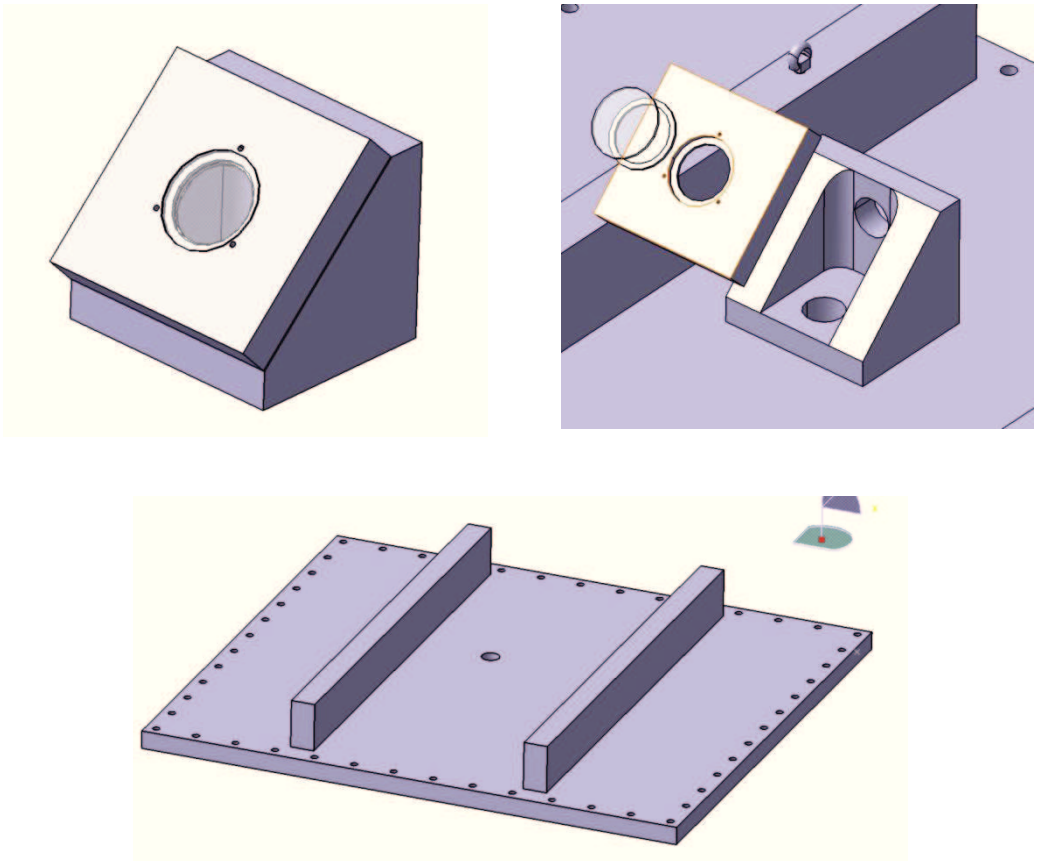


Figure 22 – De gauche à droite, d'haut en bas : placement du miroir, vue éclatée du placement du miroir, plan de couvercle.

4.1.2. Opérations de Soudage

La plupart des assemblages entre les composants de base de l'enceinte sont soudées. Cette opération a été choisie, malgré la rigidité qu'elle confère aux éléments attachés, parce qu'elle permet de garantir des assemblages forts et étanches. Cependant, il faut faire attention à la façon de mettre en œuvre les soudures et adapter la conception aux méthodes si besoin, pour rendre les opérations plus aisées.

4.1.2.1. Soudage des Composants en Aluminium

La soudure des composants en aluminium sera faite avec un apport du matériau sur le caniveau entre les pièces à joindre. Cependant, la soudure de l'aluminium n'est pas une méthode d'assemblage facile à mettre en œuvre : il s'agit d'un matériau à faible soudabilité, et il faut faire attention aux alliages d'aluminium choisis pour effectuer la soudure (base et apport) ; puis, il faut décaper et dégraisser les surfaces avant de commencer le processus et empêcher la formation d'hydrogène ; finalement, il est impératif d'utiliser une atmosphère de gaz inerte afin d'empêcher la formation d'oxydes supplémentaires. Enfin, la forte conductivité thermique de l'aluminium provoque des fortes déformations aux pièces. Il est important de souder rapidement pour ne pas générer des contraintes résiduelles lors du montage de l'ensemble.

Les soudures des parois avec la base sont faites au point de contact entre la paroi et la base, au côté extérieur de l'enceinte, formant un angle à 90 degrés. Cette géométrie permet une soudure aisée des composants et une bonne disposition du cordon d'un point de vue de l'inspection et de la réparation. Pour les parois, les caniveaux de soudure à 45 degrés d'inclination sont placés aux joints entre les plaques : les latérales avec la plaque de front (un de chaque côté), la plaque au fond avec chaque plaque latérale (les deux sur la plaque de fond). La collerette sera fixée en haut des parois, suivant le même principe que la base : soudure en angle de 90 degrés entre les deux surfaces, du côté extérieur.

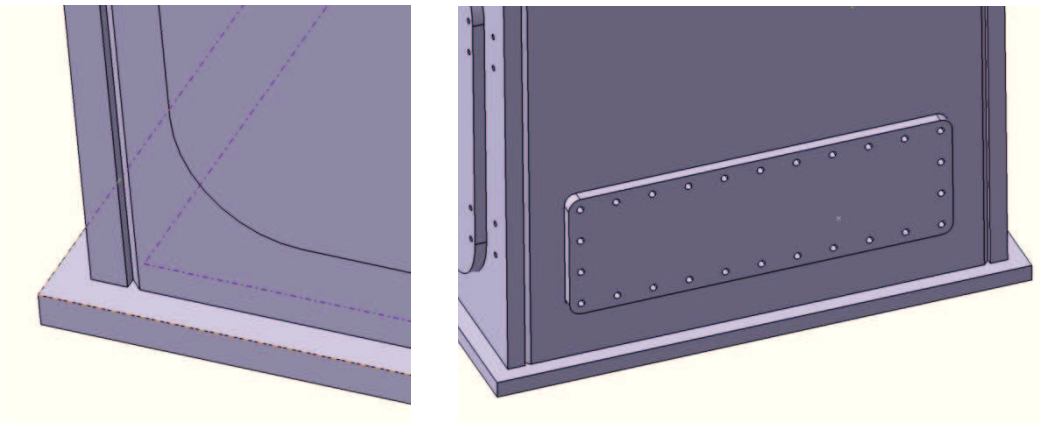


Figure 23 – Détail des caniveaux de soudure, en forme de chanfrein aux points de contact entre les parois latérales.

4.1.2.2. Soudage des Composants en Acier

La soudure des pièces en acier sera faite aussi avec un apport d'acier sur le point de l'assemblage. Les pièces à rendre ensemble sont les deux composants du placement du miroir, puis le placement et la partie plane du couvercle. Dans le premier des cas, deux faux « caniveaux » sont formés par la base et la plaquette du miroir. Une fois soudés, les côtés plats sont finis avec l'addition de deux cordons de soudure. La forte rigidité de la base devrait empêcher des grands écarts géométriques à cause de la chaleur lors du soudage. Le tout sera ajouté sur le couvercle plat, en répétant une soudure deux à deux, ne générant pas de contraintes résiduelles et évitant les écarts géométriques.

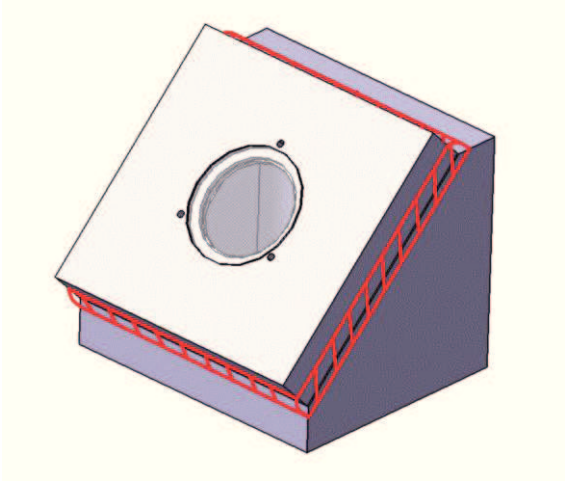


Figure 24 – En rouge, cordons de soudure sur le placement du miroir, reliant la plaquette-hublot et la base usinée depuis un bloc brut.

4.1.3. Assemblage

Il existe un pas qui précède le montage complet de l'enceinte. Il s'agit du sablage des surfaces intérieures des parois, portes et couvercle, ceci comprenant aussi l'espace intérieur immédiat au miroir dichroïque. Après avoir achevé une rugosité acceptable, un revêtement en peinture à haute émissivité est à mettre sur les surfaces traitées de façon soigneuse. Le but du revêtement est de fournir les propriétés optiques de non réflexion à l'intérieur de l'enceinte.

Ensuite, l'assemblage global de l'enceinte est achevé avec l'assemblage du couvercle et de la base d'aluminium, et l'addition des composants plus petits. Le couvercle a été muni préalablement d'un joint d'étanchéité dans la rainure faite à cet effet. L'assemblage entre le couvercle et la collerette est faite avec 40 boulons ; cette quantité permet de garantir un écart suffisant entre chacun d'entre eux et une bonne étanchéité pour l'assemblage. Puis, les portes sont munies de ses joints et sont montées sur des charnières, ensuite fermées avec un système de serrage à vis. Le miroir et le dioptre de radiation visible sont aussi placés avec leurs garnitures pour garantir l'étanchéité.

4.2. Mise en Œuvre des Annexes

Le montage global comporte, comme il a été décrit, une série d'annexes qui permettent de mettre en place les systèmes de captation et de rendre la manipulation de l'enceinte plus facile. L'ensemble des annexes comporte le portique, un système de mise en place pour l'enceinte, les caméras, les asservissements de l'enceinte et de la machine.

4.2.1. Portique

Le nouveau montage conçu après la CAO détaillée et la définition des besoins pour l'expérience permet d'envisager une modification du portique actuel pour l'adapter à la nouvelle géométrie. Le placement de la caméra infrarouge sous le portique implique un rallongement des quatre poteaux pour avoir de la place, puis pour permettre les réglages des distances optiques pour la captation des images. Ensuite, la philosophie de la base sera gardée, mais avec des modifications ; comme il est envisagé de mettre un système de rails permettant le déplacement de l'enceinte sous le portique, il sera nécessaire, donc, de changer la position des poteaux, qui seront placés aux coins. Les traverses originales seront placées dans le même état actuel sur des nouvelles traverses additionnelles, comme il est montré ci-dessous.

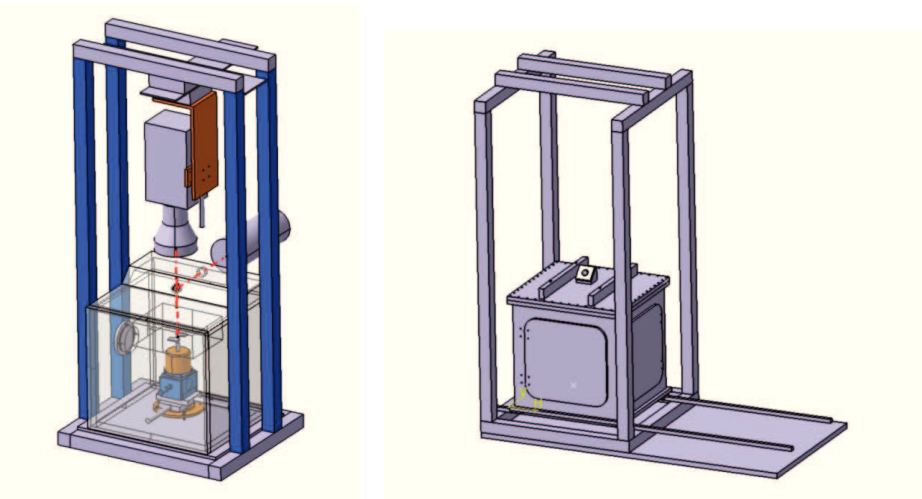


Figure 25 – À gauche, conception première du portique ; à droite, conception nouvelle.

La structure de base actuelle est à garder, en enlevant un des côtés. Deux anciens poteaux sont à réutiliser une fois raccourcis pour les deux nouvelles traverses latérales. Les traverses centrales et le dispositif de balayage seront gardés dans son état actuel.

4.2.2. Rails de Guidage

À partir du travail sur la CAO, le poids estimé pour l'enceinte est d'environ 70 kg. La possibilité de déplacer l'enceinte est, donc, fortement contraint, parce qu'il faut respecter les limitations de charge maximale à déplacer par une personne (environ 30-35 kg). Étant donné que l'enceinte sera placée sous le portique, l'opération du placement est encombrante du fait que les quatre poteaux vont empêcher certaines manœuvres.

La solution à cette problématique a été de mettre un système de guidage par rails sur la table. Ce système, consistant en deux rails à profil rond emboutis dans la surface de la table, permettra de déplacer l'enceinte sur quatre appuis glissants. La marque Bosch permet de se fournir d'un système de guidage de ce type, avec des appuis réglables en hauteur. Ce réglage servira à réduire les écarts angulaires entre le portique et l'enceinte, pas corrigeables avec les systèmes de balayage de la caméra infrarouge.

Le travail avec ce système sera, aussi, plus aisé. Les montages des expériences seront faits dans un espace à droite ou à gauche du portique, où on viendra extraire l'enceinte grâce au système de guides. Une fois monté, il ne restera qu'à replacer l'enceinte sous le portique, régler sa position par rapport aux systèmes de captation et connecter les asservissements nécessaires pour l'expérience.

Figure 26 – Rail et système porteur Bosch.

4.2.3. Asservissements

Le système conçu est fourni avec une série d'asservissements pour la réalisation du vide à l'intérieur de l'enceinte. La porte arrière est l'endroit où on viendra placer les éléments permettant le raccordement avec les systèmes annexes de base.

Une prise à vide du type DN 25 est à prévoir, raccordant le compresseur à l'enceinte. Selon le système de vidage, avec ou sans régulation, une deuxième vanne est à prévoir pour la remise en pression de l'intérieur lors de la fin de l'expérience. Ce double système pourrait être complété avec une vanne à trois voies, permettant le raccordement d'un système d'entrée de gaz inerte (azote, argon…) pour faire des essais sous atmosphère contrôlée si besoin. Cependant, l'étanchéité parfaite lors de la réalisation de ces essais ne pourra pas être garantie, parce que l'enceinte est prévue pour des essais sous vide. Une adaptation au niveau des systèmes de fixation des portes d'accès pourrait permettre une transition facile vers ce genre d'essais. Finalement, un manomètre sera placé sur le couvercle, côté frontal, pour avoir des lectures sur la pression atteinte à l'intérieur. Des autres manomètres sont à prévoir à l'arrière de l'enceinte si on dispose d'entrées de gaz, etc.

Quant à la partie électrique, l'enceinte doit permettre l'entrée de l'alimentation pour le système d'éclairage des essais. Cette entrée peut être faite avec des prises spéciales adaptées à l'interfaçage vide-atmosphère. Cependant, le coût de ce type d'éléments est très fort, et les fonctionnalités fournies peuvent être atteintes avec un petit bricolage sur des éléments moins coûteux : un connecteur du type BNC inséré dans un alésage adapté avec les espaces entre le trou et le connecteur bouchés avec de la résine peut être une configuration

acceptable. Ce système existe déjà sur le tribomètre du laboratoire de mécanique de l'École Centrale, donnant une bonne tenue face aux efforts induits par la différence de pression.

4.3. Assemblage Totale

Le montage définitif des annexes et de l'enceinte comporte l'obtention d'une table et le placement des rails et les systèmes de guidage déjà cités sur sa surface. Suite à cette opération, le portique sera mis en place, puis attaché de façon solide et précise par rapport aux guidages. L'enceinte sera à ajouter juste après, occupant sa place sous le portique, sur les rails de guidage. Les dispositifs d'asservissement pourront être accrochés : raccords de vide, électricité, contrôle et alimentation de la micromachine, etc.

Les annexes mises à disposition de l'expérience sont, après l'enceinte et le portique, de la place pour les équipements de captation et mesure, qui pourront être placés sous la table, du même que le rack électronique de contrôle de la micromachine et de ses capteurs, ainsi que l'ordinateur avec le logiciel de contrôle et mise en route de la machine.

4.4. Requête de Devis

La mise en œuvre de l'enceinte en soi-même a été l'objet d'une requête de devis auprès de certains ateliers afin de chiffrer les coûts et étudier si la conception optimisait cet aspect. Les spécialistes concernés ont été : l'atelier de l'École Centrale de Lille ; Dassonville (Wattrelos).

Les devis obtenus **pour la fabrication de l'enceinte** ont donné, pour l'instant, les chiffrages suivants en termes de coûts et de délais.

- **Pour l'atelier de l'École :** entre **4000** et **5000** € (Euros), avec un délai estimé de **4 semaines** (sans compter les délais d'approvisionnement et le prix des matières premières).
- **Pour Dassonville : 7696** € (Euros), avec un délai estimé de **8 semaines** (sans compter les délais d'approvisionnement).

Restent à ajouter à ces coûts la partie des composants annexes et asservissements pour compléter l'ensemble de l'expérience. D'après les travaux antérieurs, ces coûts peuvent être chiffrés de :

- **Table micrométrique de base : 847 € (Euros).**
- **Montage et dispositifs de vide sans régulation :** environ **3036 € (Euros).**
- **Montage et dispositifs de vide avec régulation : environ 4259 € (Euros).**

Nous pouvons estimer, donc, que le coût de réalisation de l'enceinte sous vide et de la mise en œuvre de l'expérience comporterait un prix compris dans la fourchette entre **8400 € (Euros)** pour un dispositif réalisé à l'atelier de l'École Centrale de Lille et aucune régulation du régime de vide, et **12800 € (Euros)** pour un enceinte construit chez Dassonville et avec une régulation pour le fonctionnement du vide.

5. Tests et Mise au Point

La partie finale de ce projet comporte le test de tous les matériaux qui vont intervenir dans la réalisation du projet. L'enceinte sera révisée et testée sur ses capacités de tenue du vide, durée de l'état de vide sans extraction d'air, isolement thermique par rapport à l'extérieur, isolement optique et comportement optique de l'intérieur. La micromachine sera l'objet d'une mise au point pour régler tous ses éléments et capteurs et garantir son bon fonctionnement pour les expériences.

5.1. Mise à Point de la Micromachine

Malgré l'apparition tardive de cette épigraphe dédiée aux processus de mise à point de la micromachine, cette démarche s'est déroulée au même temps que la conception de l'enceinte, toujours en coordination avec les autres parties du projet.

5.1.1. Introduction

La micromachine d'essais de traction-compression est, comme il a été décrit auparavant, un instrument appartenant au LML. Elle a permis la réalisation de plusieurs thèses et essais sous le microscope à balayage électronique (MEB), situé dans le laboratoire de l'École Centrale de Lille. Depuis quelque temps, cette machine n'a pas été utilisée, d'où l'intérêt d'une mise à point exhaustive afin de la mettre dans les meilleures conditions de travail. La démarche suivie avec cette machine a été, grosso modo :

- Démontage des éléments mécaniques, nettoyage, lubrification, remontage.
- Vérification du fonctionnement en vide.
- Réglage du capteur de position LVDT.
- Réglage du système de mesure d'efforts.
- Test de la machine.

La phase de démontage a été effectuée avant le début du stage. Les opérations de démontage ont eu pour but de vérifier : d'un côté, le bon état des roulements axiaux placés dans les boitiers des mors, sa lubrification et sa remise en position avec un bon serrage, opération répétée avec les mors pour placer les éprouvettes ; d'autre côté, la mise à point des systèmes de traction (moteurs piézoélectriques, réducteurs, vis).

5.1.2. Fonctionnement à Vide

Avant le réglage des systèmes, la machine a été placée sous le portique déjà existant au laboratoire et testée à vide, afin de vérifier qu'il n'y avait pas de problèmes pour la réalisation de la course totale de la machine. La machine a été contrôlée en mode manuel et depuis la commande de l'ordinateur, sans montrer aucun problème pour réaliser les déplacements ni avec le logiciel. Les résultats de cette phase montrent, donc, un bon fonctionnement du système.

5.1.3. Réglage du capteur de Position LVDT

Le capteur LVDT est un dispositif de captation de déplacement placé entre les deux traverses de la micromachine. Il consiste en un cylindre avec une tige que se déplace à l'intérieur. Selon le déplacement, un signal électrique est issu du capteur et reprise par le rack électronique d'asservissement de la machine. Connaissant la course de la micromachine, il suffit donc de placer la micromachine dans l'origine géométrique (c'est-à-dire, le point intermédiaire de départ où on placerait l'éprouvette et on démarrerait l'essai, soit en traction, soit en compression). Ce repère géométrique est relié à une valeur de tension électrique fournie par le capteur LVDT. En l'introduisant dans le logiciel, on peu fixer une référence pour les déplacements, avec un « 0 » artificiel, et vérifiant le sens du travail par rapport à l'écart entre la valeur du capteur et l'origine repéré.

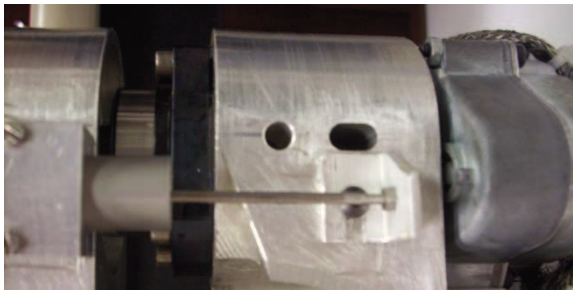
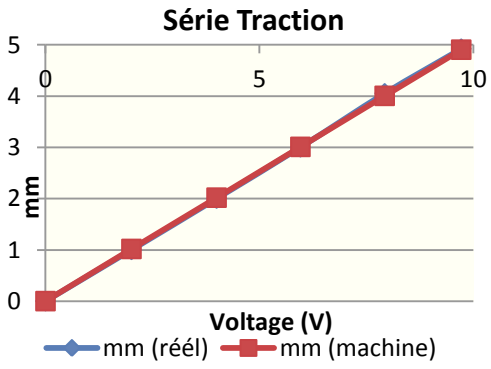
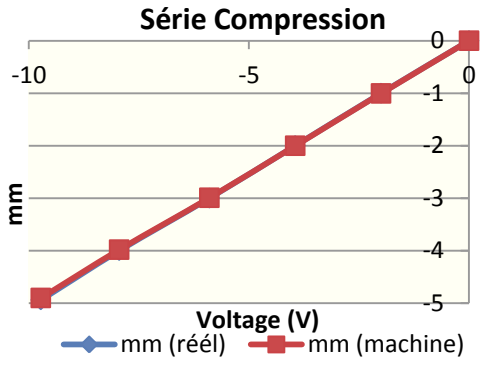


Figure 27 – Capteur LVDT sur la micromachine.

Cependant, les capteurs sont soumis à certains phénomènes tels que l'hystérésis, où l'application d'une grandeur physique dans un sens croissant ou décroissant donne comme résultat des valeurs écartées d'un comportement linéaire. Afin de tester la non-hystérésis du capteur LVDT, un essai a été mis en place : les mors ont été séparés jusqu'à la distance où on pourrait placer une éprouvette et la fixer, sans qu'elle soit soumise à une charge par la machine.

Une fois la position vérifiée, la valeur de voltage issue du capteur a été notée. Puis, l'éprouvette a été enlevée et substituée par deux blocs d'acier, insérés sur les mors. L'un des blocs a un alésage où on peut insérer un micromètre, en contact avec le bloque en face. Celui-là a été placé et fixé sur une position où il est à zéro. Puis, deux courses ont été effectuées : une montée et une descente. Pendant la montée, plusieurs couples de valeurs distance-voltage du LVDT ont été repris ; lors de la descente, on a essayé de repérer les mêmes valeurs en tension et vérifier si la mesure de distance était dans le même rang.





Le résultat de l'essai a été positif, et on peut conclure que le capteur LVDT fonctionne correctement. On peut, donc, utiliser le capteur comme référence pour les déplacements du système lors des essais à venir.

5.1.4. Réglage des Capteurs d'Efforts

La mesure des efforts sur une machine typique de traction-compression est habituellement attribuée à une cellule de charge avec une instrumentation très fine. Cependant, la micromachine d'essais a été une réalisation interne de l'atelier de l'École Centrale et du LML, et en raison de son faible encombrement, elle n'a pas été fournie d'un tel système pour la mesure d'efforts.

5.1.4.1. Le système de Mesure

Le raisonnement suivi pour résoudre ce problème a été d'effectuer une mesure indirecte. Le système a été conçu sur un logiciel de calcul par éléments finis. Ceci a permis de connaître le point où la structure des traverses subira les plus grandes déformations en situation de charge. Cette partie a été instrumentée avec une jauge extensométrique et une jauge de compensation de la température. Ces deux jauges constituent la moitié d'une configuration connue comme « Pont de Wheastone », où on alimente un carré à quatre résistances électriques par deux sommets opposées. Si le pont est déséquilibré par une action mécanique sur la jauge de la traverse, le voltage entre les deux sommets non-alimentés changera, donnant une relation avec l'effort subi par le système.

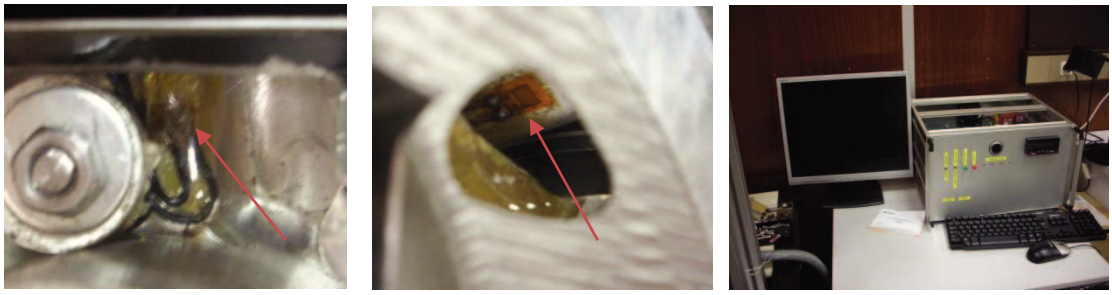


Figure 28 – De gauche à droite : jauge de déformation ; jauge de compensation thermique ; ordinateur de contrôle et électronique des asservissements.

La mesure de l'effort sera, donc, donnée par une mesure de la déformation par le biais de la jauge. Le rack électronique permet de relier des valeurs artificielles à des mesures électriques, le tout constituant une droite approximée du comportement en déformation de la traverse et, pour autant, de l'effort appliqué. Une éprouvette a été envoyée chez HBM et instrumentée pour relever l'effort à travers d'une électronique propre. Le but est, donc, de mettre l'échantillon instrumenté sur la machine et de le soumettre à des essais où on relèvera les valeurs de l'effort appliqué sur l'éprouvette et le voltage issu de la jauge. Ces groupes de deux valeurs pourront être utilisées par le système de contrôle de la micromachine pour fournir une droite de comportement et, dans des utilisations postérieures, donner l'effort appliqué lors des essais.

Cette démarche d'essais a été mise en œuvre, mais le comportement obtenu n'est pas celui attendu, et plusieurs problèmes ont été repérés : non-linéarité, relâchement…[6]

5.1.4.2. Problème de Non-Linéarité

Le problème de non-linéarité est référé aux essais d'efforts en montée et descente. Lors d'une montée, en tirant sur l'éprouvette, des valeurs de voltage ont été reprises. Ensuite, le système électronique a calculé sa courbe interne de comportement et une descente a été poursuivie. En observant les valeurs de voltage, on se rend compte que, pour de positions très proches en tension électrique, l'effort calculé par l'électronique n'est pas du tout le même, même des fois négatif, sachant qu'on se trouvait toujours dans une situation où l'échantillon était en tension.

Afin de vérifier ce comportement, il a été décidé de comparer les valeurs de déformation avec des valeurs d'efforts issus de l'éprouvette instrumentée. Cependant, cette méthode n'as pas permis de corriger le problème : les hystérésis se sont reproduites, confirmant un comportement non-linéaire. On observe également que l'échantillon instrumenté, quand on exécute un palier en force, lâche les efforts jusqu'à 30 – 50 N par rapport à la mesure désirée. Pour ne pas être troublés par ce dernier comportement, il a été décidé de comparer les déplacements (fixes et stables d'après le capteur LVDT), avec les voltages issus de la jauge.

Les résultats de la comparaison, en faisant une montée et une descente, ont montré que la relation déplacement-déformation induite par les efforts suit une droite sur chaque course, mais que les deux droites sont écartées de quelques microvolts. On n'a pas trouvé une raison stricte pour justifier ce comportement, mais la faiblesse des écarts peut être due à des nuisances externes ou à une faible résolution de la jauge, qui oscille et ne permet pas de raffiner au point de 1 µV.

5.1.4.3. Problème de Relâchement

La répétition des essais de traction-compression, en relevant des données d'effort sur l'échantillon instrumenté, a déclenché un second problème. Comme il a été indiqué auparavant, les valeurs des efforts relevés depuis le système de mesure de l'éprouvette étaient soumises à un relâchement des efforts d'environ 30 – 50 N sous la valeur désirée, appliquant un effort constant. Ce relâchement était présent sur l'éprouvette, mais pas sur la déformation de la traverse où le déplacement. Or, la raison de ce relâchement doit se trouver dans le comportement de l'échantillon, les mors de la machine, ou le système d'ancrage des mors.

Afin de vérifier le bon état de l'éprouvette instrumentée, elle a été testée sur une machine de traction de 400 kN avec sa propre cellule de charge, sans dépasser le 7 kN permis pour le travail sans endommagement. Un essai avec un palier d'effort sur cette machine, tout au long d'une journée, a donné comme résultat que le relâchement d'efforts était commun

[6] Voir l'Annexe A.5. « Réglages de la Micromachine ».

aux deux machines, micro et macro ; effectivement, tout au long de la journée, la machine de 400 kN s'est relâchée de presque 400 ± 500 N, mesure confirmée par le logiciel de gestion de la machine, mais aussi par l'éprouvette instrumentée. Cependant, la traverse de la grande machine n'a pas bougé.

La nature de ce relâchement reste, à l'heure actuelle, à trouver. Les hypothèses issues des consultations auprès les professeurs et chercheurs de l'École Centrale de Lille pendant les essais ont donné quelques pistes, que devront être vérifiées :

- **Hypothèse du Capteur :** la résine pour coller la jauge subit un fluage local, modifiant les mesures.

- **Hypothèses Mécaniques :**
  - Les mors ne sont pas assez rigides, et permettent un relâchement léger au long du temps.
  - Les systèmes d'actionnement interne donnent un peu de jeu, qui est repris lors de la mise en palier de la charge, provoquant le relâchement.

5.1.5. État Actuel

Le réglage final de la micromachine a été arrêté en attendant une compréhension plus profonde des phénomènes retrouvés lors du réglage et son incidente sur la réalisation des expériences. Si elle n'est plus précise, le LML devra décider s'il est désirable de finir la mise à point où s'il vaut mieux se fournir d'un autre instrument remplaçant la micromachine.

5.2. Tests de l'Enceinte

Une fois l'enceinte arrivée au laboratoire, elle devra être testée afin de vérifier que les fonctionnalités prévues dans le cahier de charges ont été bien accomplies. Cela entraine de tests sur le vide (sa qualité et tenue), l'optique (isolement vers l'extérieur, réflexion à l'intérieur...), etc., mais aussi sur les asservissements autour du système, les caméras, les systèmes de compresseur et vide, etc.

5.2.1. Tests des Asservissements

Avant de commencer à utiliser l'enceinte, il sera nécessaire de vérifier le bon fonctionnement des asservissements extérieurs à utiliser sur l'expérience. Un test du compresseur et des systèmes de raccord sera à faire, ainsi que de l'électronique de contrôle de la micromachine. Ensuite, des vérifications seront à faire sur les raccordements pour les systèmes à l'intérieur : bonne fixation, étanchéité et service. Une fois que les systèmes annexes seront mis à point, les tests sur l'enceinte pourront démarrer.

5.2.2. Tests du Vide

La qualité du vide fourni par la chambre devra être testée. Il y a trois opérations envisageables pour le programme de tests : vérification du niveau de vide dans la chambre ; vide/remise en pression du système de façon répétée, pour observer la tenue du système de trappes et de ses garnitures face à ces cycles de fonctionnement ; finalement, la mise sous vide et estimation du temps de perte du vide à cause des fuites. La base pour ces tests sera la prise de valeurs de pression depuis les manomètres situés sur l'enceinte.

5.2.3. Tests de l'Optique

Concevoir une enceinte où le comportement optique est le meilleur possible a été un des soucis principaux pendant le projet. Avec l'enceinte achevé, il sera nécessaire de tester que, effectivement, l'optique est bonne et permet une bonne observation de l'essai à l'intérieur de l'enceinte. Deux essais principaux sont à effectuer : un essai de placement et calibration des systèmes d'observation, avec une éprouvette témoin et le corps noir à monter à l'emplacement de la micromachine ; enfin, un essai d'observation de la surface d'une éprouvette en conditions de vide, afin de vérifier que le système est fonctionnel et qu'il n'y a pas de problèmes avec les dioptres et les déformations induites par la pression.

6. Bilan Final

Après la démarche de conception et de planification de la fabrication de l'enceinte sous vide, ainsi que de toutes ses annexes, un dernier bilan de l'état de l'art est à faire. Sous cette épigraphe on veut montrer l'état d'accomplissement des tâches, ainsi qu'une brève description de l'expérience d'ingénieur au long du stage.

6.1. État de l'Art à l'heure actuelle

Ce rapport comprend toute la démarche de conception de l'enceinte sous vide à utiliser pour la mesure couplée de champs thermique s et de déplacements. Nous avons fourni une conception complète de l'enceinte, en montrant les raisons et les calculs que justifient les choix techniques effectués dans chaque étape du projet. La fabrication a été aussi prévue lors de la conception : des procédés de mise en uvre ont été choisis, et leur influence sur la conception prise en compte.

L'état de la démarche à l'heure actuelle est d'attente de devis de la par de différents acteurs externes avant d'entreprendre la mise en uvre. Si elle est faite en sous-traitance, il sera nécessaire de bien spécifier toutes les caractéristiques de la conception sur les plans à fournir. Si l'enceinte est à fabriquer dans l'atelier de l'École Centrale de Lille, il sera nécessaire de discuter les détails de la fabrication avec le personnel en charge de la mise en uvre.

L'état de la micromachine est incertain, dû au fait que la démarche de mise à point n'a pas eu de résultats positifs. Les problèmes retrouvés lors du réglage du système de mesure des efforts ne permettent pas, pour l'instant, son utilisation avec une sécurité sur les résultats. Il est à décider, par les acteurs concernés, de continuer à résoudre ces problèmes ou de chercher un nouvel équipement avec les mêmes fonctionnalités.

6.2. Bilan du Rôle de l'Ingénieur

Le rôle de l'ingénieur dans cette démarche est, essentiellement, d'être un lien entre les différents acteurs. Il ne constitue pas un être en soit même, mais une partie d'une chaîne plus grande. Il est en contact avec les acteurs qui lancent le projet et avec les utilisateurs futurs afin de connaître les contraintes issues de l'utilisation et des plans postérieurs pour l'enceinte. Il doit être en contact avec les agents de fabrication, discutant avec eux tout les aspects d'une future mise en uvre afin d'adapter sa conception dès le début.

Dans la démarche montrée auparavant, des nombreuses réunions de débriefing on était faites avec tous les intervenants. Le but de ces réunions a été de montrer l'état d'avancement et de discuter les options à poursuivre, connaître l'avis d'autres ingénieurs et prévoir les actions à mettre en place pour une démarche plus aisée et rapide. Chaque débriefing a été suivi d'un bilan écrit et transmis aux participants du projet.

A. Annexes Techniques

A.1. Calcul des Écarts Angulaires

A.1.1. Principe Géométrique

La configuration de l'enceinte, avec des dioptres intermédiaires entre l'intérieur et l'extérieur pose un problème d'adaptation aux comportements de l'enceinte lors de la mise en pression. Le but de cette configuration est de s'affranchir des problèmes de l'Effet Narcisse, où on capte une image avec un dispositif, et la réflexion spéculaire sur la surface du matériau à observer donne une superposition de notre image désirée, superposée avec le dispositif lui-même.

Cette configuration doit être robuste, afin de garantir que, lors de la mise sous vide, les déformations induites sur les placements des dioptres n'empêchent pas la bonne transmission des radiations à capter par les dispositifs infrarouges et visibles. C'est surtout au niveau du miroir dichroïque qu'on va se concentrer, parce que son placement est très proche du centre du couvercle, l'aire la plus déformée lors du travail de l'enceinte.

Le placement du miroir est sur une surface à 45 degrés. Il est fixé par trois vis, appuyé sur une rondelle que permet de garantir l'étanchéité de l'ensemble. Sur la conception première, cette surface à 45 degrés fait partie de la structure de l'enceinte, tel qu'il est montré sur l'image ci-dessous.

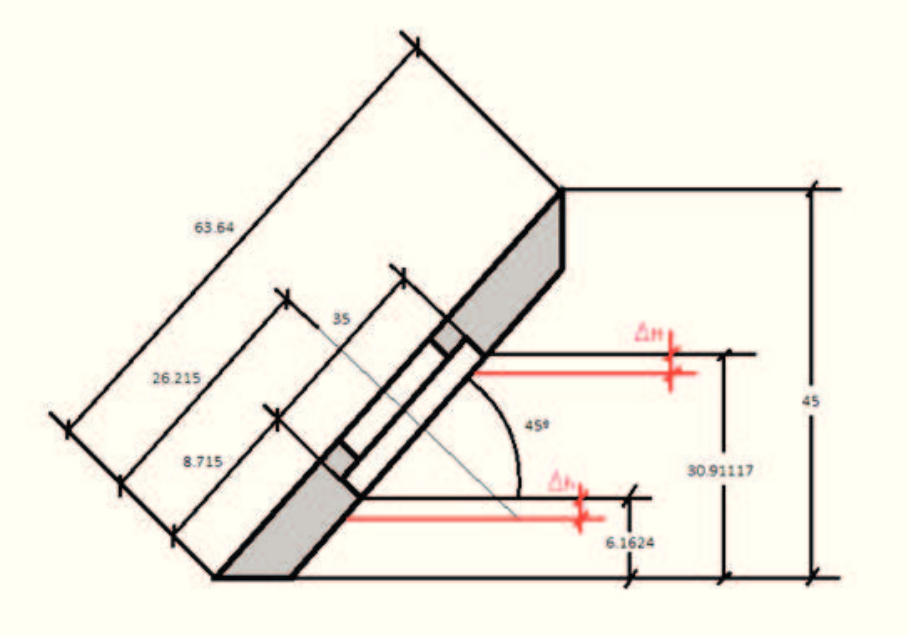


Figure 29 – Détail de la géométrie du placement du miroir.

Lors de la mise à vide, les déplacements sur la position du miroir ont une nature principalement verticale. La différence des déplacements des extrémités du miroir induira une rotation autour de l'axe perpendiculaire. Cette rotation, mal maîtrisée, peut induire aussi un mauvais transfert de l'image, comme il est montre ci-dessous.

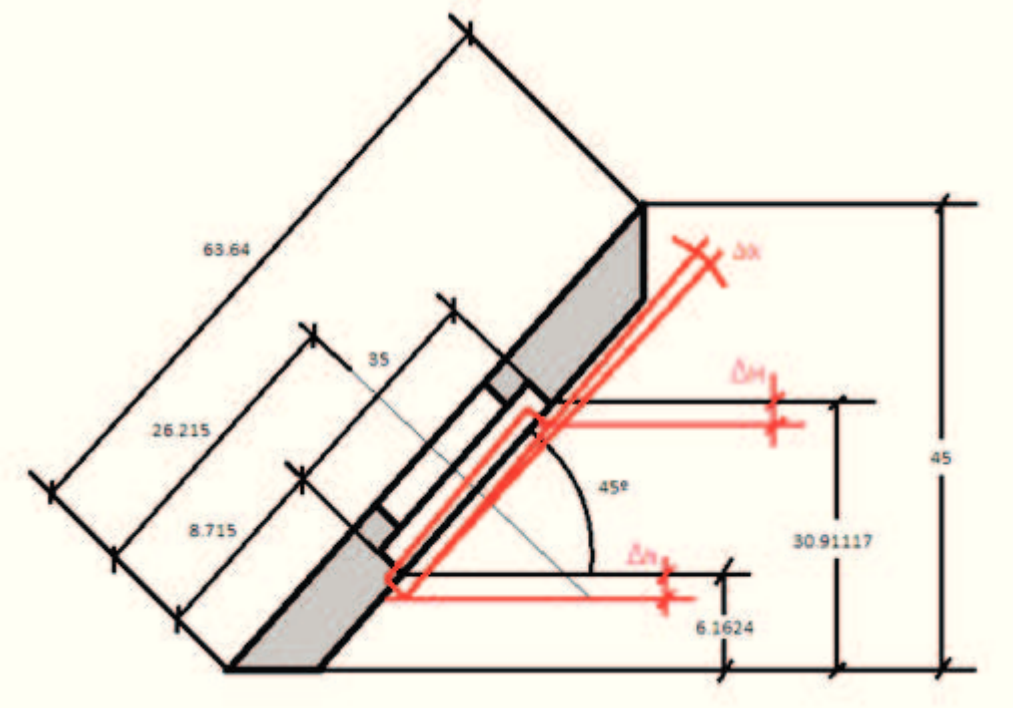


Figure 30 – Représentation des écarts de position en charge par rapport à la géométrie en repos.

L'écart angulaire entre les deux situations, repos et travail, peut être décrit en fonction de la variation de l'écart vertical entre les points haut et bas du miroir. Considérant le miroir comme presque indéformable, on accepte sa grandeur caractéristique (le diamètre) comme fixe. On peut se dire, donc, que l'angle issu de la configuration de travail est :

$$\alpha' = \arcsin\left(\frac{H'}{35}\right) ; H' = (30.91117 - \Delta H) - (6.1694 - \Delta h)$$

Et que l'écart global est :

$$\Delta\alpha = 45° - \alpha' \rightarrow \Delta\alpha = 45° - \arcsin\left(\frac{(30.91117 - \Delta H) - (6.1694 - \Delta h)}{35}\right)$$

A.1.2. Calculs

En prenant en compte les déplacements des points extrêmes, issus d'une analyse d'éléments finis de la géométrie, il a été possible de caractériser, pour les différents géométries et matériaux essayés, les écarts angulaires de chaque cas. Les tableaux suivants montrent les résultats pour chaque essai, en partant du principe décrit sur l'épigraphe précédente.

A.1.2.1. Géométrie Première

Les résultats suivants comprennent tous les essais pour la géométrie de base issue des travaux précédents. Ces essais ont eu comme but de caractériser le comportement de la géométrie pour chaque matériau et son utilité par rapport au cahier de charges du projet.

Matériau	U_{haut}	U_{bas}	H'	α	Δα
PMMA	-0,56049	-0,60971	24,69955	44,88623929	-0,11376071
Aluminium	-0,028815	-0,031218	24,746367	44,99451269	-0,00548731
Acier	-0,0097971	-0,010593	24,7479741	44,99823305	-0,00176695

Tableau 1 – Écarts angulaires pour la géométrie originale.

A.1.2.2. Géométrie Modifiée

Cette épigraphe veut montrer les essais développés pour déterminer la configuration plus pratique dans la nouvelle conception. C'est à travers de ces essais qu'on justifie le choix de la géométrie et des renforts comme il est montré sur la démarche de conception.

Matériau	U_{haut}	U_{bas}	H'	α	Δα
Aluminium	-0,0321358	-0,0318297	24,7496061	45,0020113	0,0020113
Acier	-0,0115831	-0,012881	24,7480021	44,99829787	-0,00170213

Tableau 2 – Écarts angulaires pour la nouvelle géométrie.

A.2. Calcul de l'Assemblage Boulonné

A.2.1. Introduction

Les assemblages boulonnés sont très communes dans le domaine de l'ingénierie. Elles sont très utilisés pour relier des éléments de forme rigide, résistante, mais aussi démontable dans quelques occasions au long de la vie de l'assemblage. Le cas présent est une union tête à tête, entre le couvercle et la collerette accrochée aux parois, ce qui constitue un exemple classique de ce type d'accrochage. Le défi pour cette assemblage, surtout dans le cas des applications sous pression, est de garantir une étanchéité entre les deux parties reliées, avec les membrures de chaque côté bien collées, malgré l'application de forts efforts. Le serrage doit être garanti par l'action des boulons, pré-chargés lors du montage et qui, lors de l'application des efforts, vont permettre de garder une pression sur l'aire du contact, malgré les charges essayant de les séparer.

Cependant, le cas concernant l'enceinte sous vide pose un défi bien différent. Là, le travail des boulons n'est plus de garder le contact quand la pression à l'intérieur monte, parce que l'action cette fois-ci arrive depuis l'extérieur : le vidage de la chambre induit une charge issue de la pression atmosphérique, et le défi est de garantir une bonne tenue de l'assemblage par rapport à l'extérieur, empêchant les entrées d'air.

A.2.2. Base Technique

Un assemblage boulonné comporte, typiquement, trois parties : les bases ou membrures, les boulons, et une interface entre les deux surfaces de contact, afin d'assouplir l'action entre les deux parties et garantir un bon contact. Le but du calcul est de garantir, au pire des cas, une action sur l'interface qui empêche le déplacement des éléments. Pour le problème actuel, ce qu'on veut trouver est la garantie d'un bon contact entre les éléments de l'assemblage, plus particulièrement entre le joint d'étanchéité et les membrures (voir le couvercle et la collerette).

Le tassement correct d'un joint d'étanchéité est donné par une valeur de pression à appliquer sur une surface effective d'écrasement, afin de garantir un contact optimal entre le joint et la surface d'une membrure. Il faut distinguer le degré de serrage : fort, où on colle les surfaces des membrures les unes contre les autres ; ou faible, où le joint est tassé, étanche, mais le contact métal-métal n'est pas présent sans pour autant perdre la fonctionnalité de l'assemblage.

Il est possible de retrouver, dans la littérature technique, des valeurs typiques selon les matériaux du joint, afin de garantir l'écrasement correct. Dans le cas du l'assemblage couvercle-collerette, le matériau envisagé pour le joint est un caoutchouc. D'après la littérature[7] consultée, un élastomère à dureté Shore plus grande que 75 a comme pression d'écrasement 1,38 MPa.

[7] Voir l'annexe B.1. « Bibliographie ».

A.2.3. Calcul de l'Assemblage

Le calcul des efforts à appliquer sur l'assemblage pour garantir les performances envisagées a été fait en deux parties : une approche théorique et une approche « empirique » afin d'avoir le plus d'informations possibles sur l'effort de serrage et bien le quantifier.

A.2.3.1. Approche Éléments Finis

Avant de calculer les efforts de serrage par la méthodologie analytique, une analyse par éléments finis a été mise en place pour connaître les valeurs de contrainte sur un joint torique lors de son écrasement, sur la surface de contacte. Une considération de rigidité des membrures quasi-infini par rapport au joint a été prise en compte. Puis, des essais d'efforts pour obtenir le même comportement ont été faits afin de voir la correspondance entre les résultats.

- **Efforts d'interface.**

  Après l'analyse d'éléments finis, la pression de contact sur le joint est aux entours de 5 – 13 MPa, selon le point de calcul, si le système est infiniment rigide. Par contre, si le système possède des caractéristiques mécaniques pour le caniveau et le couvercle, ces valeurs sont plus basses : 3 à 5 MPa. Cette valeur sera prise lors des calculs analytiques, car elle est plus élevée que les 1,38 MPa issus de la littérature, donc permettant la mise en place d'un calcul conservateur.

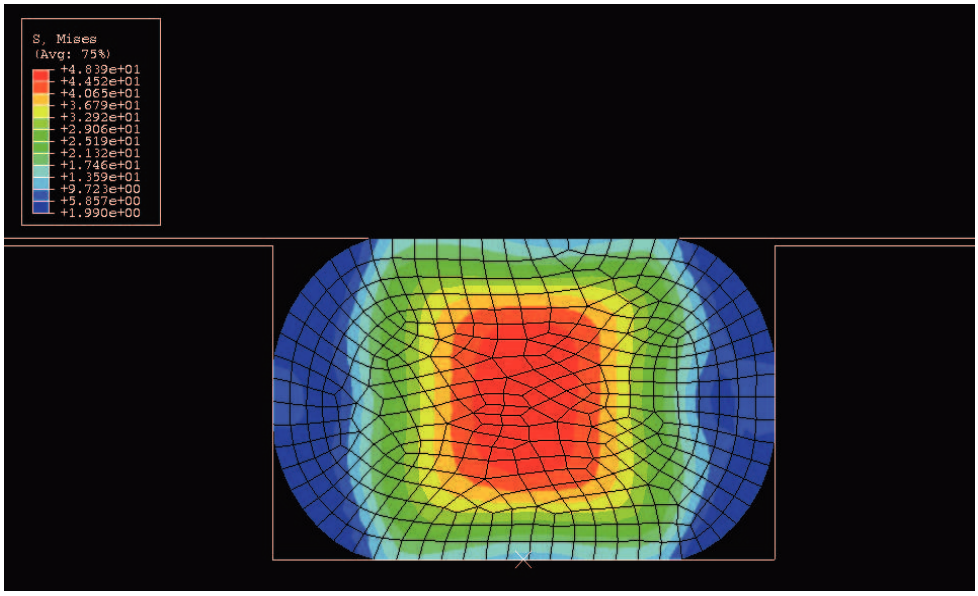


Figure 31 – Simulation d'un joint torique dans un logement infiniment rigide. Les valeurs au contact oscillent entre les 5 – 13 MPa.

- **Efforts de Serrage.**

  Effectuant une correspondance entre l'effort induit sur le joint et celui qu'il faudrait faire sur le couvercle, on s'aperçoit rapidement que l'hypothèse de rigidité infini entre joint et logement n'est pas vraie. L'élasticité du couvercle prend une partie des efforts sous forme de déformation, ce qui fait que l'effort équivalent à appliquer sur le couvercle est plus grand que celui qu'on aurait pu calculer de façon simple.

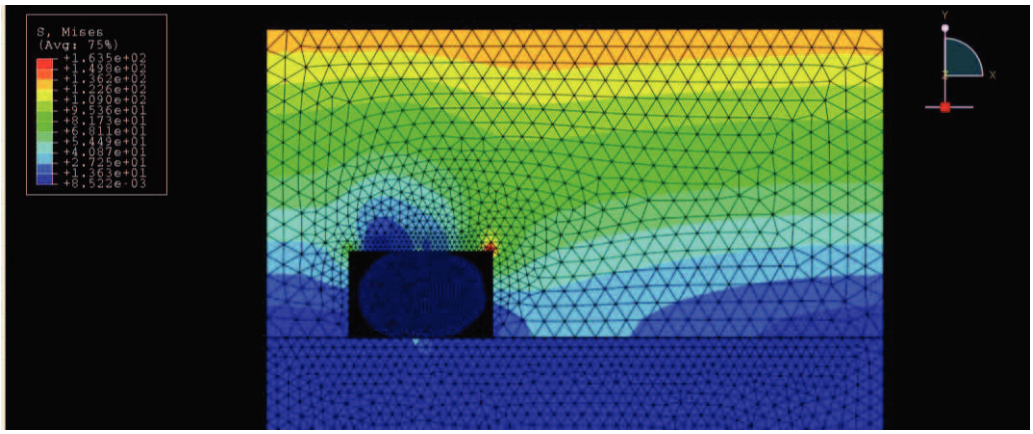


Figure 32 – Tassement du joint de couvercle en exerçant une pression telle que le contact entre membrures est fait et l'écrasement est total.

Puis, le comportement du matériau constituant le joint n'est pas celui d'un caoutchouc avec une hypothèse énergétique et des considérations thermomécaniques, mais plutôt une courbe d'écrouissement avec certaines valeurs, essayant de représenter la non-linéarité du caoutchouc de façon simple et rapide.

Nous pouvons conclure que l'analyse de l'assemblage par éléments finis est une aide pour la prise des décisions, mais que le besoin d'une description précise du modèle des matériaux rend la détermination des efforts trop longue et couteuse. Les valeurs de pression à l'interface sont à garder, car ils seront utilisés lors de l'approche analytique au problème de l'assemblage.

A.2.3.2. Calcul Théorique

Le calcul théorique suit la démarche typique dans la littérature technique : l'assemblage est caractérisé par les rigidités de ses éléments constituants (membrures, joint et boulons). Les efforts sur le système sont décrits ci-dessous : deux pressions sont présentes, interne et externe, puis on retrouve les efforts sur les boulons et le joint, plus un effort au contact (si existant).

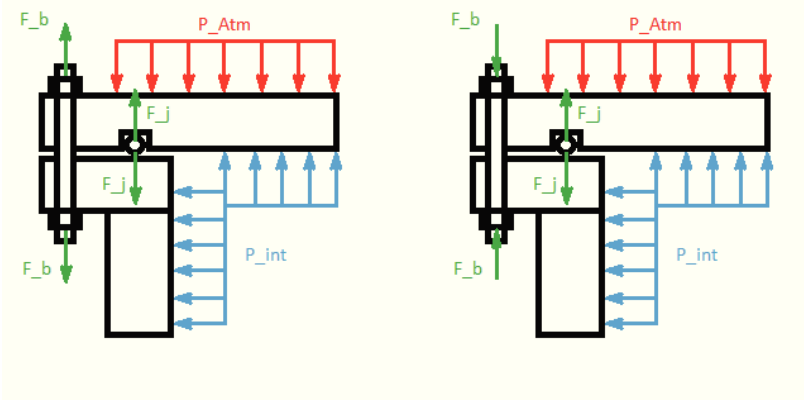


Figure 33 – À gauche : efforts sur l'assemblage quand la pression interne est plus grande que la pression externe ; à droite, efforts sur l'assemblage si la pression interne est moindre que celle à l'extérieur.

Soit le bilan d'efforts sur la deuxième considération :

$$F_{boulonnage} = F_{contact} + F_{joint}$$

Dans une première étape, on tasse le joint, donc il n'y a pas d'effort de contact. Alors, on peut considérer que l'effort sur les boulons équilibre celui exercé sur le joint. Prenant une pression à l'interface joint-rainure de logement d'environ 5 MPa (cas extrême) :

$$F_{boulonnage} = F_{joint} \rightarrow F_{boulonnage} = 5\ MPa \cdot [2{,}5\ mm \cdot (360 \cdot 2 + 400 \cdot 2\ + 2 \cdot \pi \cdot 7{,}5)]$$
$$\rightarrow F_{boulonnage} = 24589\ N$$

Considérant cet effort comme repris par le joint pour se tasser au maximum, tout effort additionnel sera subi par les membrures de l'assemblage. L'effort induit par l'atmosphère va aider le tassement (relâchant les boulons), mais on pourrait toujours ajouter un effort supplémentaire de serrage de la même valeur, pour empêcher une relaxation excessive des boulons. Soit une surface de couvercle de 460 x 420 mm,

$$F_{atm} = P_{atm} \cdot S_{couvercle} \rightarrow F_{atm} = 0.1013\ MPa \cdot (460 \cdot 420) \rightarrow F_{atm} = 19571\ N$$

Supposons maintenant qu'on veut garantir une pression de serrage entre les membrures lors du serrage initiale d'environ 1 MPa, pour une collerette à dimensions externes de 460 x 420 mm et 400 x 360 à l'intérieur,

$$F_{contact} = 1\ MPa \cdot (460 \cdot 420 - \ 400 \cdot 360) \rightarrow F_{contact} = 49200\ N$$

Donc, avec la valeur de $F_{contact}$ nous sommes en position de garantir que les deux membrures seront en contact après le vide de la chambre. L'effort initial sur les boulons serait,

$$F_{boulonnage} = F_{joint} + F_{contact} \rightarrow F_{boulonnage} = 73789\ N \sim 74000\ N$$

Dû à la géométrie de la collerette, avec une largeur pour le logement des boulons de 15 mm au-delà du bord de paroi, et prenant le diamètre de la surface équivalente d'action du boulon 3 fois son diamètre, le diamètre maximale pour un boulon serait aux entours de 6 mm. Trois fois cette grandeur sera la distance entre les axes de boulon, empêchant le chevauchement des zones d'action des efforts. Cela donne un nombre de boulons de,

$$L = n_{boulons} \cdot D_{boulon} + (n_{boulons} - 1) \cdot D_{boulon} + 2 \cdot D_{boulon} \rightarrow$$

$$L = D_{boulon} \cdot (4 \cdot n_{boulons} - 1)$$

Pour les côtés de 460 et 420 mm, et sachant que les boulons aux coins sont partagés par les deux côtés aboutissant sur le coin, le nombre de boulons est de,

$$n_{boulons} = \left(\frac{460}{D_{boulon}} - 1\right) \cdot \frac{1}{2} + \left(\frac{420}{D_{boulon}} - 1\right) \cdot \frac{1}{2} - 4 \rightarrow n_{boulons} = 68\ boulons$$

Cette configuration donne une charge maximale par boulon de,

$$F_{boulon} = \frac{F_{boulonnage}}{n_{boulons}} = \frac{74000}{68} = 1088{,}2\ N \Rightarrow \sigma_{boulon} = \frac{F_{boulon}}{S_{boulon}} = \frac{4 \cdot F_{boulon}}{\pi \cdot 6^2} = 38{,}5\ MPa$$

On observe que cette charge est loin d'être critique pour un acier typique à limite élastique de 260 MPa. Ce résultat est bien encourageant, car il sera possible de : soit diminuer la taille des boulons, soit diminuer son nombre. Les limites des deux cas sont,

$$\sigma_{boulon} = \frac{4 \cdot F_{boulonnage}}{\pi \cdot 6^2 \cdot n_{boulons}} = 260\ Mpa \rightarrow n_{boulons} = 11\ boulons$$

$$\sigma_{boulon} = \frac{4 \cdot F_{boulonnage}}{\pi \cdot D_{min}^2 \cdot 68} = 260\ Mpa \rightarrow D_{min} = 2{,}3085\ mm$$

Le nombre des boulons a finalement été réduit à 50 lors de la conception de l'enceinte. Cette quantité permet de réduire en 18 le nombre de perçages à faire, avec un gain de temps et de coût et sans renoncer à une bonne étanchéité au niveau de l'assemblage.

A.3. Vérification du Voilement

La conception de cette enceinte sous vide a été effectuée en considérant que le cadre des calculs était inscrit dans le domaine de la mécanique linéaire, parce que les efforts subis par le système n'atteignent pas des niveaux préoccupants. Cependant, la géométrie de l'enceinte possède certains points où une vérification s'imposait afin de garantir que, effectivement, les hypothèses de calcul sont correctes et, éventuellement, donner une frontière à ne pas dépasser lors de la conception pour garantir la correction des calculs et l'accomplissement du cahier de charges.

Le voilement est un phénomène d'instabilité dont sa modélisation est issue du domaine de grandes transformations, comme est le cas du flambage dans les poutres. Il apparaît lorsqu'on sollicite une plaque avec des efforts en parallèle à sa surface, mais contrairement au flambage, n'entraîne pas forcement la ruine de l'élément si les contraintes ne dépassent pas un certain seuil. Pour une plaque avec des dimensions principales « a » et « b » et à épaisseur « t », l'effort critique de voilement est donné par l'expression :

$$N_{cr} = k_m \frac{\pi^2 D}{b^2} = \frac{k_m \pi^2 E t}{12(1-\nu^2)}\left(\frac{t}{b}\right)^2 \geq \frac{\pi^2 E t}{3(1-\nu^2)}\left(\frac{t}{b}\right)^2$$

Où « E » est le Module de Young, « v » le Coefficient de Poisson et « k_m », associé aux modalités propres de flambement selon « m » demi-ondes, est donné par l'expression suivante:

$$k_m = \left(\frac{bm}{a} + \frac{a}{bm}\right) \geq 4$$

C'est en appliquant cette expression aux dimensions du projet qu'on peut savoir si la conception tiendra face aux efforts induits par le vidage de la chambre. Les plaques analysées sont typiquement le front et les latérales, considérant leurs propriétés géométriques et du matériau qu'on pourrait choisir. Les tableaux suivants montrent l'effort critique de flambage pour le premier mode (c'est-à-dire, une demi-onde), pour l'épaisseur de 15 mm choisi pour la conception et pour les trois matériaux considérés lors des essais.

PMMA	Porte	Latérale	Unités	Al	Porte	Latérale	Unités	Acier	Porte	Latérale	Unités
E	3300	3300	MPa	**E**	70000	70000	MPa	**E**	210000	210000	MPa
v	0,43	0,43		**V**	0,35	0,35		**v**	0,3	0,3	
a	430	375	mm	**A**	430	375	mm	**a**	430	375	mm
b	400	400	mm	**B**	400	400	mm	**b**	400	400	mm
t	15	15	mm	**T**	15	15	mm	**t**	15	15	mm
m	1	1		**M**	1	1		**m**	1	1	
k_m	2,01	2,00	**prendre 4**	**k_m**	2,01	2,00	**prendre 4**	**k_m**	2,01	2,00	**prendre 4**
N_cr	**280,95**	**280,95**	**N/mm**	**N_cr**	**5535,84**	**5535,84**	**N/mm**	**N_cr**	**16014,38**	**16014,38**	**N/mm**
N_act	**12,16**	**12,16**	**N/mm**	**N_act**	**12,16**	**12,16**	**N/mm**	**N_act**	**12,16**	**12,16**	**N/mm**

Tableau 3 – Valeurs critiques d'effort à appliquer sur 1 mm de côté d'une plaque de 15 mm d'épaisseur selon le matériau.

On observe que les choix faits pendant la conception on été bons. Puis, il faut ajouter que les valeurs critiques calculés ne sont que des approches idéales où l'élément plaque est parfaitement homogène et sa surface sans défaut. Ce sont les défauts où la présence d'une déformation les causes du voilement dans une certaines direction. C'est pour cette raison que les valeurs donnés doivent être considérés soigneusement, et essayer de garder la plus grande marge de sécurité possible en choisissant l'épaisseur des plaques.

Or, cette démarche permet aussi de trouver l'épaisseur minimale théoriquement critique pour une plaque avec des certaines dimensions. Cette vérification a été mise en œuvre pour les éléments de la conception, surtout en ce qui concerne l'utilisation de l'acier ou de l'aluminium et ses performances en tenue, poids, etc.

PMMA	Porte	Latérale	Unités	Al	Porte	Latérale	Unités	Ac	Porte	Latérale	Unités
E	3300	3300	MPa	**E**	70000	70000	MPa	**E**	210000	210000	MPa
v	0,43	0,43		**v**	0,35	0,35		**v**	0,3	0,3	
a	430	375	mm	**a**	430	375	mm	**a**	430	375	mm
b	400	400	mm	**b**	400	400	mm	**b**	400	400	mm
N_cr	12,16	12,16	mm	**N_cr**	12,16	12,16	mm	**N_cr**	12,16	12,16	mm
k_m	4	4		**k_m**	4	4		**k_m**	4	4	
t_cr	**5,27**	**5,27**	**mm**	**t_cr**	**1,95**	**1,95**	**mm**	**t_cr**	**1,37**	**1,37**	**mm**

Tableau 4 – Épaisseurs critiques pour un voilement théorique sur la file d'en bas.

A.4. Évaluation des gains en masse selon le matériau.

Le but de cette épigraphe est de montrer le calcul développé des gains en poids selon la matière utilisée pour la fabrication de l'enceinte. La démarche suivie a été de rassembler dans les tableaux les géométries de base de chaque pièce, puis des perçages les plus importants en termes de matière. Le volume extrait de rester les perçages aux plaques brutes a été multiplié par la masse volumique du matériau. Le résultat du poids est issu de l'addition des masses individuelles. Les parois ont 15 mm pour les calculs de l'aluminium, et 5 mm pour ceux de l'acier.

A.4.1. Masse de l'enceinte en Aluminium et Acier

ALUMINIUM	Brut			Trou			Volume mm^3	Perçages gros
Pièce	Largeur	Longueur	Épaisseur	Largeur	Longueur	Épaisseur		
Plaque Base	460	420	15	0	0	0	2898000	
Plaque Front	430	400	15	270	250	15	1567500	
Plaque Latér	375	400	15	240	250	15	1350000	
Plaque Latér	375	400	15	240	250	15	1350000	
Plaque Fond	400	400	15	270	50	15	2197500	
Collerette	460	420	15	400	360	15	738000	
Porte Front	330	310	10	***270***	***250***	***5***	1360500	
Porte Latér	300	310	10	***240***	***250***	***5***	1230000	
Porte Trou	300	310	10	***240***	***250***	***5***	1209218,36	20781,6354
Raccord	330	110	10	***270***	***50***	***5***	430500	
				Centrages en cursive et gras				
TOTALE							**38,6656271**	**kg Al**

ACIER	Brut			Trou			Volume mm^3	Perçages gros
Pièce	Largeur	Longueur	Épaisseur	Largeur	Longueur	Épaisseur		
Plan Couvercl	460	420	15	***400***	***360***	***5***	3618000	
Renforts	380	40	20	0	0	0	304000	
Renforts	380	40	20	0	0	0	304000	
Miroir	*	*	*	*	*	*	104400	
				Centrages en cursive et gras				
TOTALE							**33,99364**	**kg Acier**

TOTALE ENCEINTE (estimation grossière)	**72,6592671**	**kg**

Tableau 5 – Calcul détaillé du poids des pièces de l'enceinte pour l'option mixte aluminium-acier.

A.4.2. Masse de l'enceinte en Acier

ACIER	Brut			Trou			Volume mm^3	Perçage Gros
Pièce	Largeur	Longueur	Épaisseur	Largeur	Longueur	Épaisseur		
Plaque Base	460	420	5	0	0	0	966000	
Plaque Front	430	400	5	270	250	5	522500	
Plaque Latér	375	400	5	240	250	5	450000	
Plaque Latér	375	400	5	240	250	5	450000	
Plaque Fond	400	400	5	270	50	5	732500	
Collerette	460	420	5	400	360	5	246000	
Porte Frontale	330	310	1	***270***	***250***	***5***	439800	
Porte Latérale	300	310	1	***240***	***250***	***5***	393000	
Porte Trou	300	310	1	***240***	***250***	***5***	384687,346	8312,654161
Raccord	330	110	1	***270***	***50***	***5***	103800	
				Centrages en cursive et gras				
TOTALE							**36,8030557**	**kg Acier**

ACIER	Brut			Trou			Volume mm3	Perçage Gros
Pièce	Largeur	Longueur	Épaisseur	Largeur	Longueur	Épaisseur		
Couvercle Plat	460	420	15	***400***	***360***	***5***	3618000	
Renforts	380	40	20	0	0	0	304000	
Renforts	380	40	20	0	0	0	304000	
Miroir	*	*	*	*	*	*	104400	
				Centrages en cursive et gras				
TOTALE							**33,99364**	**kg Acier**

TOTALE ENCEINTE (estimation grossière)	**70,7966957**	**kg**

Tableau 6 – Calcul détaillé du poids des pièces de l'enceinte pour l'option mixte aluminium-acier.

A.5. Essais de réglage de la Micromachine

Dans cette annexe on veut développer en détail l'ensemble des travaux qu'on été faits pour obtenir un bon réglage de la micromachine d'essais de traction-compression. Les efforts ont été concentrés sur deux aspects : la mise en route du capteur LVDT qui permet de déterminer la position de la micromachine, puis la vérification du bon fonctionnement des systèmes de mesure indirecte des efforts par le biais des déformations (et, donc, du pont de jauges monté sur la machine). Vous trouverez ici le développement des essais concernant la captation des efforts, qui ont été très exhaustifs.

Tout d'abord, le premier type d'essai mis en route a été l'obtention d'une droite de comportement linéaire de la micromachine. Pour l'obtenir, on s'est servi d'une éprouvette instrumentée chez HBM capable de fournir, par le biais d'un système électronique connecté à ses capteurs, l'effort qu'on applique avec la micromachine.

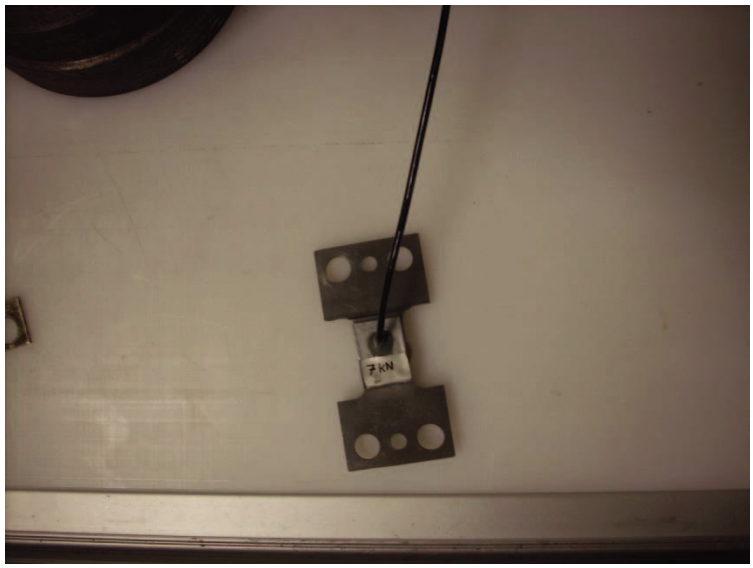
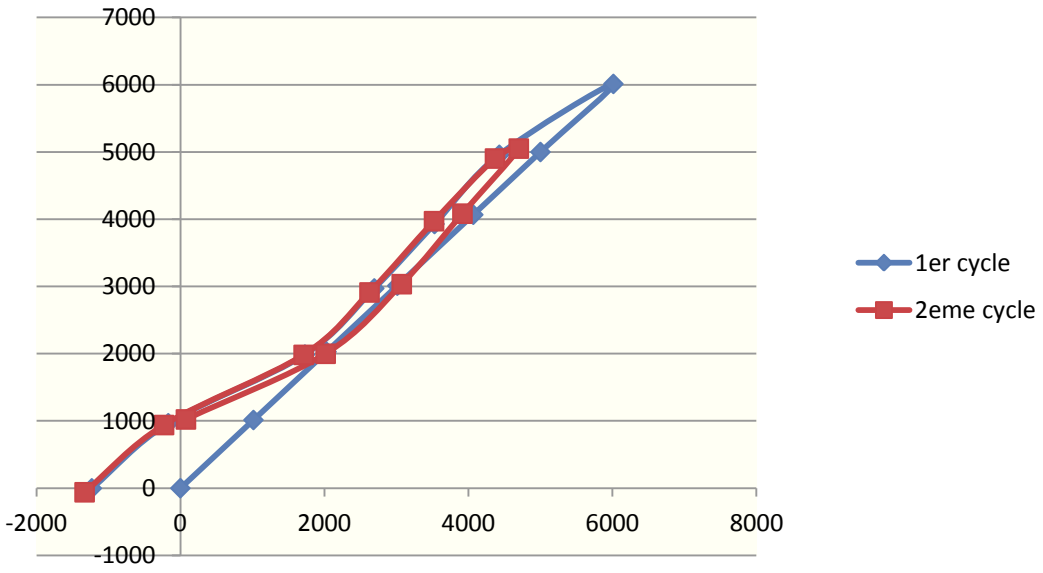


Figure 34 – Éprouvette instrumentée pour capter des efforts en traction – compression.

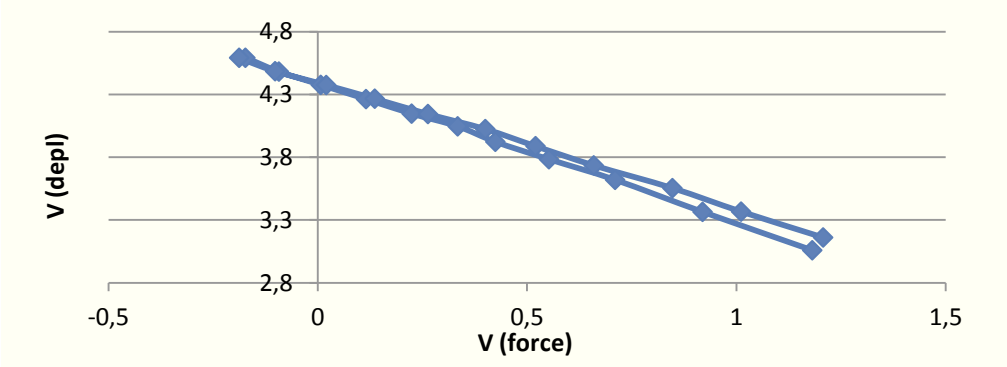
La démarche de l'essai est bien simple : l'éprouvette est placée entre les mors lorsqu'on les a en position « 0 » (origine du repère des essais, fixé avec le capteur LVDT lors des réglages précédents). Ensuite, des couples effort-tension seront introduites dans le système électronique mis en place. Chaque effort sera relevé de l'appareil de contrôle de l'éprouvette et pris comme bon ; les valeurs de voltage sont issus du système de contrôle de la micromachine, que les relève depuis la sortie du pont de jauges. Le résultat de ces essais a été surprenant : dans un contexte où le comportement des matériaux composant la micromachine est censé d'être linéaire, on observe que les valeurs d'effort associées aux tensions électriques à partir de la courbe de montée, lors de la descente, ne sont pas en correspondance avec les efforts relevés du capteur d'efforts monté sur l'éprouvette.



Graphique 1 – Cycle de montée et descente. L'axe d'abscisses montre l'effort donné par la courbe expérimentale. En bleu, on trouve la premier cycle. Comme en montée les valeurs de la courbe sont ceux de l'instrumentation, on suit une droite. En descente, la courbe écarte les valeurs par rapport à la réalité : si on a vraiment 4960 N, la courbe calculée donne 4430 N ; si on devrait avoir -1,3 N, on trouve une valeur calculée de -1230 N. On voit bien que le deuxième cycle effectué suit bien la courbe de descente, mais avec une légère hystérésis.

Deux questions se sont posées : c'est le système de calcul l'origine de ces défaillances, ou c'est un problème plus profond ? Ces résultats divergents ont réapparu lors d'un essai avec plus de points de résolution. Puis, le relâchement des efforts aperçu sur les sorties d'efforts de l'éprouvette instrumentée ajoute encore plus d'incertitude : est-ce que les valeurs d'efforts qu'on ajoute sont imparfaits et, donc, on va induire des erreurs sur la courbe expérimentale ? Étant donné que la méthode de calcul pour le système électronique est de comparer sa droite interne avec une valeur de voltage issue du pont de jauges, c'est par ce côté qu'on a continué à faire des essais, parce que ça n'est pas affecté par les phénomènes aperçus.

Il a été décidé, donc, d'observer la relation entre le déplacement et les valeurs du pont de jauges, afin de vérifier s'il y a un comportement plutôt linéaire entre les deux. Ces essais ont été effectués avec une montée et une descente. On trouve un comportement assez linéaire pour chaque procédé séparé, mais entre les deux, des écarts persistent. Il n'a pas été possible d'éclairer l'origine de ces écarts.



B. Bibliographie et Références

B.1. Bibliographie

B.1.1. Bases Théoriques de l'Expérience

- **Laurence BODELOT :** *Etude couplée des champs thermiques et cinématiques à l'échelle de la microstructure des matériaux métalliques*. Thèse de doctorat. Université des Sciences et Technologie de Lille I. 2008.
- **Romain DESBATS** : *Réalisation d'essais sous vide sur micromachine de traction avec de mesures optiques dans le visible et l'infrarouge.* Rapport du projet IMPACT. École Centrale de Lille. 2012.

B.1.2. Technique du Vide

- **Jean LECLERC :** *Techniques du Vide – Introduction*. Techniques de l'Ingénieur – traité de Génie Mécanique. 1997.
- **Jean LECLERC** : *Nature et Qualité du Vide*. Techniques de l'Ingénieur – traité de Génie Mécanique. 1997.
- **Jean LECLERC** : *Vide et Environnement*. Techniques de l'Ingénieur. 1983.
- **Louis MAURICE** : *Pompes à Vide*. Techniques de l'Ingénieur. 1983.

B.1.3. Technique des Assemblages

- **Gilbert DROUIN, Michel GOU, Pierre THIRY, Robert VINET :** *Éléments de Machines*. Éditions de l'École Polytechnique de Montréal. 1986.
- **Michel AUBLIN et all. :** *Systèmes Mécaniques*. Éditions DUNOD. 2004.

B.1.4. Technique des Soudures

- **Michel COLOMBIÉ et coll. :** *Matériaux Industriels – Matériaux Métalliques*. Éditions DUNOD. 2000.

B.2. Indice des Images

Figure 1 – De gauche à droite : principe de base et montage de Mlle. Bodelot pour mesure couplée des champs cinématiques et thermiques. *(Figures issues des travaux de Mlle. Bodelot et M. Desbats)* 7
Figure 2 – Montage de M. Desbats pour la mesure couplée des champs cinématiques et thermiques. *(Figure issue de la CAO de M. Desbats).* 8
Figure 3 – De gauche à droite, de haut en bas : portique actuel, détail du dispositif de balayage, traverses du portique à garder. 11
Figure 4 – Bouchon de câblage de la micromachine, intégrable dans la nouvelle conception. . 12
Figure 5 – De gauche à droite : micromachine en verticale, détail des mors de serrage, détail de la vis de déplacement et capteur LVDT. 12
Figure 6 – À gauche, montage de Mlle. Bodelot, à droite, montage de M. Desbats. *(Figures issues des travaux de Mlle. Baudelot et M. Desbats).* 13
Figure 7 – Aspect générale de la conception de M. Desbats. *(Figure issue des travaux de M. Desbats).* 13
Figure 8 – De gauche à droite : placement de la micromachine sur sa position exacte ; réglage optique par le biais d'un corps noir ; rayonnement du système vers les capteurs. *(Figures issues des travaux de M. Desbats).* 14
Figure 9 – À gauche, champ de déplacements sur la paroi gauche, à droite, contraintes de Von Mises. 18
Figure 10 – À gauche, champ de déplacements sur le couvercle à géométrie originale ; à droite, contraintes de Von Mises. 19
Figure 11 – À gauche, champ de déplacements sur le couvercle à géométrie originale ; à droite, contraintes de Von Mises. 20
Figure 12 - À gauche, champ de déplacements sur le couvercle à géométrie originale ; à droite, contraintes de Von Mises. 20
Figure 13 – Vue globale de l'enceinte, avec les portes ouvertes. 22
Figure 14 – De gauche à droite : placement du miroir ; plan de couvercle. 22
Figure 15 – Vue globale de l'enceinte. 24
Figure 16 – À gauche, déplacements sur un ensemble paroi-porte ; à droite, déplacements du couvercle renforcé. 26
Figure 17 – À gauche, contraintes sur un ensemble paroi-porte ; à droite, contraintes du couvercle renforcé. 27
Figure 18 - Esquisse des rayonnements : en rouge, image radiée directement de l'éprouvette ; en bleu clair, cône de rayonnement direct sur le miroir ; en bleu foncé moyen, cône de rayonnement vers l'intérieur du petit espace ; en bleu très foncé, zones de rayonnement direct impossible. 28
Figure 19 – Placement des composants sur une plaque d'aluminium de 2 m^2. 31
Figure 20 – Vue d'une paroi latérale. Le chanfrein sert comme caniveau de soudure. Les perçages à droite permettent l'ancrage des charnières. 32
Figure 21 – À gauche, côté intérieur de une porte, avec son centrage ; à droite, côté extérieur, avec les perçages de fixation des charnières. 32
Figure 22 – De gauche à droite, d'haut en bas : placement du miroir, vue éclatée du placement du miroir, plan de couvercle. 33

Figure 23 – Détail des caniveaux de soudure, en forme de chanfrein aux points de contact entre les parois latérales. 34
Figure 24 – En rouge, cordons de soudure sur le placement du miroir, reliant la plaquette-hublot et la base usinée depuis un bloc brut. 35
Figure 25 – À gauche, conception première du portique ; à droite, conception nouvelle. 36
Figure 26 – Rail et système porteur Bosch. 37
Figure 27 – Capteur LVDT sur la micromachine. 40
Figure 28 – De gauche à droite : jauge de déformation ; jauge de compensation thermique ; ordinateur de contrôle et électronique des asservissements. 41
Figure 29 – Détail de la géométrie du placement du miroir. 46
Figure 30 – Représentation des écarts de position en charge par rapport à la géométrie en repos. 47
Figure 31 – Simulation d'un joint torique dans un logement infiniment rigide. Les valeurs au contact oscillent entre les 5 – 13 MPa. 50
Figure 32 – Tassement du joint de couvercle en exerçant une pression telle que le contact entre membrures est fait et l'écrasement est total. 51
Figure 33 – À gauche : efforts sur l'assemblage quand la pression interne est plus grande que la pression externe ; à droite, efforts sur l'assemblage si la pression interne est moindre que celle à l'extérieur. 51
Figure 34 – Éprouvette instrumentée pour capter des efforts en traction – compression. 58