

École nationale supérieure Louis Lumière
Spécialité photographie – Promotion 2021

Lavigne Clémence

Reconstitution du procédé de photographie en relief de Louis Lumière : « la Photo-stéréo-synthèse »

Comment retrouver un dispositif disparu ?

Mémoire de Master 2

Sous la direction de Pascal Martin et de Fabien Hamm

Tome 1/2

Membres du jury

Monsieur Pascal Martin | Monsieur Fabien Hamm

Madame Véronique Figini | Monsieur Jean-Paul Gandolfo | Monsieur Laurent Stelin | Madame

Remerciements

Je tiens tout d'abord et avant tout à remercier ma famille. Merci à mon père, qui a su me transmettre la passion pour les sciences dès mon plus jeune âge et sans qui je n'aurais pu progresser aussi loin dans ce projet. Merci à ma mère, qui n'a cessé de m'adresser ses prières réconfortantes tout au long de ce programme de recherche. Merci à mes frères, Benoit et Bixente, pour leur générosité, leur patience et leur aide précieuse. Sans eux, le prototype n'aurait peut-être pas vu le jour. Merci à mes trois sœurs, Bénédicte, Lucie et Anna, pour leur soutien moral sans faille.

Je tiens ensuite à particulièrement remercier Pascal Martin et Fabien Hamm pour leur accompagnement, leur disponibilité, leurs conseils et leurs encouragements.

Je voudrais également adresser mes plus sincères remerciements à Eloi Lemée, sans qui la vie à Paris ne serait pas si agréable. Ami, acolyte et bientôt associé, sa présence et son aide m'ont permis de garder espoir dans les moments difficiles et de ne jamais me décourager.

J'aimerais remercier Fabrice Loussert, pour ses conseils, son aide, son énergie et pour nos discussions reposantes autour de ses cabanes à oiseaux.

Je remercie Jules Nguyen et Maxime Sicard pour leur accompagnement et leur patience pendant une phase d'expérimentation chimique très angoissante.

Je remercie aussi Jean-Paul Gandolfo pour ses conseils toujours bons et avisés.

Je remercie Pascale Fulghesu pour sa disponibilité et sa gentillesse tout au long de mon cursus.

Pour terminer, j'aimerais remercier les professionnels des musées pour nos discussions instructives et leur implication. Merci à Céline Marot, Nathalie Barriat et Marie Palleau pour leur chaleureux accueil au cœur des fonds du Musée de la Photographie de Bièvres. De même, mes remerciements à Yves Cadet pour m'avoir accordé une visite au sein des archives de la Bibliothèque Municipale de Lyon. Enfin, merci à Cindy Lim et à l'équipe du renseignement à distance de la Bibliothèque Centrale du Muséum National d'Histoire Naturelle pour leurs recherches généreuses.

Résumé

Dès ses premières représentations picturales, l'être humain cherche à comprendre, à visualiser et à représenter le relief. L'avènement de la photographie donne lieu à l'invention d'un grand nombre de dispositifs ayant pour seul objectif de capturer la profondeur d'un espace ou d'un objet.

Notre étude porte sur le procédé de « photo-stéréo-synthèse », présenté à l'Académie des Sciences le 8 novembre 1920 par son inventeur Louis Lumière. Ce procédé consiste à recréer une illusion de relief en enregistrant successivement plusieurs plans d'un volume en modifiant la distance de point, pour reconstituer ce même volume. Afin d'obtenir une netteté suffisamment réduite, l'ingénieur met en place un dispositif spécifique basé sur la rotation du plan de l'objectif en corrélation avec celui de la surface sensible. Il n'existe aujourd'hui plus aucun modèle de ce fameux système. Le reconstituer permettrait de retrouver une technique et esthétique photographiques actuellement disparues.

Une analyse optique et mécanique approfondie du brevet d'invention nous permet de rédiger un cahier des contraintes détaillé qui nous guide tout au long de la reconstitution du dispositif. Après une phase de test, des photographies seront réalisées en gélatino-bromure d'argent sur plaques de verre, procédé chimique historiquement utilisé par Louis Lumière.

Malheureusement, certains mauvais choix dus au manque d'expérience et des problèmes de gestion et de planification ne nous ont pas permis d'obtenir des résultats concluants.

Abstract

From the earliest pictorial representations, human beings have sought to understand, visualise and represent relief. The advent of photography led to the invention of a large number of devices whose sole objective was to capture the depth of a space or an object.

Our study focuses on the "photostereo-synthesis" process, presented to the Académie des Sciences on 8 November 1920 by its inventor Louis Lumière. This process consists of recreating an illusion of relief by successively recording several planes of a volume by modifying the point distance, in order to reconstitute this same volume. In order to obtain a sufficiently reduced sharpness, the engineer set up a specific device based on the rotation of the lens plane in correlation with that of the sensitive surface. Today, no model of this famous system exists. Reconstructing it would make it possible to rediscover a photographic technique and aesthetic that have now disappeared.

An in-depth optical and mechanical analysis of the patent enabled us to draw up detailed specifications that guided us throughout the reconstruction of the device. After a test phase, photographs will be taken using gelatin silver bromide on glass plates, the chemical process historically used by Louis Lumière.

Unfortunately, some bad choices due to lack of experience and management and planning problems did not allow us to obtain conclusive results.

SOMMAIRE

Introduction	p.7
--------------------	-----

I] Étude historique

1.1. Voir et représenter le relief	9
1.2. Le procédé de photo-stéréo-synthèse	15
1.2.1. Un procédé visionnaire	15
1.2.2. Les images historiques	20

II] Étude du procédé de photo-stéréo-synthèse

2.1. Principe optique d'agrandissement de la tache de flou	28
2.2. Étude des paramètres fondamentaux	39
2.2.1. Les limites du système	40
2.2.2. La quantification du flou	41
2.2.3. Le sujet photographié	44
2.2.4. La surface sensible	45
2.2.5. Le système de visualisation	53

III] Le dispositif photographique

3.1. Analyse détaillée du dispositif historique	55
3.2. Cahier des contraintes	61
3.2.1. Schéma cinématique	62
3.2.2. Détermination de l'origine des jeux	63
3.2.3. Choix technologiques	67
3.2.4. Plans et cotations des pièces	83
3.3. Reconstitution d'appareil	91
3.3.1. Usinage des pièces	91
3.3.2. Montage	106
3.3.3. Tests de fonctionnement	112

IV] Expérimentations photographiques

4.1. Préparation des plaques photosensibles.....	124
4.1.1. Préparation et installation du matériel.....	124
4.1.2. Cycle de couchage d'une plaque	143
4.1.3. Détermination de la sensibilité des plaques	148
4.2. Capture et traitement des images	151
4.2.1. Installation des prises de vue expérimentales	151
4.2.2. Protocole des images expérimentales.....	156
4.2.3. Analyse des résultats	163
4.2.4. Réalisation des photographies finales	167
Conclusion.....	179
Bibliographie	181

Introduction

La représentation du relief est une problématique très ancienne qui ne cesse de se renouveler. Dès ses premières représentations figuratives datant du paléolithique, l'être humain se questionne et expérimente la profondeur. En étudiant l'état des surfaces rocheuses, il joue avec leurs diverses aspérités pour texturer son dessin mais aussi suggérer la notion d'espace. Premiers bas-reliefs de l'Histoire, les fresques préhistoriques ne sont que les prémices d'une succession d'études et d'expérimentations, tant artistiques que scientifiques. Les progrès et les évolutions théoriques dans le domaine de l'optique font naître de nouvelles formes de représentations qui visent à reproduire la vision de la profondeur. Des fresques romaines à la perspective italienne, les techniques picturales d'illusion de la troisième dimension évoluent. Dès la révolution industrielle du XIX^{ème} siècle marquée par l'invention de la photographie, la course à l'innovation s'accélère. La conception et la production de dispositifs photographiques cherchant à restituer une sensation de relief ne cessent d'accroître. Du stéréoscope à miroirs jusqu'aux installations immersives plus contemporaines, la photographie entretient l'espoir d'être, un beau jour, capable d'observer une image en profondeur.

En 1920, Louis Lumière s'inscrit dans cette quête du relief et dépose un nouveau brevet d'invention¹. Il y décrit un procédé photographique expérimental atypique : la photo-stéréo-synthèse. Cette technique repose sur la réalisation de plusieurs images consécutives d'un volume en décalant la position du plan de mise au point. L'inventeur capture ainsi plusieurs sections nettes qu'il superpose finalement dans une boîte rétroéclairée pour reconstituer ce dit volume. Lorsque le spectateur observe le montage frontalement, les plaques s'alignent, la profondeur de l'image est reconstituée. La sensation de relief est saisissante. Le portrait semble prendre vie. Le procédé de photo-stéréo-synthèse s'inscrit dans la quête d'une photographie dite intégrale. La représentation de l'espace en trois dimensions peut être visualisée sans dispositif d'observation, contrairement à la stéréoscopie, pour ne citer qu'elle, qui requiert l'emploi de lunettes spéciales. Le procédé de Louis Lumière nécessite néanmoins un appareil de prise de vue spécifique pour obtenir une zone de netteté suffisamment réduite. Le

¹ Louis Lumière : *Procédé de stéréo-synthèse-photographique par stratification*, brevet d'invention n°523 962, 21 janvier 1920.

prototype décrit dans le brevet réduit artificiellement la profondeur de champ grâce à une transformation homographique des plans de front. Malgré l'élégance du concept, très peu d'images réalisées par photo-stéréo-synthèse ont été conservées et le dispositif a disparu.

La course à l'innovation technique mène à une consommation massive d'images et à l'invention d'une multitude de systèmes visant à reproduire le relief. Ainsi, pour des raisons techniques comme économiques et commerciales, certains procédés réussissent à se démarquer, et d'autres, au contraire, tendent à tomber dans l'oubli. Or, la disparition d'un système ou d'un savoir-faire se traduit irrémédiablement par la perte d'une esthétique particulière.

Pour mieux comprendre le procédé, nous avons entrepris sa reconstruction. À notre connaissance, il n'y a jamais eu de tentative de ce type depuis 1920. Ce travail a donc nécessité une étude approfondie du principe optique du procédé de photo-stéréo-synthèse permettant de souligner et mettre en exergue les différentes contraintes techniques de chaque phase du protocole photographique. Une recherche bibliographique assez large autour de la vision et de la représentation du relief ainsi qu'un examen minutieux des images historiques s'est imposé afin d'appréhender l'ensemble de la chaîne de fabrication.

Nous avons procédé ensuite à une analyse graphique du prototype décrit dans le brevet d'invention, étape nécessaire à la conception et la reconstitution d'un dispositif similaire. Nos choix et nos expérimentations techniques sont détaillés et justifiés en respectant la chronologie d'un protocole de construction mécanique. Une phase de tests est venue finaliser la conception et vérifier le bon fonctionnement de l'appareil.

Louis Lumière utilisait des plaques de verre enduites de gélatino-bromure d'argent. Dans un souci de vérité historique nous avons choisi ce procédé d'enregistrement. Ainsi, des recherches théoriques et expérimentales autour du procédé chimique ont été entreprises dans le but de construire un montage similaire à ceux présentés par l'inventeur.

Quelques cent ans plus tard, force est de constater combien ce procédé était particulièrement novateur, car est-il besoin de rappeler que les scanner utilisés aujourd'hui dans le domaine médical fonctionnent sur un principe similaire de stratification des volumes.

I] ÉTUDE HISTORIQUE

1.1. Voir et photographier le relief

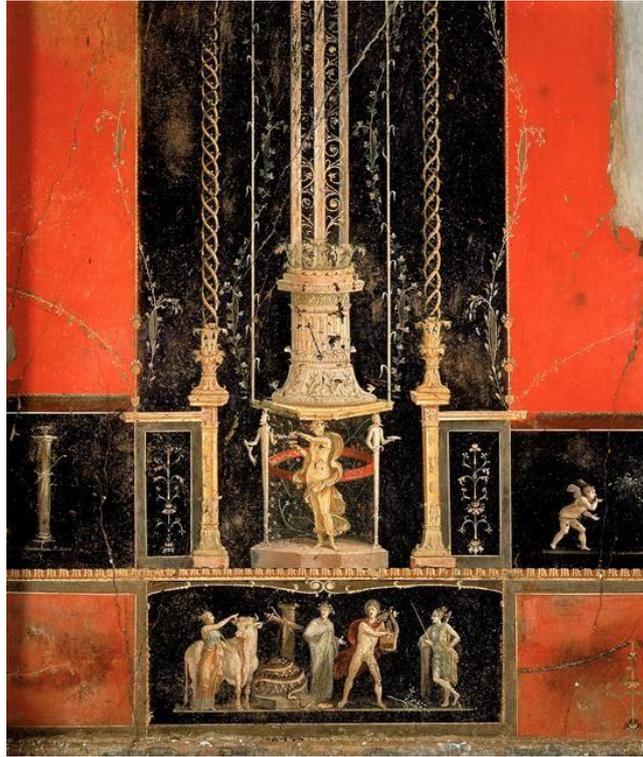
L'optique peut être définie comme la science étudiant la propagation du rayonnement lumineux et les phénomènes de la vision. De part ce double objet, elle constitue une discipline charnière entre sciences de la matière et sciences de l'humain. Dans son livre Archéologie de la vision : l'optique, le corps et la peinture², le philosophe et historien des sciences Gérard Simon tente de démêler les évolutions théoriques dans le domaine optique ainsi que leurs implications philosophiques et culturelles. En conciliant Histoire des Sciences et Histoire Culturelle, il étudie les trois premières mutations qui ont marqué la conception de la vision sous l'influence de l'optique. Dans cette perspective, Gérard Simon reconstitue des modes de pensée révolus en ne portant pas son attention sur la véracité des théories anciennes mais sur leurs répercussions. Ainsi, il démontre que chaque évolution, même théorique, ici dans le domaine optique, impacte notre manière d'appréhender notre environnement. Lorsque l'astronome Johannes Kepler réfute au XVII^e siècle la théorie du savant Ibn al-Haytham et émet l'hypothèse de la sensibilité rétinienne, toutes les données concernant la physiologie de l'œil et la vision binoculaire précédentes deviennent empiriques. Cette étape marque le renouvellement de la problématique de la perception spatiale, ou en d'autres termes la vision du relief. Le relief est une notion qui caractérise la présence d'une troisième dimension. Tout ce qui nous entoure, tout ce qui est réel, est en relief. Pour un être humain, le percevoir est

² Gérard Simon, *Archéologie de la vision : l'optique, le corps et la peinture*, Seuil, avril 2003, 304p.

naturel et inné. Il peut ainsi se mouvoir dans l'espace et évoluer aisément avec son environnement. La vision du relief s'oppose donc assez spontanément à la surface bidimensionnelle de la rétine, qui est, selon Kepler, le lieu de formation de l'image. Tout le processus de vision est remis en question. Jusqu'au XX^{ème} siècle, il devient l'objet de nombreuses théories, qui visent à rompre avec les conceptions médiévales devenues désuètes. Nous pouvons notamment citer la théorie de Descartes qui repense la transmission de l'information en séquençant la perception visuelle en trois phases (physique, corporelle et mentale). Comprendre et expliquer le mécanisme de la vision, et plus précisément le concept de perception tridimensionnelle, a donc nécessité des millénaires de recherches et de théorisations scientifiques comme philosophiques. Mais chaque pas vers la compréhension de ce processus a permis de concevoir de nouvelles techniques de représentation, dans le but de retranscrire l'impression de profondeur et de relief d'un espace. Il est tout de même important de relever que, bien avant de comprendre grâce à quel mécanisme il peut concevoir l'espace, l'être humain a tenté de le figurer.

Pendant de nombreux siècles, la qualité d'une œuvre d'art reposait principalement sur la capacité de l'Artiste à représenter fidèlement la nature. Principal dogme de la représentation picturale, le peintre s'est soumis pendant longtemps à l'imitation de la beauté naturelle de son sujet. Dans son Traité de la Peinture, Léonard Da Vinci soutient cet idéal naturaliste en déclarant : « *la peinture la plus digne d'éloge est celle qui présente le plus de ressemblance avec la chose qu'elle veut rendre, cela dit pour réfuter les peintres qui veulent corriger la nature* »³. Le peintre doit se confronter au réel, s'y soumettre et le retranscrire. Ainsi, il doit se limiter à la reproduction contemplative et respectueuse de son sujet.

³ Léonard Da Vinci, *Traité de la peinture*, traduit de l'italien au français par R Fréart, Paris, Editions chez Pierre-François Giffart, Libraire et Graveur.



a. *Maison des Vetti, Péristyle (triclinium) paroi Est, Fresque du 4ème style, Florence, Italie, 1er siècle après J.-C.*

D'un point de vue technicité, l'art décoratif romain qui émerge sous la forme du trompe-l'œil illustre cette tendance figurative et illusionniste. La Maison des Vetti à Pompéi est représentative du quatrième style d'art pictural romain, dit style fantastique. En observant le détail de l'une des fresques du triclinium, nous constatons que la sensation de relief est suggérée par le détachement d'éléments architecturaux d'un fond noir intense. La teinte sombre est naturellement associée à l'absence de lumière et renvoie à l'idée d'une profondeur infinie. Cette impression de vide est renforcée par la présence d'éléments ornementaux qui viennent au contact des surfaces murales rouges. Ces détails appuient l'illusion du relief par une succession de plans parallèles, le premier étant celui des personnages et des composants architecturaux. Cependant, cette technique de représentation s'oppose à une figuration rigoureuse de la vision. La rupture entre le premier plan et le fond noir est trop brutale pour être réaliste. La structure de cette composition évoque davantage les décors théâtraux, eux-mêmes imaginés en plans successifs parallèles au fond de scène. Malgré ce manque de naturalisme, l'impression de spatialité est bien réelle.

D'un point de vue scientifique, ce phénomène visuel est théorisé par l'astronome Claude Ptolémée un siècle plus tard, dans son Traité de l'Optique⁴. Texte fondamental pour le domaine de l'optique, il propose pour la première fois une explication concrète du processus perceptif et plus précisément, de l'illusion picturale d'un espace en trois dimensions. Les théories de son prédécesseur Euclide à ce propos se limitent à la propagation rectiligne et réversible des rayons, depuis l'œil à l'objet, puis de l'objet jusqu'à l'œil. Sa conception de la vision peut être comparée à l'écholocation, qui permet à certains être vivants de localiser les objets par émission d'ultrasons. Cependant, Euclide n'évoque aucunement la question de la couleur, de la perspective ou même de la lumière.

Une nouvelle reformulation de notre conception de la lumière par le savant Ibn al-Haytham, connu sous le nom d'Alhazen, laisse apparaître de nouvelles formes et études picturales. Sa théorie réfute en 1021 l'émission de rayons par les globes oculaires. Les rayons entrent dans les deux yeux, et c'est à l'intérieur que se produit la sensation visuelle, plus précisément sur le cristallin, jusqu'à la théorie de la sensibilité rétinienne de Kepler six siècles plus tard. Dès lors, tout bascule. La lumière trouve enfin sa place comme agent essentiel de la vision. Les rayons lumineux émis par une source rencontrent un objet et sont réfléchis par la surface de cet objet jusqu'à nos pupilles. L'être humain n'est pas à l'origine de son regard, il est soumis à la nature lumineuse. Cette nouvelle optique de la lumière se traduit par une reconceptualisation totale du processus perceptif, et donc une nouvelle approche intellectuelle du visible. La compréhension de la perception visuelle ne repose plus sur l'évidence intuitive du voir mais sur des conditions physiques et physiologiques. En d'autres termes, la métaphore de la palpation visuelle n'est plus pertinente. Cette nouvelle considération du système de vision ouvre par conséquent le champ des expérimentations, même si les innovations rendues pensables n'apparaissent pas immédiatement après la publication du traité d'Alhazen. Grâce à une large diffusion de ses théories en occident dès le XIIIème siècle dans une traduction latine et italienne, ses idées ouvrent théoriquement la voie aux techniques géométriques, notamment dans le domaine architectural. Les premières théories de la perspective ont été rédigées par le philosophe et mathématicien italien Leon Battista Alberti, au XVème siècle, dans son livre De

⁴ Albert Lejeune : *L'Optique de Claude Ptolémée*, Leiden, E.J.Brill, Collection de travaux de l'Académie Internationale d'Histoire des Sciences N°31, 1989.

Pictura. Ces travaux visent à exprimer mathématiquement l'harmonie et la beauté de la Nature, l'essence de l'art pictural de la Renaissance reposant toujours sur la mimésis visuelle. Ainsi, il propose une méthode de construction géométrique pour représenter la profondeur, aujourd'hui très célèbre, celle du point de fuite central. En appliquant son fondement scientifique à l'œuvre d'art, il tend vers un réalisme calculé.



b. SANZIO, Raffaello, *L'École d'Athènes*, 1508-1512, fresque, 4.40 x 7.7 m. Chambre de la Signature des Musées du Vatican, Vatican.

De nombreux artistes s'inspirent des recherches d'Alberti pour figurer la profondeur dans leurs tableaux. Nous pouvons notamment citer le peintre et architecte de la Renaissance italienne Raphaël qui s'approprie cette technique pour de nombreuses compositions, principalement pour les dessins architecturaux. Sa fresque « L'École d'Athènes » de 1510 est un exemple parmi tant d'autres. L'utilisation des règles de perspective prend explicitement forme dans la figuration du fond.

Les lignes de construction des trois voûtes tendent vers un point central sur la ligne d'horizon invisible, cachée par l'alignement des personnages. Ce jeu est appuyé par la forme voutée de la peinture, qui devient physiquement la fenêtre vers une autre réalité. Nous pouvons aisément créer un parallèle entre l'œuvre italienne et les trompe-l'œil pompéiens. Tous deux cherchent à effacer la frontière du support afin d'inviter le spectateur à franchir la paroi par l'illusion de profondeur.

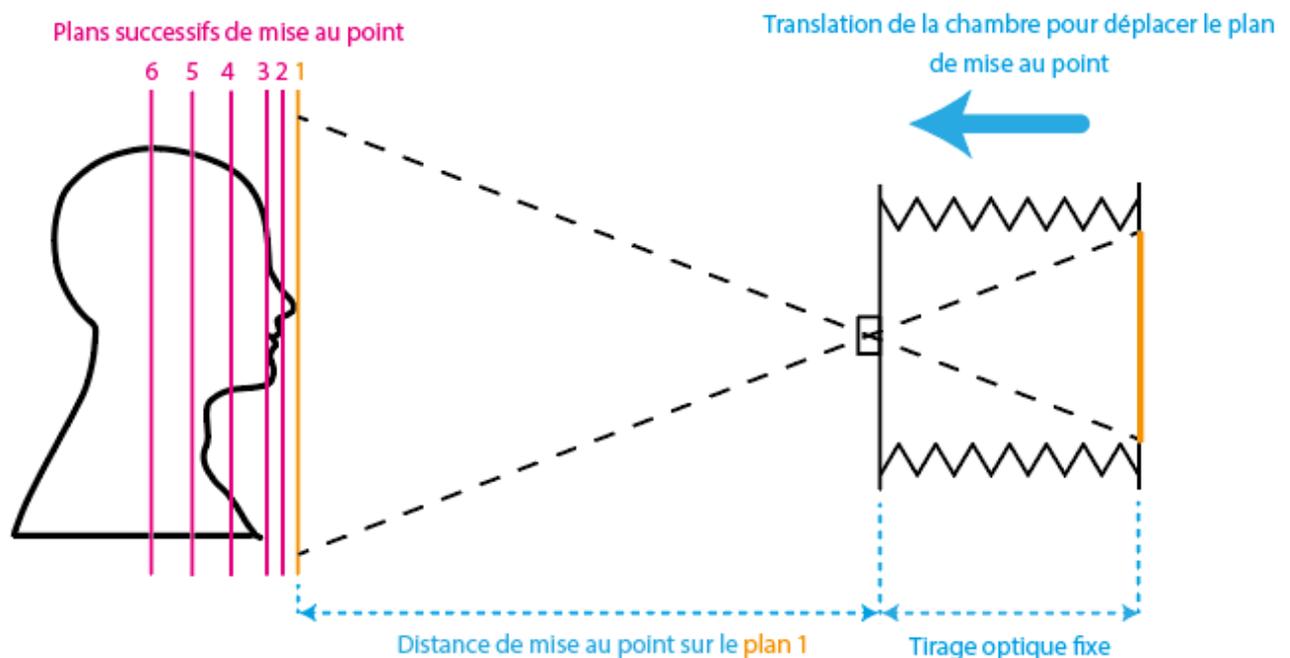
Avec le développement technique et technologique de la Révolution Industrielle, ces artéfacts se sont peu à peu transformés en dispositifs de visualisation du relief. Dès 1832, nous voyons apparaître le dispositif optique de Charles Wheatstone qui permet de contempler un dessin en trois dimensions. Lorsque la photographie voit le jour, l'idée d'apposer ce système sur l'image ravive l'espoir que l'illusion parfaite de la troisième dimension est possible. En 1849, Sir David Brewster conçoit le premier stéréoscope à lentilles, qui est à l'origine de nombreuses innovations technologiques. La photographie, dite « intégrale⁵ », désigne les procédés photographiques n'ayant pas recours à ce type d'accessoires de visualisation. Le spectateur voit le relief de ses yeux nus. Le procédé de photo-stéréo-synthèse de Louis Lumière s'inscrit dans cette démarche.

⁵ Pierre Hermandinquer : « *La photographie intégrale* », in *La Nature : soixante-troisième année*, premier semestre : N° 2944-2955, 1935.

1.2. La photo-stéréo-synthèse

1.2.1 Un procédé visionnaire

Le 8 novembre 1920, Louis Lumière présente à l'Académie des Sciences⁶ un nouveau procédé de prise de vue qui vise à reconstituer un solide dans l'espace par stratification photographique. Cette technique repose sur la réalisation d'une succession d'images négatives de ce solide, à échelle et point de vue fixes, en décalant la mise au point sur différents plans parallèles, équidistants ou non, de ce dit volume. Si nous prenons l'exemple d'un portrait, le bout du nez serait net sur la première image, les lèvres sur la seconde, les yeux sur la troisième et ainsi de suite.



c. Schéma simplifié du principe du dispositif de prise de vue.⁷

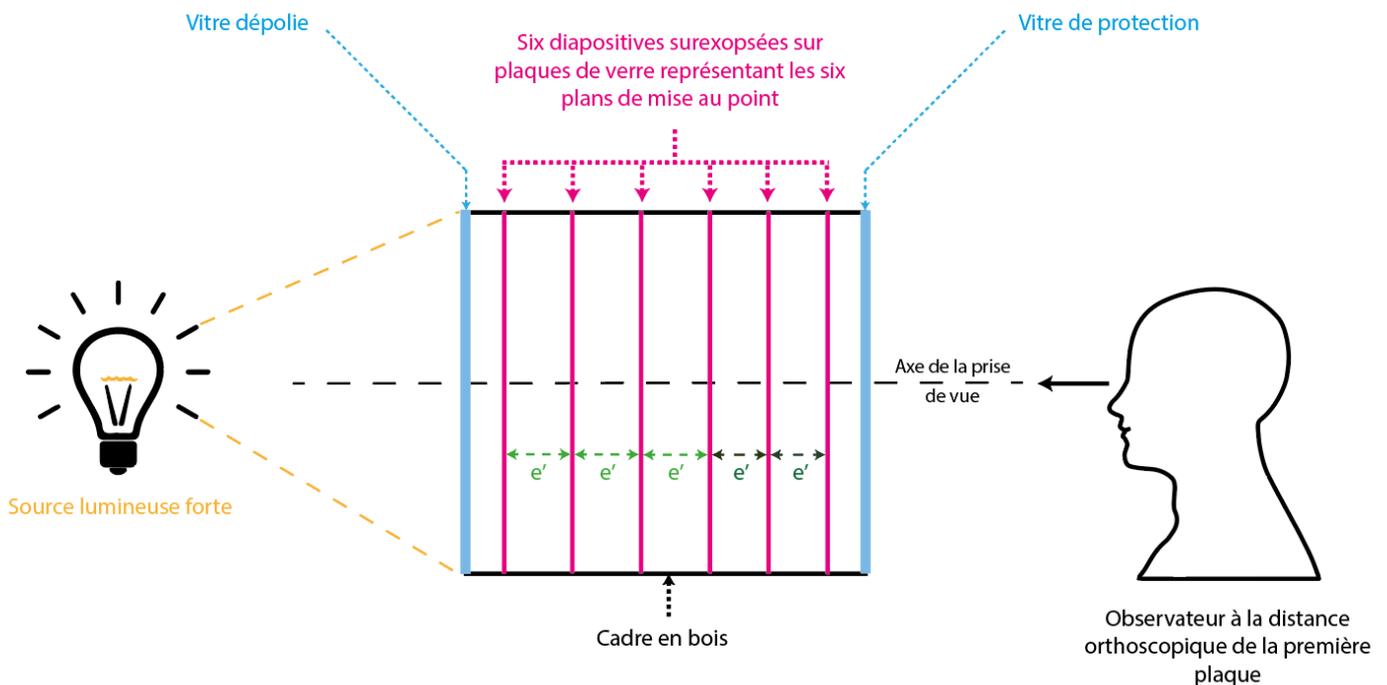
Louis Lumière présente des solutions optiques et mécaniques pour obtenir un volume de netteté assez réduit afin que chaque image tende à représenter l'intersection de l'objet par le

⁶ *Compte rendu de la séance du 8 novembre 1920*, les comptes rendus des séances de l'Académie des sciences, (juillet-décembre 1920), Tome 171, Gauthiers-Villards et Cie, Paris, 1920.

⁷ Réinterprétation du schéma de Franck Malecot : *Le procédé de photographie en relief de Louis-Lumière : « la Photo-stéréo-synthèse »*, Mémoire de recherche en traitement des images (sous la direction de M. MARTIN Pascal), Saint-Denis, École Nationale Louis-Lumière, 2003, p.15.

plan correspondant. Il propose la modification d'une chambre photographique classique pour diminuer artificiellement la profondeur de champ grâce à une rotation synchrone de l'objectif et du châssis par rapport à l'axe optique. Le tirage optique - distance entre l'objectif et la surface sensible - doit rester fixe pour conserver le rapport de grandissement. Le déplacement successif du plan de netteté nécessite donc une translation du dispositif dans son ensemble.

Les images réalisées par photo-stéréo-synthèse sont donc des objets ou sculptures photographiques composés de six diapositives sur verre, tirées à faible densité à partir des négatifs de prise de vue, alignées et montées dans l'ordre, chacune représentant un plan du sujet. L'intervalle entre deux plaques est égal à l'espacement des deux plans de mise au point déterminés à la capture multiplié par l'échelle de reproduction choisie. Ainsi assemblées, elles forment un bloc d'une certaine épaisseur qui, grâce à un rétroéclairage, permet au spectateur d'observer par transparence la reconstitution du volume photographié. En théorie, une reconstitution parfaite devrait être constituée d'un nombre infini d'images très rapprochées. La réalisation de cette condition apparaît instinctivement impossible au vu des moyens techniques employés. Mais les expérimentations prouvent également qu'un nombre élevé de plans n'est pas nécessaire pour procurer une sensation de relief. En effet, quelques plaques suffisent à donner une impression de continuité dans l'espace. Théoriquement, à chaque image correspond un plan, mais en pratique, l'obtention d'une netteté si réduite et précise est impossible. Chaque image représente davantage un volume focal déterminé. Les effets de parallaxe de la vision limitent tout de même ce volume focal, qui doit rester assez faible.



d. Dispositif d'exposition des diapositives finales.⁸

Louis Lumière n'applique son procédé qu'au portrait. Il photographie notamment les membres de sa famille, comme son frère Auguste et sa fille Yvonne. Mais le principe de photo-stéréo-synthèse fut également expérimenté par Ferdinand Bastin en microphotographie⁹. L'emploi du microscope comme dispositif de prise de vue permet de s'affranchir de tout artifice mécanique pour réduire le volume focal. En effet, les objectifs de microscope présentent des longueurs focales très réduites qui, employées à grande ouverture, proposent une profondeur de champ convenable pour ce procédé.

Ainsi, Ferdinand Bastin, anthropologue, s'appuie sur les recherches de Louis Lumière pour photographier et reconstituer une mouche en trois dimensions. L'insecte de 4mm de long est disposé de profil sur le porte-objet du microscope utilisé sans oculaire. Les cinq prises de vue sont réalisées à l'aide d'un objectif achromatique de Leitz n°2 de 24mm de foyer, ouvert à 0.21,

⁸ Réinterprétation du schéma de Franck Malecot, *Le procédé de photographie en relief de Louis-Lumière : « la Photo-stéréo-synthèse »*, Mémoire de recherche en traitement des images (sous la direction de M. MARTIN Pascal), Saint-Denis, École Nationale Louis-Lumière, 2003, p.16.

⁹ MONPILLARD Fernand, *Macrophotographie et microphotographie*, Editions Doin, Paris, 1926.

pour un rapport de grandissement de 10. L'espace entre le premier plan et le dernier plan photographiés est de 1.3mm.

Sachant que cinq images sont réalisées, nous pouvons estimer le déplacement de la mise au point à 0.26 mm environ entre chaque cliché.

$$\frac{1,3}{5} = 0.26 \text{ mm}$$

Afin de maîtriser avec précision ce déplacement, F. Bastin affine les graduations de la vis micrométrique de son microscope. Cette méthode de poses successives employant une vis particulière était déjà proposée par Viallannes¹⁰ pour la reproduction d'objets épais et l'observation des détails. La seule différence est qu'il superposait les différentes captures sur la même plaque négative, contrairement à F. Bastin pour qui chaque arrêt de la vis correspond à une image négative à partir de laquelle il tire une diapositive ektachrome peu dense. Comme Louis Lumière, il les superpose ensuite dans l'ordre, en laissant un espace convenable entre elles grâce à des bandelettes de papier ou de carton épais de 2,5mm. Le volume de la mouche est reconstitué et peut enfin être observé par transparence. La quête de ce montage a été le sujet d'une recherche approfondie. Malgré des échanges avec le réseau des bibliothèques du Muséum national d'Histoire naturelle¹¹, aucune image ni même une information supplémentaire n'ont été trouvées sur Ferdinand Bastin et ses photographies.

Cette réappropriation illustre bien l'aspect visionnaire et précurseur du procédé de photo-stéréo-synthèse. Le principe de stratification photographique d'un objet pour obtenir une reconstitution de son volume est le concept de nombreuses techniques et technologies contemporaines. Dans le domaine médical, l'imagerie par résonance magnétique (IRM) permet d'obtenir une reconstitution numérique 3D à partir d'une succession de radiographies du corps examiné. En cartographie topologique, la symbolisation des reliefs grâce à des courbes de niveaux s'appuie sur un principe semblable. Chaque courbe délimite un espace constitué de points situés à la même altitude, découpant ainsi la photographie aérienne du terrain en tranches successives. Pour revenir à la photographie, le procédé de Louis Lumière s'apparente aux systèmes plénoptiques et à la technologie Light field. La présence d'une grille composée de microlentilles, chacune associée à plusieurs photosites du capteur, permet d'enregistrer le

¹⁰ Ibid, p.
¹¹ Annexe

positionnement spatial de chaque point du sujet photographié. Ainsi, l'image de chaque plan de ce dernier peut être reconstituée par un traitement informatique pour créer la « *carte de profondeur de l'objet* »¹². Grâce à cette technologie ingénieuse, la mise au point peut être définie après la prise de vue sur tout point composant l'image.

Même si le dispositif de Louis Lumière n'est resté qu'au stade de prototype expérimental, il a, des décennies avant l'apparition du numérique, indiqué la voie à emprunter pour un jour réussir à enregistrer la profondeur et le relief d'un sujet. La multiplication des moyens techniques et des systèmes de capture plus performants ont permis l'approfondissement de son concept pour aboutir à des technologies remarquables.

¹² MARTIN Pascal, « La photographie intégrale devient réalité. », in. *Cahier Louis-Lumière*, n°10, décembre 2016, p149-165.

1.2.2. Les images historiques

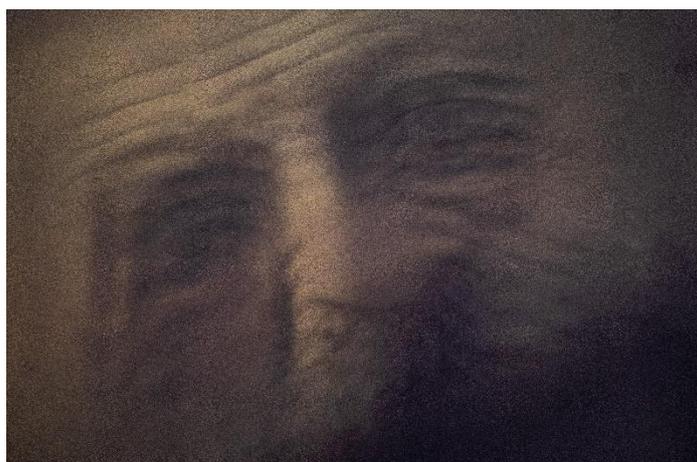
Aujourd'hui, une dizaine de portraits réalisés par photo-stéréo-synthèse sont conservés par trois institutions françaises. Malgré les complications dues aux conditions sanitaires, nous avons eu la chance d'en observer quelques-unes de nos propres yeux. J'ai dans un premier temps rencontré Céline Marot, responsable des collections du Musée de la Photographie de Bièvres, ainsi que Nathalie Barriat et Marie Palleau, régisseuses des collections, qui m'ont fait découvrir les fonds d'archives du Musée. Elles m'ont très gentiment exposé les deux exemplaires qui y sont conservés, accompagnés du livre d'Ernest Coustet, La photographie stéréoscopique en noir et en couleur de 1925¹³. Les deux œuvres ont été acquises dans les années 90 auprès d'un collectionneur inconnu, passionné par la photographie en relief et les procédés stéréoscopiques. L'origine exacte des œuvres reste une énigme. J'ai pu dans un second temps obtenir une entrevue avec Yves Cadet, responsable des collections photographiques de la Bibliothèque Municipale de Lyon Part-Dieu, qui m'a chaleureusement accueillie et faite visiter les archives. Il a ainsi pu nous montrer six des sept exemplaires, le septième étant en atelier de restauration. Tous ont été acquis lors de la fermeture de la Fondation Nationale de la Photographie en 1993. Ils n'ont jamais été sortis des fonds. Une dernière image est conservée à l'Institut Lumière à Lyon. Malheureusement fermé lors de mon passage à Lyon pour cause pandémique, je n'ai pu observer cette dernière œuvre. Cette visite aurait été instructive car le montage est exposé de manière permanente, et non conservé dans des archives.



e. LUMIERE Louis, *Portrait de Yvonne*, Musée de la Photographie de Bièvres, 1920.

¹³ COUSTET Ernest, *La photographie stéréoscopique en noir et en couleur*, Editions Charles Mendel, Paris, 1925.

J'aurai pu observer la configuration d'exposition, notamment en ce qui concerne le type d'éclairage employé. En effet, lors de mes deux visites, nous examinions les photographies à plat sur des tables lumineuses. Nous devions être surélevés, debout sur une chaise, afin de pouvoir visualiser l'image frontalement et ainsi percevoir le relief. Malgré cette posture peu agréable, la sensation de relief était néanmoins saisissante et particulièrement belle. Une alternative plus ergonomique pourrait être imaginée.



f. LUMIERE Louis, *Portrait d'Auguste Lumière*, Bibliothèque municipale de Lyon Part-Dieu, 1920.

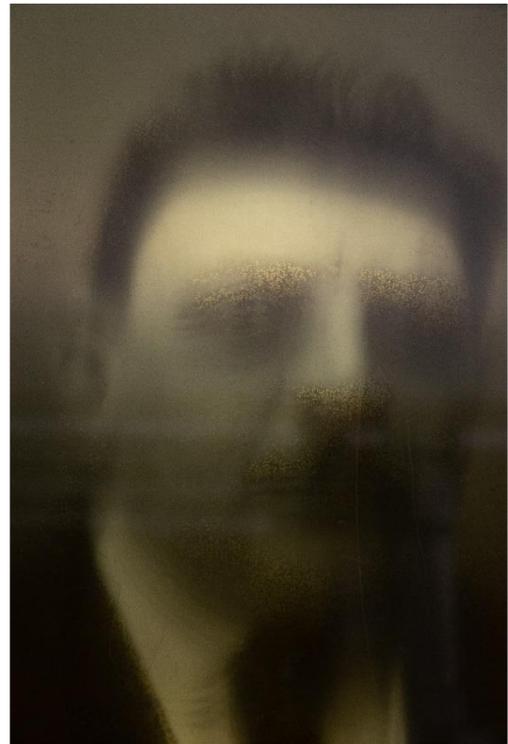
Lorsque notre regard se place dans le bon axe, perpendiculairement à la superposition, chaque plan s'aligne et le portrait est recomposé comme par magie dans l'espace. L'esthétique vaporeuse due à la superposition de plaques de faible densité confère également aux images un aspect fantomatique particulièrement agréable visuellement. Il complique néanmoins la distinction et la quantification des plaques, notamment pour celles situées à l'arrière du montage. Il est impossible de les observer de biais et elles se confondent facilement avec le verre dépoli lumineux. Dans certains dispositifs, nous remarquons la présence de numéros



g. f. LUMIERE Louis, *Portrait d'Auguste Lumière*, Bibliothèque municipale de Lyon Part-Dieu, 1920.

manuscrits dans le coin haut gauche de quelques plaques. Ces annotations devaient être utiles pour recomposer l'ordre exact des plans réels du sujet lors du montage dans le système de visualisation. Tous ne sont pas visibles, cela aurait facilité le décompte des images.

Malgré leurs formats différents, tous les portraits restent relativement similaires. Chaque œuvre se présente sous forme d'une boîte en bois fin, fabriquée artisanalement, munie d'un verre de protection à l'avant et d'un verre dépoli à l'arrière. À l'intérieur, plusieurs rainures sur parois latérales permettent de maintenir les plaques photographiques. Nous pouvons supposer que les bords de chaque image sont protégés par une bande adhésive afin que la gélatine ne soit pas abîmée lors de leur insertion. L'extérieur de la boîte est revêtu un papier feutré de protection noir. Bien évidemment, ces systèmes de visualisation n'ont jamais été démontés car le risque d'endommagement est trop élevé. Cependant, le démontage serait nécessaire



h. f. LUMIERE Louis, *Portrait de Edouard Herriot*, Bibliothèque municipale de Lyon Part-Dieu, 1920.

pour la restauration des plaques de verre et de l'intérieur des boîtes, car de nombreuses altérations dues au temps sont apparues. La plupart des plaques présentent en effet une teinte jaunâtre et verte plutôt importante causée par le vieillissement de la gélatine. Sur le portrait de Edouard Herriot, nous relevons la présence de petits points blancs concentrés principalement dans les zones de hautes densités, signe de la moisissure de la gélatine due à l'humidité et à la chaleur qui favorisent le développement des agents biologiques*. De nombreux dégâts mécaniques, comme des fissures, sont également à déplorer. Mais actuellement, seul l'extérieur des boîtes peut être entretenu. C'est notamment le cas du portrait de la poupée qui est revêtu d'un papier de protection cartonné plus contemporain. Les œuvres sont alors manipulées avec précaution en portant des gants en coton fin. Pour limiter les risques, elles sont également conservées dans des boîtes Klug KS 12 simples avec couvercle séparé.

Outre le système de visualisation, les photographies sont esthétiquement similaires les unes des autres. Le procédé de photo-stéréo-synthèse nécessite en effet un protocole précis qui réduit considérablement les possibilités. Chaque prise de vue respecte donc les mêmes règles de cadrage, de lumière et de mise en scène.



À. LUMIERE Louis, Portrait de Yvonne, Musée de la Photographie de Bièvres, 1920.

Chaque sujet est cadré au niveau de la poitrine, son visage est compris dans la moitié supérieure de l'image. Le point de vue adopté est frontal, même si le modèle est positionné de biais, ses épaules n'étant pas strictement parallèles au cadre. Le sujet semble aussi légèrement penché vers l'avant. Nous pouvons émettre l'hypothèse que Louis Lumière les installait assis et les invitait à prendre appui sur un accoudoir pour tenir la pose et rester statique. L'expression faciale détendue et sérieuse des sujets s'inscrit aussi dans cette quête d'immobilité. En effet, un sourire ne peut être parfaitement conservé tout au long du processus de prise de vue. Une œuvre se distingue particulièrement des autres, un des deux portraits d'Yvonne conservé à Lyon. Cette dernière est photographiée de profil.

La directivité et l'aspect doux des ombres témoignent d'un éclairage continu en hauteur, dirigé assez frontalement et en plongée. Cette lumière vient dessiner les lignes principales du sujet, comme son arcade sourcilière ou le contour de son visage, sans trop texturer la peau qui apparaît lisse et lumineuse. Ces ombres permettent de faire ressortir les éléments physiologiques caractéristiques représentés nets sur les différentes plaques. Le fond éclairé uniformément est lui aussi clair et lumineux afin de favoriser une meilleure transmission des rayons une fois le montage final effectué. Nous pouvons cependant relever quelques détails propres à certains portraits qui méritent réflexion. Pour la photographie de la poupée conservée à Bièvres, ou l'un des trois portraits d'Auguste Lumière à Lyon, le papier de protection extérieur est découpé pour former une fenêtre devant le verre protecteur. Cette finition est astucieuse car elle tend à faire oublier le dispositif de visualisation et renforce ainsi l'illusion d'observer un objet en flottaison dans une boîte. Sur cette même image de la poupée,

le fond surexposé se confond presque avec ses vêtements blancs. Son visage, détaché du cadre et du dispositif, est mis en valeur. La sensation de relief est renforcée. Enfin, en analysant les portraits de plus grand format, nous remarquons que l'espacement des plaques n'est pas régulier. Louis Lumière a reconstitué à l'échelle les distances entre chaque plan du sujet photographié. A contrario, pour les plus petits formats, comme le portrait de la poupée, la disposition des plaques est régulière. Nous pouvons en déduire que la taille réduite et la nature du sujet induisent un systématisme lors de la prise de vue. La forme d'une tête de poupon se différencie nettement



J. LUMIERE Louis, Portrait d'une poupée, Musée de la Photographie de Bièvres, 1920.

de la morphologie d'une tête adulte et demeure bien évidemment plus petite. Ainsi les plans successifs photographiés s'étendent moins en profondeur et permettent d'opter pour un décalage similaire entre chaque prise de vue.

Indépendamment de cette saisissante sensation de relief, l'esthétique aérienne de ces images demeure bouleversante. Le portrait semble illusoire et immatériel, en flottage dans un espace incertain. Plusieurs œuvres plus contemporaines jouent elles aussi sur la superposition de plans transparents, photographiés ou peints, pour suggérer le relief ou simplement retrouver cet aspect brumeux et délicat.

En mars 2021, j'ai eu la chance de pouvoir découvrir une des œuvres de Leandro Erlich, tirée de sa série Single Cloud collection, à la Galerie Continua dans le 3^{ème} arrondissement de Paris. L'installation, de grandes dimensions, présentait une esthétique fumeuse comparable. Former de couches fines d'acrylique pulvérisé sur plaques de verre, le nuage flottait, immobile et pourtant, semblait parfois bouger.

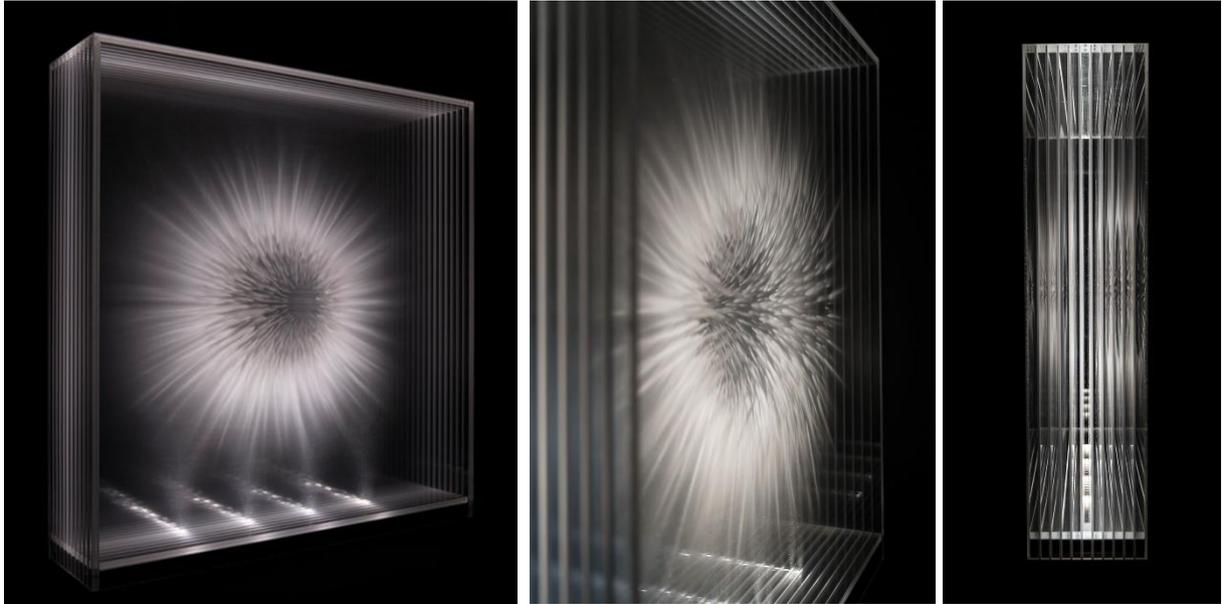


k. Photographies des œuvres de Leandro Erlich : *Single Cloud collection*, acrylique sur plaques de verre, Galerie Continua, Paris, 2020.

D'autres artistes proposent des expérimentations sur verre autour du relief toutes aussi dignes d'intérêt :



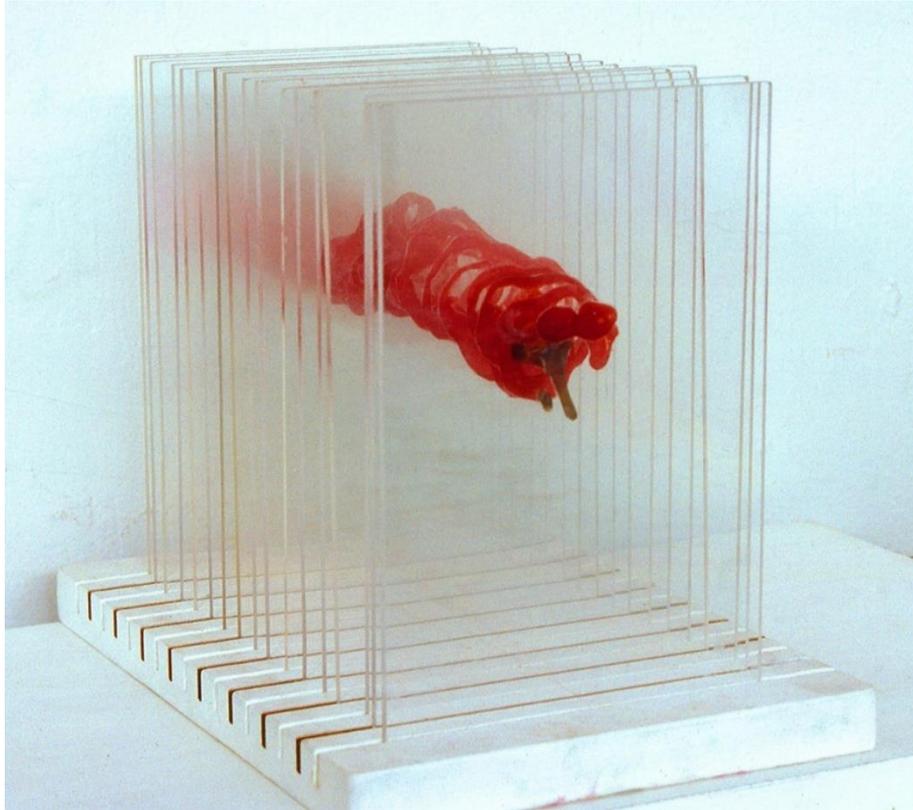
l. XIAOWAN Xia, *Double human figure*, feutre sur 14 panneaux de verre teinté, 175x122x83cm, Chine, 2009.
m. XIAOWAN Xia, *The body*, feutre sur 14 panneaux de verre teinté, 175x122x83cm, Chine, 2009.



n. SPRIGGS David : *Vision Series*, Acrylique sur couches de plexiglas dans une vitrine en plexiglas éclairée par des LED, 2019, 81 x 20 x 84 cm.



o. Photographies de Kichirō Okamura de l'installation de SPRIGGS David, *First Wave*, acrylique sur couches transparentes, Oku-Noto Triennale, Suzu, Japan, 970 x 271 x 381 cm, 2021.



p. SPRIGGS David, *Red Pepper Study*, Photographies imprimées sur couches de plexiglas, 1999.

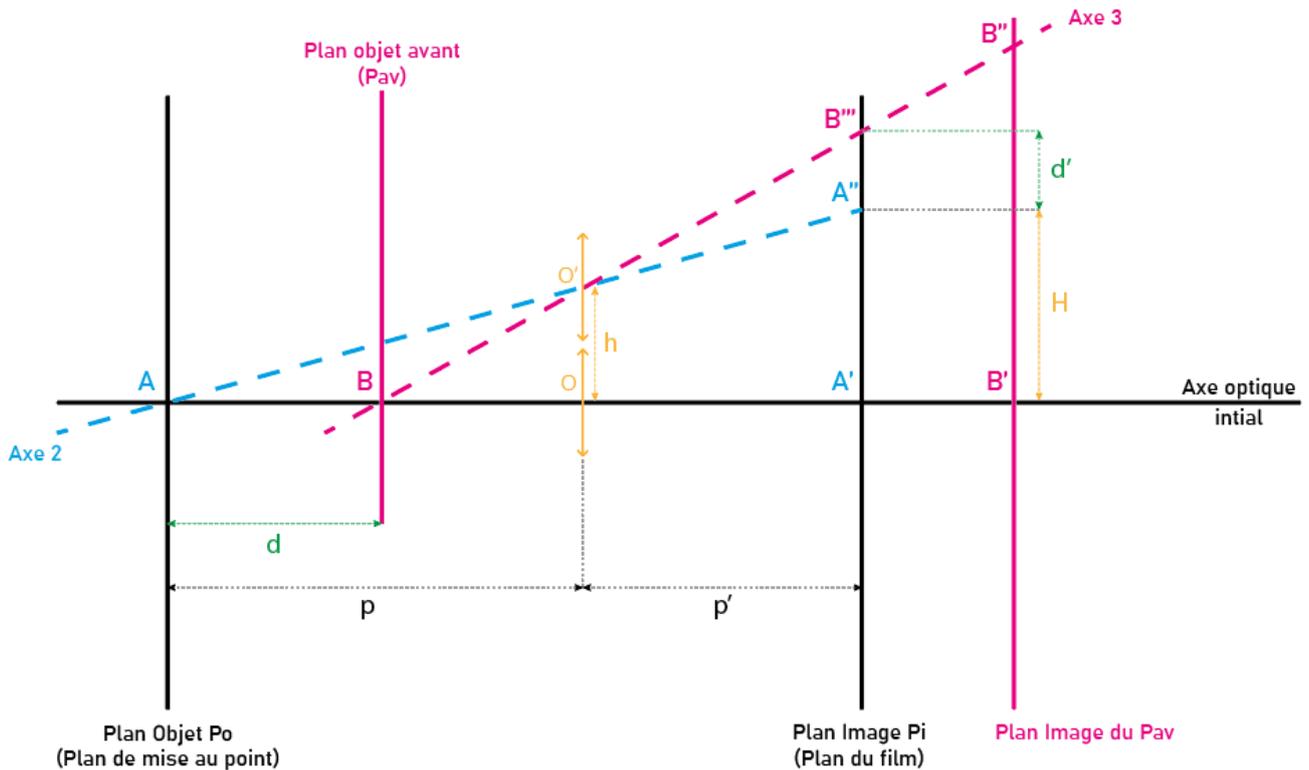
II] ÉTUDE THÉORIQUE DU PROCÉDÉ

2.1. Principe optique d'agrandissement de la tache de flou

En 1920, les objectifs disponibles ne permettent pas d'obtenir la quantité de flou nécessaire au procédé de photo-stéréo-synthèse. Ils sont sujet aux aberrations optiques qui impactent considérablement la qualité du flou. Mais leur diamètre d'ouverture reste surtout trop faible. Louis Lumière imagine alors un dispositif mécanique qui réduit artificiellement la zone de netteté. En d'autres termes, il agrandit fictivement l'ouverture de l'objectif. Ce dispositif repose sur les transformations homographiques des plans de front lors la mise en rotation de l'objectif et de la surface sensible autour d'un axe parallèle à l'axe optique principal. En considérant ce mouvement mécanique, la quantité de flou générée pourrait être obtenue à l'aide d'une lentille mince immobile de plus grande surface et de même distance focale¹⁴.

Afin d'analyser et expliquer le principe optique de ce dispositif, nous nous plaçons dans les conditions de Gauss en réduisant l'objectif à une simple lentille mince convergente. Ainsi nous l'assimilons à un objectif strictement stigmatique et aplanétique pour écarter les aberrations du système optique et clarifier le propos théorique en une figure géométrique simple.

¹⁴ Ernest Coustet, *Traité général de photographie en noir et en couleurs*, , Librairie Delagrave, nouvelle édition entièrement refondue et mise à jour, Paris, 1933, p.514..



q. Reproduction de la figure originale dessinée par Louis Lumière pour la démonstration de son système optique.¹⁵

Sur ce schéma,¹⁶ la lentille de centre O représente l'objectif, le plan image P_i la surface sensible, conjugué du plan objet P_o , le plan de mise au point dont l'image nette se forme sur le plan P_i . La distance de mise au point p et le tirage optique p' restent constants. Ainsi, le point objet A situé sur le plan P_o donne un point image A' sur le plan P_i par O.

En déplaçant la lentille de centre O d'une distance h en O' , nous obtenons le point image A'' , conjugué du point objet A par O' , toujours sur le plan image P_i . Mais si en parallèle, le plan image P_i effectue lui aussi un déplacement proportionnel H , dans son plan et sans rotation, les points images A' et A'' se confondent. Le mouvement de l'objectif est annulé par le mouvement corrélé de la plaque photographique dont l'amplitude est déterminée par un calcul simple. A partir du Théorème de Thalès, Louis Lumière formule la relation n°1, qui conditionne le rapport entre le déplacement de l'objectif et celui de la surface sensible.

¹⁵ Réinterprétation de la Figure 1 du brevet d'invention de Louis Lumière : *Procédé de stéréo-synthèse-photographique par stratification*, op cit.p.7.

¹⁶ La description optique qui suit est une réinterprétation des propos de Louis Lumière. Les lettres et les notations ont été changés pour des soucis de lisibilité et de compréhension.

RELATION N°1¹⁷

$$\frac{OO'}{A'A''} = \frac{p}{p+p'} = \frac{h}{H}$$

Démonstration

Théorème de Thalès dans les triangles AOO' et AA'A''

$$\frac{OO'}{A'A''} = \frac{AO}{AA'} \leftrightarrow \frac{h}{H} = \frac{p}{p+p'}$$

À présent, considérons un point objet B, situé sur l'axe optique à une distance d du plan de mise au point P₀ et de A. Son image B' se forme derrière le plan P₁. En gardant l'objectif fixe, nous voyons que les points A, B, O, A' et B' restent alignés sur l'axe. Mais si la lentille translate vers sa seconde position, les points A, B, O', A'' et B'' ne sont plus du tout alignés. Deux axes bien distincts se dessinent (en bleu et rose sur le schéma). Sur le plan P₁, l'axe 3 s'éloigne de l'axe 2 d'une distance d'. Cette dernière représente l'augmentation artificielle de la tâche de flou, ce pourquoi Louis Lumière a imaginé ce dispositif. Plus la distance d augmente, plus le décalage d' sur le plan P₁ sera grand. Autrement dit, plus un point est éloigné du plan de netteté, plus la taille du flou augmente. Toujours à l'aide du Théorème de Thalès, Louis Lumière propose une deuxième relation optique qui vise à calculer théoriquement le diamètre de cette augmentation.

RELATION N°2¹⁸

$$d' = \frac{h * p'}{p - d} - (H - h)$$

Démonstration

Théorème de Thalès dans les triangles BA'B''' et BOO'

$$\frac{OO'}{A'B'''} = \frac{BO}{BA'} \leftrightarrow \frac{h}{H+d'} = \frac{p-d}{p-d+p'}$$

$$\leftrightarrow h * (p - d + p') = (H + d') * (p - d)$$

$$\leftrightarrow H + d' = h * \frac{p-d+p'}{p-d}$$

¹⁷ *ibid.*

¹⁸ *ibid.*

$$\begin{aligned} \Leftrightarrow d' &= \frac{h * (p - d + p')}{p - d} - H \\ \Leftrightarrow d' &= \frac{hp - hd + hp' - Hp + Hd}{p - d} \\ \Leftrightarrow d' &= \frac{h(p - d) + hp' - H(p - d)}{p - d} \\ \Leftrightarrow d' &= \frac{hp' + (p - d)(h - H)}{p - d} \\ \Leftrightarrow d' &= \frac{hp' - (p - d)(H - h)}{p - d} \\ \Leftrightarrow d' &= \frac{hp'}{p - d} - (H - h) \end{aligned}$$

Nous avons reformulé cette dernière relation afin d'éliminer H et de laisser apparaitre le grandissement g_y , qui est l'un des paramètres prédéterminés par Louis Lumière. Il s'avère également utile pour le calcul de la profondeur de champ.

Reformulation

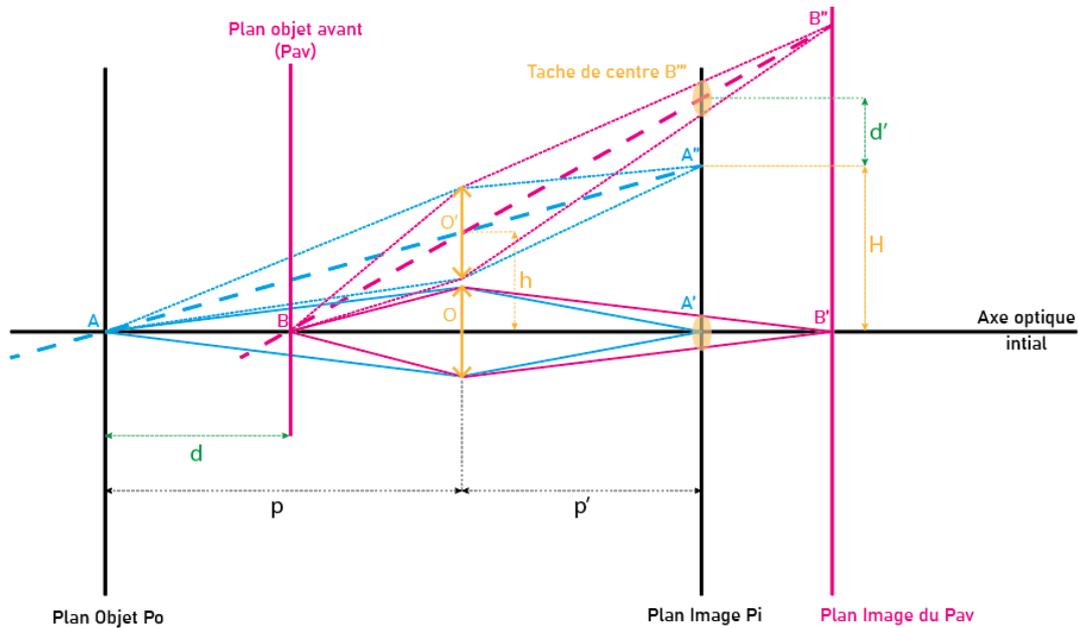
Théorème de Thalès dans le triangle AA'A''

$$\frac{A'A''}{OO'} = \frac{AA'}{AO} \Leftrightarrow \frac{H}{h} = \frac{p + p'}{p} \Leftrightarrow H = h \left(\frac{p + p'}{p} \right)$$

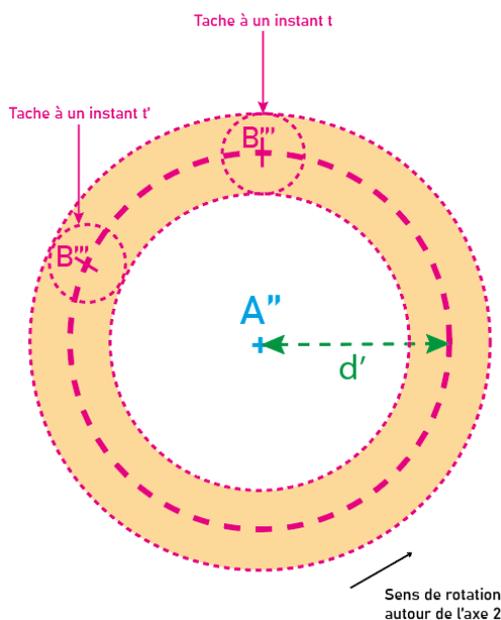
En remplaçant H dans la relation N°2, nous obtenons :

$$\begin{aligned} d' &= \frac{hp'}{p - d} - \left[h \left(\frac{p + p'}{p} \right) - h \right] \\ \Leftrightarrow d' &= \frac{hp'}{p - d} - \left[\frac{hp + hp'}{p} - h \right] = \frac{hp'}{p - d} - \left[\frac{hp + hp' - hp}{p} \right] \\ \Leftrightarrow d' &= \frac{hp'}{p - d} - \frac{hp'}{p} = hp' \left(\frac{1}{p - d} - \frac{1}{p} \right) = hp' \left[\frac{p - (p - d)}{(p - d)p} \right] \\ \Leftrightarrow d' &= hp' \left[\frac{p - p + d}{p(p - d)} \right] = hp' \times \frac{d}{p(p - d)} = h \times \frac{p'}{p} \times \frac{d}{p - d} \\ d' &= h * \frac{p'}{p} * \frac{d}{p - d} \quad \text{ou} \quad d' = h * G_y * \frac{d}{p - d} \end{aligned}$$

Il ne faut bien sûr pas oublier le cercle de diffusion généré par les points n'appartenant pas au plan de netteté, comme le point B. Sous cette appellation, nous entendons le flou généré « naturellement » par les parties du sujet situées en dehors de la profondeur de champ. Les points images B' et B'' , conjugués de B par O et O' sur le plan image du Plan objet avant P_{Av} , peuvent alors être assimilés à un cercle de diffusion de centre B''' sur le plan image P_i .



r. Schéma optique détaillé du procédé.¹⁹



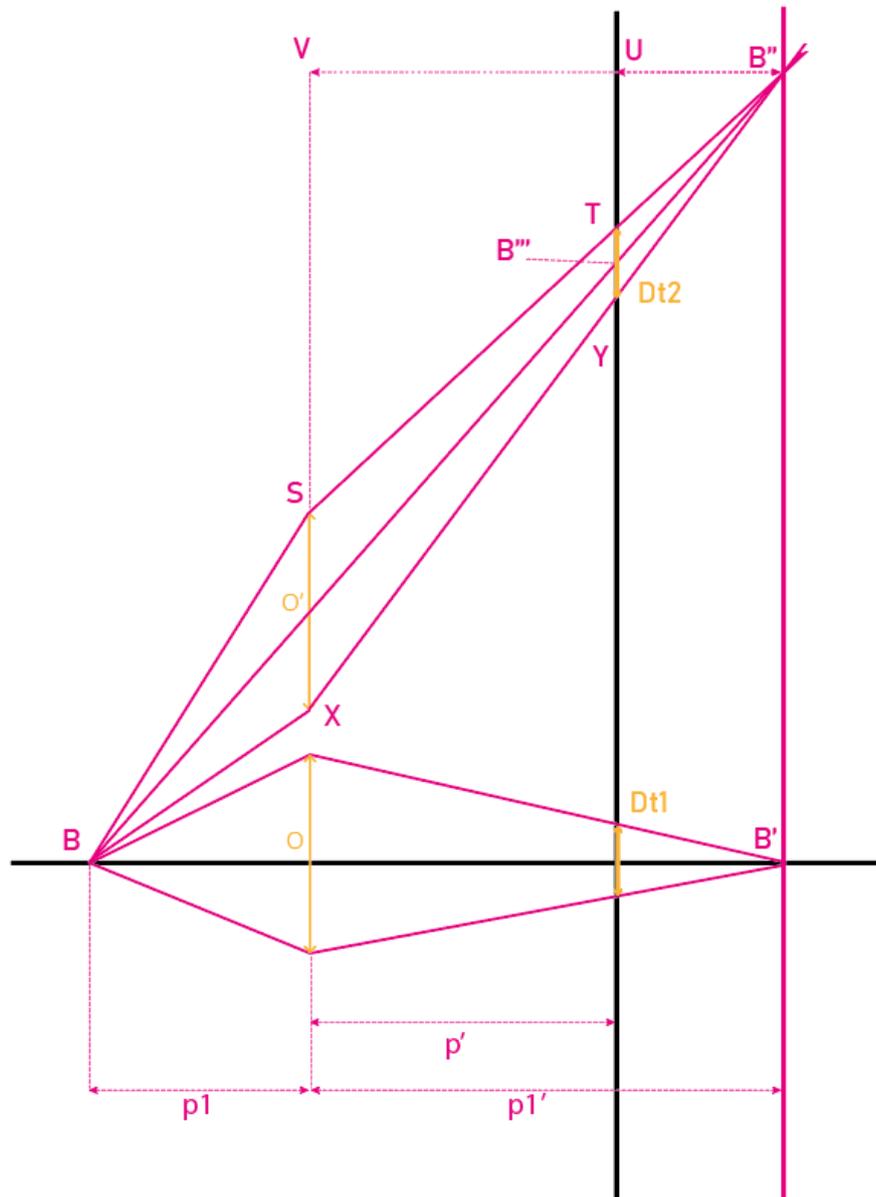
s. m. Schéma de la rotation de la tache de centre B''' .¹⁹

Si nous nous plaçons face à la surface sensible pendant la rotation de la lentille autour de l'axe optique initial, nous remarquons que cette tache de centre B''' décrit une couronne autour de A'' , de rayon $A''B'''$ ou d' .

Plusieurs constructions géométriques ont ensuite démontrées que le diamètre de cette tâche de flou de centre B''' n'évolue pas avec le déport de la lentille. Le plan du sujet, celui de l'objectif et celui de l'émulsion sensible restent parallèles, leurs espacements demeurent identiques. Seule la valeur des

¹⁹ Schéma inspiré d'une illustration parue dans l'article de Pascal Martin, *La photo stéréo-synthèse*, Louis Lumière et le relief, Image Expert de février-mars 1996, page 47.

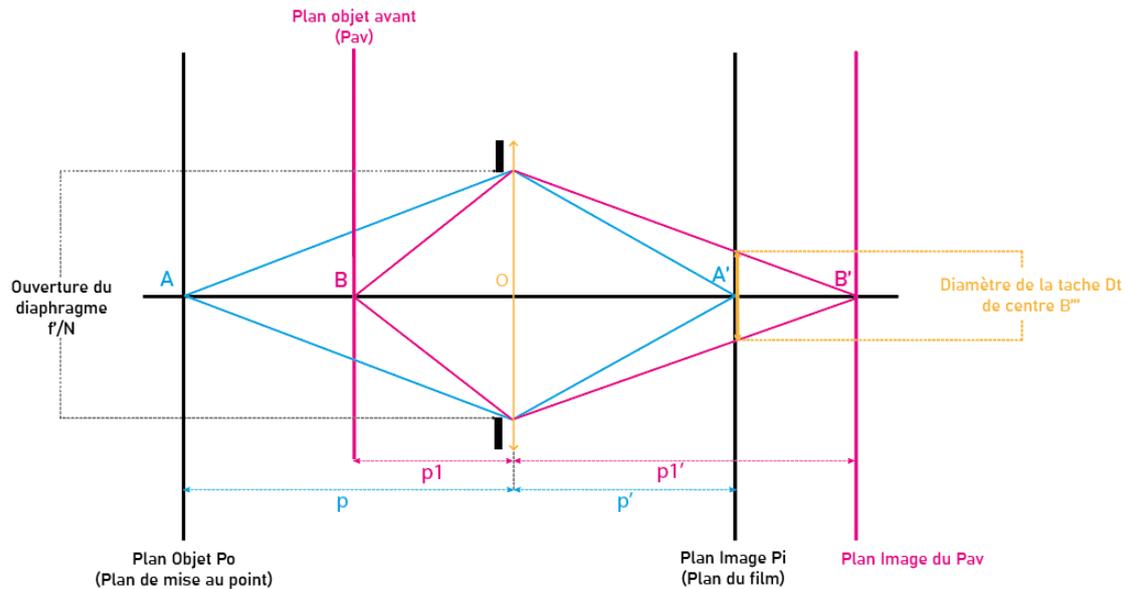
angles aux sommets est impactée par le décalage h de l'objectif, la tache de flou elle ne change pas. Sur le schéma suivant, nous pouvons en effet visuellement constater que le diamètre de la tache Dt_1 et celui de la tache Dt_2 sont égaux.



t. Démonstration géométrique de l'invariabilité du diamètre de la tache de flou.²⁰

Le diamètre de la tache peut alors être calculé sans prendre en considération la rotation des plans propre au procédé de photo-stéréo-synthèse. Nous simplifions le schéma optique et l'assimilons à une objectif immobile classique.

²⁰ Schéma redessiné sur Illustrator à partir de nos constructions géométriques graphiques.



u. Schéma du système optique sans déplacement de la lentille. ²¹

Toujours grâce au Théorème de Thalès, une troisième relation est formulée. L'objectif étant assimilé à une lentille mince, le diamètre d'ouverture du diaphragme se confond ici avec la pupille d'entrée du système optique.

$$\varnothing = \varnothing Pe = \frac{f}{N}$$

RELATION N°3²²

$$D_t = \frac{f}{N} * \frac{p'_1 - p'}{p'_1}$$

Démonstration

Théorème de Thalès dans le triangle sommet B' et de base la pupille d'entrée $\varnothing Pe$

$$\frac{Dt}{\varnothing Pe} = \frac{p'_1 - p'}{p'_1}$$

$$\leftrightarrow Dt = \varnothing Pe * \frac{p'_1 - p'}{p'_1}$$

$$\leftrightarrow Dt = \frac{f}{N} * \frac{p'_1 - p'}{p'_1}$$

²¹ Réinterprétation du schéma de Franck Malécot, *Le procédé de photographie en relief de Louis-Lumière* : « la Photo-stéréosynthèse », Mémoire de recherche en traitement des images (sous la direction de M. MARTIN Pascal), Saint-Denis, École Nationale Louis-Lumière, 2003, p.31.

²² *Louis Lumière : Procédé de stéréosynthèse-photographique par stratification*, op.cit.p. 7.

En revenant au schéma « *Démonstration géométrique de l'invariabilité du diamètre de la tâche de flou* », nous pouvons confirmer par le calcul que le diamètre de la tâche de centre B''' n'évolue pas avec le déport de la lentille. En manipulant le théorème de Thalès, nous obtenons de nouveau la relation N°3 pour la tâche Dt₂.

Par le calcul, dans le triangle B''SX, nous avons :

$$\frac{Dt_2}{SX} = \frac{B''T}{B''S} = \frac{B''Y}{B''X}$$

Dans le triangle B''SV, nous avons :

$$\frac{B''T}{B''S} = \frac{B''U}{B''V}$$

Or

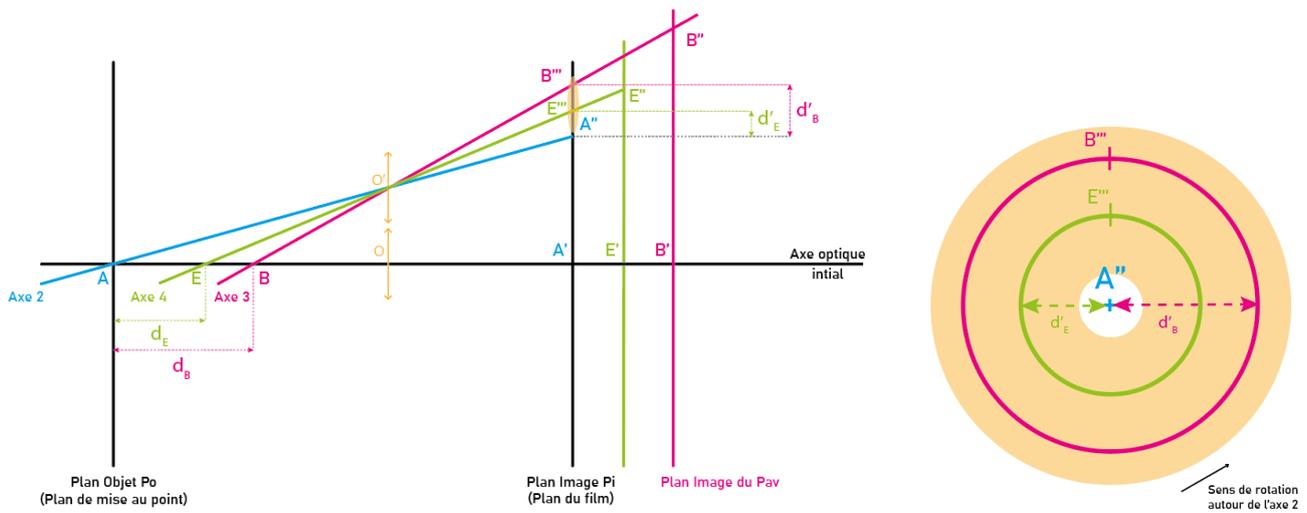
$$\frac{B''U}{B''V} = \frac{p'_1 - p'}{p'_1}$$

Donc

$$\frac{Dt_2}{SX} = \frac{p'_1 - p'}{p'_1}$$

Donc Dt₂ = Dt₁

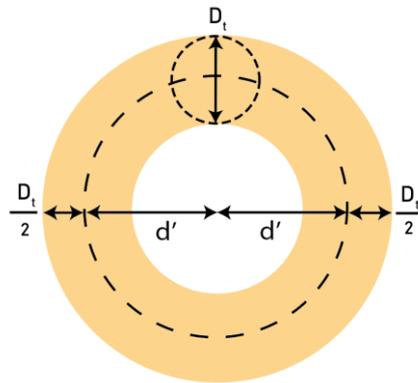
Par ailleurs, si nous prenons en compte un troisième point E, à une distance d_E de A, nous remarquons que la tache de centre E''' vient se former entre la tache de centre B''' et A''. Le segment [A''B'''] est donc le lieu des centres des cercles de diffusion dus à chaque point n'appartenant pas au plan de mise au point.



v. Schémas simplifiés du procédé en considérant trois points distincts.

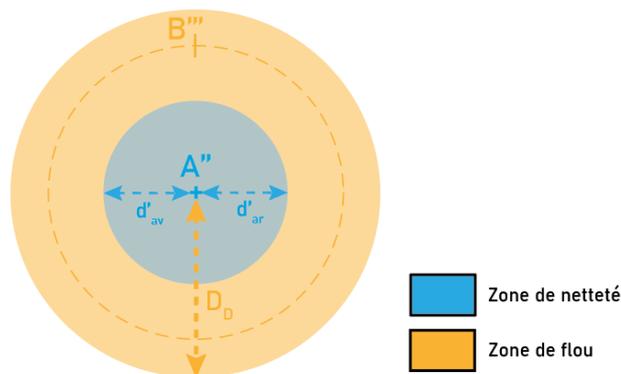
Cette observation peut expliquer pourquoi Louis Lumière considère la tache de flou comme un disque et non comme une couronne. En effet, sur cette schématisation strictement théorique, seul le point central A'' reste net. Il est donc tout à fait justifié de penser le flou généré par le dispositif non pas en forme d'œillet mais comme une trace circulaire. Représentée ainsi, le diamètre de la tache de flou peut être calculée en ajoutant le diamètre D_t du cercle de centre B''' au double de la distance d' .

$$\text{Diamètre du disque} = D_t + 2 * d'$$



w. Schéma simplifié pour le calcul du diamètre du disque.

Cependant, en réalité, le plan de netteté ne peut être rigoureusement qu'un plan unique. La profondeur de champ détermine davantage un volume de netteté dont les limites ne peuvent être arbitrairement définies. Sur la surface sensible, l'image nette n'est donc plus un point unique A'', mais un cercle de centre A''. Le flou doit alors être symbolisé par une couronne, son rayon intérieur correspondant au rayon de la zone de netteté sur l'image.



x. Schéma simplifié de la profondeur de champ.

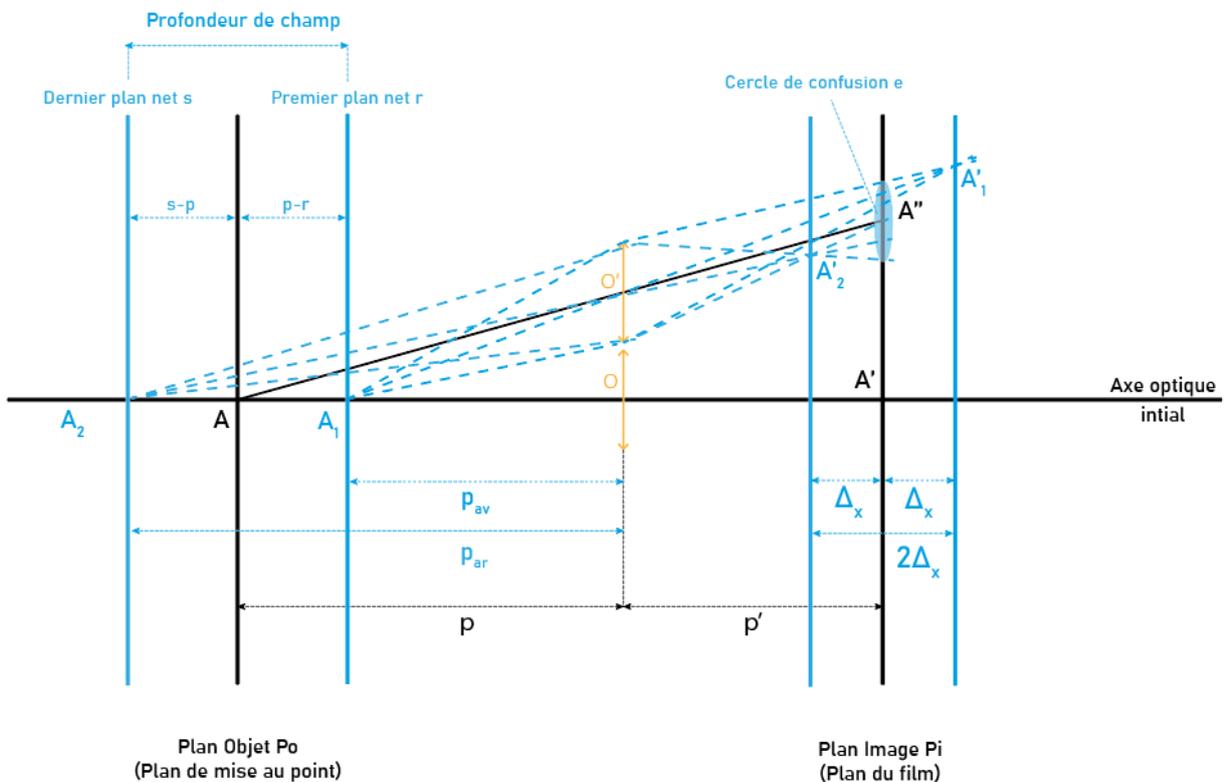
Le rayon intérieur de cette couronne correspond en fin de compte au cercle de confusion e qui est la tolérance de netteté de notre émulsion. Cette valeur représente le seuil de différenciation du net et du flou. Il est défini par le rapport entre la focale f' et le critère de netteté angulaire α , généralement arrondi à 2' d'arc.

$$\alpha = 2' d'arc = \frac{1}{1500} \text{ rad}$$

$$\text{donc } e = \frac{f'}{1500}$$

En considérant ce cercle de confusion, le nombre d'ouverture N de notre objectif et le grandissement g_y , nous pouvons compléter la caractérisation du dispositif optique par le calcul de la latitude de mise au point Δ_x puis de la profondeur de champ. La latitude de mise au point définit « la distance sur laquelle la surface sensible peut être déplacée tout en conservant une netteté relative ».

$$\Delta_x = Ne(1 - g_y) \quad \text{avec} \begin{cases} N, \text{ le nombre d'ouverture} \\ e, \text{ le cercle de confusion} \\ g_y, \text{ le grandissement transversal} \end{cases}$$



y. Schéma optique du principe de profondeur de champ.

En proxiphotographie ($1 > g_y > 0.1$), comme en macro ($10 > g_y > 1$) et en microphotographie ($g_y > 10$), la profondeur de champ ne dépend quasiment plus de la focale. Plusieurs formules simplifiées existent pour déterminer le volume de netteté en la négligeant. Sous les conseils de Pascal Martin, nous utiliserons l'équation suivante :

$$s - p = p - r = \frac{\Delta_x}{g_x} Ne\left(\frac{1 - g_y}{g_y^2}\right)$$

La profondeur de champ, comprise entre le premier plan net r et le dernier plan net s , est égale au rapport de la latitude de mise au point Δ_x sur le grandissement axial g_x qui est égal au carré du grandissement transversal g_y .

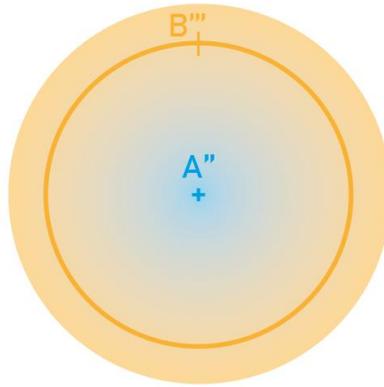
Profondeur de champ :

$$s - p = p - r \quad \text{avec} \begin{cases} p, \text{ la distance de mise au point} \\ r, \text{ le premier plan net} \\ s, \text{ le dernier plan net} \end{cases}$$

Grandissement axial :

$$g_x = g_y^2$$

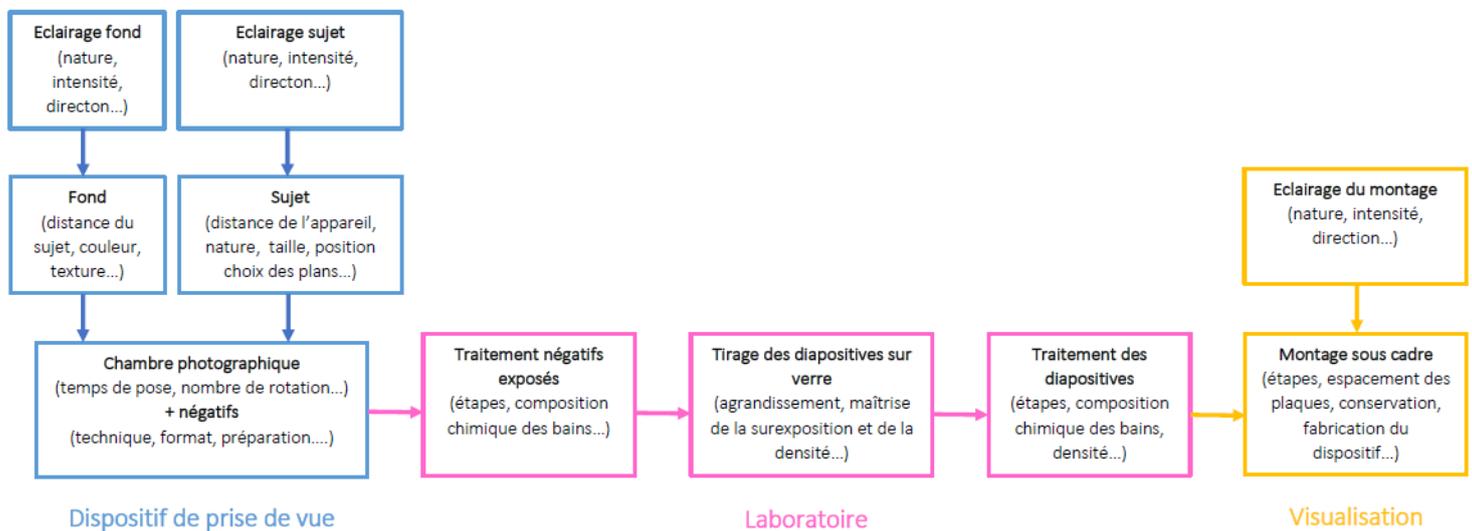
Il est tout de même nécessaire de rappeler l'aspect théorique et évaluatif de ces calculs. Cette représentation en forme de couronne reste symbolique et théorique. En réalité, la frontière du net au flou n'est pas stricte et précise. La transition est plus progressive, et n'est pas parfaitement centrée autour du plan de mise au point. Elle évolue différemment avant et après ce plan. La distinction visuelle du flou/net dépend également de la perception subjective du spectateur. La valeur du cercle de confusion e reste une approximation. De plus, nous ne prenons pas en compte certains paramètres comme les aberrations optiques de l'objectif ou encore la nature de la surface sensible. Un capteur numérique et un film argentique ne procureront pas les mêmes sensations de flou. Les expérimentations pratiques peuvent nous surprendre. Il est donc primordial de prendre en considération tous les aspects du processus, de l'analyse du procédé à la présentation des résultats expérimentaux, en passant par la conception du dispositif.



z. Schéma simplifié de la transition flou/net réelle.

2.2. Définition des paramètres fondamentaux

Nous connaissons à présent le concept optique à partir duquel est conçu le dispositif de prise de vue. Grâce à ses calculs et à diverses expérimentations techniques et mécaniques, Louis Lumière définit également les contraintes principales qui conditionnent le choix des différents éléments intervenant dans la chaîne expérimentale.



aa. Chaîne expérimentale du procédé de photo-stéréo-synthèse.²³

²³ Réinterprétation du schéma de Franck Malécot, *Le procédé de photographie en relief de Louis-Lumière : « la Photo-stéréo-synthèse »*, Mémoire de recherche en traitement des images (sous la direction de M. MARTIN Pascal), Saint-Denis, École Nationale Louis-Lumière, 2003, p.15.

2.2.1. Limites du procédé

Pour ce dispositif, Louis Lumière emploie un objectif de type anastigmat de 210 mm de focale, qui est la focale normale du format 18x24 cm. Opter pour une plus longue focale n'aurait pas été judicieux au vu de leur plus faible ouverture. En effet, pour ce procédé, l'objectif doit proposer une grande ouverture relative pour augmenter la quantité de flou. A contrario, les focales plus courtes restaient assez rares à cette époque.

Le choix du grandissement $g_y = p'/p$ est également limité. $|g_y|$ doit être inférieur à 1 pour que l'image soit plus petite que l'objet et rester également fixe durant tout le procédé. Il est imposé par le choix du sujet et la surface sensible. Le sujet étant un portrait, nous pouvons approximativement évaluer la hauteur d'un visage à 40 cm. L'objectif est un 210 mm et l'émulsion est au format 18x24cm. Pour obtenir une image du portrait ni trop petite ni trop grande, Louis Lumière opte pour un rapport g_y de 0,5, en effectuant sa mise au point à 60 cm. L'image du visage est donc deux fois plus petite que le visage réel du sujet. Le facteur de grandissement étant compris entre 0.1 et 1, nous nous plaçons dans le domaine de la proxiphotographie. Ce procédé nécessite donc l'emploi des formules utilisées en macrophotographie.

Enfin, d'après ses expérimentations, Louis Lumière limite la circonférence h décrite par l'objectif à 80mm. Si cette contrainte n'est pas respectée, l'ingénieur décrit la présence d'une anamorphose conique altérant l'apparence de l'image. Cette altération visuelle est due à l'évolution différente du flou en avant et en arrière du plan de netteté mais aussi à l'accentuation trop importante des aberrations optiques, bien que l'objectif soit anastigmatique. Cette dénomination signifie qu'il est corrigé de l'aberration sphérique, de la coma et de l'astigmatisme. Pour un rapport p/p' de 2, Louis Lumière décide alors, après plusieurs expérimentations, d'opter pour une rotation du corps avant de 4 cm de rayon. Grâce à la relation N°1, il obtient un rayon de rotation de 6 cm pour le corps arrière de la chambre.

Choix expérimentaux de Louis Lumière

Emploi d'un objectif anastigmat 210 mm, f/4.5

Format 18*24 cm

Taille du sujet (un visage) = 40 cm environ

Rapport $p/p' = 2$ ou $g_y=1/2$, $p = 63$ cm, $p'=31.5$ cm

Rayons des bielles du corps avant $h = 4$ cm

Rayons des bielles du corps arrière $H = 6$ cm

2.2.2. Quantification théorique du flou

À partir de ces valeurs, nous pouvons quantifier théoriquement le flou/net produit par le dispositif. Tout d'abord, le lieu des centres des cercles de diffusion d' , dû à la différence focale, peut être déduit avec la relation N°2. En considérant un point B, le plus éloigné du plan de mise au point d'une distance hypothétique d de 10 cm, cette distance d' est de 3,77mm. Ainsi, le diamètre d'augmentation artificielle de la tache de flou due à la rotation du dispositif est égal à 7,54mm.

$$\text{Relation N°2 : } d' = h * g_y * \frac{d}{p - d}$$

$$d' = 4 * \frac{1}{2} * \frac{10}{63-10} = 0.377 \text{ cm} = 3.77 \text{ mm}$$

$$3.77 * 2 = 7.54 \text{ mm}$$

Louis Lumière trouvait un résultat légèrement différent, 7,48mm. Il est ensuite nécessaire de calculer le diamètre de la tache de centre B''', ou le diamètre du flou lié à la différence focale, en utilisant la relation n°3. Le résultat est de 4,4mm.

$$\text{Relation N°3 : } D_t = \frac{f}{N} * \frac{p'_1 - p'}{p'_1}$$

Trouver p'_1 avec la relation de conjugaison : $p'_1 = \frac{1}{\left(\frac{1}{21} - \frac{1}{53}\right)} = 34,78 \text{ cm}$

$$D_t = \frac{21}{4.5} * \frac{34,78 - 31,5}{34,78} = 0,44 \text{ cm}$$

Diamètre extérieur de la couronne : $D_t + 2 * d'$

$$4.4 + 2 * 3.77 = 11.94 \text{ mm}$$

Ainsi, le diamètre extérieur de la couronne, est de 11.94mm. Cette valeur diverge de celle exprimée par Louis Lumière qui estime le diamètre de la tache de centre B''', ou le cercle de diffusion, à 4,6 mm et le flou total à 12,08mm. Cette différence reste minime.

Nous pouvons compléter ce calcul en déterminant le diamètre intérieur de cette même couronne, qui délimite théoriquement la zone de netteté sur l'image. Ce diamètre correspond au cercle de confusion de notre surface sensible.

Diamètre intérieur de la couronne :

$$e = f' * \alpha \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{1}{1500} \text{ rd} \quad \text{donc} \quad e = \frac{210}{1500} = 0.14 \text{ mm}$$

À partir de cette valeur, nous pouvons approfondir notre analyse optique en calculant la profondeur de champ et la latitude de mise au point de cette configuration. Lorsque $g_y < 1$, la zone de netteté se répartit équitablement de part et d'autre du plan de mise au point. La latitude de mise au point correspond donc au double de Δ_x .

Calcul de la latitude de mise au point :

$$2\Delta_x = 2 * N * e * (1 - g_y)$$

$$2\Delta_x = 2 * 4.5 * 0.14 * (1 - (-0.5))$$

$$2\Delta_x = 1.89 \text{ mm}$$

La profondeur de champ, qui s'étend du premier plan net au dernier plan net au niveau du sujet, est directement liée à cette dernière distance par le grandissement axial g_x , qui est égal au carré du grandissement transversal g_y .

$$s - p = p - r = N * e * \left(\frac{1 - g_y}{g_y^2}\right)$$

$$\Leftrightarrow s - 630 = 630 - r = 4.5 * 0.14 * \left(\frac{1 - (-0.5)}{0.5^2}\right)$$

$$\Leftrightarrow s - 630 = 630 - r = 3.78$$

$$\Leftrightarrow s = 630 + 3.78 = 633.78 \text{ mm} \quad r = 630 - 3.78 = 626.22 \text{ mm}$$

$$\text{Profondeur de champ} = 3.78 * 2 = 7.56 \text{ mm} \text{ ou } s - r = 633,78 - 626,22 = 7,56 \text{ mm}$$

Pour terminer, si nous cherchons à obtenir les mêmes valeurs de flou avec un simple objectif fixe, sans rotation, le diamètre d'ouverture du diaphragme adéquat est égal à celui déterminé par Louis Lumière, malgré nos résultats différents. Pour un diamètre de flou total de 12.08 mm, l'ingénieur estime cette ouverture de diaphragme à 1.6 pour un objectif angulaire de 50°. Nos calculs nous mènent à un résultat similaire de 1.7 après arrondissement au dixième.

Calcul de l'ouverture de diaphragme équivalente :

$$N = \frac{f'}{\emptyset P_e} \quad \frac{D_t}{\emptyset P_e} = \frac{p'_1 - p'}{p'_1}$$

Si $D_t = 12.08 \text{ mm}$

$$\emptyset P_e = \frac{12.08 * 347.7}{347.7 - 315} = 128.45 \text{ mm}$$

$$N = \frac{210}{128.45} = 1.63$$

Si $D_t = 11.94 \text{ mm}$

$$\emptyset P_e = \frac{11.94 * 347.7}{347.7 - 315} = 126.96 \text{ mm}$$

$$N = \frac{210}{126.6} = 1.658 \approx 1.7$$

2.2.3. Le sujet

Louis Lumière limite l'expérimentation de ce procédé à la réalisation de portraits de sa famille, comme son frère Auguste ou sa fille Yvonne, ainsi que quelques personnages plus célèbres comme Edouard Herriot par exemple ou encore le buste du Maréchal Foch²⁴. Nous pouvons nous questionner sur la capacité de cette technique à s'adapter à d'autres formes de photographies, telle que la nature morte par exemple. Mais le grandissement adopté restant fixe, la profondeur et la taille du sujet représenté restent limitées par le dispositif. Il est en effet inenvisageable d'appliquer la photo-stéréo-synthèse à la reconstitution d'un paysage ou d'un édifice architectural. De plus, un visage observé frontalement est un volume relativement continu dans la profondeur. Les reliefs principaux du visage comme le nez, les lèvres ou encore les oreilles dessinent naturellement des plans régulièrement espacés. Louis Lumière s'appuie sur ces éléments pour déterminer ses différents plans de netteté. La section des épaules par le cadre de l'image reste cependant un frein à la sensation de relief. Elle renvoie intuitivement le spectateur à la perception d'une image plane. Nous pouvons émettre l'hypothèse qu'un sujet plus petit, dont l'image respecte les limites de la surface sensible, peut accentuer l'impression de relief.

D'un point de vue pragmatique, le choix d'un sujet vivant complique la séance de prise de vue. En effet, le protocole relativement long met son l'immobilité à rude d'épreuve. Nous pouvons alors imaginer que Louis Lumière installait ses sujets assis, bien évidemment, et immobilisait leur visage grâce à un repose-tête. A l'aube de la photographie de portrait, cet accessoire restait indispensable pour obtenir une image nette du sujet.

Concernant l'éclairage utilisé pour la prise de vue, aucune information n'est précisée dans le brevet. En observant les quelques plaques conservées à Lyon et à Bièvres, nous remarquons que le sujet est éclairé en plongée. Une source lumineuse placée en hauteur et légèrement frontale permet de dessiner les traits principaux du visage qui ont déterminé le choix des plans de mise au point. Les ombres mettent ainsi en valeur le creux des yeux, l'ouverture de la bouche, le cartilage de l'oreille, le bout du nez et souligne la courbe du menton. Les ombres restent tout de même assez douces et le contraste n'est pas très appuyé. Nous pouvons alors imaginer que Louis Lumière éclairait son sujet à la lumière naturelle, grâce

²⁴ Discours de Charles Fabry, *Jubilé Louis Lumière*, 6 novembre 1935, monographie imprimée, Paris, 1936, p.50.

à des verrières placées au plafond de l'atelier par exemple. Au vu du temps de pose assez long, cette configuration paraît tout à fait justifiée. Mais sur certaines photographies, l'éclairage du fond remet en doute cette hypothèse de lumière naturelle. En effet, si nous observons le portrait de son fils Henri, un cercle lumineux est facilement distinguable sur le fond papier. Cette forme induit alors l'utilisation d'une source lumineuse artificielle plus focalisée. Dans ce cas, nous pouvons supposer l'emploi d'une lampe à décharge.

2.2.4. La surface sensible

Le brevet déposé par Louis Lumière ne contient que très peu d'informations concernant la chimie de son procédé. Comme dans la plupart des brevets photographiques, l'inventeur divulgue les informations techniques concernant son dispositif de prise de vue mais refuse de dévoiler les recettes et les produits chimiques utilisés. Pour le procédé de photo-stéréosynthèse, nous savons seulement que le photographe emploie une première émulsion négative au gélatino-bromure d'argent sur support en verre pour la capture, avec laquelle il tire ensuite une image positive sur une seconde plaque. Cette démarche lui permet de maîtriser plus précisément la densité et le contraste de ses positifs finaux, mais également de mettre en valeur certains éléments visuels grâce à des masques, ou encore d'obtenir des clichés plus grands par l'utilisation d'un agrandisseur.

Le choix du gélatino-bromure d'argent sur verre est loin d'être surprenant. La transparence du support en verre s'impose en effet comme une évidence pour permettre la transmission de la lumière lors de la superposition finale des images. La gélatine aux halogénures d'argent présente également plusieurs avantages. Pour commencer, l'émulsion est sèche, contrairement aux plaques collodionnées qui sont humides. L'opérateur peut alors séparer l'instant de couchage en laboratoire du temps de capture. Les plaques peuvent être préparées en avance. Cette caractéristique est à l'origine d'un réel bouleversement du domaine photographique dès son invention par Richard Maddox en 1871. Grâce à une amélioration de la sensibilité de l'émulsion par Charles Benett en 1878 par une simple opération de chauffage, la production de ces plaques gélatinées s'est rapidement industrialisée pour devenir ensuite massive. Les plaques prêtes à l'emploi affluent, leur coût baisse. Plus accessible, la pratique photographique s'ouvre désormais à un plus large public. Véritable révolution économique,

sociale et artistique, la gélatine sur plaque de verre disparaît progressivement avec l'apparition du support souple en plastique en 1889, mais reste néanmoins en usage jusque dans les années 1940. Le rendu particulier des plaques photographiques notamment en termes de texture du grain et de restitution des détails ne peut être remplacé par la pellicule.



Photographie d'une boîte de plaques « Étiquettes bleues » des frères Lumière.

Par ailleurs, les frères Lumière ont commercialisé pendant près de 60 ans leurs propres plaques sèches au gélatino-bromure d'argent. Les plus connues portent l'appellation « Étiquette bleue ». Mises au point en 1883 et disponibles dès 1890 jusqu'aux années 1950, elles proposaient une sensibilité de 4 asa, et un temps de pose record de 1/60 de seconde. Elles seront supplantées quelques années plus tard par la sensibilité double des « Étiquettes violettes » *. Dès 1889, l'usine Monplaisir des frères Lumière les produisait industriellement et diffusait quotidiennement l'équivalent de 5000 boîtes de 12 plaques prêtes à l'emploi en 25 formats, du 4X4cm au 50X60cm. Le protocole industriel de fabrication de ces plaques est décrit par une fresque aujourd'hui exposée de manière permanente au sein du jardin de l'Institut Lumière, à quelques mètres du hangar de l'ancienne usine. Chaque étape est illustrée d'une image, tirée d'un reportage photographique de 1895 lui-même réalisé sur les plaques Lumière, accompagnée d'une légende explicative.



bb. Photographie de la fresque *Les étapes de fabrication des plaques photographiques, de la matière brute au produit fini, un parcours dans l'usine Lumière Monplaisir en 1895*, jardin de l'Institut Lumière, Lyon, 2021.²⁵

La chaîne de production industrielle de l'usine Lumière peut être détaillée ainsi :

- ***Découpage et nettoyage des plaques de verre***

*« L'usine reçoit deux wagons de feuilles de verre tous les jours, ce qui représente une consommation de 6 à 7 tonnes quotidienne. Les feuilles de verre sont découpées sur gabarit en bandes de 60 cm ayant comme largeur la dimension de l'un des formats les plus courants. Pendant cette opération, un premier tri des verres défectueux est effectué. Les bandes de verre sont ensuite lavées à l'eau afin d'enlever les poussières dont elles sont recouvertes. »*²⁶

Ce rinçage à l'eau est suivi d'un nettoyage à l'acide.

*« Cette machine permet de passer les verres dans un mélange à base d'acide sulfurique afin de se débarrasser des impuretés qui empêcheraient la prise de l'émulsion. Après cette opération, toute la fabrication se poursuit à la lumière inactinique verte. »*²⁸

La qualité du verre, son état de surface et sa composition impactent considérablement la qualité de l'émulsion sensible finale. Dans leur Cours de chimie photographique, Pierre Montel et Pierre Glafkidès précisent : *« Le verre doit être rigoureusement plat et sans défaut interne (exempt de bulles, de points noirs) »*²⁷.

²⁵ Photographie réalisée avec mon téléphone lors de mon passage à Lyon.

²⁶ Citations des légendes de la fresque.

²⁷ Pierre Montel et GLAFKIDES Pierre Glafkidès : *Cours de chimie photographique*, Éditions Le Temps Apprivoisé, Paris, 1992, p.295.

• *Préparation de l'émulsion sensible*

« Dans l'atelier de chimie, l'émulsion est fabriquée par la dissolution d'un mélange de gélatine, de nitrate d'argent et de bromure d'ammonium. »²³

Une émulsion photosensible est une couche de gélatine contenant des cristaux d'halogénures d'argent en suspension. Sa préparation est bien évidemment déterminante pour l'obtention d'une qualité de plaques photosensibles optimale. De nombreux procédés d'émulsification existent pour des substances aux propriétés spécifiques, mais restent souvent un mélange de nitrate d'argent et de bromure. Dans son article, Charles Fabre synthétise parfaitement le processus en quelques lignes :

« Une dissolution chaude de gélatine dans l'eau est additionnée d'un bromure alcalin ; on la mélange ensuite à une solution aqueuse et tiède de nitrate d'argent, faite en proportion telle que dans son état final le mélange contienne un léger excès de bromure alcalin : il se forme du bromure d'argent qui, au lieu de se précipiter, reste en suspension dans le liquide et constitue une émulsion d'un blanc laiteux, très sensible à la lumière; le liquide tient aussi en dissolution un nitrate alcalin. Par refroidissement, l'émulsion se prend en gelée, insoluble dans l'eau froide ; par conséquent, si on soumet cette gelée à l'action de l'eau, le nitrate alcalin ainsi que le bromure en excès se dissoudront, et après ce lavage l'on obtiendra un mélange de gélatine et de bromure d'argent que l'on pourra verser à chaud sur des plaques de verre et qui formeront ainsi des couches sensibles à la lumière. »²⁸

La gélatine est une substance transparente voire légèrement jaune extraite par hydrolyse et cuisson du collagène qui constitue le tissu cellulaire de la peau et des os de certains animaux. Chimiquement, la gélatine est, par la condensation des amino-acides qui la constituent, une protéine. Corps amphotère, cette substance n'est pas inerte. Ses réactions varient selon le pH du milieu. En milieu acide, elle est « *susceptible de former des sels de protéine* », tandis qu'un milieu basique favorisera la formation de protéinates. Le point d'équilibre des propriétés du corps, ou point isoélectrique, est voisin d'un pH de 4.8. La valeur ne reste qu'une moyenne, elle dépend de son origine et de sa préparation chimique. Pierre Glafkidès, dans son deuxième livre

²⁸ Charles Fabre : *Traité encyclopédique de photographie*, Tome deuxième, Paris : Gauthier-Villars et fils, 1890, p.203.

Physique et chimie photographiques, propose des valeurs indicatives plus précises : « *la peau de veau préparée en méthode alcaline possède un point isoélectrique situé entre 4.7 et 5.2, avec la peau de porc traitée à l'acide à 8.2* »²⁹. En ce point, la tension de surface, la viscosité et le gonflement de la gélatine sont relativement stables. Sa tension surfacique dépend de la complexité de sa structure interne qui évolue constamment. Au repos, la dureté de la protéine ne cesse d'augmenter, liée à sa viscosité. Cette dernière caractéristique, stable en milieu basique et moindre en milieu acide, dépend de la longueur de la chaîne moléculaire de la gélatine et de la température. Dans un environnement chaud, la viscosité du corps baisse, jusqu'au point de fusion de la gélatine. Inversement, elle augmente en basse température jusqu'à son point de solidification. Ces deux limites varient selon la concentration d'eau dans la gélatine. Pierre Glafkidès précise : « *Il ne faut pas confondre viscosité et prise en gelée, qui dépendent de facteurs différents (longueur de la chaîne moléculaire pour la première, et des ponts hydrogène formés entre des groupes NH et CO pour la force en gelée, plus stable en milieu acide).* »³⁰. Le gonflement de la gélatine, accéléré par un pH faible, dépend lui aussi de la température. La quantité d'eau absorbée augmente si la chaleur augmente. Il varie également selon la concentration en gélatine, la pression interne du milieu dans lequel elle est immergée et la température du séchage. Avec un séchage à froid, le gonflement évolue normalement, tandis qu'un séchage à chaud provoque la contraction de la gélatine pendant son refroidissement.

Comme nous venons de le constater, les gélatines possèdent de nombreuses propriétés qui influent directement sur la qualité de notre émulsion, et il s'avère difficile de les classer. À noter que les gélatines photographiques sont constituées de plusieurs gélatines différentes. Dans le commerce, elles sont généralement catégorisées selon leur dureté. Une gélatine dure a été peu attaquée par hydrolyse, contrairement à une gélatine tendre, ou molle. En immersion, la première se gonfle plus lentement, l'absorption du liquide étant plus lente. Transposée à la photographie, une gélatine trop dure peut empêcher la bonne pénétration du révélateur et ainsi voiler l'image. Les substances gélatineuses sont également classées selon leur force en gelée, désignée par son degré Bloom. L'indice bloom d'un gel ou d'une gélatine exprime sa résistance à l'enfoncement sur une échelle de 50 à 300 par tranche de 20. Plus cette valeur

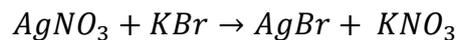
²⁹ GLAFKIDÈS Pierre, *Chimie et physique photographiques*, Paris, Publications Paul Montel, 1976, p.293.

³⁰ *Ibid.* p.294.

indicative est faible, plus la gélatine est tendre et favorise la pénétration d'une solution dont la quantité peut alors être réduite.

La sensibilisation de la gélatine commence par sa dissolution dans l'eau avec un bromure alcalin comme le bromure de potassium *KBr*. Ce dernier réagit avec le nitrate d'argent contenu dans la solution suivante pour former l'halogénure d'argent sensible à la lumière.

*Equation de la réaction avec le bromure de potassium*³¹



Les concentrations en bromure de potassium et en nitrate d'argent sont étudiées pour obtenir un surplus de cristaux de bromure d'argent qui reste alors en suspension dans la gélatine. Celle-ci est refroidie pour retrouver sa consistance de gelée pour ensuite être lavée. L'excès de nitrate de potassium, qui cristalliserait à la surface, et l'excès de bromure alcalin, nuisible pendant le développement, sont dissous. L'émulsion est prête à être versée sur les plaques de verre.

Néanmoins, Charles Fabre nous précise la différence entre une préparation artisanale et une préparation industrielle. Pour une production de plaques en quantité massive, le lavage de la gélatine représente une « *dépense de main d'œuvre, d'eau et de matériel considérable* ». Les procédés sont alors « *plus simples* ». Fabre nous renseigne même sur le procédé employé par l'usine Lumière :

*« MM. Lumière et fils, dont il convient de citer le nom lorsqu'il s'agit de la production d'excellentes plaques au gélatino-bromure d'argent, se sont servis de la réaction produite par le bromure d'ammonium sur l'oxyde d'argent dissous dans l'ammoniaque. Il se forme du bromure d'argent, de l'ammoniaque et de l'eau. La présence de ces substances ne nécessite pas de lavages. En effectuant cette réaction au sein de solutions gélatineuses, on peut éliminer facilement l'ammoniaque, et l'émulsion ne contient plus que du bromure d'argent ; elle peut alors être employée sans lavages. Il y a donc de ce chef une grande simplicité de travail. »*³²

³¹ *Ibid.*

³² Charles Fabre : *Traité encyclopédique de photographie*, Tome deuxième, Paris : Gauthier-Villars et fils, 1890, p.255.

La sensibilité de l'émulsion photographique obtenue dépend donc des conditions de cette précipitation. Si elle est lente, les cristaux de bromure d'argent sont très fins. Si elle est rapide, les grains formés ont des dimensions et des aspects plus diversifiés.

- **Maturation de l'émulsion**

« L'émulsion repose ensuite 5 à 6 jours dans des jarres en grès afin d'augmenter la sensibilité du gélatino-bromure d'argent ainsi obtenu. »

Après élimination du nitrate d'argent en excès, la gélatine est refondue et maintenue à une température constante pendant une durée prédéterminée. Cette action entraîne la formation de centres de sensibilités à l'intérieur et à l'extérieur des cristaux. Plus le temps de maturation est long, plus ces centres se développent et se multiplient. L'émulsion « mûrit »³³, sa sensibilité augmente à la lumière.

- **Étendage de l'émulsion**

« Les bandes de verre passent sous un distributeur automatique qui égalise l'émulsion uniformément sur toute leur surface, puis dans un bain d'eau glacée qui refroidit instantanément l'émulsion et la solidifie. »

Une nouvelle fois, la production industrielle diffère de la méthode artisanale. La fabrication massive de plaques impose l'emploi de machines automatisées qui produisent un nombre élevé de plaques avec une régularité et une homogénéité d'étendage parfaite, en des temps records. Grâce à une translation à vitesse constante des courroies sans fin strictement horizontale, les plaques de verre passent sous un appareil spécial qui déverse la gélatine sur leur surface, avec une pression et une température constante.

En fin de circuit, les plaques peuvent être séchées pour la dessiccation de la couche prise en gel qui dure au moins dix-huit heures. Toujours en quête d'une production massive régulière,

³³ GLAFKIDÈS Pierre, *Chimie et physique photographiques*, Paris, Publications Paul Montel, 1976.

le séchage est lui aussi effectué avec des machines. L'usine Lumière emploie des réchauffeurs et des régulateurs de température spécifiquement conçus.

- ***Découpage des plaques, contrôle de qualité et mise au rebut des verres***

« Après séchage, les bandes de verre sont ensuite découpées en plaques par d'autres ouvrières. Des plaques prises au hasard subissent alors un contrôle de qualité par des tests de prise de vue afin d'éliminer une série de plaques présentant des défauts d'émulsion. Les déchets provenant de la découpe des verres défectueux ou de mauvaises séries s'élèvent à une tonne par jour. Ils sont vendus à la fabrique de bouteilles. »

Pour être mené rapidement, des appareils spécifiques ont été conçus. Ils retirent une fine bande d'émulsion pour découper le verre au diamant. Une autre technique propose l'utilisation d'une règle-guide et d'un disque en acier, appelé « coupe-verre » dans le commerce, qui divise selon lui plus facilement la couche de gélatine.

- ***Emballage, transport, stockage et expédition des plaques***

« Les plaques sont individuellement enveloppées dans du papier orange pour les protéger de la lumière, puis emballées par douzaine dans des boîtes en carton.

L'emballage des plaques est également optimisé grâce à un système rainuré et mécanisé qui accueille les plaques sensibles, les aligne et les serre pour qu'elles soient enfin emballées et placées dans leur boîte en carton.

« Après le collage des étiquettes de la fabrique, les boîtes sont amenées à la menuiserie. Des caisses en bois sont fabriquées sur site par des ouvriers de l'usine. »

Les boîtes de plaques en carton y sont soigneusement rangées pour être enfin stockées dans le hangar d'expédition avant d'être envoyées et livrées aux revendeurs des produits Lumière.

La chaîne de production des plaques Lumière est terminée. Industrielle et automatisée, sa précision et sa régularité ne peuvent être comparées à celles d'une chaîne artisanale, qui

n'assure pas une telle maîtrise de l'émulsion. Pour nos expérimentations ultérieures, l'étude de cette seconde méthode apparaît indispensable dans l'optique d'optimiser chaque étape du processus.

2.2.5. La technique de visualisation

Le procédé de photo-stéréo-synthèse nécessite un dispositif de visualisation particulier. Lorsque les plaques ont été exposées et traitées, elles doivent être montées les unes derrière les autres, dans l'ordre des plans réels du sujet qu'elles représentent, en respectant certaines contraintes. Pour la restitution correcte du relief, l'opérateur doit « *remettre les images dans la position qu'elles occupaient dans l'espace* »³⁴, pour reprendre les termes de Charles Fabry. Ainsi, leur espacement doit être proportionnel à l'espacement réel des plans de netteté, selon le rapport de reproduction. En observant les exemplaires conservés à Bièvres et à Lyon, nous pouvons remarquer que les premières images sont moins espacées que les dernières. Cette différence est tout simplement due à la forme d'un visage humain : la distance entre les oreilles et l'arcade sourcilière est plus grande que la distance qui sépare le bout du nez des lèvres.

Écartement élémentaire des diapositives =

Distance entre plans photographiés * coefficient agrandissement ou de réduction p/p'

Le calcul de cet espace doit donc être réalisé avant la conception du dispositif de monstration. Pour recréer l'image composite du portrait, les plaques de verre sont fixées dans un cadre de menuiserie à rainures en bois dont l'épaisseur est bien sûr déterminée par le pas et le grossissement adoptés. Sur la face avant de cette boîte est fixée une vitre de protection en verre fin qui limite le contact des photographies avec l'air ambiant pour une meilleure conservation. A l'arrière de la boîte, un verre dépoli au format des plaques photographiques permet une diffusion uniforme de la lumière sur la totalité de la surface image. Le dispositif est

³⁴ Discours de FABRY Charles, *Jubilé Louis Lumière, op.cit.p.44.*

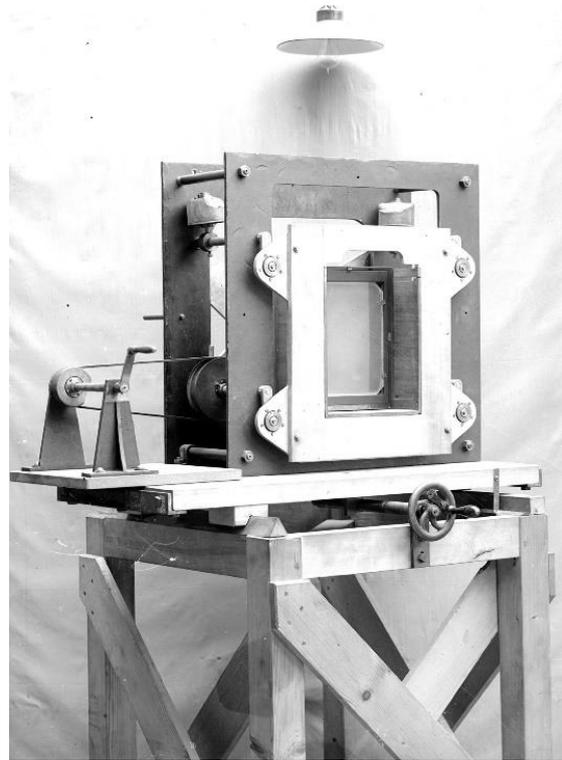
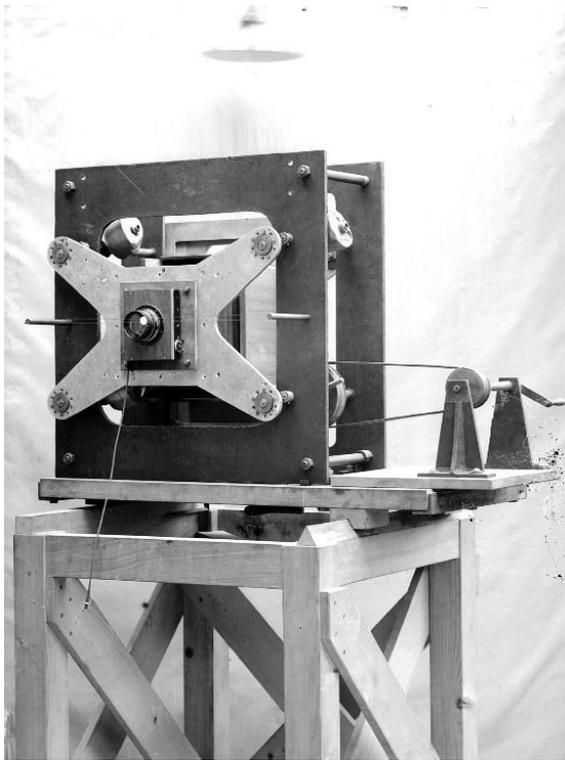
placé sur un socle fixe et stable, idéalement à la hauteur moyenne d'un être humain pour que le spectateur se situe face au portrait en relief. Pour une sensation de relief optimale, il faudrait également que l'observateur se place à une distance convenable de l'objet, plus précisément à la distance orthoscopique de la première image. En effet, la superposition des images s'effectuant par transparence, les photographies suivantes peuvent être assimilées à des projections sur la première plaque. La distance orthoscopique peut donc être ramenée à une seule et même image.

III] Reconstitution de l'appareil photographique

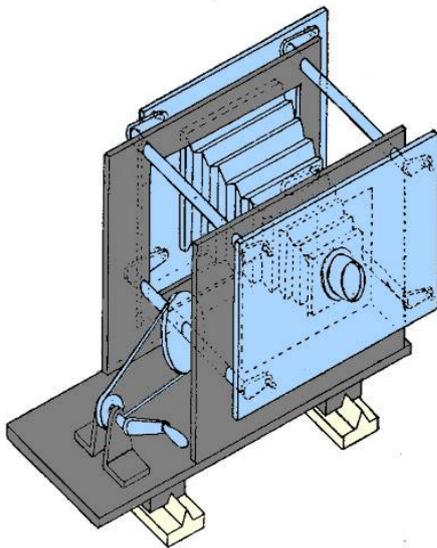
À partir du concept optique étudié précédemment, Louis Lumière imagine un dispositif de prise de vue qui lui permet de réduire la profondeur de champ pour obtenir la quantité de flou nécessaire à l'élaboration des photo-stéréo-synthèses. Dans la perspective d'une reconstitution fidèle de la technique historique, une étude approfondie et détaillée de cette chambre photographique particulière apparaît comme une évidence. Elle nous permettra de rédiger un cahier des contraintes clair et précis pour la construction de notre propre appareil.

3.1. Analyse détaillée du dispositif historique

Malheureusement, l'invention de Monsieur Lumière est restée au stade de prototype expérimental. De nos jours, le dispositif n'existe plus et la documentation à son sujet reste très limitée. Elle se constitue principalement d'une description mécanique incluse dans le brevet d'invention, accompagnée de deux photographies et de quelques croquis. Mais ne nous décourageons pas ! Ces informations nous permettent, grâce à des croquis analytiques et des recherches dans le domaine mécanique, de comprendre la fonction de chaque pièce, la nature de leurs liaisons et les contraintes dues à leur mise en mouvement. Nous pourrons ainsi, à la fin de cette analyse, émettre des hypothèses de conception et de réalisation.



cc. Photographies du dispositif de Louis Lumière.³⁵



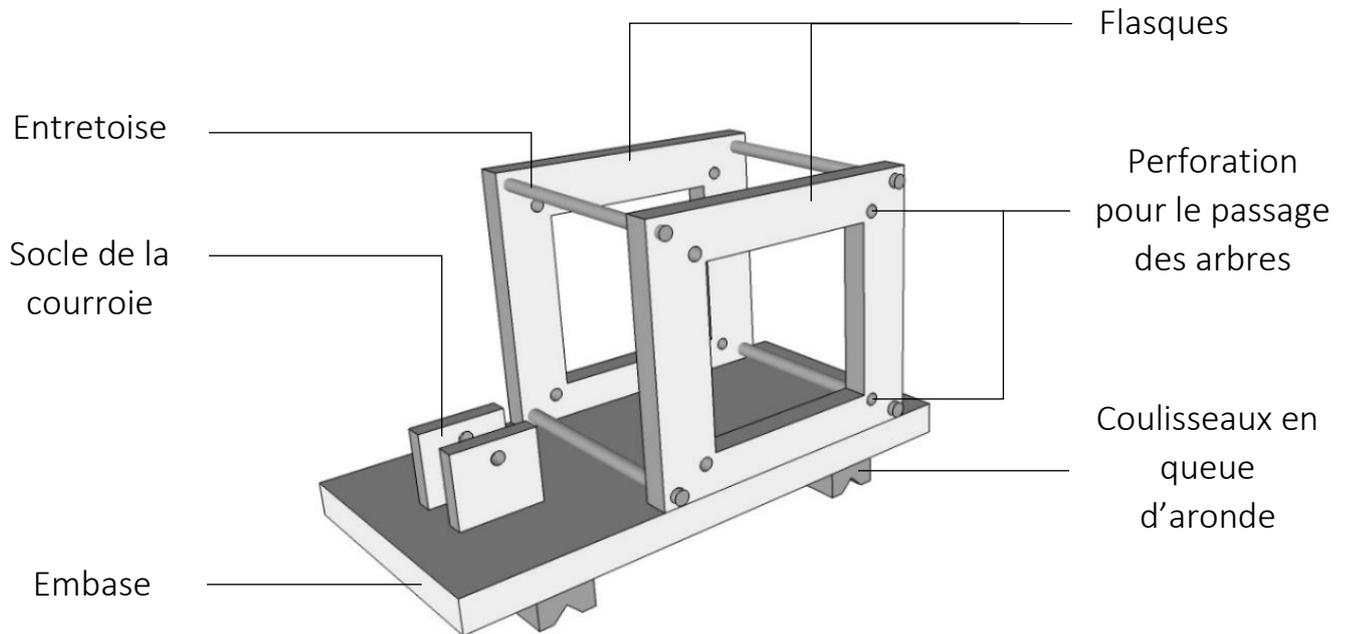
dd. Représentation 3D du dispositif historique.³⁶

En observant les photographies et les croquis fournis par Louis Lumière, nous pouvons distinguer deux sous-ensembles d'éléments. Le premier, colorisé en gris, permet la translation de tout le dispositif de prise de vue entre chaque cliché. Le second, en bleu, englobe toutes les pièces qui entrent en rotation pendant la capture de l'image.

³⁵ *Compte rendu de la séance du 8 novembre 1920*, les comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences, op.cit.p.15.

³⁶ Louis Lumière : *Procédé de stéréosynthèse-photographique par stratification*, op.cit.p.7.

- *Support en translation entre chaque capture*



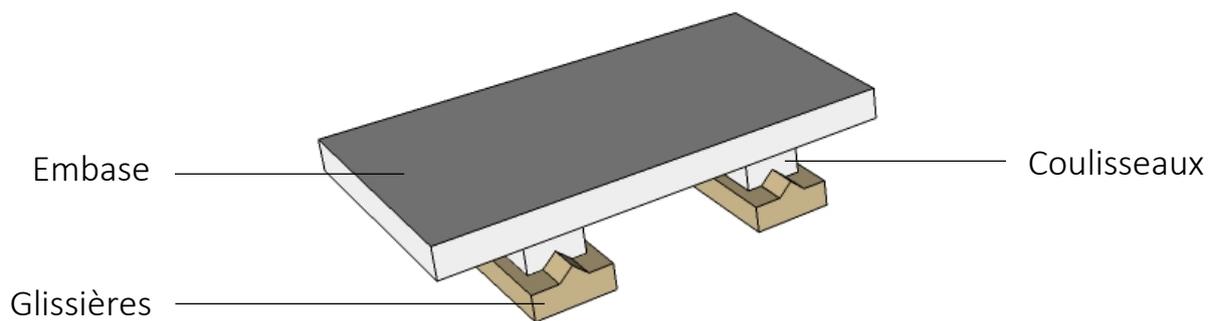
ee. Représentation 3D du bâti du support en translation.³⁷

Le bâti qui permet de déplacer le dispositif entier entre chaque image est composé de deux flasques à larges ouvertures, percées aux quatre angles pour laisser passer les axes en rotation (non-représentés sur la figure). Ces deux cadres en bois supportent tout le système en mouvement pendant la capture. Ils doivent être rigoureusement stables, statiques et résistants aux différentes vibrations. L'ajout de quatre entretoises parallèles entre ces flasques assure leur rigidité, leur immobilité et leur parallélisme. Cet ensemble repose sur une embase épaisse, strictement parallèle au sol, sur laquelle est également placé le socle du système de courroie. Pour être plus précis, ce socle, constitué de deux pans percés, est fixé sur une planchette, elle directement assemblée à l'embase. La présence de cette planchette est justifiée pour appliquer une tension convenable à la courroie, nécessaire pour la mise en rotation du dispositif.

L'embase est un plateau épais muni de coulisseaux engagés dans des glissières fixées au socle de l'appareil, comme un chariot glissant sur un rail. Dans le brevet du procédé, les coulisseaux sont décrits « en queue d'aronde ». Cependant, en observant le prototype historique, nous remarquons que Louis Lumière a préféré un système de guidage non

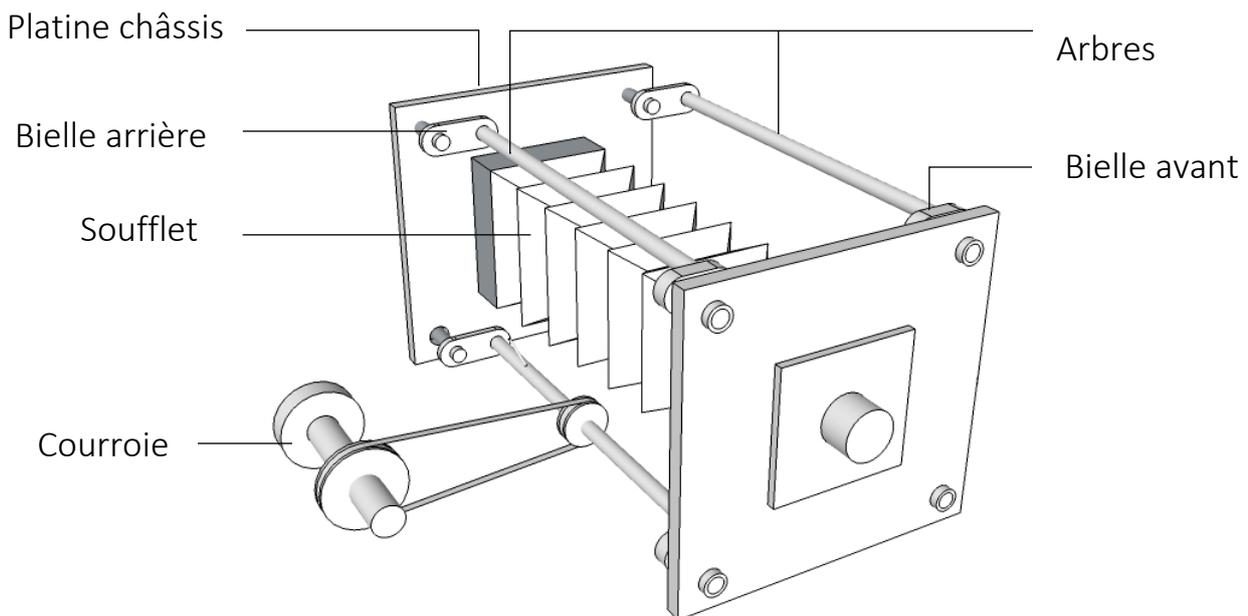
³⁷ Toutes les modélisations sont réalisées sur le logiciel Google ScketchUp.

maintenu. Avec ce type de glissière, dite ouverte, les coulisseaux ne supportent pas d'efforts latéraux significatifs, contrairement au guidage maintenu comme les montages par queue d'aronde. Le contact entre les deux pièces étant assuré par gravité, le coulisement est plus fluide et demande moins d'effort. La translation est actionnée grâce à un système de vis/écrou. Lorsque la manivelle à l'arrière du dispositif est enclenchée, la vis sans fin tourne sur elle-même en restant immobile, impose le déplacement le long de son axe de l'écrou lié à l'embase. Pour finir, deux pièces métalliques sont vissées aux champs latéraux de l'embase pour prévenir des mouvements internes du bois.



ff. Système d'embase glissante.

• *Système en rotation pendant la prise de vue*



gg. Dispositif en rotation.

Comme expliqué précédemment, les deux flasques constituant le bâti du dispositif soutiennent quatre arbres, chacun pourvu à ses deux extrémités de bielles. Ces dernières présentent un corps plus court du côté de la platine portant l'objectif que de celle portant la surface sensible. En effet, le rapport entre ces deux longueurs est égal à $p/p+p'$ afin de conserver le rapport h/H nécessaire pour garder une zone de netteté sur l'image.

$$\text{Bielle avant / bielle arrière} = p/p+p'$$

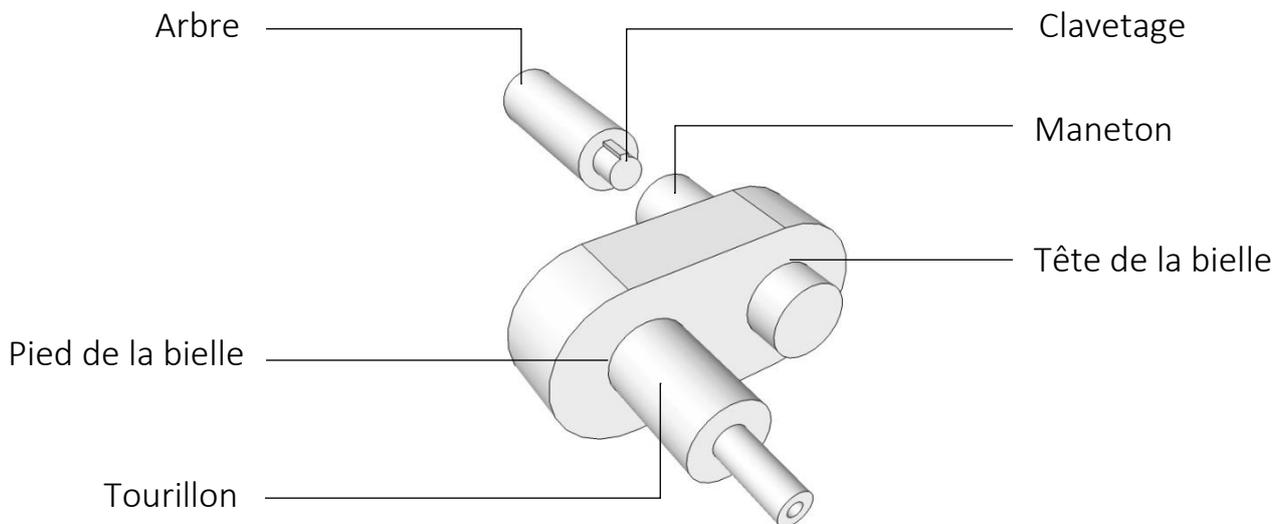
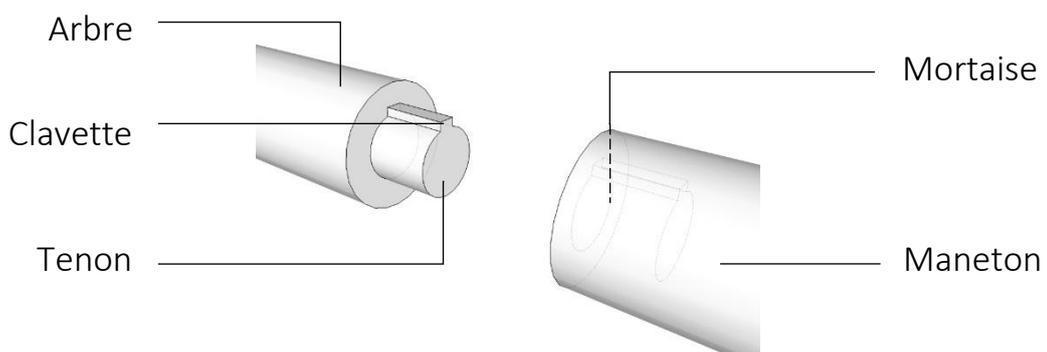


Schéma d'une bielle

Pour plus de précision, chaque arbre est claveté, de chaque côté, à un maneton, lui-même lié à la tête d'une bielle. La distance entre la tête et le pied de cette bielle, appelée l'entraxe, définit sa longueur et donc le rayon de rotation du système. Au niveau de la bague de pied se trouve un tourillon qui permet de transmettre le mouvement de rotation à la platine de l'objectif ou celle du châssis, en s'engageant dans une douille fixée à l'une ou à l'autre.



Détail du clavetage arbre / maneton

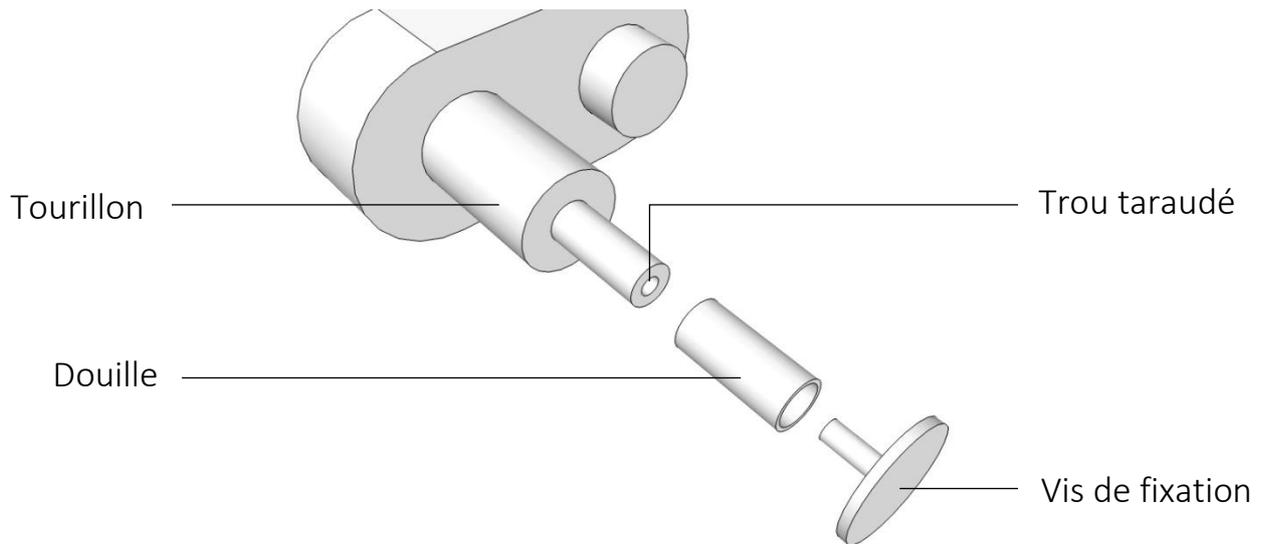


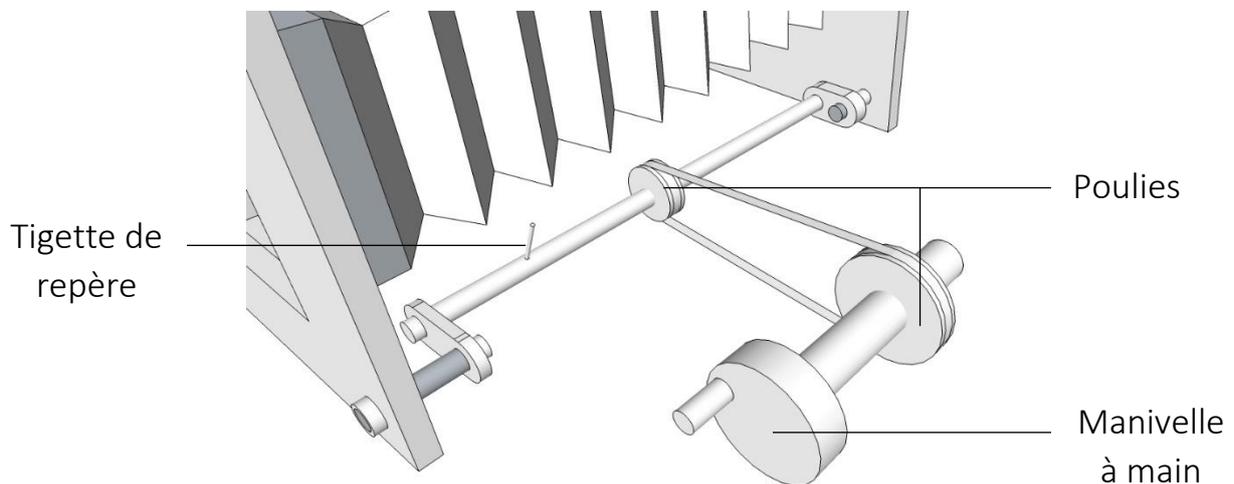
Schéma de la liaison bielle / platine

Les deux platines portant le corps avant et le corps arrière de la chambre sont donc perforées aux quatre angles pour laisser le passage des douilles et des tourillons. Elles sont reliées par un soufflet étanche à la lumière, comme une chambre classique. Le brevet ne donne que très peu voire aucune information sur ces éléments. En analysant les photographies du prototype de 1920, nous pouvons relever la présence, au niveau du corps arrière, d'une boîte rainurée qui permet le déplacement horizontal du dépoli pour effectuer une mise au point plus précise. Chaque platine présente aussi une forme un peu particulière en croix qui peut être expliquée très simplement par l'évidement des pièces pour limiter le poids imposé aux bielles.

Enfin, le mouvement de rotation est généré et imprimé à tout le dispositif par un système de poulie-courroie. L'une des poulies est reliée à l'un des quatre arbres, l'autre à une manivelle à main. Les trois autres axes n'étant pas directement en contact avec la poulie, l'ingénieur place sur chacun d'eux un poids pour une répartition plus homogène de l'inertie et réduire les vibrations.

Une tige en bois est collée à un des axes afin de pouvoir compter le nombre de tours qu'effectue le dispositif pendant la prise de vue. Répéter la rotation permet d'homogénéiser la qualité du flou, impactée par la fluidité imparfaite et non-linéaire de la poulie. En théorie, un seul tour suffirait si la vitesse angulaire de rotation restait constante. Le brevet ne présente

aucune information spécifique au temps de pose ou au nombre de tours qu'effectuait Louis Lumière pendant ses essais. L'expérimentation et le tâtonnement seront alors nécessaires pour trouver le temps d'obturation adéquat.



Système de courroie

Enfin, nous pouvons relever sur les photographies la présence d'une mire en forme de disque blanc, collée sur deux fils noirs en avant de l'objectif. Cet élément était essentiel à Louis Lumière qui expérimentait uniquement le portrait. Sans ce repère visuel, le regard du sujet photographié aurait automatiquement suivi la rotation de l'appareil. A cause du temps de pose relativement long, les yeux seraient apparus flous sur les images.

La plupart des pièces nécessitant une conception précise sont réalisées en métal. Ce choix est représentatif de l'engouement porté à cette époque par l'industrie française pour le métal et la production industrielle.

3.2. Cahier des contraintes

Grâce à cette analyse, nous pouvons à présent penser et rédiger le cahier des charges. Ce document permet de définir et baliser tout le processus de conception. Il facilite également la communication entre les différents acteurs intervenant et spécifie leurs missions. Sa forme et sa structure varient selon le type d'activité (architecture, mécanique, design ...) mais suivent un raisonnement semblable.

Suite à la lecture de divers cahiers des charges de conceptions mécaniques, et en se référant à l'article « Conception de machines spéciales : méthodologie d'élaboration de cahier des charges » publié dans le journal Mécanique et Industrie, une structure rédactionnelle simplifiée peut être proposée en synthétisant les étapes principales. Notre dispositif n'étant pas destiné à une production industrielle massive, son cahier des charges ne nécessite pas le respect rigoureux des normes appliquées à ce type de document. Ainsi, nous proposons au lecteur le raisonnement suivant :

- Définition fonctionnelle de l'appareil.
- Réalisation du schéma cinématique et détermination de l'origine des jeux admissibles par le système.
- Choix des technologies à employer.
- Cotation et dessin des pièces.
- Budgétisation du projet.

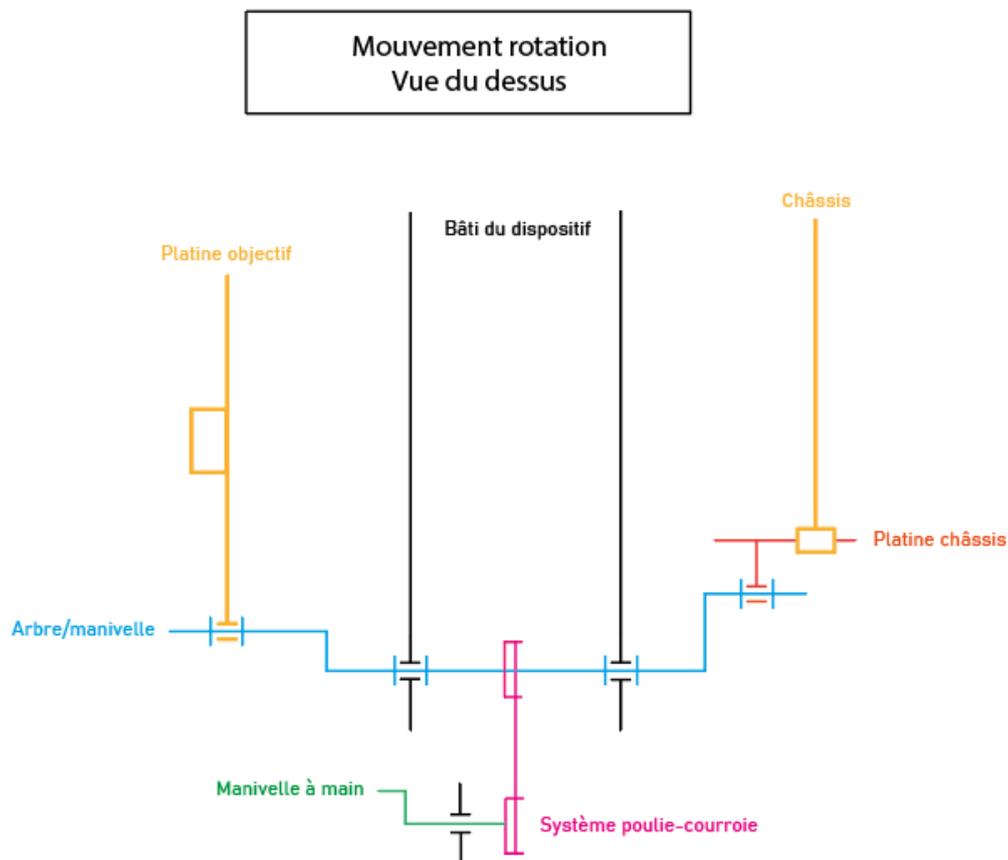
3.2.1. Descriptif des caractéristiques de l'appareil

Dans l'optique d'une reconstitution historique, le respect des caractéristiques du prototype de Louis Lumière est notre ligne directrice. En s'appuyant sur l'étude optique et technique de l'appareil d'origine, nous cherchons à concevoir un dispositif semblable dans sa forme d'ensemble qui nous permette d'obtenir une esthétique d'image similaire aux plaques de 1920. Mais notre prototype ne doit pas se limiter à une recomposition rigoureusement identique. Certains aspects peuvent être repensés et conçus différemment, notamment les systèmes et les assemblages mécaniques. L'utilisation de pièces contemporaines impose bien évidemment l'adaptation des plans.

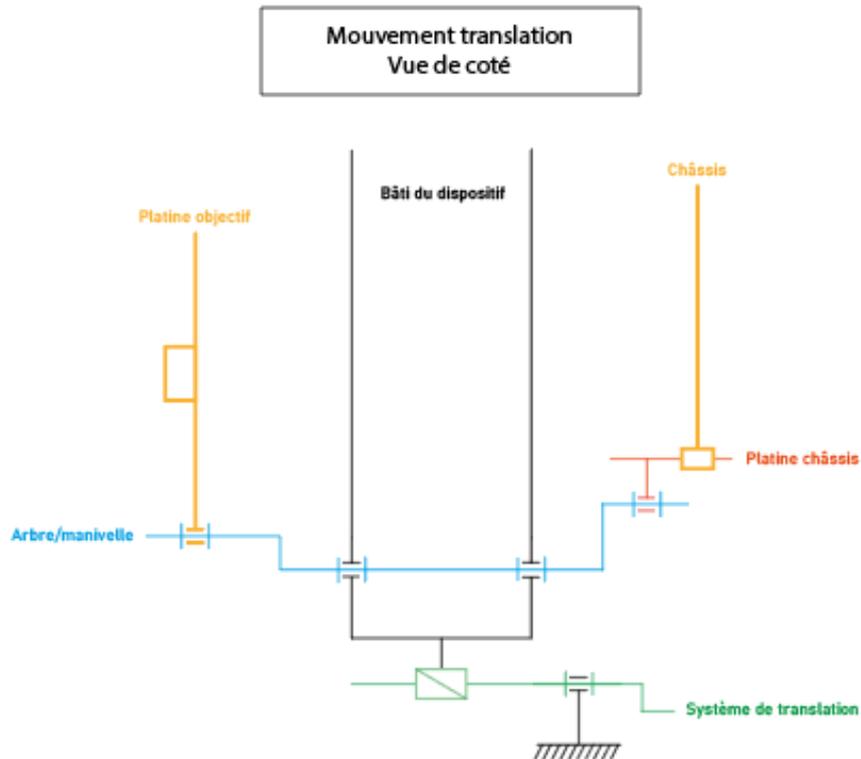
Pour la conception de notre prototype, nous avons choisi de partir d'une chambre classique entièrement modifiable afin de réduire le temps de fabrication. Après la restauration du châssis 18*24 cm, du soufflet et le choix d'un objectif de focale 210 mm, nous pourrons concevoir le mécanisme de rotation et enfin, le bâti de support et le système de translation.

3.2.2. Réalisation du schéma cinématique et définition des jeux admissibles par le système

Le schéma cinématique est une représentation normée d'un mécanisme qui vise à décrire le plus simplement les liaisons et les mouvements des pièces qui le constituent. Grâce à des symboles graphiques minimalistes, le schéma cinématique permet d'appréhender plus facilement et rapidement le fonctionnement d'un système. Il permet également de simuler et prédire un ou plusieurs comportements afin de déterminer les solutions techniques adéquates. Ce type de dessins ne tient pas compte de la forme ou des dimensions des différents composants. Il ne renseigne donc aucunement sur les technologies employées ou l'ergonomie du dispositif en question.



Réinterprétation du schéma cinématique de Franck Malécot.



Réinterprétation du schéma cinématique de Franck Malécot.

Symboles des liaisons mécaniques – NF E 04-015 – Iso 3952					
Désignation	Mouvements relatifs		Degrés de liberté	Symbole	
	Translation T	Rotation R		Représentation plane (orthogonale)	Représentation en perspective
Liaison encastrement ou liaison fixe	0	0	0	 * Si pas d'ambiguïté d'interprétation.	
Liaison pivot	0	1	1		
Liaison glissière	1	0	1		
Liaison hélicoïdale	1 (conjuguées)	1	1		

Signification des symboles des liaisons mécaniques

En analysant ces schémas, nous pouvons noter trois types de liaisons à optimiser pour diminuer les jeux et assurer le bon fonctionnement du mécanisme. Tout d'abord, nous remarquons la présence de plusieurs liaisons pivot qui permettent la rotation d'une pièce

autour d'un axe sans translation. Elles s'avèrent indispensables afin que les arbres puissent tourner à l'intérieur des flasques de support et ainsi transmettre le mouvement aux bielles, elles-mêmes en rotation dans les platines. Une liaison en pivot est également nécessaire entre l'axe et le support de la poulie, toujours pour la transmission du mouvement rotationnel. Chacune de ces liaisons représente un haut risque de frottements pendant la giration de l'appareil. Ces frictions non désirées se traduisent par de légères vibrations qui, transmises à l'ensemble du dispositif, accroissent le risque d'obtenir une image floue.

De plus, si la construction et l'assemblage des pièces sont imprécis et admettent trop de jeux, le parallélisme des platines ne peut être rigoureux. La conception de ces liaisons en pivot influe donc directement sur l'aplanétisme du système et impacte en conséquence la qualité de l'image nette. Toutes doivent alors être stables, strictement identiques et doivent permettre une rotation fluide et régulière du dispositif pendant la capture.

Une deuxième forme de liaison est utilisée entre le châssis portant l'émulsion sensible et la platine du corps arrière en contact avec les tourillons des bielles. Il s'agit d'une liaison glissière, qui n'admet qu'un degré de liberté : la translation. Elle s'applique à la boîte de mise au point, visible sur le dispositif historique, qui permet une définition plus précise de la distance de mise au point pour la première prise de vue. Cette liaison impacte clairement la verticalité du châssis et par conséquent agit sur le parallélisme des platines. Le mouvement de translation doit aussi être assez fluide, pour un réglage précis du positionnement de l'émulsion, et strictement parallèle à l'axe optique, pour éviter son décentrement. Idéalement, nous devrions imaginer un système de fixation pour bloquer cette liaison glissière après avoir effectué la mise au point pour la première image. En effet, cette distance doit rester strictement fixe pour la réalisation des photographies suivantes. Il serait également astucieux de graduer la boîte pour simplifier le relevé des données expérimentales.

Enfin, un troisième type de liaison est employé au niveau du support. Il s'agit d'une liaison hélicoïdale. Cette dernière permet de convertir un mouvement de rotation en une translation, ou l'inverse. Elle s'avère nécessaire pour un déplacement maîtrisé de l'ensemble du dispositif entre chaque prise de vue. Lorsque la manivelle est actionnée, l'embase se

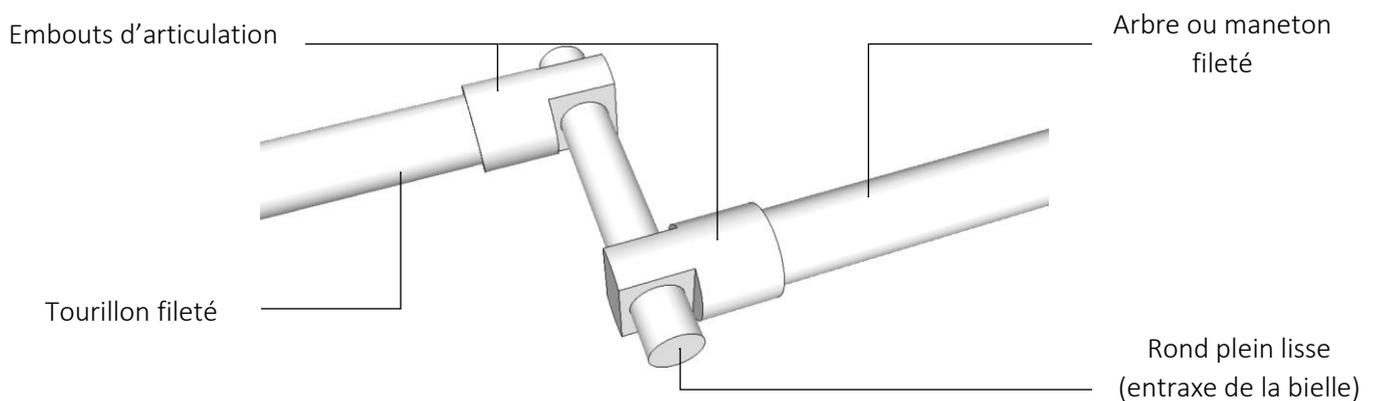
déplace. Comme la liaison glissière, il est nécessaire que les pièces employées permettent une translation fluide et sans déviation de l'axe optique.

Par ailleurs, il est important de remarquer la symbolisation très minimaliste des liaisons entre les bielles et les arbres. Sur ces schémas, leur point de contact est assimilé à une liaison fixe, or le montage du dispositif nécessite l'emploi de deux pièces distinctes. Leur assemblage doit tendre à une fixité parfaite pour éliminer toute possibilité de jeu entre les bielles et les axes.

Dans son projet de mémoire, Franck Malécot estime les jeux admissibles par le dispositif à partir du calcul de la profondeur de foyer du système optique. Cette distance définit les limites théoriques du positionnement de la surface sensible pour l'obtention d'une image nette. Elle est conjuguée à la profondeur de champ par la lentille, dépend de l'ouverture du diaphragme et de la tolérance de netteté du format de l'émulsion. En effet, le choix d'une grande ouverture et d'un capteur petit réduit considérablement la profondeur de foyer, ce qui nécessite alors plus de précision lors de la conception du dispositif et augmente indéniablement les coûts liés à sa construction. Franck Malécot détermine alors une profondeur de foyer de 1,93 mm pour le dispositif historique au format 18*24 cm. Les jeux du système doivent être inférieurs à cette distance dans la direction de l'axe optique pour conserver la netteté de l'image. Une analyse mécanique approfondie des pièces et des liaisons participant au positionnement parallèle des platines permettrait de quantifier plus précisément leur tolérance. Elle devrait être complétée par une étude détaillée de la résistance des matériaux employés, de leurs déformations et de leurs déplacements, pour justifier rigoureusement nos choix technologiques et pour optimiser le dimensionnement des différents éléments. Malheureusement, par manque de temps et de connaissances dans le domaine de la mécanique, ces deux études ne seront pas abordées dans ce mémoire. Nous pouvons tout de même suggérer l'hypothèse que les déformations des pièces restent négligeables au vu des forces exercées, la masse de chaque élément et leur vitesse angulaire de rotation étant relativement faibles. En prenant en compte la précision des technologies d'usinage de l'époque, Franck Malécot estime et limite le jeu des liaisons du dispositif historique au dixième de millimètre. Nous nous appuyons sur cette valeur pour la conception de notre propre système.

3.2.3. Choix technologiques

Maintenant que les principales contraintes de conception et les jeux admissibles sont définis, nous pouvons précisément déterminer les pièces et les matériaux qui seront utilisés. Pour accroître la pertinence de nos décisions, nous demandons conseil à plusieurs professionnels issus du domaine de la mécanique et de l'ébénisterie tout en effectuant parallèlement une recherche approfondie sur divers forums ainsi que dans les rayons de différents magasins de bricolage et les catalogues de plusieurs fournisseurs comme Norelem. Ce fabricant et fournisseur, spécialisé dans les composants standards destinés à la construction et à l'ingénierie mécanique, propose une large diversité de produits ce qui multiplie les possibilités de conception.



Représentation 3D des bielles de notre dispositif

Dans un premier temps, il est judicieux de déterminer la conception des bielles et leur fixation aux axes. Pour atteindre un niveau de précision optimal, le choix de pièces métalliques conçues industriellement paraît logique. Au vu de la multitude de pièces existantes, diverses solutions technologiques s'offrent à nous. Idéalement, les bielles devraient être réalisées sur mesure par un tourneur fraiseur, par thermoformage par exemple. Elles auraient également pu être imprimées en trois dimensions. Mais pour limiter les coûts, nous préférons employer des pièces préconçues. En prenant en compte la limite budgétaire imposée et notre calendrier, nous emploierons alors des embouts d'articulation. Ces petites pièces en acier permettent de lier perpendiculairement deux tiges. Le premier perçage est taraudé, le second est lisse. Pour

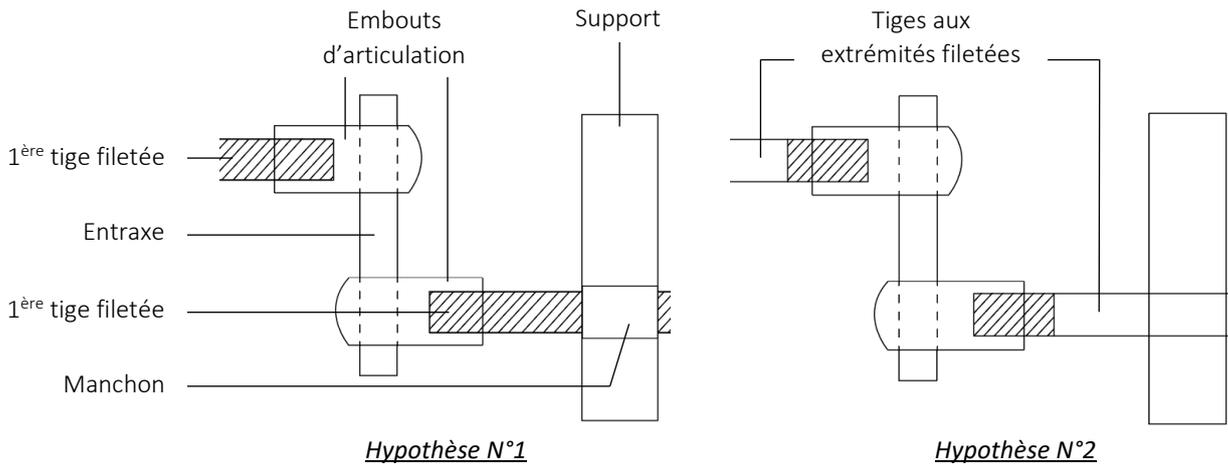
constituer nos bielles, le trou taraudé borgne accueillera l'extrémité fileté du maneton ou du tourillon de la bielle. Comme le système de clavetage employé par Louis Lumière, la liaison par vissage permet de renforcer l'assemblage des pièces et éliminer les jeux. Les deux embouts d'articulation parallèles seront liés par un troisième rond plein lisse qui viendra se loger dans leur second alésage non-taraudé. Ainsi, l'entraxe de chaque bielle sera facilement ajustable. Ce montage pourra être utilisé pour les bielles du corps avant comme pour celles du corps arrière. Seul l'espace entre les deux embouts sera différent. Un second modèle d'embout est proposé par Norelem. Il présente une rotule au niveau du trou lisse qui donne la possibilité d'orienter l'entraxe. Cette option n'étant pas nécessaire et le modèle étant plus cher, le choix du premier modèle, plus simple et moins onéreux, reste pertinent.



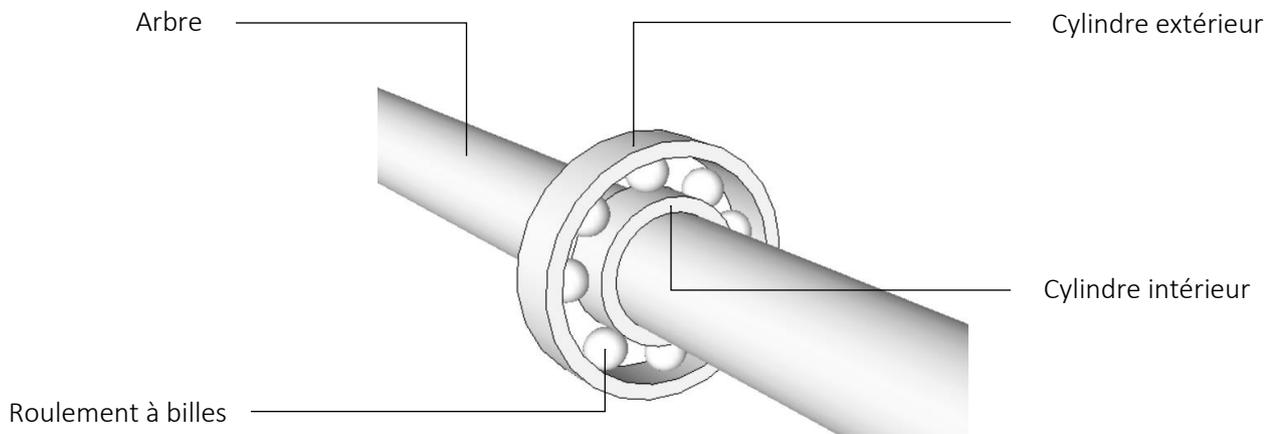
Embout d'articulation en acier

Chaque axe sera en acier. Les tiges constituant les entraxes des bielles devront obligatoirement être lisses et devront s'adapter au diamètre de l'embout. Pour une fixation solide et résistante, nous suivrons les conseils de nombreux passionnés lus sur les forums de discussions. Nous consoliderons chaque liaison avec une colle particulière, la Loctite 603, chimiquement conçue pour lier deux surfaces cylindriques.

En ce qui concerne les arbres, deux hypothèses peuvent être envisagées. La première est d'employer des tiges entièrement filetées. Elles seraient parfaitement adaptées au taraudage des embouts et assureraient l'efficacité de la liaison. Mais ce type de tige imposerait l'achat de manchons au niveau de son point de contact avec le support du dispositif ou les platines. La seconde hypothèse est alors de se tourner vers l'emploi de tiges lisses aux extrémités filetées. Après maintes recherches, ce type de pièce reste introuvable sur le marché. Nous achèterons donc des ronds pleins lisses, et les filetages seront réalisés manuellement.



Dans un deuxième temps, nous nous intéressons à l'optimisation des liaisons pivots. Avec mon frère Bixente Lavigne, nous avons commencé par imaginer un système sur mesure qui réduirait au minimum les jeux concentrés autour de ces liaisons. Malheureusement, la fabrication de ce système serait onéreuse et longue à confectionner. Nous préférons alors nous tourner vers l'achat de roulements à billes préfabriqués. Le principe de ce type de pièce est assez simple. Chaque roulement est un anneau d'une certaine largeur contenant des petites billes. Les cylindres intérieurs et extérieurs sont indépendants. Les billes les séparant absorbent la rotation et roulent autour de l'axe. L'un peut donc rester fixe pendant que l'autre est en mouvement. Pour notre dispositif, le cylindre intérieur du roulement sera collé à l'axe qui lui transmettra la rotation. Le cylindre extérieur sera lui lié au support et restera immobile. Ainsi, encastrés dans les flasques ou les platines, ces roulements à billes supprimeront le contact direct entre le système en rotation et le support fixe. Les frottements et les vibrations dus à la giration sont minimisés, le mouvement sera aussi plus fluide et plus homogène.

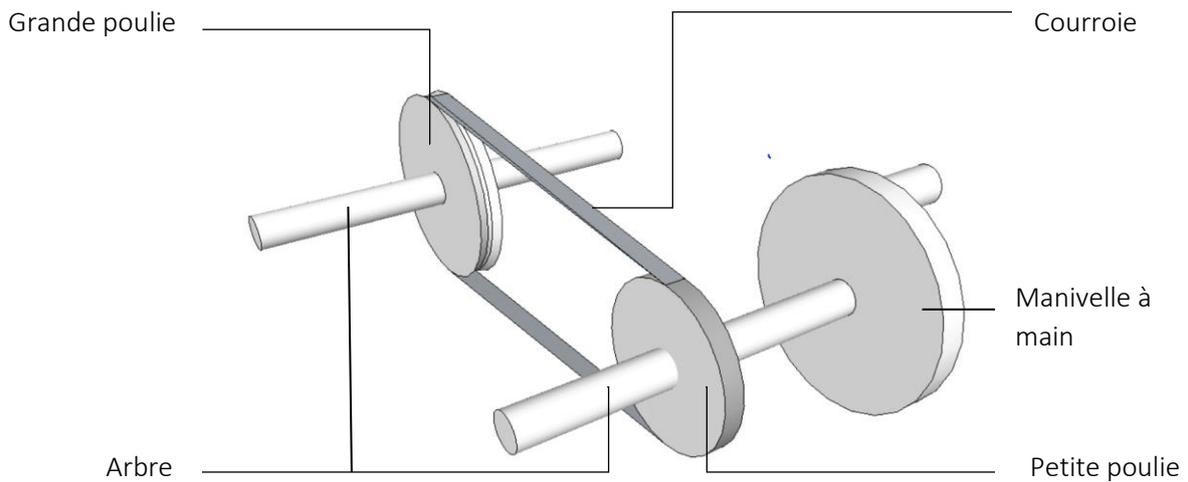


Représentation 3D du principe d'un roulement à billes

Le choix d'un modèle de roulement à billes est limité par quelques contraintes. Il est d'abord déterminé par le niveau de résistance nécessaire au bon fonctionnement du dispositif. Les forces radiales et axiales supportées restant faibles, des roulements à billes extrêmement performants s'avèreraient assez futiles. Même les modèles les plus simples aux dimensions voulues sont initialement conçus pour des mécanismes motorisés tournant à une vitesse maximale de 15000 tours par minute. Ils conviennent donc tout à fait à notre dispositif qui ne dépassera pas une vitesse de quelques tours par minute. De plus, le coût accroît parallèlement aux performances de techniques de la pièce. Le nombre de roulements nécessaire à la conception de notre appareil étant assez élevé, le choix d'un modèle à une rangée de billes, moins puissant et moins cher, apparaît pertinent et raisonnable.

Photographie		
Type / modèle	Roulement à une rangée de billes	Roulement à rouleaux coniques
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Accepte un grand nombre de tour par minute (27000 tr) • Dimensions diverses 	<ul style="list-style-type: none"> • Supporte des charges axiales et radiales très élevés • Résiste à des températures élevées
Coût (Avril 2021)	4,37€/pièce	34.09€/pièce

Dans un troisième temps, nous pouvons définir le système de poulie et de courroie, à l'origine du mouvement rotationnel de l'ensemble du dispositif. Il restera très semblable au système employé par Louis Lumière. Une courroie sera tendue entre deux poulies alignées, l'une fixée à un arbre, l'autre reliée à une manivelle à main.



Représentation 3D du système de poulie-courroie

Nous ne cherchons pas à obtenir une vitesse angulaire de rotation particulière. Les dimensions des deux poulies et de la courroie pourront donc être déterminées arbitrairement selon leur prix. Leurs diamètres devront tout de même être différents. La poulie de plus faible dimension sera montée sur l'axe de la manivelle, la plus grande sur l'arbre. Ainsi, lorsque la première entre en rotation après actionnement manuel, une vitesse initialement élevée sera moindre au niveau des bielles. La giration sera plus maîtrisable. La manivelle à main sera constituée d'un volant en aluminium avec une poignée cylindrique fixe, lui aussi préconçu et commandé en ligne. Idéalement, une poignée rotative serait plus pratique mais le prix s'avère plus élevé.



Poulie de courroie



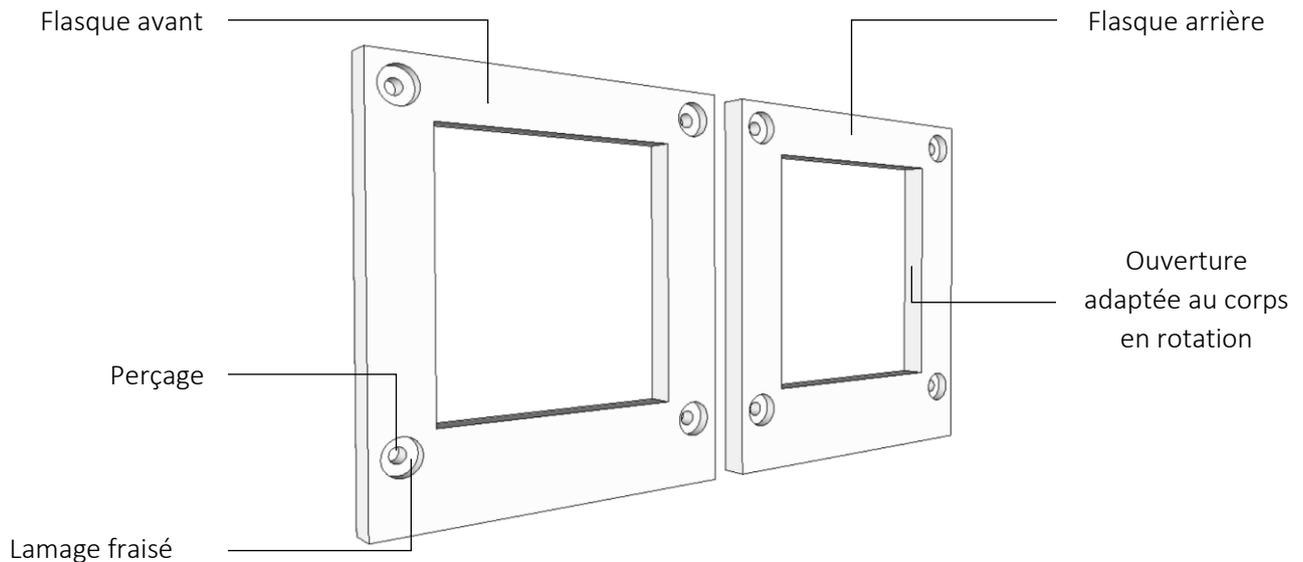
Courroie étroite en néoprène avec câble de traction en polyester



Volant en aluminium

Tout le mécanisme permettant la rotation des platines avant et arrière est maintenant déterminé. Passons à présent à la conception du bâti de support et sa liaison hélicoïdale au socle fixe. Comme Louis Lumière, le corps de la chambre sera en bois, plus précisément en contreplaqué. Ce bois présente l'avantage d'être assez rigide et solide pour supporter le système en rotation tout en facilitant l'usinage.

Les deux flasques aux dimensions identiques présenteront quatre perçages en leurs angles. Pour éviter tout contact entre les arbres et le bois, ces perçages auront un diamètre légèrement plus grand que celui des ronds pleins choisis pour les axes. Autour de chaque perforation, un lamage effectué par fraisage accueillera un roulement à billes. Le pan inférieur de chaque cadre devra également être plus large pour prévoir la rotation des platines et éviter qu'elles n'entrent en contact avec le support du dispositif.

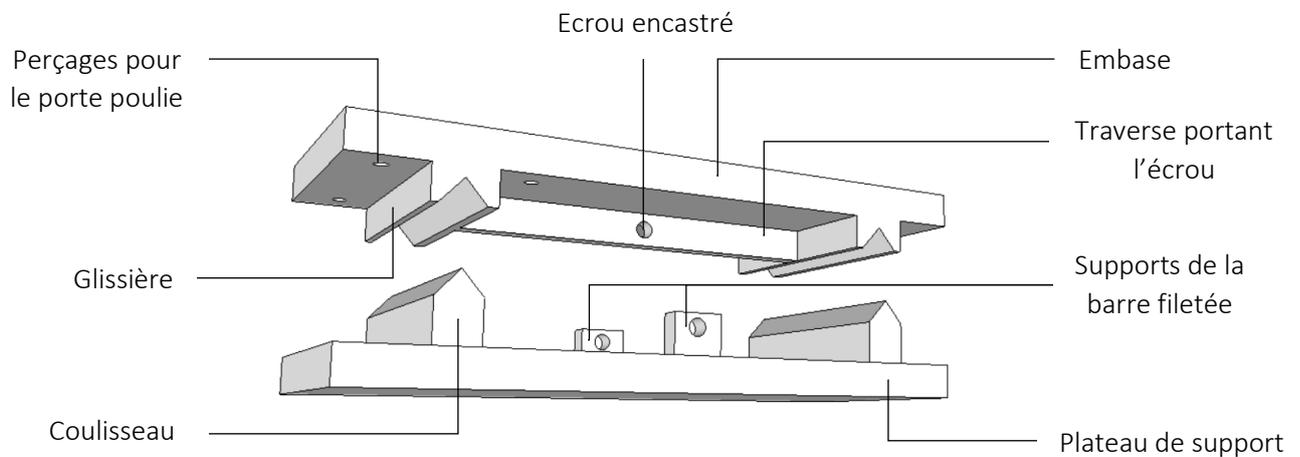


Représentation 3D des deux flasques de notre dispositif

Ces deux flasques seront fabriquées en contreplaqué, qui est un bois assez souple, facile à usiner et peu onéreux. Pour limiter les coûts, les trois entretoises qui maintiendront les deux cadres fixes et parallèles seront également réalisées en contreplaqué. Cette alternative s'avèrera aussi fiable que les barres métalliques utilisées pour le dispositif historique. Elles seront vissées vers le pan supérieur des flasques pour un renforcement équilibré. Elles devront bien sûr être strictement identiques.

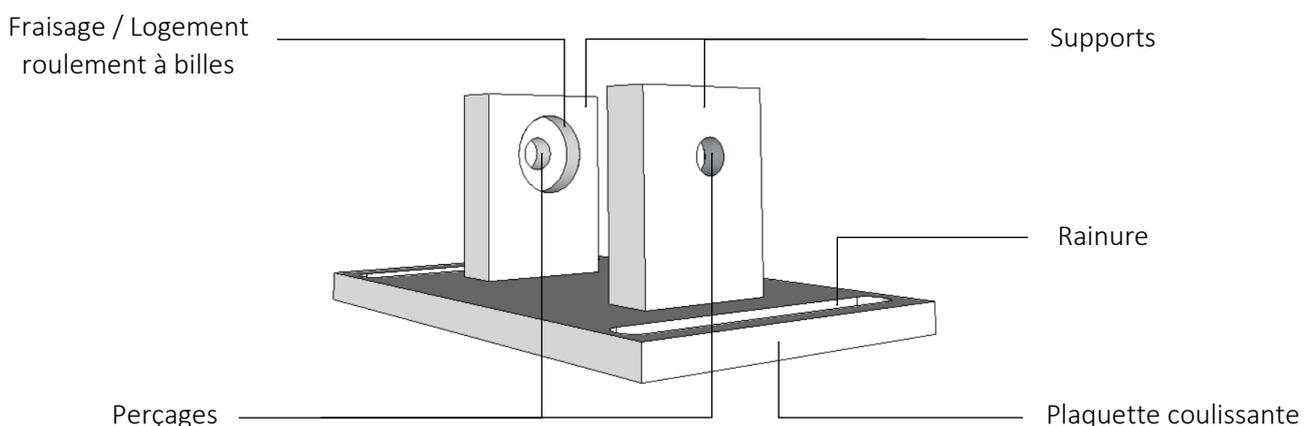
Nous utiliserons également du contreplaqué pour construire l'embase et le plateau de support du dispositif. Ils devront cependant être plus épais pour assurer sa stabilité. En outre, pour la fabrication des coulisseaux et des glissières, du chêne ou du hêtre s'avèrent plus adaptés. En effet, leur dureté plus importante favorise un coulissement plus lisse et plus homogène. Dans le même but, les coulisseaux ne seront pas en queue d'aronde comme indiqué dans le brevet d'invention. Nous opterons, comme le prototype historique, pour un guidage non maintenu par vé symétrique à 90. Grâce à cette forme triangulaire, les glissières ne

supporteront pas d'efforts latéraux significatifs. Elles assureront également une parfaite rectitude de la trajectoire du coulisseau tout en limitant les jeux.



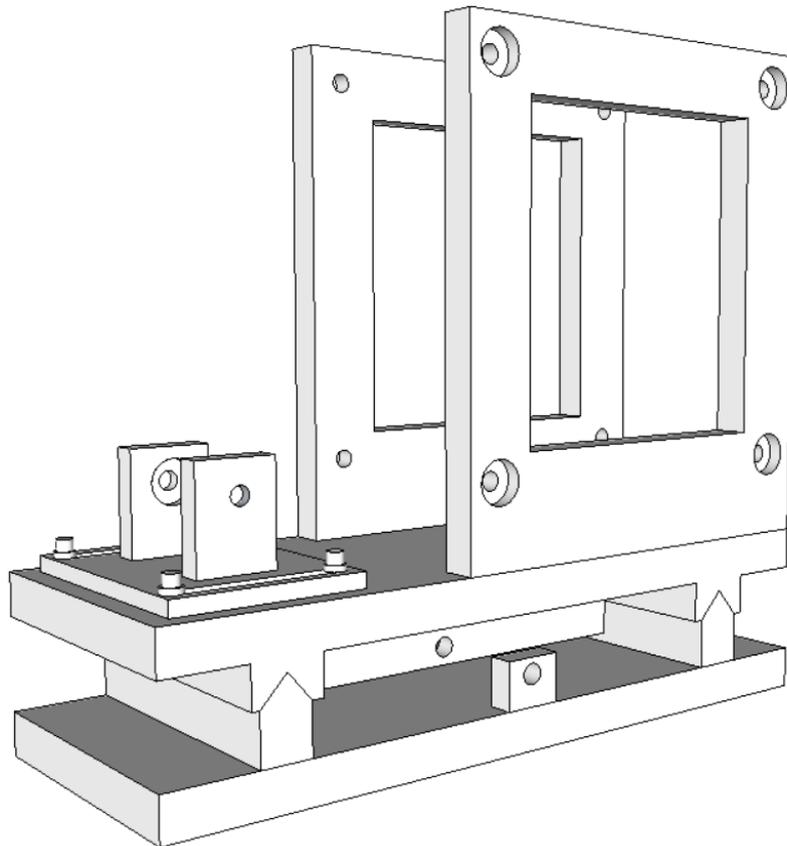
Représentation 3D du socle de notre dispositif

Par ailleurs, le système hélicoïdal entraînant la translation de tout notre dispositif de prise de vue sera assez simple mais efficace. Nous opterons pour un système de vis/écrou qui permet de convertir un mouvement rotationnel en mouvement translationnel. Un écrou incrusté à l'intérieur d'une traverse en bois vissée à l'embase accueillera une tige filetée de diamètre assez grand. La tête de cette tige sera elle liée au plateau de support fixe grâce à deux petits boîtiers percés et quelques écrous de serrage. Cette tige jouera la fonction d'une vis sans fin : lorsqu'elle rentrera en giration, elle restera statique ce qui entrainera le déplacement du boulon sur son axe et donc, la translation du dispositif. Toutes les pièces seront vissées à l'embase et au plateau. L'ajout d'équerres métalliques serait envisageable pour consolider les fixations. Il sera enfin nécessaire de réaliser quatre perçages dans l'embase, de part et d'autre d'une glissière, pour anticiper le positionnement du porte poulie.



Représentation 3D du porte-poulie sur son socle

Ce dernier sera lui aussi conçu en contreplaqué, de même épaisseur que les flasques. Les deux porteurs de l'axe seront identiques, percés et fraisés sur la face intérieure pour porter deux roulements à billes. Ils seront vissés par en dessous à une planchette. Celle-ci présentera deux rainures réalisées à l'extérieur des deux porteurs verticaux. Ces trous oblongs accueilleront chacun deux vis munies d'écrous à ailes pour serrer la planchette contre l'embase. Ainsi, la distance entre des deux poulies pourra être ajustée lors du montage pour assurer la tension de la courroie. En effet, si celle-ci est insuffisante, le mouvement de rotation ne pourra être convenablement transmis d'une poulie à l'autre.



Représentation 3D du bâti de notre reconstitution

Pour terminer, les platines elles aussi seront en contreplaqué, mais d'une épaisseur moindre pour réduire le poids supporté par les bielles. Dans le même objectif, la surface des plaques pourra être évidée. Comme les flasques vues précédemment, elles seront également percées et fraisées aux quatre coins pour recevoir les tourillons des bielles et leur roulement à billes associés. Ces perçages devront respecter les dimensions des perforations des flasques, qui seront calculées pour éviter tout contact entre le corps en rotation et le corps fixe du dispositif. En ce qui concerne le défonçage des cadres intérieurs des platines, il dépend essentiellement de la chambre photographique acquise pour être adaptée au procédé.

Cette dernière est une chambre noire série II A « pour touristes, amateurs et photographes » de format 18x24 cm conçue par les établissements Mackenstein. Leur signature est gravée sur deux pièces métalliques vissées sur le plateau. Fondés en 1872 par Hermann-Josef Mackenstein, leur usine se situait au 15 rue des Carmes à Paris. À partir de 1888 jusqu'en 1914, l'entreprise produisait de nombreux modèles de chambres photographiques et de caméras dédiés à un usage spécifique comme des caméras stéréoscopiques, des appareils panoramiques ou encore des photo-jumelles.



Chambre de voyage Mackenstein série II A
pliée et dépliée

Notre modèle est une chambre de voyage, facilement pliable et transportable. Le corps avant, le corps arrière et le chariot peuvent se replier grâce à des charnières métalliques. Des crochets en laiton permettent de les bloquer dans cette position et ainsi faciliter le déplacement de l'ensemble. Une poignée devait initialement être fixée sur la partie supérieures de l'appareil, mais celle de notre exemplaire est absente. Toutes les pièces métalliques sont en laiton poli, verni et nickelé. Les pièces en bois sont en acajou blond assemblées par des extrémités en queue d'aronde.

Le corps avant porte deux planchettes qui peuvent translater pour effectuer des décentrement verticaux comme horizontaux. La plus petite, qui permet un décentrement horizontal, est totalement indépendante du dispositif, maintenue par deux glissières parallèles

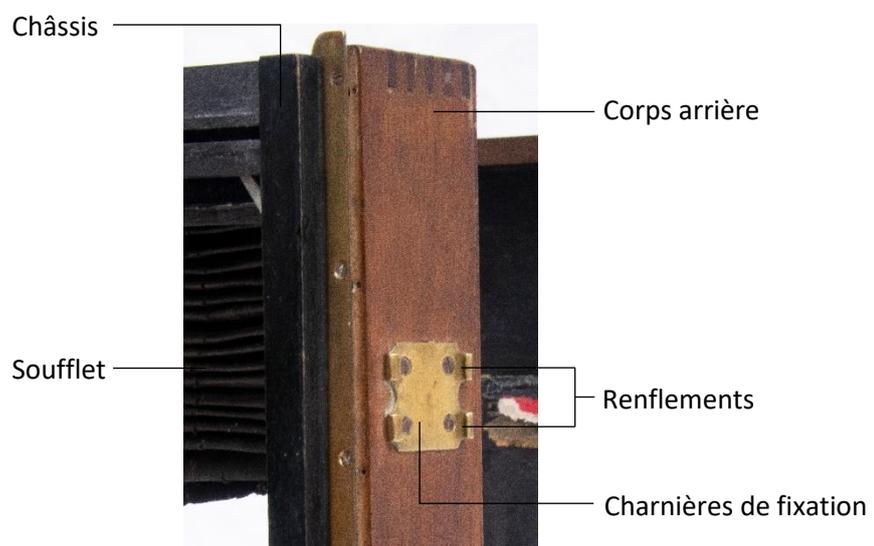
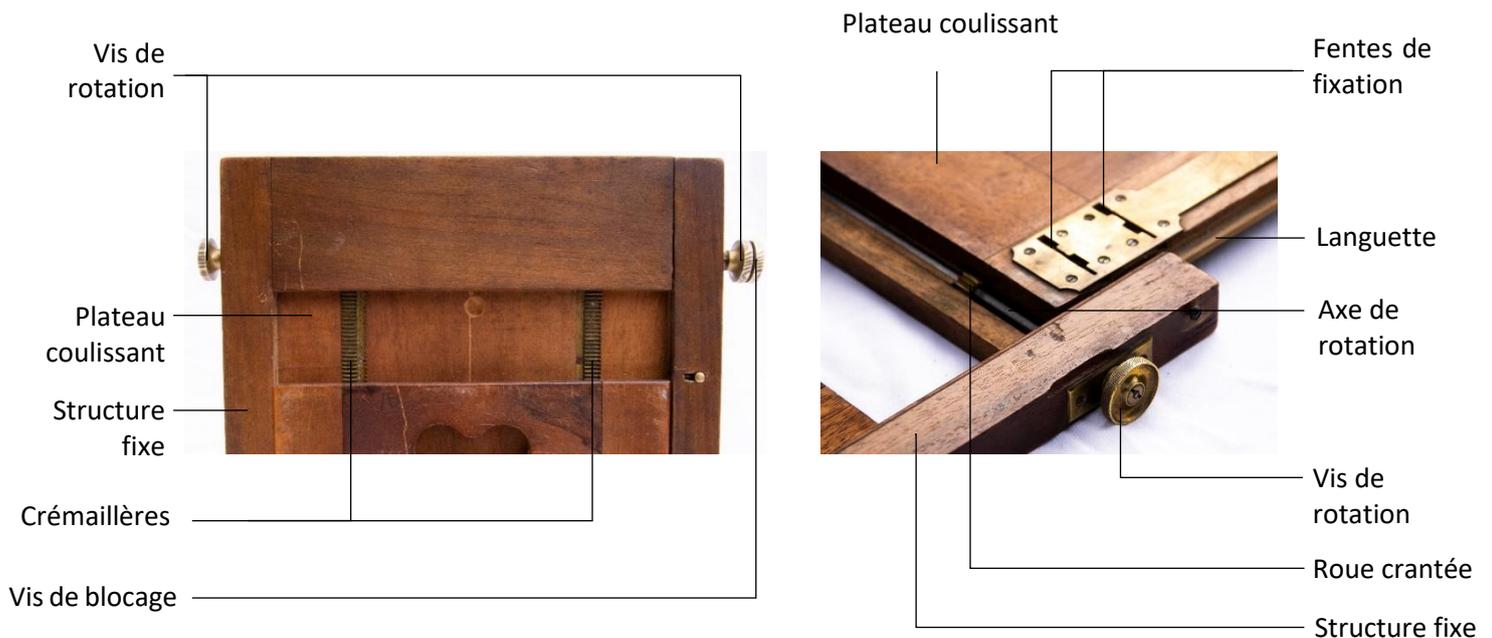
et symétriques. La bague de fixation de l'objectif est manquante. Les quatre petits percages autour de l'orifice accueillant l'objectif laissent deviner qu'elle était fixée à la platine avec 4 vis, qu'elle présentait un diamètre extérieur de 90 mm et un diamètre intérieur de 70 mm. Sur la seconde plaquette, qui propose un décentrement vertical, le logement de l'objectif est constitué d'un cône noir en bois tournant qui permet d'orienter le soufflet en portrait ou en paysage.



Photographies du corps avant liée au chariot

Parallèlement, le corps arrière portant le verre dépoli et le châssis peut lui aussi être orienté grâce à un couple de charnières vissées sur deux de ses tranches. Les renflements de ces charnières se logent dans huit fentes de largeur décroissante fixées sur le plateau mobile du chariot. Ce type d'assemblage non-permanent assure la stabilité du corps arrière tout étant réversible. Il rappelle notamment le mécanisme des entrebâilleurs rigides de porte. En outre, le plateau coulissant présente trois positions de fixation différentes pour amplifier la plage de mise point et ainsi multiplier les possibilités. Pour le réglage du tirage optique, deux crémaillères incrustées sous ce même plateau mobile entrent en contact avec deux roues crantées montées sur un axe en acier lié à la partie fixe du chariot. En actionnant les roues

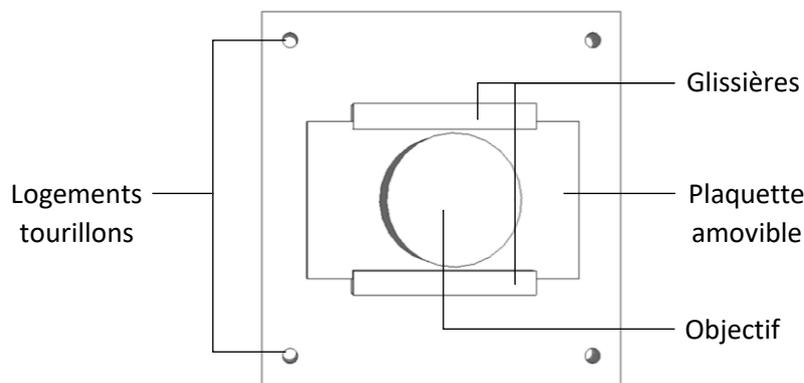
assemblées aux extrémités de cet axe, les deux engrenages entrent en rotation. Ce mouvement rotationnel est transmis aux rails du plateau qui le convertissent en un mouvement de translation. Les deux languettes collées sur les longues arêtes du plateau glissent dans les rainures entaillées dans la structure fixe. Lorsque la mise au point est effectuée, la position du corps arrière peut être bloquée grâce une troisième vis assemblée à l'axe en acier.



Vues rapprochées du corps arrière et du chariot de la chambre Mackenstein

Malgré quelques restaurations nécessaires, cette chambre reste idéale pour notre projet. En effet, plusieurs éléments comme la planchette de l'objectif, le corps arrière avec le

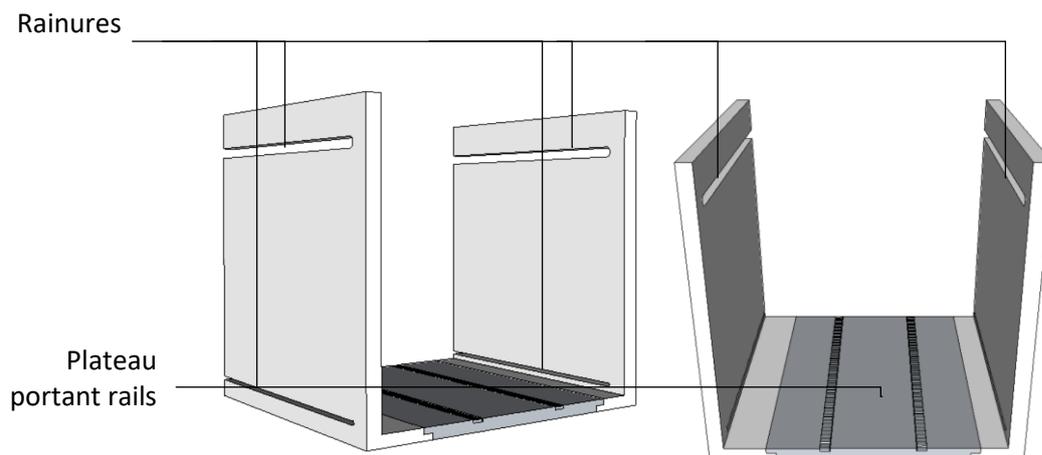
châssis double, et le plateau coulissant du chariot sont amovibles et indépendants de la structure fixe de la chambre. Ils peuvent être facilement apposés à notre dispositif. Pour commencer, les deux glissières qui maintiennent la plaquette de l'objectif pourront être dévissées pour être ensuite fixées à notre platine avant. Leur espacement, qui dépend de la largeur de la plaquette, définira les dimensions du cadre intérieur de cette même platine.



Représentation 3D de la platine avant de notre disposition

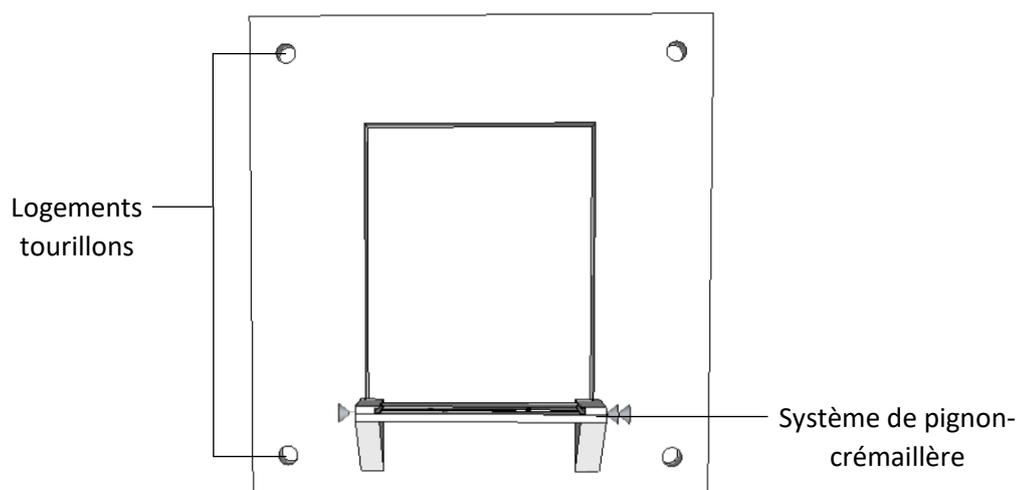
Pour notre platine arrière, le système de pignon-crémaillère qui permet un réglage précis de la mise au point s'avère intéressant. La troisième vis de blocage serait particulièrement adaptée pour assurer la stricte immobilité du châssis après la réalisation de la première image.

Pour l'intégrer à notre dispositif, nous avons dans un premier temps imaginé une boîte de mise au point semblable à celle du dispositif historique de Louis Lumière. Le plateau coulissant aurait été la base de la boîte, les crémaillères vers l'intérieur. Nous voulions ensuite démonter l'axe, l'allonger et l'intégrer directement dans la base du corps arrière de la chambre. Cet axe aurait été maintenu dans deux rainures effectuées sur les parois latérales de la boîte. Un embout fixé à la partie supérieure du corps et relié à l'axe aurait permis de conserver la verticalité du corps pendant son déplacement. Mais cette construction s'avère assez dangereuse car elle implique de multiples modifications, notamment du mécanisme de pignon-crémaillère pour être adapté aux dimensions de la boîte.

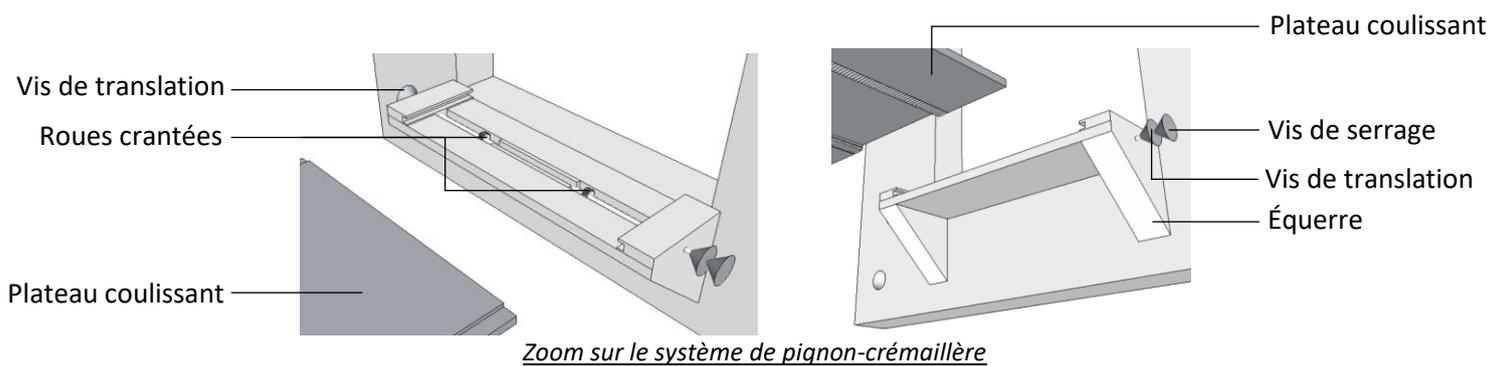


Représentation 3D de notre boîte de mise au point sans le châssis

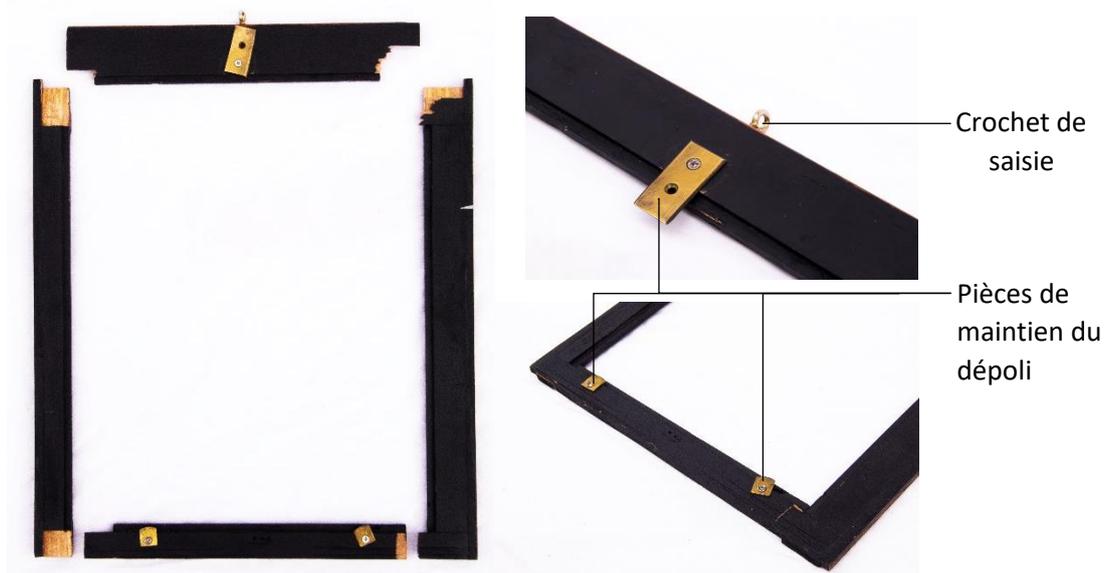
Après la présentation des plans et du protocole d'usinage à mon frère ébéniste, nous avons dans un second temps imaginé une adaptation plus simple, qui ne nécessite pas la construction d'une boîte et qui n'intervient pas directement sur les pièces métalliques. Nous scierons simplement la partie de la structure en bois supportant le système de pignon-crémaillère dans son ensemble, et nous l'assemblerons à notre platine arrière grâce à deux équerres en bois. Ainsi, tout le mécanisme reste intact et parfaitement fonctionnel. La précision de la translation et l'ergonomie de la vis de blocage ne sont pas impactées. Le plateau coulissant pourra aussi être utilisé sans être modifié ce qui nous permet de conserver les charnières qui assurent la verticalité et la stabilité du châssis. Comparée à notre première hypothèse, cette adaptation réduira considérablement le temps de fabrication et ne demandera aucun achat supplémentaire.



Modélisation 3D de la platine arrière



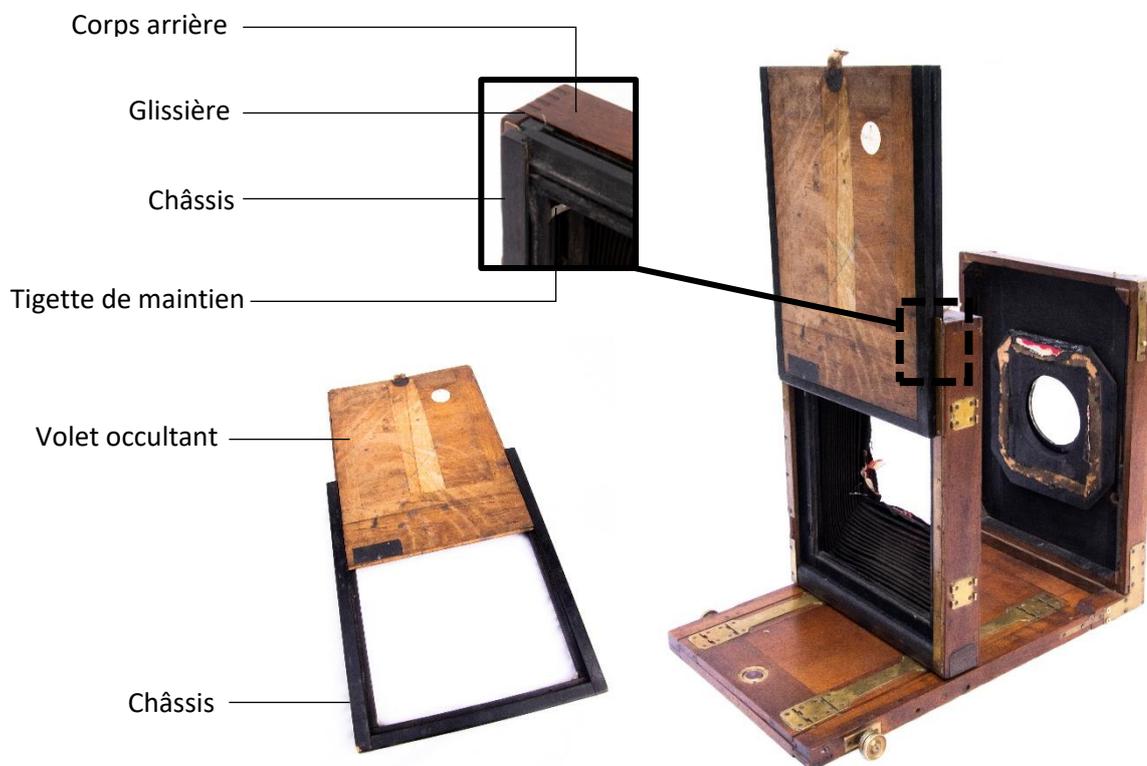
Nous devons également reconstruire le porte dépoli, brisé en quatre morceaux. L'original est constitué de trois pièces en bois : deux cadres et une fine languette. Les deux cadres présentent des dimensions légèrement différentes qui, après contre collage, forment une feuillure accueillant le dépoli. La fine languette joue le rôle de cale pour éviter que l'assemblage ne bouge dans châssis. Pour notre dispositif, le porte-dépoli pourra être fabriqué simplement à partir d'une planchette en bois fin dans laquelle sera découpé une fenêtre. Une fine feuillure régulière sera ensuite réalisée par ravalement sur les bords intérieurs de ce cadre. Le dépoli se logera sur ces quatre feuillures. Les trois pièces de maintien en laiton, et le crochet de saisie, pourront être dévissés puis assemblés à notre nouveau porte-dépoli.



Photographies du porte-dépoli reçu avec la chambre

Ensuite, concernant le châssis qui reçoit l'émulsion sensible, aucune restauration sera nécessaire, si ce n'est un léger ponçage ou l'ajout de paraffine sur les glissières pour faciliter l'insertion des volets occultants. À l'origine, ce châssis devait être double pour permettre de transporter deux plaques sensibles à la fois. Cependant, la paroi intermédiaire qui sépare les deux logements est absente. À la place, quatre tiges métalliques ont été fixées dans les angles pour pouvoir maintenir la plaque positionnée derrière. Ainsi, une seule plaque peut être positionnée dans notre châssis.

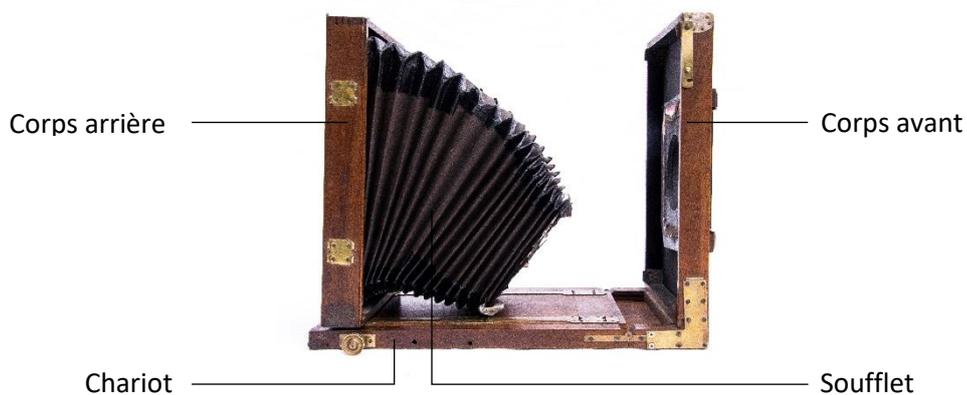
Par ailleurs, un des deux volets occultants est manquant. Le volet déjà existant sera reproduit en entaillant une feuillure sur trois tranches d'une planchette de mêmes dimensions. Ces feuillures joueront le rôle de languettes qui glisseront dans les rainures du châssis. Une vis ou une petite pièce métallique sera placée dans l'épaisseur de l'arête supérieure du volet pour faciliter la prise en main lors de son extraction. Le volet déjà existant présente la particularité d'être constitué, sur sa partie inférieure, de plusieurs lamelles liées par une toile imperméable. Ainsi, le rideau peut être partiellement retiré, il est alors qualifié de « mi-rideau ». Pour limiter la complexité de la fabrication, cette spécificité ne sera pas reproduite.



Photographies du châssis seul et monté sur le corps arrière de la chambre

Quant au soufflet, nous pouvons commencer par noter qu'il n'est pas d'origine. Les pages publicitaires d'époque présentant cette chambre décrivent un soufflet en peau. Le nôtre est constitué d'un carton fin pris en étaux entre deux couches de toile en coton noire. Néanmoins, il reste très abîmé. En nous plaçant dans une pièce sombre et en positionnant une petite source lumineuse à l'intérieur, nous pouvons observer de nombreuses fuites lumineuses. Deux solutions se présentent alors à nous. Il pourra être restauré par le collage d'un nouveau revêtement en tissu sur les parois extérieures et renforcé avec du gaffer noir. Cette solution nécessitera une minutie rigoureuse pour assurer l'occultation des défauts et éviter tout décollement. La seconde hypothèse est de réaliser un nouveau soufflet. Ses dimensions pourront être spécifiquement adaptées à celles de notre prototype. De nombreux tutoriels existent pour nous guider pendant la fabrication. Ils conseillent l'emploi de papier cartonné assez épais pour la structure, d'un tissu en coton noir pour le revêtement intérieur et en similicuir noir pour l'extérieur. Malheureusement, le cuir est tendance cette année et se retrouve victime de son succès. En rupture de stock chez plusieurs fournisseurs, nous préférons une toile opaque en PVC, qui présente également l'avantage d'être moins onéreuse.

Restauré ou entièrement reconstitué, le soufflet sera directement collé à la platine avant du dispositif et à l'arrière du châssis. Afin qu'il supporte la rotation du dispositif sans se décrocher, cette manipulation nécessitera une colle extrêmement forte et résistante.

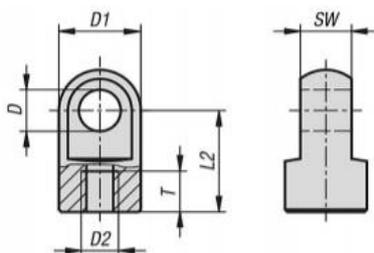


Vue de profil de la chambre Mackentsein dépliée

3.2.4. Plan et cotation des pièces

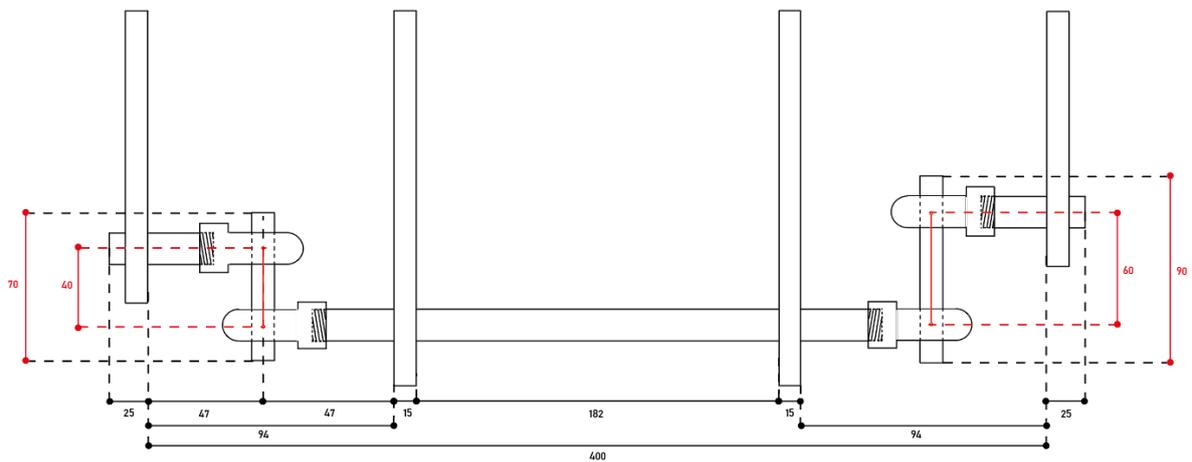
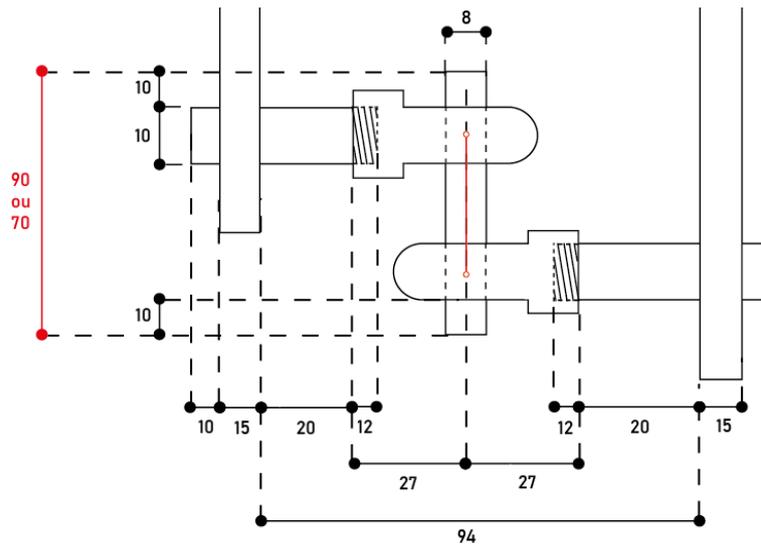
À présent, les dimensions de chaque pièce peuvent être déterminées.

Dans un premier temps, nous pouvons calculer la longueur de chaque tige métallique à partir des contraintes optiques imposées par le procédé, à commencer par l'amplitude des bielles. Comme pour le prototype historique, le rayon de rotation de la platine avant de notre dispositif sera de 40 mm, celui de la platine arrière de 60 mm. Les tiges transversales, qui constituent l'entraxe de chaque bielle, présenteront respectivement une longueur de 70 mm et 90 mm pour une épaisseur de 8 mm. La marge de 30 mm permettra l'enfilement dans les embouts avec un dépassement de 10 mm à chaque extrémité. Dans son brevet, Louis Lumière décrit également une distance de mise au point p de 630 mm pour un grandissement g_y de $\frac{1}{2}$. Le tirage optique p' entre l'objectif et la surface sensible est théoriquement égale à 315 mm. En prenant en compte que le plateau et le châssis pourront translater sur 200 mm environ pour le réglage de la mise au point, la distance séparant les deux platines peut être estimée à 400 mm. En considérant cette longueur et les dimensions des embouts d'articulation, la longueur de chaque rond plein de diamètre 10 mm peut être calculée. Les quatre arbres mesureront 270 mm, les huit tourillons 50 mm. Le taraudage des embouts étant de 12 mm les filières pourront être effectuées sur 20 mm. Ainsi, nous obtiendrons un prototype d'une largeur d'ensemble de 450 mm.



Référence	Matière du corps de base	Forme	D	D1	D2	L2	SW	T
27618-1008127	acier	A	8,1	18	M10	27	10	12

Côtes du modèle d'embout d'articulation



Nous pouvons ensuite déterminer les dimensions du bâti en bois de notre appareil. Lors de la réalisation des plans côtés, nous n'avions pas encore l'objectif ni la chambre Mackenstein sous les yeux. Nous avons donc estimé leurs dimensions avec de la marge pour pouvoir poser les côtes du support. En effet, la taille des pièces qui le constituent dépend des dimensions de la platine arrière, qui présente une amplitude de circumduction plus grande. Tout contact entre corps en giration et le corps fixe est à proscrire. Il est alors nécessaire de connaître la surface couverte par le châssis, son système de mise au point et le soufflet pendant la rotation pour déterminer le format de nos deux flasques ainsi que l'espacement des arbres. Pour un châssis hypothétique de 340 mm de large et 280 mm de hauteur, et un système de mise au point

estimé à 1 cm de large, la surface couverte par le système lors de sa rotation serait équivalent à un rectangle à angles arrondis de 460 mm sur 400 mm.

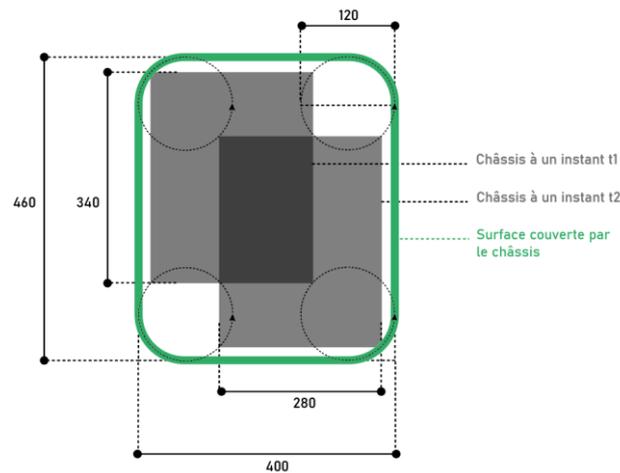
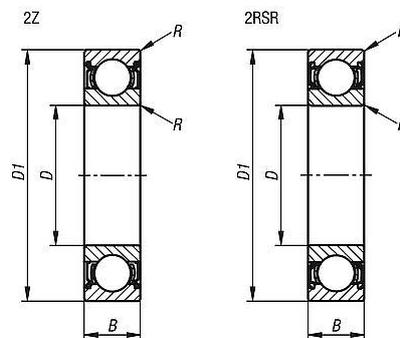


Schéma de la rotation du corps arrière.

En gardant une marge de 30 mm entre cette surface et les arêtes des flasques, les fenêtres de ces dernières mesureront 460 mm sur 520 mm. Sachant que les roulements à billes, et leur logement, présenteront un diamètre de 30 mm et une épaisseur de 9 mm, les pans des deux cadres feront 60 mm de large et seront confectionnés avec du bois épais de 18 mm. Le pan inférieur, fixé à l'embase, sera plus large pour anticiper la rotation du système et ainsi éviter le contact des platines avec le support ou les glissières. L'arbre supportant la poulie se trouve alors à 70 mm du support. Les deux poulies devant être alignées, cette hauteur détermine le niveau des perçages des deux planchettes de maintien du mécanisme de poulie-courroie, sans oublier la présence d'un plateau rainuré de 10 mm d'épaisseur pour sa mise en tension. Les deux planchettes identiques seront alors hautes de 85 mm et larges de 16 mm, pour pouvoir accueillir un roulement à billes. Le diamètre des poulies ne devra pas excéder 150 mm pour ne pas entrer en contact avec le socle. Aucune vitesse spécifique n'est ici recherchée, elles peuvent donc être choisies arbitrairement selon les modèles proposés par le catalogue Norelem. L'une sera tout de même plus grande que l'autre pour pouvoir décélérer la rotation de la manivelle à main et ainsi réduire les vibrations au début du mouvement. De même pour la courroie, nous ne cherchons pas à obtenir une longueur particulière. Elle devra seulement être compatible avec les poulies, et ne pas être trop ample, ce qui allongerait inutilement la taille de l'embase. Dans cette perspective, nous avons choisi une première poulie de diamètre 83 mm, une seconde de 62 mm. Une fois celle-ci montée et tendue, les deux poulies seront

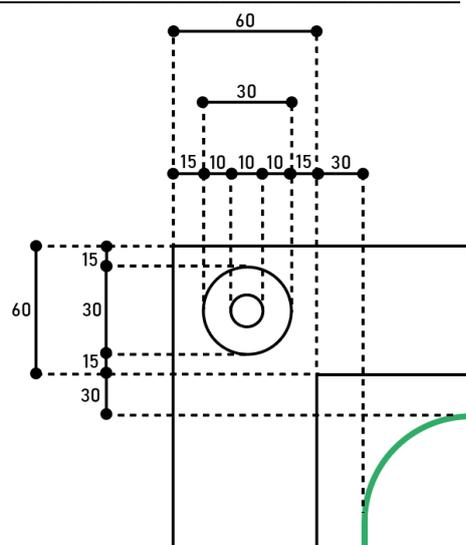
théoriquement espacées de 200 mm environ. L'embase devra alors mesurer 880 mm de long et 210 mm de large pour supporter les flasques et le système de poulie, vissés par-dessous. Les glissières seront elles vissées par-dessus, et disposées à 80 mm des bords de la base. Collée entre elles, une traverse de 70 mm de haut présentera un perçage en son milieu qui accueillera un boulon M16 pour le système de translation.

Les coulisseaux, alignés aux glissières, seront vissés sur un second plateau, parallèle et identique à l'embase. Sur ce même plateau, deux pièces de maintien percées seront collées pour bloquer la tige filetée fixe pendant sa rotation. Leur perçage devra alors être alignés au boulon incrusté dans la traverse. La hauteur de ces trois trous sera de 40 mm à partir du support des coulisseaux.

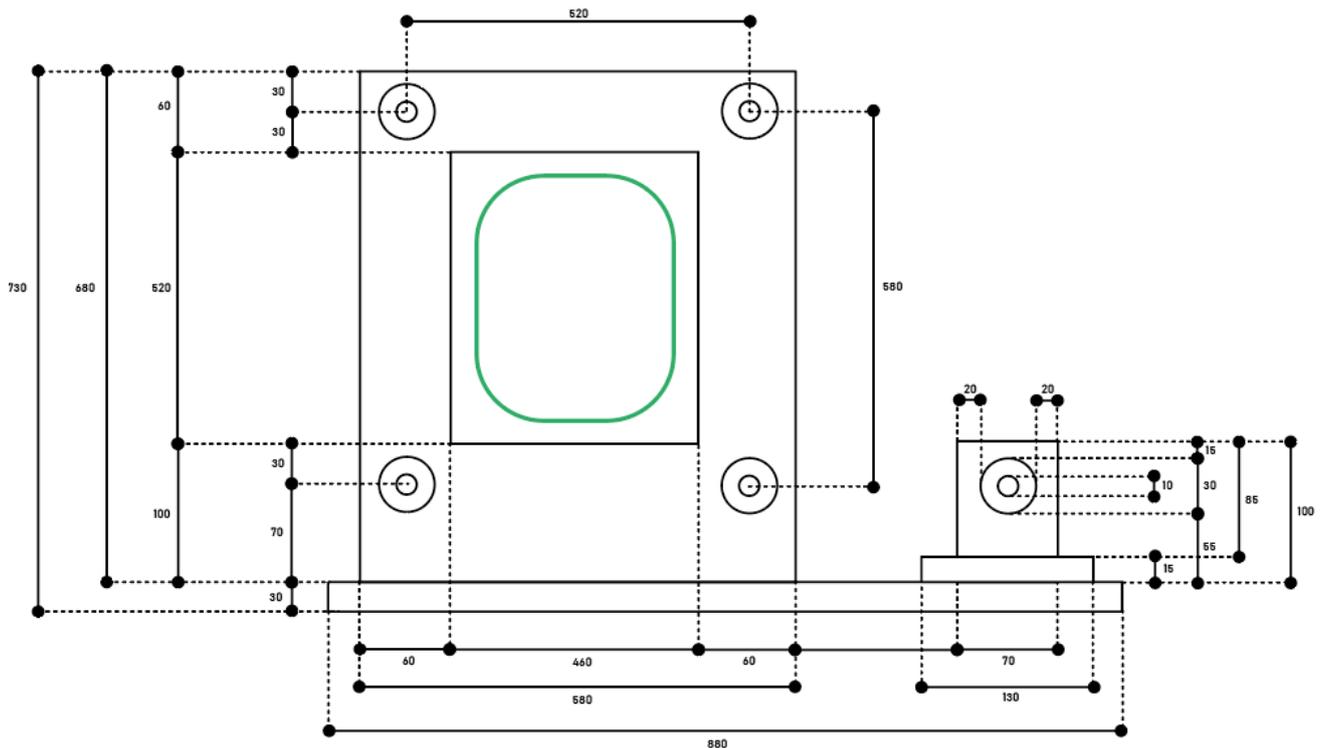


Référence	Désignation	Finition	D	D1	B	R min.	Charge de base dynamique N	Charge de base statique N	Vitesse de rotation limite en tr/min	CAO	Acc.	Prix	Commander
23800-101003009	6200-2Z	2Z	10	30	9	0,6	6000	2600	26000			4,37 €	<input type="text" value="0"/>

Dimensions du modèle de roulement à billes



Plan côté du logement d'un roulement à billes

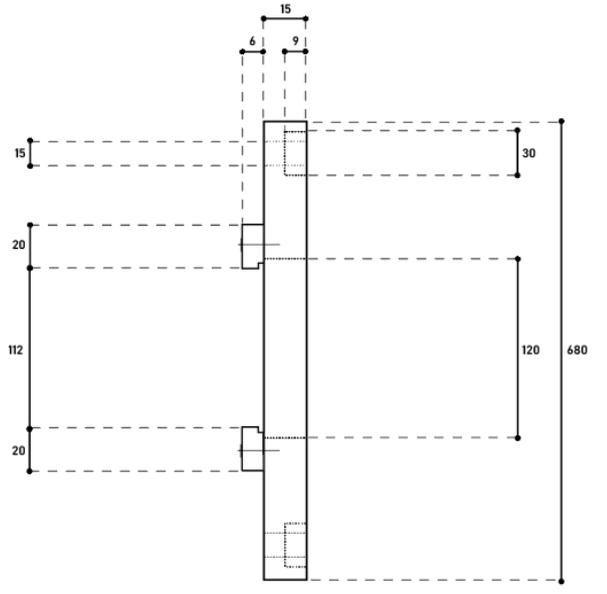
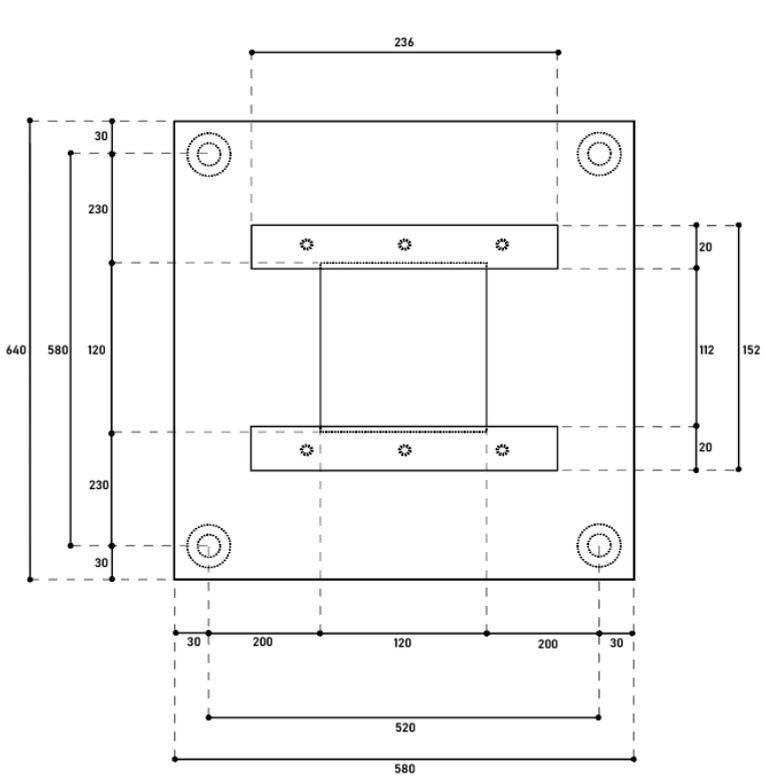


Plan côté du bâti du dispositif

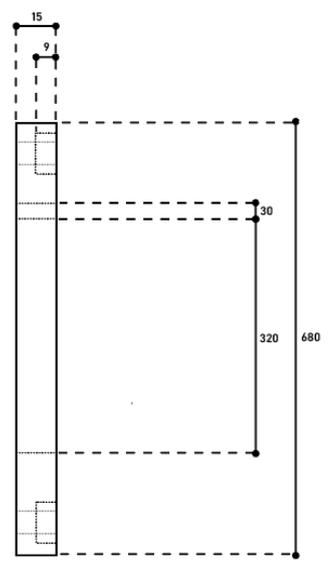
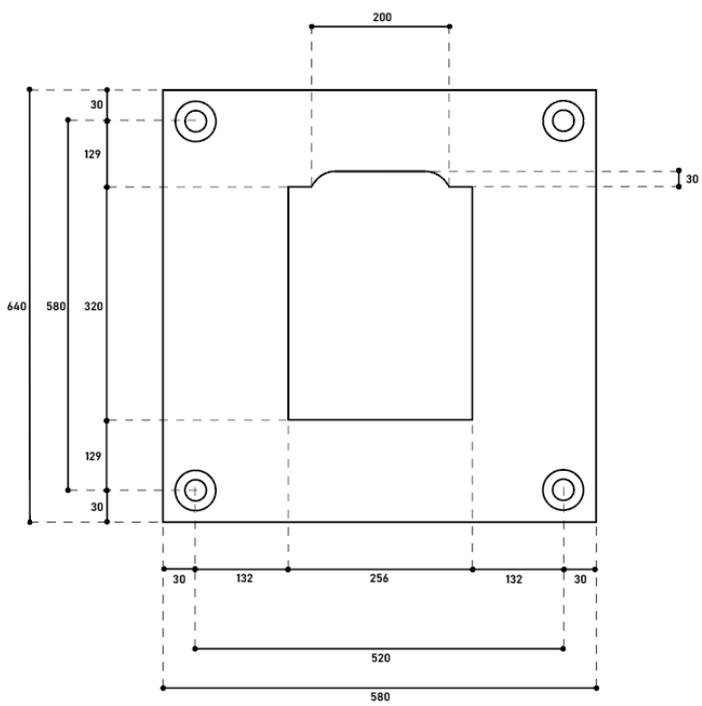
**Entretoises non représentées pour simplification du schéma*

En ce qui concerne les platines, leur dimensionnement est conditionné par les côtes des flasques. En effet, elles devront être identiques afin que les tourillons des bielles et les arbres soient parfaitement parallèles. Seules les dimensions du cadre intérieur diffèrent de celles des flasques. Elles seront ici calculées en fonction de la planchette de l'objectif et du châssis. Le cadre de la platine avant ne devra pas dépasser l'espacement des deux glissières vissées sur la face, c'est-à-dire 152 mm. Nous opterons pour un cadre carré de 120 mm de côté. Pour la platine arrière, le défonçage intérieur s'adaptera au chariot de la chambre qui coulisse à travers la fenêtre. Il devra aussi bien sûr être légèrement plus large que le format de l'émulsion sensible pour une visualisation correcte de l'image. La fenêtre arrière mesurera donc 210 mm sur 300 mm.

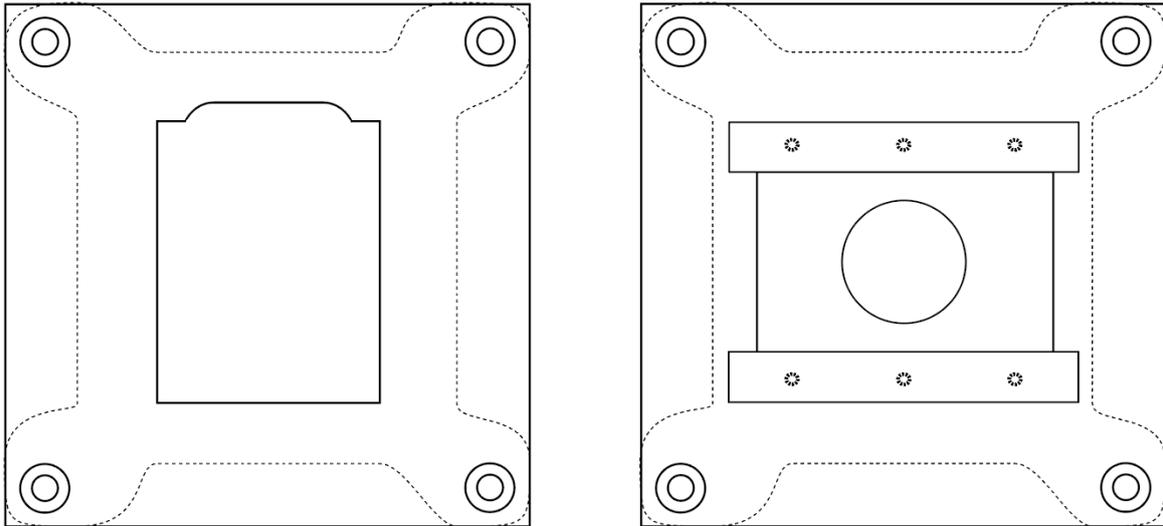
Les deux platines seront également évidées pour réduire leur poids. L'évidement ne devra tout de même pas être trop important pour ne pas risquer de fragiliser les modules. Nous garderons alors une marge de 50 mm autour de l'ouverture du cadre. L'évidement n'est pas représenté sur les plans pour des raisons de clarté.



Plans côtés de la platine avant

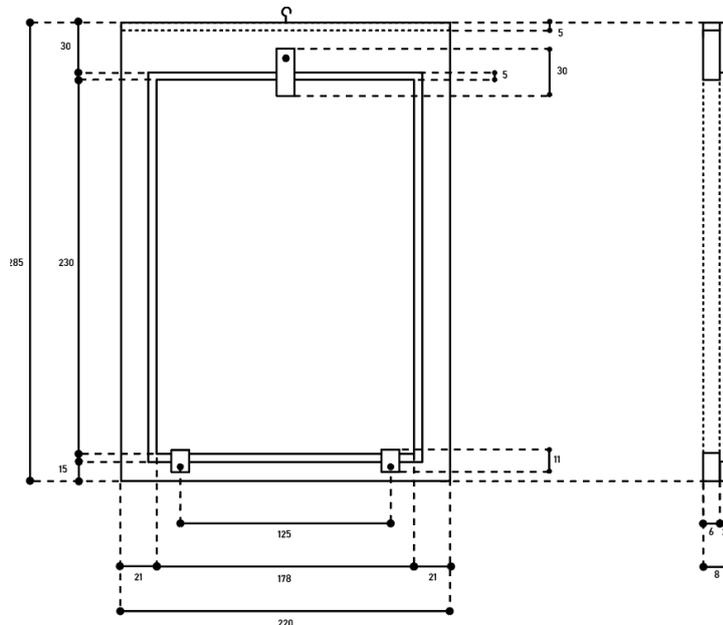


Plans côtés de la platine arrière

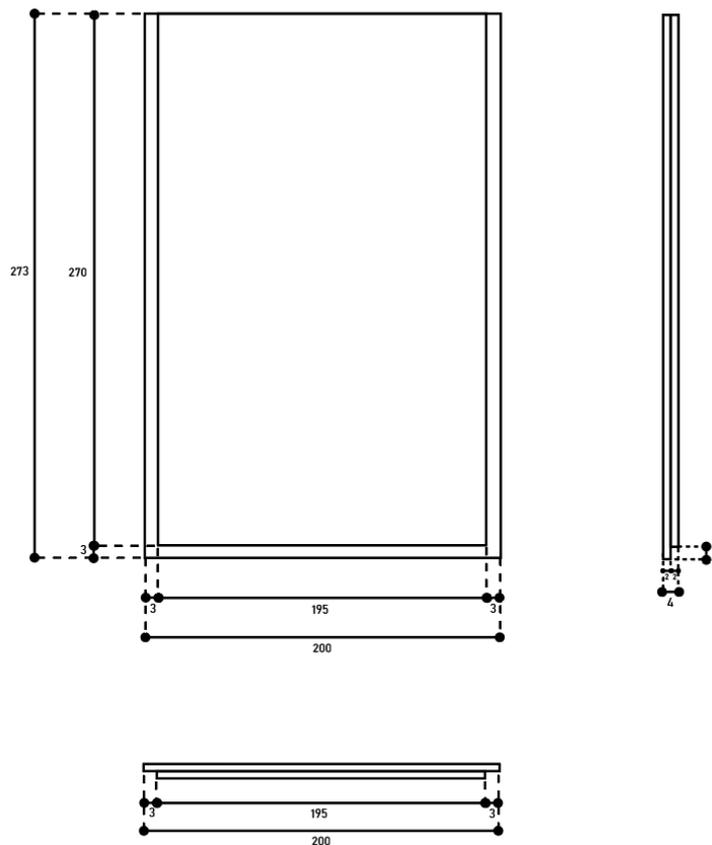


Représentation de l'évidement des platines

Le système de réglage de mise au point nécessite moins de calcul. Le plateau coulissant de la chambre et le châssis seront gardés intacts. Le mécanisme des roues crantées sera récupéré en sciant la partie fixe du chariot à environ 100 mm de son extrémité. Les équerres de maintien seront ajustées à cette longueur. Les côtes précises du volet occultant et du porte-dépoli ont également été relevées et reportées sur plans pour leur reproduction en atelier.



Plan côté du port-dépoli



Plans côtés du volet occultant

Enfin, si nous décidons de réaliser un tout nouveau soufflet, ses dimensions pourront être adaptées aux platines de notre prototype. Sa petite base carrée s'intégrera directement dans la fenêtre intérieure de la platine avant, elle devra donc mesurer 120 mm de côté. Pour la plus grande base, elle sera fixée à l'arrière du châssis. Elle sera légèrement plus ample que le format du dépoli pour éviter que le soufflet ne soit à fleur et ne gêne la prise de vue. Enfin, sa longueur et sa capacité à s'étendre dépendent du tirage optique de notre prototype et sa plage de mise au point. Le tirage optique maximal peut être approximativement estimé à 400 mm, pour une plage de 200 mm. En s'appuyant sur des tutoriels vidéos, qui déterminent la longueur à plat du soufflet en calculant $\frac{4}{3}$ du tirage optique maximal, le soufflet mesurera théoriquement 515 mm. Cependant, notre dispositif reste particulier et diffère d'une chambre classique. L'espacement entre les platines restant constant, le soufflet ne requiert pas une envergure très grande. En conservant cette mesure, nous gardons une marge d'erreur qui impliquera un éventuel raccourcissement avant d'être monté sur le prototype. En ce qui concerne les plis du soufflet, leur largeur sera identique à celle des plis du soufflet récupéré avec la chambre Mackenstein, c'est-à-dire 20 mm.

3.3. Reconstitution du dispositif

À partir de nos plans côtés, nous pouvons entamer la fabrication de notre dispositif. La première phase, l'usinage des pièces, requiert plusieurs séances en atelier réparties sur le mois d'avril. Pour la conception des modules en bois, nous collaborons avec mon premier frère Benoit, diplômé d'un BMA Ebénisterie depuis 2003 et devenu Compagnon. Pour le façonnage des éléments mécaniques, nous sommes accompagnés de mon second frère, Bixente, diplômé d'un CAP maintenance cycles et motocycles. Il intervient également pendant la deuxième phase, le montage de la chambre. Leur savoir-faire et leur expérience professionnels s'avèrent essentiels pour notre projet de construction, notamment pour les manipulations qui requièrent des compétences spécifiques et un geste expérimenté. Nos sessions de travail restent tout de même sur un ton pédagogique et d'apprentissage. Ils prennent le temps de nous montrer chaque outil, de nous expliquer chaque geste et nous laissent dès que possible en autonomie pour la réalisation de certaines tâches accessibles. La fabrication de notre dispositif se conclut avec une phase de test qui permet d'assurer la fonctionnalité de l'appareil avant les prises de vues et de le modifier en fonction des problèmes relevés.



- [...] – Usinage des pièces
- [...] – Montage du dispositif en rotation
- [...] – Tests de fonctionnement

Calendrier de la reconstitution.

3.3.1. Usinage des pièces



Marquage des axes.



Sciage des axes.



Ensemble des ronds-pleins taillés.

Une fois la découpe terminée, les extrémités des axes peuvent être filetées. Pour cette étape, nous nous appuyons sur divers tutoriels vidéo disponibles sur Youtube. Les tiges sont d'abord immobilisées verticalement dans un étau fixé à l'établi. Pour faciliter le calage et la perpendicularité de la filière M10, l'embout de la tige est préalablement limé et enduit d'huile de coupe. Son positionnement est contrôlé avec une équerre avant d'effectuer la rotation. Si la filière n'est pas strictement perpendiculaire à l'axe, le filetage ne sera pas droit, et la bielle sera tordue.



Filetage des axes.

Malgré plusieurs essais, le filetage manuel s'avère compliqué. Il nécessite une forte pression et une grande rigueur technique. Pour assurer une réalisation correcte, nous préférons laisser travailler mon frère, plus expérimenté et habitué à ce type d'usinage. Lorsque tous les filetages sont effectués, les tiges sont nettoyées avec un tissu sec et propre. Elles sont maintenant prêtes pour le montage du système mécanique.

Parallèlement, nous élaborons l'ébénisterie de notre appareil. Au cours de quatre jours répartis sur le mois d'avril, Benoit nous a chaleureusement accueillis dans son atelier situé à Saint-Just-Ibarre, un petit village du Pays-Basque. Outre le cadre idéal et la mise à disposition de ses machines, Benoit nous fournit également le bois et la quincaillerie. Ce don réduit considérablement nos coûts. Au-delà des économies, sa maîtrise professionnelle et ses connaissances techniques nous étaient indéniablement indispensables pour espérer atteindre une précision d'usinage suffisante.

Pendant notre première séance en atelier le samedi 10 avril, nous entamons notre collaboration par un échange dans son bureau. Nous lui présentons synthétiquement notre projet et les objectifs de cette reconstitution. Nous analysons ensuite plus en détails les plans côtés du dispositif. À partir de son expérience, Benoit a su nous proposer des alternatives techniques plus appropriées afin d'optimiser et simplifier la fabrication tout en gardant le niveau de précision nécessaire. Il m'a notamment suggérée le dispositif ingénieux d'une planchette coulissante pour le support de la poulie et de la manivelle à main qui permet de tendre la courroie lors du montage de l'appareil. Nous modifions les cotations de nos plans selon ses observations et déterminons chronologiquement chaque étape de la conception.

Le protocole à présent bien défini, la fabrication peut commencer. Pendant cette première journée, nous nous concentrons sur la confection des flasques, des deux embases, des entretoises et du support de la poulie.

① Choix et découpe du bois



Découpe du bois à la scie à format.

Benoit sélectionne des planches de contreplaqué parmi les chutes présentes à son atelier en prenant en compte les épaisseurs de chaque pièce*. Nous les découpons ensuite aux dimensions voulues à l'aide d'une scie à format Chambon SF293. Cet outil professionnel bien que précis et performant, reste complexe et subtil à utiliser. Au vu des risques liés à sa manipulation, Benoit se charge principalement des découpes. Pour l'apprentissage, nous nous essayons tout de même au sciage de quelques pièces mais une pratique régulière reste nécessaire pour acquérir un niveau d'aisance plus soutenu.

② Perçage des flasques et du support de la poulie

Pour assurer l'alignement de leurs perçages et de leur cadre intérieur, les deux pièces destinées à devenir nos flasques sont temporairement liées ensemble. Positionnées face contre face et leurs arêtes strictement alignées, quatre cales en bois sont vissées sur deux de leurs tranches. Nous marquons le centre des perçages, les limites de fraisage et des cadres intérieurs sur chaque face de l'assemblage avec une équerre et un crayon à papier. Les pièces sont ensuite immobilisées sur l'établi à l'aide de deux serre-joints. Avec une perceuse munie d'une fraise, les épaulements qui accueilleront les roulements à billes sont réalisés par à-coups, en vérifiant progressivement le centrage et la profondeur du lamage avec une petite règle métallique. Commencer par ces fraisages permet d'optimiser les perçages suivants en diminuant les risques de déviation de la mèche. Une première perforation guide est effectuée avec un foret 2mm au centre de chaque lamage. Elle est finalisée avec un foret 15mm, en retournant plusieurs fois

les deux flasques pour vérifier la perpendicularité de sa direction. Un lamage et un perçage sont également réalisés sur chaque planchette de support de la poulie.

Une perceuse à colonne aurait été l'outil idéal pour cette étape. Elle aurait permis un plus haut niveau de précision en assurant une perpendicularité stricte.



Liaison temporaire des deux flasques.



Immobilisation des flasques à l'établi.



Fraisage et perçage des flasques.

③ Débit des flasques

Pour procéder au débit du cadre intérieur des flasques, les quatre cales de maintien sont dévissées afin d'usiner chaque pièce indépendamment. Avant d'effectuer la découpe avec une scie circulaire plongeante Festool TS 55, celle-ci est de nouveau immobilisée à l'établi avec deux serre-joints. Le rail de guidage de la scie est positionné avec précision sur les délimitations de notre fenêtre. L'outil est posé dans son logement et placé pour que la lame s'introduise correctement, sans dépasser les limites du carré à débiter. Lorsque la découpe commence, la lame en rotation est d'abord abaissée lentement dans la pièce en bois pour la traverser. La scie peut ensuite être translaturée le long de la règle pour découper la longueur, en s'assurant bien évidemment de ne pas dépasser les marquages. Ce geste est réalisé sur chaque côté du cadre. Pour de plus belles finitions, nous terminons le sciage des angles avec un scie sauteuse. Les flasques sont débitées.



Découpe des cadres intérieurs des flasques à la scie circulaire.



Finition de la découpe à la scie sauteuse.

④ Montage du support poulie

L'usinage du support de la poulie et de la manivelle est une étape relativement rapide. Les deux petits pans de bois percés et fraisés sont positionnés sur leur planchette de support selon les dimensions prédéfinies. Leur position est annotée au crayon à papier sur la surface. Avec la scie sauteuse, deux rainures sont réalisées à l'extérieur des marquages. Lorsque ces deux trous oblongs sont terminés, les deux pans sont vissés à la planchette par-dessous. L'ajout d'équerres métalliques était initialement prévu pour assurer leur perpendicularité. Mais après quelques vérifications, ce renforcement ne semble pas nécessaire. Les vis suffisent à maintenir les planchettes parfaitement droites. Avant l'assemblage définitif, nous vérifions de bien positionner les fraisages des deux pièces face à face afin que les roulements à billes soient plus proches.



Montage du support du système de poulie.

⑤ Perçage de l'embase supérieure

À partir des dimensions des rainures de la planchette vue précédemment, les perçages de l'embase supérieure peuvent être effectués, avec la perceuse Dewalt munie d'une mèche 8mm. Les quatre perforations accueillent les vis M7 de serrage qui immobiliseront le support de la poulie contre l'embase pour le maintien en tension de la courroie. N'ayant pas encore cette dernière pièce entre les mains, l'emplacement des trous est estimé approximativement, mais d'autres perçages peuvent être réalisés ultérieurement si nécessaire. Par la même occasion, les positions des flasques sont délimitées au crayon sur la surface de l'embase pour préparer leur assemblage.



Perçage de l'embase supérieure.

⑥ Finitions des pièces

Avant la fin de notre première séance d'ébénisterie, chaque pièce est finalisée. À l'aide d'une ponceuse électrique dotée d'un disque abrasif assez fin de 120, les arêtes sont chanfreinées pour les adoucir et limiter leur saillance. Toutes les surfaces sont également poncées pour apparaître plus lisses et être plus agréables au toucher. Cette étape permet aussi d'effacer les traces de crayon résiduelles et atténuer quelques défauts du bois. Les fraisages et les perçages sont eux poncés manuellement avec du papier de verre aussi très fin. Seuls les chants situés au niveau d'un point de contact entre deux pièces ne doivent pas être poncés afin de conserver leur planéité de découpe. Ainsi la droiture et la stabilité de l'assemblage sont assurées. Pour terminer, nous notons la position des trois entretoises en bois sur les flasques pour préparer leur fixation.



Ensemble des pièces réalisées pendant la première séance.

L'usinage se poursuit lors de notre deuxième session, le samedi 17 avril. L'objectif de cette journée est de confectionner les glissières et les coulisseaux pour ensuite monter le système de translation et l'ensemble du bâti.

⑦ Confection des glissières et des coulisseaux

Les glissières et les coulisseaux sont usinés séparément. Un tasseau en chêne est découpé avec la scie à format Chambon et une raboteuse Utis aux dimensions posées pendant notre entretien. Avec la première machine, les pans inclinés des quatre pièces sont ensuite coupés. La précision du système d'orientation de la lame permet d'obtenir des entailles parfaitement droites, régulières et centrées. Pour les glissières, une première entaille droite est réalisée sur toute la longueur de la chute du tasseau. De part et d'autre de cette ligne, deux coupes à 45° symétriques sont effectuées. De même pour les pans des coulisseaux.

Les quatre pièces sont ensuite poncées avec la ponceuse électrique. Pour les pans inclinés, nous préférons un ponçage manuel très doux afin que la planéité reste correcte. Si l'intervention est trop destructive, la planéité des surfaces peut être compromise. Le frottement entre les coulisseaux et les glissières serait alors beaucoup plus important, pour une translation moins homogène et demandant plus d'énergie pour son actionnement. La ponceuse électrique est donc exclue pour ces pans, mais également pour les faces entrant en contact avec les embases, afin d'assurer leur perpendicularité lors de l'assemblage. Les glissières sont vissées sous l'embase supérieures, les coulisseaux sur l'embase inférieure. Il faut bien évidemment veiller à ne pas obstruer les perçages dédiés aux vis du support de la poulie.

⑧ Fabrication du système de translation

Nous enchainons avec la conception du système chargé de translater les glissières sur les coulisseaux grâce à une tige filetée épaisse sans fin. Deux petites planchettes de support et une traverse sont découpées en contreplaqué. L'espace séparant les glissières vissées ultérieurement à l'embase supérieure définit la longueur de cette traverse. Les trois pièces, maintenues par des serre-joints, sont percées ensemble avec un foret 20mm pour garantir l'alignement des trous qui accueilleront la tige filetée. Le perçage de la traverse est ensuite

fraisé. Un écrou de diamètre M15 y est encastré à la massette. Une surface intermédiaire de protection est évidemment positionnée entre la massette et le boulon pendant l'incrustation pour ne rien détériorer. La traverse est collée aux glissières et à l'embase supérieure. Parallèlement, les deux planchettes de support sont collées à l'embase inférieure. L'alignement des trois modules est contrôlé en enfilant la tige filetée lorsque la colle n'est pas tout à fait sèche pour réaliser les ajustements nécessaires. Pour la mise en rotation de cette tige filetée, nous trouvons dans l'atelier une poignée en « T » adaptée à son diamètre qui est directement vissée et collée à son extrémité. Ce type de poignée apparait idéal pour une bonne prise en main et une maîtrise rigoureuse de la distance de translation. Pour finaliser notre système de vis sans fin, des écrous doivent être montés sur la tige, en contact avec les planchettes, afin de transmettre la translation de la tige filetée à la traverse, et plus globalement, à l'appareil photographique. Ainsi, nous effectuons plusieurs tests de montage, résumés dans le tableau ci-dessous :

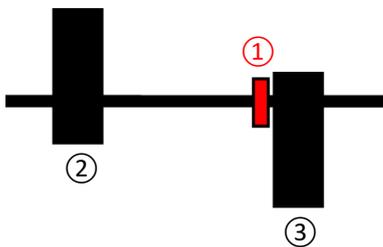
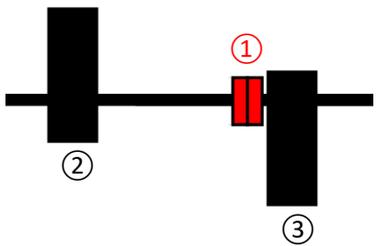
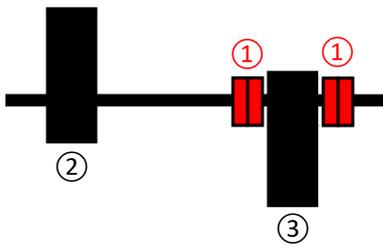
Test	Description de l'installation	Schéma (Vue de profil)	Réaction de la tige	
			Sens horaire	Sens anti-horaire
1	Un seul écrou (1) placé entre la traverse (2) et la première planchette de support (3), contre cette dernière.		<ul style="list-style-type: none"> • Translation de la tige vers l'avant • Aucun mouvement de la traverse 	<ul style="list-style-type: none"> • Translation de la tige vers l'arrière • Aucun mouvement de la traverse
2	Deux écrous (1) vissés l'un contre l'autre, entre la traverse (2) et la première planchette de support (3), contre cette dernière.		<ul style="list-style-type: none"> • Rotation sans fin • Translation de la traverse sur la tige vers l'avant 	<ul style="list-style-type: none"> • Translation de la tige vers l'arrière • Aucun mouvement de la traverse
3	Quatre écrous (1), deux de chaque côté de la planchette (3), avec un petit espacement.		<ul style="list-style-type: none"> • Rotation sans fin • Translation de la traverse sur la tige vers l'avant 	<ul style="list-style-type: none"> • Rotation sans fin • Translation de la traverse sur la tige vers l'arrière

Tableau récapitulatif des tests de montage des écrous sur la barre filetée.

Le système de translation est correctement monté. Nous pouvons déjà prévoir l'application de paraffine avant la prise de vue afin de réduire les frottements, favoriser un coulisement plus homogène et faciliter la rotation de la poignée.

⑧ Montage du bâti + vissage de l'ensemble + finitions



Toutes les pièces sont maintenant usinées. Le bâti peut alors être assemblé. Nous plaçons tout d'abord les deux flasques sur l'embase, puis nous les maintenons avec deux serre-joints pour procéder à l'insertion des vis par dessous. Un perçage guide est préalablement réalisé pour assurer la perpendicularité du vissage et ne pas abimer le chant des flasques. Évidemment, nous vérifions avant tout que les fraisages sont dirigés vers l'extérieur afin que les roulements à billes soient plus proches des futures bielles. Nous vissons ensuite les trois entretoises entre les deux cadres. Deux vis sur chaque chant garantissent leur immobilisation et celle des flasques.

Bâti de notre dispositif définitivement assemblé.

Enfin, nous disposons le support poulie sur l'embase, en alignant les perçages avec les glissières de la planchette pour ensuite insérer les vis de serrage. Des écrous ailés viennent sceller les deux pièces. Cet assemblage clôture notre seconde séance en atelier.

Avant notre troisième session, le mercredi 28, nous avons reçu la chambre Mackenstein destinée à être adaptée à notre dispositif. Avec Benoit, nous réfléchissons ensemble à cette adaptation et à la fabrication des platines. Mes premières hypothèses, qui optaient pour la fabrication d'une boîte de mise au point, étaient trop complexes et ambitieuses. Nous choisissons alors une alternative plus simple, qui requiert moins d'interventions sur cette fameuse chambre Mackenstein.

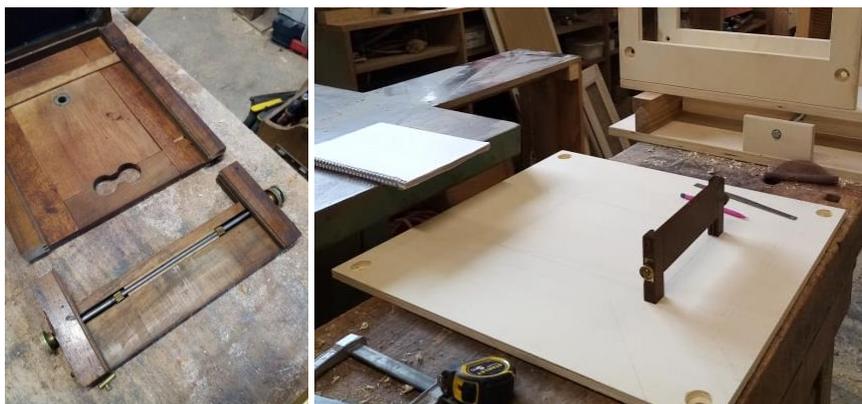
⑨ Usinage des platines

En suivant nos plans retravaillés, nous commençons par fabriquer les deux platines. Idéalement, elles auraient dû être usinées en même temps que les flasques pour maximiser la précision et l'alignement des perçages. Mais nous avons préféré attendre l'arrivée de la chambre Mackenstein pour entamer la fabrication. Le protocole reste tout de même identique. Les chutes sont découpées à la scie à format, puis percées et fraisées.



Fraisage des platines.

Avant de débiter les fenêtres intérieures, nous entamons l'adaptation de la chambre. Nous scions le chariot avec une scie circulaire pour ne garder que la partie portant le mécanisme des roues crantées et leur axe. Nous plaçons cette pièce sur la platine arrière pour vérifier le traçage du cadre intérieur. En effet, l'ouverture doit être adaptée au mécanisme et aux dimensions du plateau coulissant. De même pour la platine avant, la fenêtre doit s'adapter à la planchette portant l'objectif. Nous dévissons alors les glissières et les disposons, avec la planchette, sur notre tracé. Lorsque les ajustements nécessaires sont terminés, les deux fenêtres peuvent être débitées à la scie circulaire. Par la suite, deux équerres de support sont découpées dans des chutes avec la scie sauteuse avant d'être collées sous la partie découpée du charriot de la chambre Mackenstein. Une fois l'assemblage sec, nous le collons sur la platine arrière. Cette étape requiert une rigueur particulière pour assurer le strict alignement des glissières avec le côté inférieur de la fenêtre. Ainsi, le plateau portant le châssis pourra correctement translater sur les roues crantées.



Découpe et positionnement du mécanisme à roues crantées de la chambre Mackenstein sur la platine arrière.

Pour finaliser les deux platines, nous procédons à leur évidement avec la scie sauteuse puis à leur ponçage, toujours avec la ponceuse circulaire électrique.



Platines avant et arrière finalisées.

Au cours de notre quatrième et dernière session d'usinage avec Benoit dans son atelier, nous poursuivons avec la restauration des derniers éléments de la chambre Mackenstein, l'installation des roulements à billes et la réalisation de disques d'adaptation pour les poulies.

⑩ Restauration du porte-dépoli et du rideau occultant

Ces deux pièces sont découpées dans du bois, toujours aux dimensions choisies, avec la scie sauteuse. Des feuillures sont réalisées à l'aide d'une défonceuse sur les limites de débit

intérieur du porte-dépoli et sur les côtes extérieures du volet occultant. La faible épaisseur des feuillures fragilise les deux pièces, qui demandent alors un ponçage manuel très léger et délicat. Leur manipulation doit également être maîtrisée et attentionnée. Leur épaisseur est affinée avec une ponceuse à bande abrasive Makita.



Débit intérieur du porte-dépoli.

Le verre dépoli adapté à notre nouvelle pièce est conçu manuellement quelques semaines plus tard, au cours du mois de juin. Une plaque de verre clair de 2mm d'épaisseur et de format 19*25cm est polie à l'aide de la pâte à roder Chemico et une pièce en bois. Une cuillère à café de pâte, d'abord à gros grains, est posée sur la surface de la plaque. Avec la pièce en bois, nous venons l'étaler et la frotter contre le verre en effectuant des mouvements circulaires. Toutes les cinq minutes, nous vérifions l'état de surface de notre plaque pour éviter un polissage trop fort. Après dix minutes de polissage, nous optons également pour une pâte à grains plus fins. En effet, plus le polissage est fort, plus l'opalescence du verre augmente. L'observation d'une image demandera aussi davantage de lumière.

⑫ Incrustation des roulements à billes

Nous incrustons ensuite chaque roulement à billes dans son logement. Pour leur fixation, nous posons quatre points de colle dans le lamage avant de placer le roulement, parfaitement aligné au perçage. Un fois disposé, le roulement est rapidement dépoussiéré et

nettoyé avec un tissu et de l'air comprimé. Quelques fraisages semblent plus larges de 1 ou 2 mm, mais toutes les pièces paraissent correctement dirigées et maintenues.



Roulement à billes incrusté dans son logement.

⑬ Adaptation des poulies

Pour terminer la phase d'ébénisterie, nous réalisons des disques d'adaptation en contreplaqué pour les poulies. Découpés à la scie sauteuse, les disques sont ensuite percés en leur centre avec une mèche 10mm pour le passage de l'axe. Ils sont enfin encastrés dans les poulies avec une massette, avec une surface protectrice intermédiaire. La forme conique de la surface intérieure des poulies commandées en ligne complique cette manipulation. Elle augmente aussi les risques de ne pas obtenir un axe strictement perpendiculaire. Nous préférons attendre le montage final pour réfléchir à un éventuel renforcement de l'assemblage du système de poulie-courroie.

⑭ Restauration du soufflet

Chronologiquement, nous entamons la conception du soufflet après le montage du dispositif, le mercredi 5 mai. L'idée de départ était de fabriquer un tout nouveau soufflet, spécifiquement adapté à notre chambre. Cependant, malgré de nombreux tutoriels et forums à ce sujet, nous avons rencontré des difficultés à dessiner le patron en papier. Après deux

semaines de réflexion et d'essais, nous avons pris la décision de restaurer le soufflet récupéré sur la chambre Mackenstein. Ainsi, une toile en PVC noire est minutieusement collée comme revêtement extérieur afin d'assurer l'imperméabilité du soufflet aux rayons lumineux. Face après face, la colle néoprène est progressivement appliquée avec un pinceau plat à poils longs sur chaque pan du pliage. Le tissu est ensuite apposé sur la surface. Le passage d'une règle métallique fine au niveau des arêtes permet d'obtenir des finitions plus propres. Pour la nuit de séchage, le pliage est maintenu par trois pinces métalliques. Le revêtement terminé, nous consolidons les quatre arêtes dentées avec du gaffer noir, lui-même renforcé avec de la colle forte en gel. Le résultat final revêt un aspect « raccommodé ». La restauration, théoriquement assez simple, est assez laborieuse en pratique. Cela se ressent visuellement, mais le plus important est la fonctionnalité du soufflet.

Toutes les pièces sont à présent usinées et n'attendent plus qu'à être assemblées. Notre collaboration avec Benoit touche également à sa fin. Nous pouvons à présent entreprendre le montage du système et des pièces qui entrent en rotation pendant la prise de vue.

3.3.2. Montage du mécanisme de rotation

Les deux premiers jours, notre objectif est d'expérimenter diverses méthodes d'enfilement des axes dans les embouts d'articulation pour concevoir les bielles. Le principe paraît théoriquement simple : il suffit de chauffer l'embout en métal pour le dilater et ainsi élargir le perçage récepteur. La tige peut parallèlement être refroidie pour se contracter et favoriser une bonne insertion. Tous les ronds pleins découpés sont donc conservés une nuit entière à une température approchant les -28°C dans un congélateur. Pour limiter le choc thermique à la sortie du réfrigérateur, les tiges sont transportées dans une boîte et manipulées avec une pince, elles-mêmes stockées au froid. Nos essais concernent davantage la méthode à employer pour chauffer les embouts d'articulation.

Sur le forum de Galerie-Photo, plusieurs passionnés de mécanique conseillent l'utilisation d'une décapeuse thermique, notamment pour l'enfilement ultérieur des roulements à billes. Cet outil permet de chauffer progressivement la pièce sans risquer une quelconque détérioration. L'embout d'articulation est saisi grâce à une pince métallique et exposé au souffle d'une décapeuse Einhell. N'ayant aucun repère, nous augmentons par palier

de 5 minutes la durée du chauffage. Après un dernier essai à 15 minutes, l'embout ne chauffe pas suffisamment, la dilatation reste minime et l'insertion de l'axe se limite à quelques millimètres. Nous concluons que cette technique n'est pas la bonne.

Sur un second forum, celui de Disactis, un utilisateur propose une alternative à la décapeuse thermique. Il conseille de simplement placer la pièce à dilater dans l'eau bouillante pendant une dizaine de minutes. Comme pour l'expérimentation précédente, nous augmentons graduellement le temps de chauffe. Les résultats sont équivalents : l'axe ne s'introduit pas dans le perçage de l'embout.

Une dernière alternative se présente alors à nous. Les axes peuvent être simplement limés le plus régulièrement possible jusqu'à coulisser de manière fluide dans les embouts et les roulements à billes. Cette solution présente des risques. En effet, si le rond plein est excessivement poncé, l'axe glissera trop facilement et leur fixation sera compromise. Par ailleurs, si l'alésage n'est pas régulier, du jeu se crée. La perpendicularité de la tige par rapport à l'embout, ou le roulement, n'est plus assurée. Néanmoins, cette méthode reste notre unique issue. Pour limiter les risques, nous procédons par ponçage ou limage progressif uniquement sur les extrémités des tiges en expérimentant diverses techniques. Mon frère emploie une meuleuse tandis j'utilise du papier de verre pour métal. Nous commençons par poncer manuellement, tige à la main, mais chacune demande environ 30 minutes de ponçage. Nous nous installons différemment. Nous immobilisons une chute de papier de verre dans un étau, de sorte à former une boucle. Le rond plein est monté comme une mèche dans une perceuse. Nous le glissons ensuite dans la boucle et actionnons la perceuse. Ainsi, la rotation très rapide permet d'obtenir un ponçage plus régulier tout en étant plus efficace, soit environ 10 minutes par tige. Les axes peuvent aussi être limés avec un touret. Le ponçage ne dure alors que quelques minutes.

Lorsque tous les ronds pleins sont alésés, nous préparons la fixation des poulies et de la manivelle sur leur axe. Pour une liaison solide, nous optons pour l'ajout d'une vis d'arrêt. Montée sur leur arbre, les trois pièces sont percées en leur tranche avec une mèche fine jusqu'à transpercer l'axe. Une vis de diamètre 5 mm taillée en biseau avec une meuleuse est insérée dans le perçage, la pièce est bloquée. La tête de la vis est également taillée avec une disqueuse pour ne pas gêner le passage de la courroie. Pour la manivelle à main, nous choisissons une vis plus épaisse, de diamètre 6mm, avec une tête BTR Allen pour pouvoir être montée et démontée

rapidement à l'aide d'une clé. Nous inscrivons au passage les positions des poulies sur leur tige après avoir vérifié leur alignement et leur centrage sur l'arbre. Les pièces sont ensuite retirées de leur axe afin de pouvoir réaliser le montage final de notre mécanisme.

Le protocole est le suivant :

① Installation du plan de travail

Nous organisons, dans le sous-sol de la maison familiale, un plan de travail adapté au montage de notre dispositif. Le bâti est disposé sur un plan stable parfaitement parallèle au sol, au milieu de la pièce afin de pouvoir tourner autour, assez proche de la fenêtre pour une luminosité convenable et naturelle. Nous installons ensuite deux autres plans symétriques de part et d'autre du bâti. Grâce à des tréteaux et des calles en bois, ces deux surfaces sont surélevées par rapport au support du dispositif. Elles permettront de monter plus facilement les bielles et les platines qui sont posées sur ces pans. Toutes les surfaces sont évidemment recouvertes de tissus protecteur afin de ne pas malencontreusement abimer notre appareil. Nous gardons également à proximité du plan de travail une chute de tissu pour dépoussiérer et nettoyer nos pièces si nécessaire.

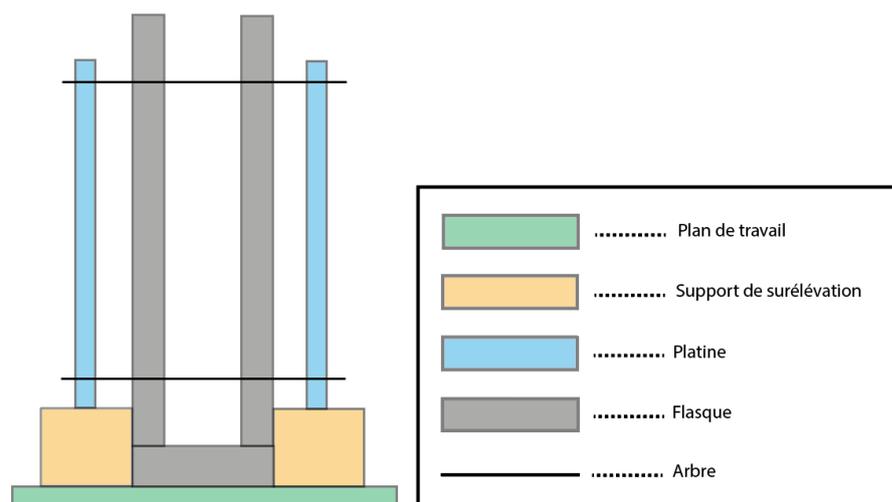
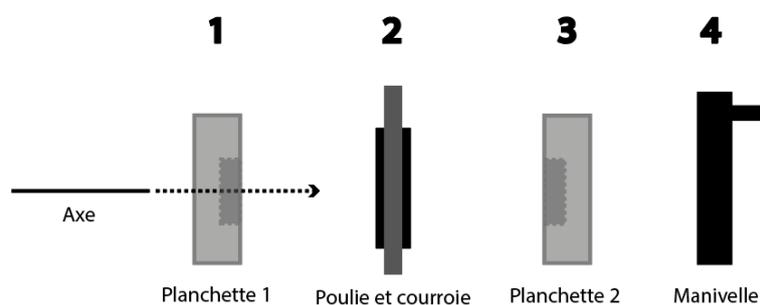


Schéma du plan de travail vu de profil.

② Montage du système de poulie-courroie

Le montage commence par la mise en place du système de poulie-courroie. Dans un premier temps, nous nous concentrons sur le support de la manivelle à main et de la petite poulie. Quelques gouttes de colle Loctite 603 sont déposées dans le roulement à billes d'une des deux planchettes. Le cylindre intérieur du roulement est tourné manuellement pour une répartition uniforme et homogène de la colle. Le rond plein est inséré dans le roulement, puis dans la petite poulie et enfin dans le roulement de la seconde planchette, lui-aussi préalablement enduit de colle. Nous laissons la tige dépassée de plusieurs centimètres vers l'arrière du dispositif pour prévoir l'ajout de la manivelle à main. La petite poulie est ensuite définitivement clavetée à l'axe. Le protocole reste identique pour le montage de la plus grande poulie sur son arbre. Il ne faut bien sûr pas oublier de placer la courroie sur les poulies. L'alignement des deux poulies est vérifié avant qu'elles soient vissées. Nous avons renforcé cette fixation à la colle forte en gel car les disques d'adaptation que nous avons fabriqués n'étaient pas parfaitement adaptés au diamètre des ronds pleins. La manivelle à main est fixée de manière similaire.



Montage de l'axe du système de poulie courroie.

③ Fixation des arbres

Nous disposons ensuite les trois autres axes, en vérifiant au millimètre près leur dépassement des flasques pour assurer un alignement correct des bielles. Il est également important de nettoyer leurs extrémités avec un tissu légèrement humide après leur passage dans les roulements enduits de colle afin d'éviter tout dépôt sur les filetages. Cela pourrait compliquer le vissage des embouts.

④ Assemblage des bielles et des platines

Les bielles peuvent à présent être conçues. Nous procédons une flasque après l'autre afin de contrôler au mieux leur parallélisme et leur symétrie. Après chaque collage, nous attendons deux heures pour un séchage complet de la colle. Nous commençons par coller un embout sur chaque entraxe de bielle. Nous venons ensuite les visser et les coller sur les axes montés précédemment. Les autres embouts d'articulation sont collés et vissés aux tourillons, puis enfilés sur les entraxes des bielles sans être définitivement fixés. La platine est ensuite positionnée sur le plan surélevé et les quatre tourillons sont placés dans leur roulement à billes respectif.

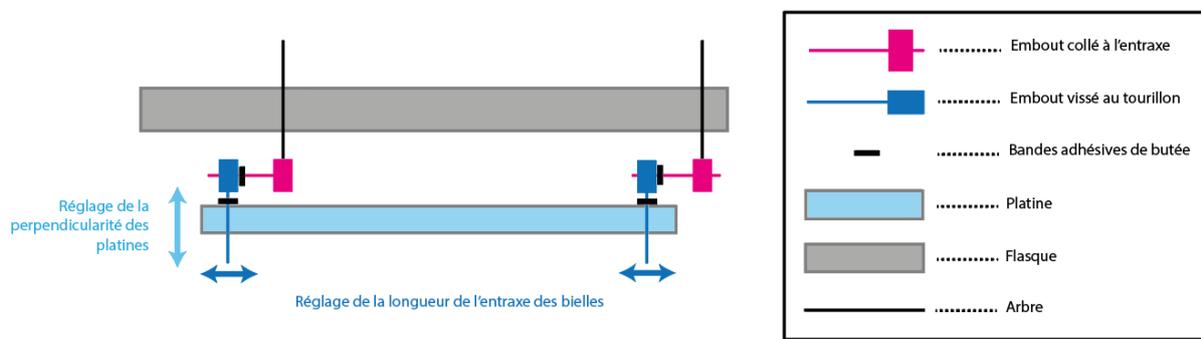
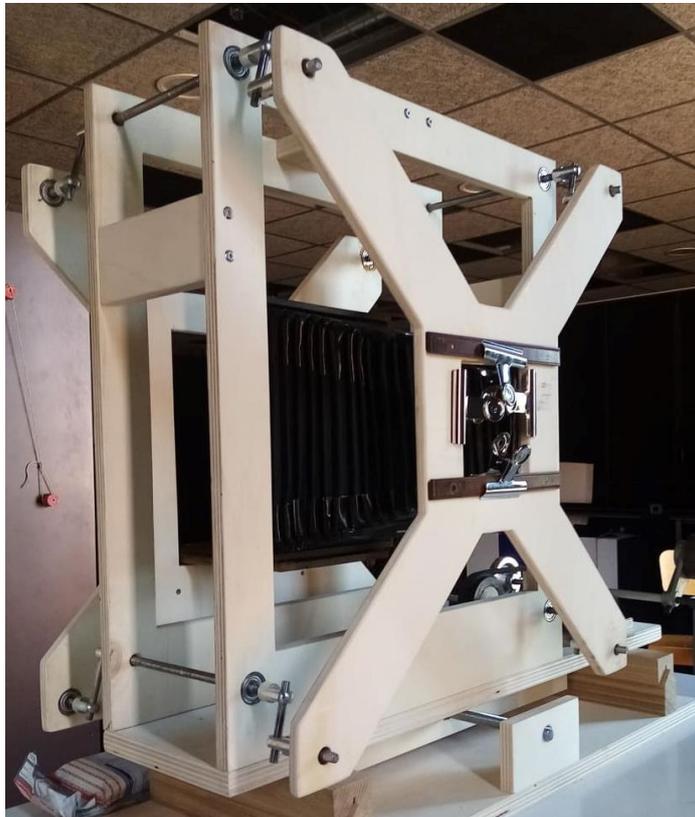


Schéma du montage de la platine.

En maintenant la platine et en la déplaçant latéralement, nous ajustons et contrôlons la longueur des quatre bielles avec un pied à coulisse. Lorsque les quatre longueurs sont identiques, nous notons la position des embouts avec une bande d'adhésif pour faciliter leur fixation ultérieure. Nous marquons également l'emplacement des roulements à billes sur les tourillons en prenant soin de vérifier la perpendicularité de la platine avec un niveau à bulle. Lorsque tous les repères sont posés, nous translatons les embouts et les roulements sur leur axe, sans totalement les retirer, pour pouvoir déposer la colle. Les pièces sont enfin replacées en butée contre l'adhésif. Les longueurs sont tout de même vérifiées et ajustées une dernière fois. La platine est maintenue dans sa position grâce à des serre-joints pour le séchage. Le montage de la seconde platine respecte le même protocole. Il ne faut cependant pas oublier de vérifier la symétrie des bielles et des platines avec une règle et un niveau à bulle pour le bon fonctionnement du système.

⑤ Montage du soufflet et de l'objectif

Les deux extrémités sont correctement taillées pour faciliter son installation sur la chambre. L'une après l'autre, elles sont enduites de colle au pinceau. Nous commençons par la face arrière du soufflet, que nous fixons au corps arrière de la chambre Mackenstein. Le cadre avant du soufflet est lui lié à la platine avant, en s'assurant qu'il n'entre pas dans le cadre de l'objectif. Ces fixations sèchent pendant toute une nuit, maintenues par des pinces métalliques plates. Le soufflet est installé. Quelques arrangements sont réalisés à la colle forte et à l'adhésif afin d'assurer son étanchéité.



Collage du soufflet à la platine avant.

Pour l'objectif, une bague filetée adaptée au diamètre de ce dernier vissée à une planchette en bois est directement collée à la planchette coulissante de la chambre Mackenstein. Après un séchage toujours maintenu par des pinces, celle-ci peut être insérée dans les glissières de la platine avant. L'objectif est posé et centré.



Photographie de l'objectif installé sur sa planchette.

Le dispositif est monté dans son intégralité. Cette dernière étape s'est avérée plus complexe que ce que nous imaginions et la précision d'assemblage demeure incertaine. Ses mécanismes doivent à présent être testés. Nous pourrions ainsi relever les éventuels défauts de conception et trouver les solutions techniques adaptées.

3.2.3. Tests de fonctionnement

Le lendemain du montage, le mardi 5 mai, le tout premier test de mise en rotation du dispositif est effectué. Un premier point positif : les platines tournent et leur mouvement semble parallèle. Cependant un bruit strident laisse à entendre qu'une friction a lieu au niveau des bielles. Les pièces en rotation subissent également un tressautement relativement fort qui tend à déloger deux des roulements. Le problème est rapidement localisé : certains filetages n'ont pas été réalisés parfaitement perpendiculaires à leur axe. Ainsi, les bielles ne sont pas strictement droites et exercent une force sur les roulements à billes pendant leur giration.

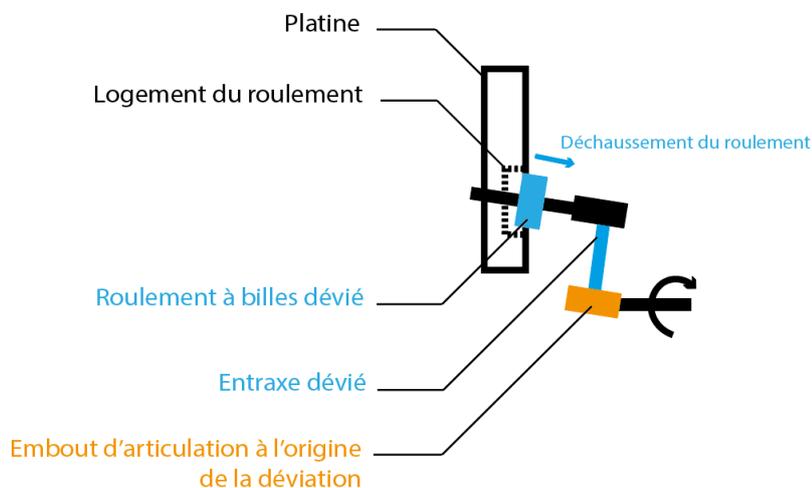
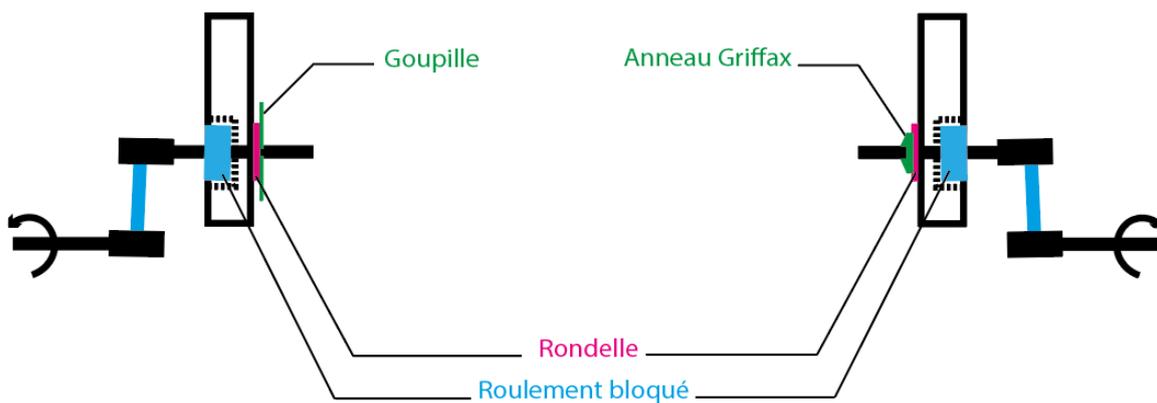


Schéma du problème de déviation des bielles.

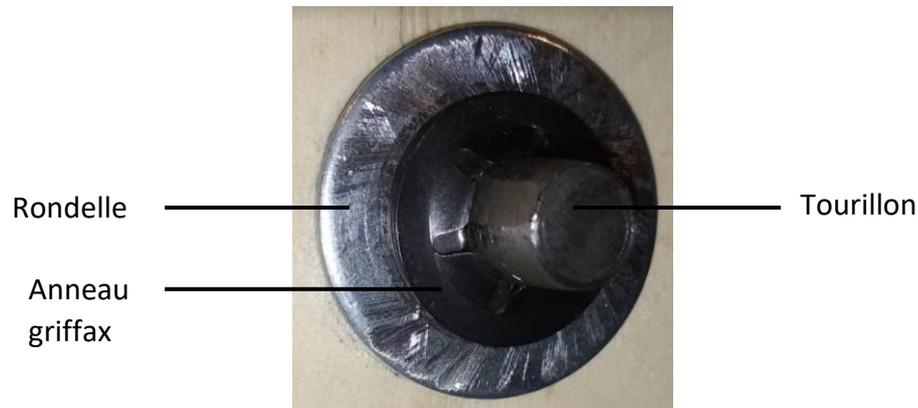
Pour corriger cette erreur d'usinage, nous essayons dans un premier temps de simplement recoller les roulements dans leur logement. Mais cela reste insuffisant. Nous tentons alors de les réaligner perpendiculairement aux bielles. Nous ponçons légèrement la surface intérieure du fraisage, repositionnons le roulement pour enfin boucher les espaces vides avec de la pâte à bois. Il s'avère cependant difficile de maintenir l'axe dans sa nouvelle position et la pâte n'a pas le temps de durcir. Nous optons dans un troisième temps pour l'ajout de goupilles à l'extérieur des platines qui bloqueraient le roulement dans la platine. Toutefois, cette alternative nécessite le limage et le perçage des axes. Pour moins de complications, nous préférons l'adjonction d'un anneau griffax sur chaque tourillon qui remplissent la même fonction que les goupilles. Une rondelle protectrice est disposée entre cet anneau et la platine pour ne pas abîmer le bois.



Schémas des deux solutions de blocage pour le maintien du roulement dans son logement.

Cette alternative s'avère efficace, mais la force exercée par la non-perpendicularité des bielles s'est déplacée et agit maintenant sur les embouts d'articulation qui se dévissent après une dizaine de tours consécutifs. Les platines se désolidarisent, leur rotation n'est plus corrélée. Ces liaisons pourraient être enduites d'une résine de blocage mais le sursaut du mécanisme reste présent et violent. Nous devons nous rendre à l'évidence, nous ne pouvons pas totalement régler ce problème inhérent à la confection des bielles, mais seulement nous en accommoder en adaptant notre protocole de prise de vue. Notre conception de ces pièces présente beaucoup d'erreurs, et nécessiterait donc une révision. L'entraxe des bielles aurait pu être réglable grâce un système d'entraxe fileté par exemple. L'achat de pièces de secours aurait aussi été judicieux, notamment des embouts d'articulation, pour élaborer des bielles de

rechange. Le collage définitif des pièces est aussi gênant. Un prototype avec un système démontable aurait été plus pratique et aurait permis le changement de certains modules.



Photographie d'un anneau griffax et d'une rondelle montés sur un tourillon.

Les poulies présentent également un souci de confection. Lorsqu'elles rentrent en rotation, elles dévient légèrement, la courroie ne reste pas dans son axe. Ce jeu provient des disques adaptateurs en bois. Ils ne sont pas parfaitement adaptés aux arbres ce qui présageait un dysfonctionnement presque certain. Des brides d'arrêt conçues industriellement auraient dû être achetées avec les poulies. La transmission de la rotation aux axes reste malgré tout assurée. La vitesse n'étant pas élevée, nous pouvons nous accommoder de cette imperfection mécanique.



Photographies d'un modèle de bride d'arrêt.

Nous relevons également que le poids imposé à la manivelle à main est beaucoup trop élevé et complique considérablement son actionnement. Il nous est nécessaire de la tenir à deux mains. La maîtrise de la vitesse de rotation est impossible. Sur un demi-tour, le mécanisme, non-soutenu, subit une accélération soudaine, similaire à une chute en avant. La rotation n'est pas linéaire, ce qui provoque le tremblement des flasques. L'obtention d'une image nette est inconcevable dans ces conditions. Nous décidons alors de fixer un contrepoids à la seconde extrémité de l'axe portant la petite poulie. Il est déporté en opposition aux platines

grâce à une pièce doublement percée pour tenter de compenser la charge supportée par la manivelle. Un tube d’allongement de l’axe est indispensable pour permettre au poids de tourner sans rentrer en contact avec le support du dispositif. Nous n’avons toutefois pas pris en considération la différence de diamètre des poulies qui décélère la rotation entre la manivelle et les platines. Ainsi, après plusieurs tours, le contre-poids s’aligne avec celles-ci. Il n’est plus efficace. Nous devons alors réaliser un tour dans un sens, puis un second tour dans le sens opposé pour palier à cette contrainte.

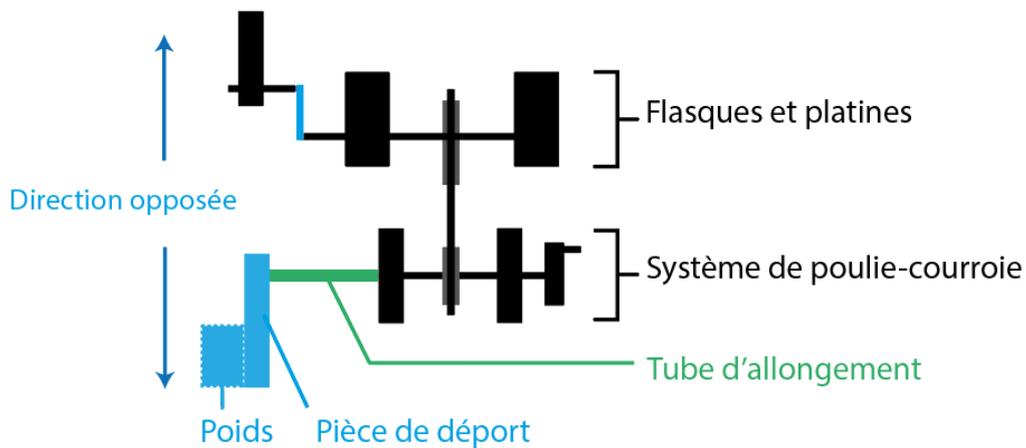
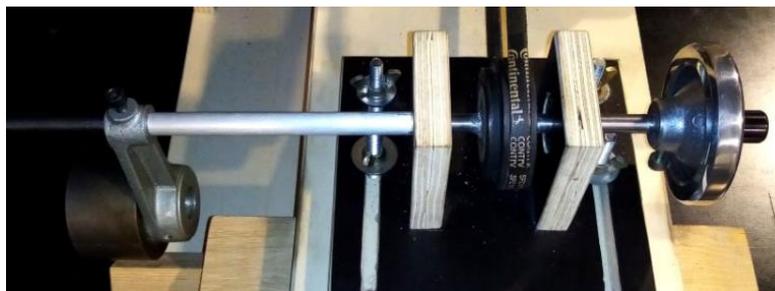


Schéma simplifié du principe du contre-poids.



Photographie du contre-poids installé.

En outre, l’actionnement du dispositif entraîne la vacillation du châssis qui est légèrement instable sur son support. Pour maintenir la partie supérieure du corps arrière de la chambre Mackenstein, deux languettes de maintien en sapin sont vissées entre la platine arrière et la partie supérieure du châssis. Pour pouvoir tout de même effectuer la mise au point, une rainure est réalisée dans la languette au niveau de l’emplacement du châssis. Elle peut être effectuée avec une meuleuse, mais nous n’en avons pas. Plusieurs perçages ont alors été

effectués le long du tracé de cette rainure avec une perceuse à colonne. Une fois évidée, la lumière est poncée manuellement pour obtenir un trou oblong lisse. Ce dernier accueille une vis plate collée au corps arrière de la chambre. Lorsque le réglage de la mise au point est terminé, un écrou ailé monté sur cette vis permet de serrer le corps contre la languette, liée à son autre extrémité à la platine avant grâce à des équerres métalliques. Notre châssis est ainsi stabilisé.

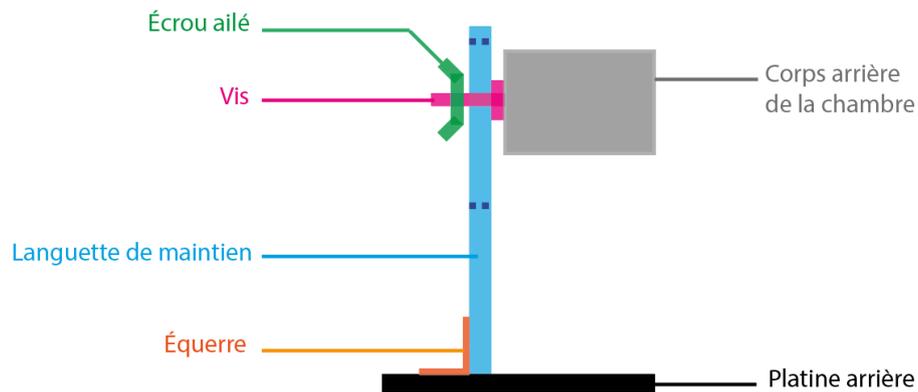
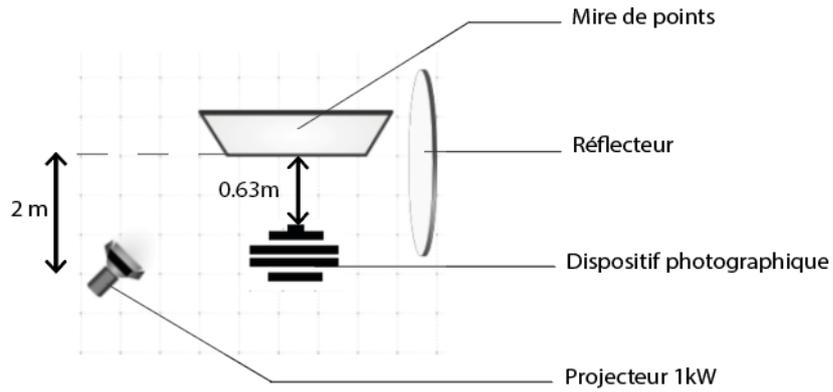


Schéma du montage des languettes de maintien.



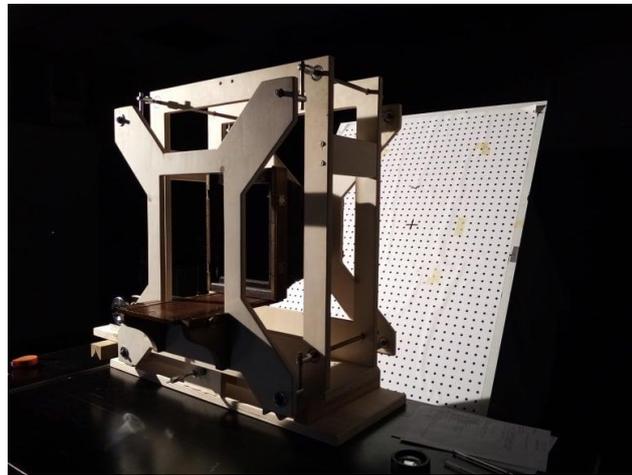
Photographie des languettes de maintien installées.

Suite à tous ces ajustements et ces modifications, nous réalisons à la fin du mois de juin quelques prises de vues tests sur du papier argentique pour analyser le système optique. Le sujet choisi est une mire de points noirs sur fond blanc positionnée en hauteur et inclinée par rapport à l'objectif. Ainsi, nous pourrions observer l'évolution de flou/net dans la profondeur. Elle est éclairée par une source tungstène de 1kW, placée à 2m de distance, à une hauteur de 180cm et dirigée à 45°. À l'opposé, nous disposons un réflecteur en polystyrène pour obtenir une image exposée uniformément.



Installation de prise de vues tests sur papier argentique.

Nous mesurons l'éclairement incident de la mire aux quatre coins et au centre de la zone photographiée avec une cellule Sekonic Speedmaster L-858D. L'éclairage est ajusté en fonction. D'après l'observation des tirages, nous pouvons estimer que l'ajout d'une seconde source en remplacement du réflecteur aurait été pertinent. Malgré une faible différence lors de nos mesures, les images ne sont pas éclairées uniformément, notamment à cause de l'inclinaison du sujet. Par ailleurs, le centre et les limites du cadre du dépoli sont inscrits sur la mire avec des bandes adhésives noires pour faciliter la mise au point.



Photographie de l'installation.

Nous poursuivons avec l'installation de notre dispositif photographique. Placé sur une table, nous ajustons son positionnement en mesurant la distance entre la lentille d'entrée de l'objectif et le centre de la mire. Lorsqu'il avoisine les 63 cm, nous contrôlons le parallélisme de la chambre vis-à-vis du sujet en observant les lignes de points sur le dépoli, lui-aussi marqué en

son centre par une croix. Lorsque tout nous semble correct, l'appareil est immobilisé à la table grâce à deux serre-joints. Après le nettoyage de l'objectif, la mise au point est réglée à l'aide d'une loupe compte-fil sur la croix centrale de la mire. Les vis de serrages du plateau coulissant sont serrées pour garder une mise au point fixe. Nous mesurons un tirage optique de 32cm.

Un premier essai de rotation est effectué à vide, sans papier, en observant le déplacement des deux croix sur le dépoli, l'observateur caché sous un drap occultant. En actionnant le mécanisme avec la manivelle à main et le contre-poids, le sursaut mécanique des platines désynchronise les croix qui ne se superposent pas pendant la rotation et une fois terminée. Nous décidons alors de soutenir manuellement les platines pendant la rotation. Cette manipulation limite le décalage entre sujet et image, mais il reste tout de même visible à l'œil nu. L'imprécision du système laisse présager une netteté restreinte, voire inexistante.

Pour les tests suivants, nous utilisons du papier argentique noir et blanc Foma mat au format 18*24 cm. Des cales découpées en carton plume viennent adapter le châssis à la finesse de la feuille pour que celle-ci soit immobilisée. Le protocole de capture est le suivant :

- Chargement de la feuille dans le châssis dans une pièce en lumière inactinique.

Un test d'« inactinicité » est préalablement réalisé avec une feuille de papier non-exposée. Nous la plaçons simplement dans la pièce allumée, posons un objet quelconque sur sa surface pour enfin la développer. Après séchage, le papier est blanc, la silhouette de l'objet ne se devine pas. La lumière est inactinique.

- Transport du châssis fermé jusqu'à la chambre.
- Dernière vérification de la mise au point sur le dépoli avec la loupe.
- Fermeture de l'objectif.
- Retrait du porte-dépoli.

Dès le premier essai avec châssis non-chargé, un nouveau problème de conception se manifeste très clairement. L'entretoise supérieure liant les deux flasques bloque le dépoli qui ne peut être retiré. De la même manière, le châssis ne peut être positionné. Nous n'avons d'autre choix que de le dévisser. La stabilisation des flasques reste assurée par les entretoises latérales.

- Positionnement du châssis dans le corps arrière de la chambre.

Il faut bien évidemment faire attention à l'insérer dans le bon sens, l'émulsion sensible vers l'objectif. Pour éviter toute confusion, nous déterminons préalablement le rôle de chaque volet occultant. Le volet d'origine, plus facile à manipuler, devra être orienté vers l'intérieur de la chambre. Le second volet, plus fragile, maintien quant à lui la surface sensible.

- Retrait du rideau occultant intérieur.
- Stabilisation du dispositif.

Nous attendons une dizaine de secondes l'arrêt des vibrations dues aux manipulations de la chambre.

- Ouverture manuelle de l'objectif.

Un chronomètre est lancé afin de surveiller le temps de pose.

- Capture de l'image (avec ou sans rotation).
- Fermeture de l'objectif et repositionnement du rideau occultant
- Retrait du châssis et transport jusqu'au laboratoire de traitement
- Retrait de la feuille sous lumière inactinique.

La chaîne de développement qui suit ne présente aucune adaptation spécifique et reste plutôt classique :

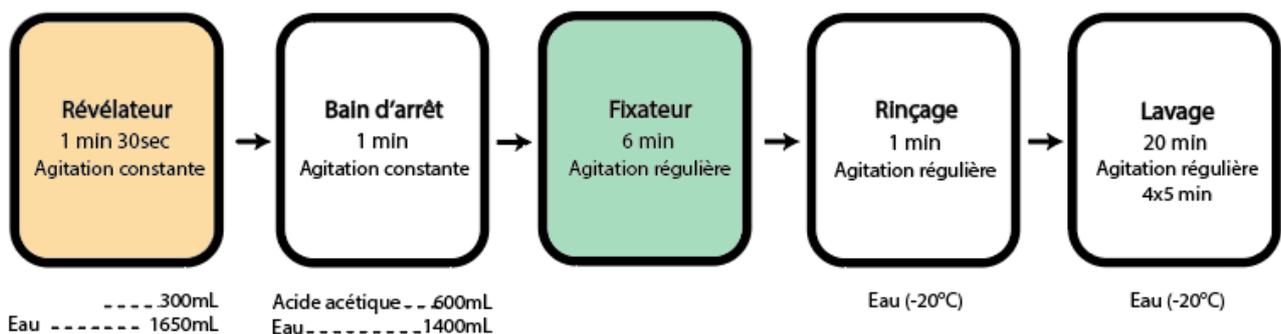
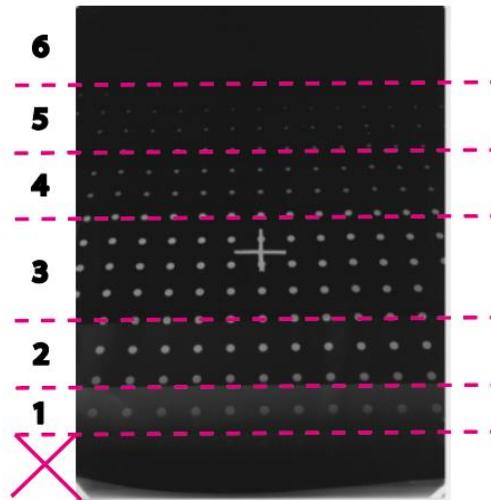


Schéma simplifié de la chaîne de traitement des sensitogrammes.

Le séchage des tirages s'effectue à plat sur une grille suivie d'un passage dans une sécheuse thermique. La température des bains avoisine les 20-25°C.

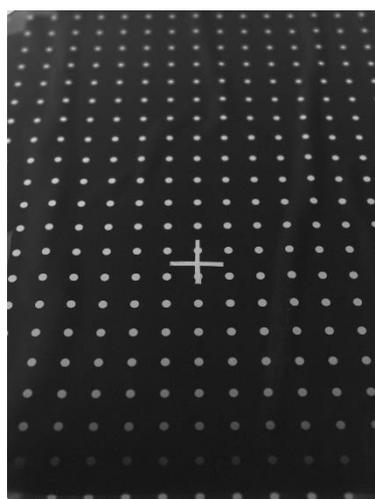
En respectant rigoureusement ce protocole, nous devons avant tout déterminer le temps de pose de nos prises de vues. Idéalement, un sensitogramme aurait pu être réalisé avec ce papier mais par manque de temps, nous avons préféré effectuer un piano. En décalant

pendant la capture le volet occultant par crans de quelques centimètres, nous testons six temps de pose à ouverture f/16. Chaque plaque correspond à un indice de lamination supplémentaire. D'une plage à l'autre, nous doublons le temps de pose de la plage précédente.



Numérisation du piano réalisé sur papier argentique.

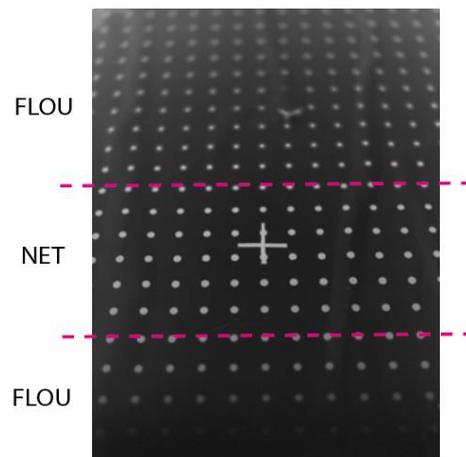
Visuellement, la troisième plage, exposée pendant 8 secondes à ouverture f/16, semble correctement exposée. Un second tirage exposé pendant 4 secondes pour un nombre d'ouverture égale à 11 confirme notre observation. Le contraste des points blancs sur le fond noir est satisfaisant visuellement. Nous pouvons également noter que, sans rotation, la netteté de la croix centrale est correcte.



Numérisation du premier test d'exposition.

f/11 4 secondes

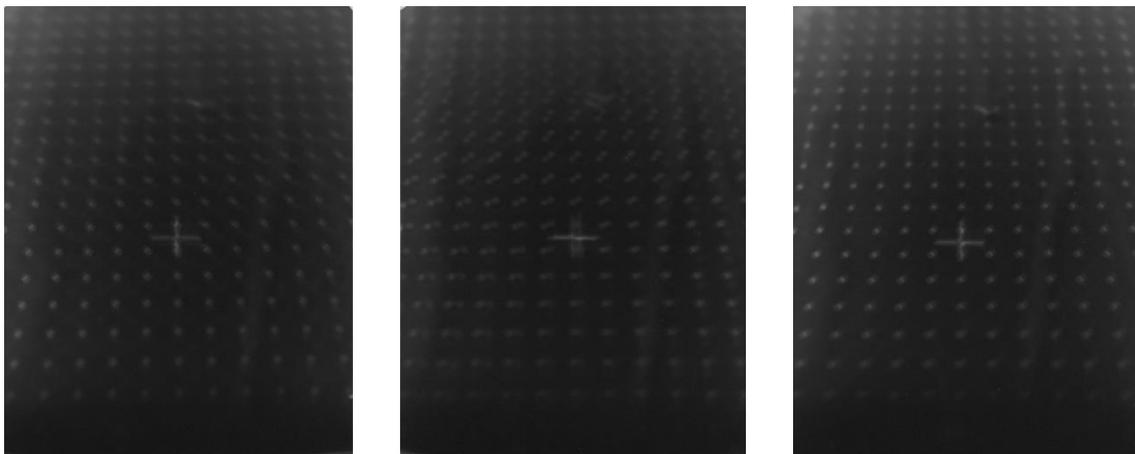
Nous poursuivons avec un troisième tirage, avec cette fois-ci une ouverture à $f/4.5$. Ce nouveau réglage nécessite l'ajout d'un filtre ND8 à l'arrière de l'objectif pour un temps de pose équivalent de 8 secondes. En analysant chaque ligne de points sur ce dernier tirage, nous pouvons délimiter très arbitrairement et approximativement la zone de netteté, deux zones de transition et deux de flou :



Numérisation du second test d'exposition.

$f/4.5$ 8 secondes

Nous pouvons maintenant expérimenter la rotation de notre dispositif. Trois photographies sont d'abord réalisées en actionnant la rotation du système avec la manivelle à main. Comme expliqué précédemment lors des tests de rotation, les platines subissent un bond plutôt fort. Leur mouvement ne reste pas parfaitement corrélé. Comme pressenti, la netteté de l'image est considérablement impactée.

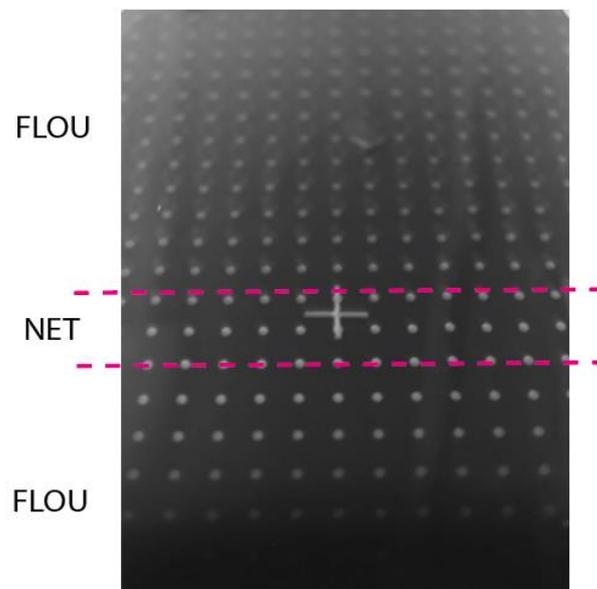


Numérisations des trois photographies capturées avec rotation de la manivelle à main.

$f/4.5$ 8 secondes

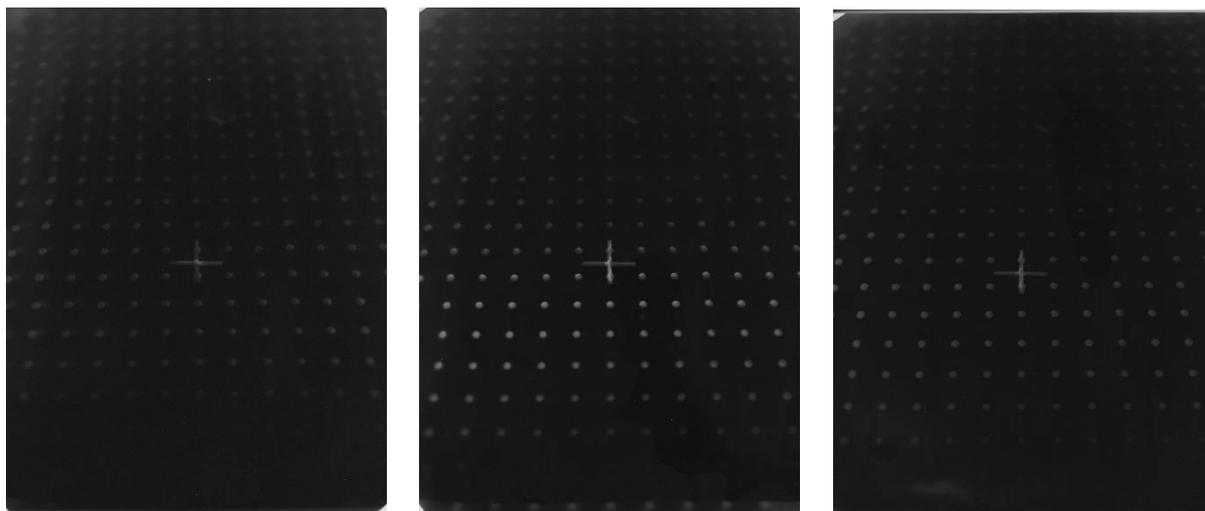
Sur les trois images, ni la croix ni aucun point n'apparaît net. Chaque détail est divisé en plusieurs images ou silhouettes floues décrivant un cercle. Le rapport entre le diamètre de rotation du corps avant et celui du corps arrière ne respecte pas la relation N°1 décrite par le brevet.

Pour le test suivant, nous décidons d'effectuer la rotation en supportant manuellement la platine arrière du dispositif. Ainsi le décalage est amoindri. Cependant cette manipulation nécessite un temps de pose plus long. Pour les captures suivantes, nous disposons un second filtre ND3 pour obtenir une exposition correcte à 16 secondes d'insolation. La vitesse de rotation peut être plus lente, le mouvement des flasques est alors mieux maîtrisé. Les tirages démontrent une différence notable avec les trois précédents tests.



Numérisation de la première plaque capturée avec rotation maintenue.

La sensation de netteté est davantage prenante, même si elle n'atteint pas le niveau de détails des photographies capturées sans rotation du système. La croix et les points constituant les trois lignes centrales apparaissent relativement nets en comparaison aux autres lignes. Il est assez satisfaisant d'observer que celles-ci semblent même plus floues qu'à l'origine. La zone de netteté est réduite, le procédé semble inespérément fonctionner. Quelques essais supplémentaires légèrement surexposés révèlent un renforcement de la sensation de netteté.



Numérisations des trois photographies surexposées et capturées avec rotation maintenue.

Nos essais sur papier sont terminés. Comme nous l'avions ressenti dès les premières mises en rotation du dispositif, le décalage des platines, lié à la conception imprécise du mécanisme, vient perturber la bonne restitution de la netteté. Nous pouvons néanmoins noter que lors de ces prises de vues, le châssis n'était pas stabilisé et vacillait légèrement. Nous espérons que l'adjonction des deux languettes de maintien au corps arrière de la chambre augmentera encore davantage la sensation de netteté pour les images en gélatino-bromure d'argent. Nous pouvons à présent réfléchir à adapter le protocole de prise de vue au support en verre de notre surface sensible.

IV] Expérimentations photographiques

Dans l'optique d'une reconstitution fidèle du procédé de Louis Lumière, il paraît logique et sensé d'employer le même type de surface sensible que l'inventeur : le gélatino-bromure d'argent sur plaque de verre. Passionnée par les techniques de tirages alternatives et les savoirs-faires anciens, l'expérimentation et la maîtrise de cette technique représentent l'occasion idéale de découvrir un nouveau procédé et d'appliquer mes connaissances acquises en chimie au cours de mon cursus.

4.1. Préparation des plaques photosensibles

4.1.1. Installation et préparation du matériel

Afin d'obtenir une série d'images cohérentes et similaires, nous avons cherché à optimiser chaque étape du protocole de préparation des plaques pour tendre à une maîtrise et une connaissance pointue de notre surface photosensible.

• *Achat des consommables*

– Les plaques de verre

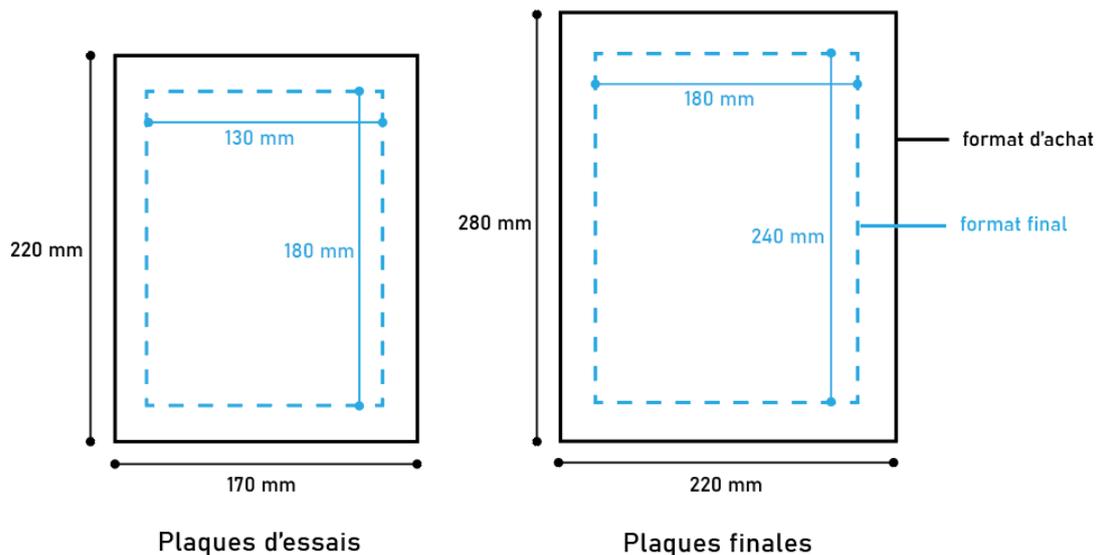
Pour nos expérimentations pratiques, nous avons choisi de nous fournir en plaques de verre clair d'une épaisseur de 2 mm, prédécoupées en divers formats dans un magasin de bricolage. Le verre clair, appelé aussi verre silico-sodo-calcique, est composé de silice SiO_2 (sable), d'oxydes de calcium CaO (chaux) et de sodium Na_2O . Brut et non traité, il est le matériau à partir duquel sont conçus tous les autres types de verre, comme le verre trempé ou le verre feuilleté. Les plaques présentent des tranches de couleur verte qui est la teinte naturelle du verre.

Le brevet de Louis Lumière ne contient aucune spécification pour le choix des plaques utilisées. Pendant notre rendez-vous au Musée de la Photographie de Bièvres et à la Bibliothèque Municipale de Lyon, nous avons estimé visuellement l'épaisseur des plaques à 2 mm. Pour plus de précision, le démontage de la boîte de visualisation aurait été nécessaire mais demeure trop dangereux d'un point de vue de la conservation des images historiques.

Pour effectuer des tests, nous nous sommes fixés un nombre de 24 plaques au format 13*18 cm. Les plaques étant redécoupées après la prise de vue, il est nécessaire de prévoir une marge estimée à 4 cm. Leur format initial est donc 17*22 cm. En effet, cette précaution permet d'obtenir une image finale aux bords nets en anticipant certaines altérations physiques et chimiques, comme le décollement de la gélatine. Les contours de la surface sensible sont les plus sujets à des déformations à cause des différentes manipulations de la plaque tout au long de la chaîne photographique. Avec 24 plaques, nous pouvons effectuer quatre tests de superpositions composées de six images.

Les objets photographiques finaux sont réalisés au format du châssis, c'est-à-dire 18*24 cm, qui est le format employé à l'origine par Louis Lumière pour ses expérimentations. En prenant toujours en compte une marge de 2 cm sur chaque côté de l'image, nous devons travailler à partir de plaques de verre de format 22x28 cm. Pour pouvoir effectuer idéalement deux montages corrects en grand format, nous en commandons 12 (2 jeux de 6 plaques). Le châssis de la chambre étant plus petit que leur format initial, ces plaques seront découpées avant la prise de vue sous une lumière inactinique. Dans ces conditions, le découpage s'avère

plus complexe et requiert une grande attention et rigueur pour une découpe précise et propre.



Enfin, nous devons nous procurer six plaques de verre pour le système de refroidissement. Nous choisissons des plaques de format 32*24 cm pour couvrir la surface de toutes les plaques émulsionnées.

Récapitulatif d'achat des plaques :

- 24 plaques 17x22 cm
- 12 plaques 22x28 cm
- 6 plaques 24*32 cm

À la sortie de l'atelier de découpe, les plaques sont emballées dans du papier bulle. Pour les déplacer une fois émulsionnées ou exposées, nous avons trouvé à l'École trois boîtes en carton que nous avons adaptées au format des plaques.

- La gélatine

Pour l'émulsion, nous avons choisi la chimie Rollei Black Magic à grade variable (RBM33) commercialisée par Rollei film en partenariat avec Maco, fournisseur de films photographiques basé en Allemagne. Le fabricant ne dévoile bien sûr pas sa composition exacte, et les informations délivrées restent très limitées. En terme de constitution chimique, la notice

indique seulement la présence de chloro-bromure d'argent. Le mode d'emploi du produit précise également la présence en petite quantité (0.1%) de phénol, qui est un fongicide et bactéricide puissant, pour une conservation à long terme.

Les informations fournies se limitent ensuite à quelques explications pratiques et techniques. Le fabricant conseille d'utiliser un bain-marie entre 40 et 45°C pour la fusion de la gélatine avant le couchage. Il exprime également la nécessité de stocker la gélatine au réfrigérateur, entre 6°C et 8°C pour une durée de vie d'environ un an. Il précise que si la température est plus basse, la chimie reste utilisable plus longtemps. Le type de lumière inactinique est aussi explicité car différent selon chaque émulsion. Pour la RBM33, notre choix, elle doit être de teinte rouge voir brun clair, mais ne doit aucunement contenir du jaune ou du vert.

Enfin, la notice indique qu'un litre de ce produit permet de couvrir environ 8m² de support non absorbant. Cette quantité sera suffisante pour nos expérimentations.

- ***Nettoyage des plaques de verre***

Avant l'étendage de la gélatine, chaque plaque est nettoyée en suivant un protocole identique d'une durée d'environ 5 à 10 minutes. Immobilisée horizontalement dans un étau, elle est dans un premier temps dégraissée et lavée à l'aide d'une éponge et d'une pointe de liquide vaisselle. Elle est rincée à l'eau courante chaude, puis à l'eau déminéralisée pour ensuite sécher à l'air libre sur un porte-plaques en bois. Un second nettoyage est réalisé avec un mélange équilibré d'alcool, d'eau déminéralisée et de blanc de Meudon. Ce dernier composant est un calcaire argileux qui se présente sous forme d'une poudre blanche très fine et très volatile. En effectuant des gestes circulaires avec le sopalin, la substance disparaît progressivement. Enfin, elle est disposée dans une sècheuse à film ou dans une boîte pour éviter le dépôt de poussières. Un scotch est apposé au dos de la plaque pour pouvoir être numéroté ultérieurement.

Dans La Chimie Photographique, Pierre Montel et Pierre Glafkidès conseillent de rincer le blanc de Meudon avec de l'acide acétique. Ce dernier transforme le carbonate de calcium en acétate de calcium, soluble dans l'eau, et permet ainsi d'éliminer parfaitement tout résidu de calcaire.

Equation de la réaction



Il est toujours utile de rappeler de se laver les mains ou d'utiliser des gants pour les manipulations de la plaque. Les doigts peuvent déposer une fine trace de gras sur la plaque qui se traduit par une altération chimique lors du couchage de l'émulsion. Tout contact entre nos doigts et la surface de la plaque est donc à prohiber.

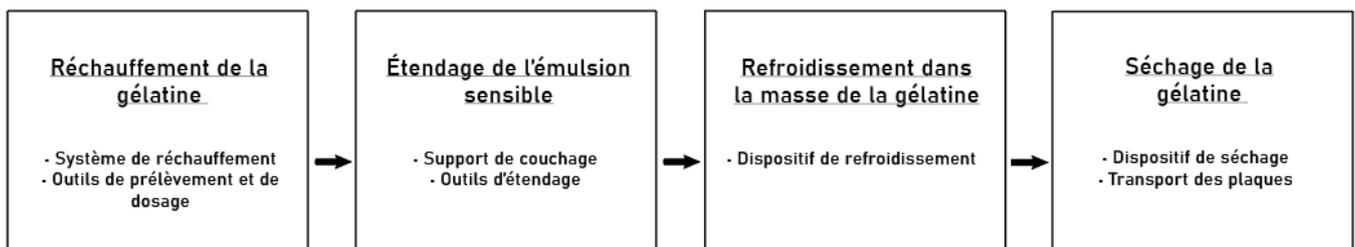
• *Préparation du laboratoire*

Pour nos expérimentations, l'étendage de l'émulsion sur les plaques est réalisé dans le laboratoire de Fabien Hamm. Composé de deux espaces, une première zone éclairée en lumière naturelle est constituée d'une paillasse en « L » assez grande. Une seconde pièce plus petite, au noir ou sous lumière inactinique, propose une paillasse plus petite mais qui se situe proche de l'évier. Malgré l'espace légèrement restreint, cette proximité avec l'arrivée d'eau permet de gagner du temps pendant la procédure de nettoyage nécessaire après chaque étendage. Lors de nos expérimentations, le laboratoire présentait une température ambiante de 23.4 C°. La lumière inactinique est produite par deux lampes émettant des rayonnements rouges.



Photographie du laboratoire préparé pour le couchage de l'émulsion sur les plaques.

Le cycle d'étendage peut être résumé en trois étapes principales qui déterminent l'installation du plan de travail :



Chaine de préparation des plaques photosensibles.

• *Préparation de l'émulsion en batch*

Pour diminuer le temps de fusion de la gélatine, nous divisons le litre dont nous disposons en plusieurs portions. La substance est transférée grâce à une cuillère en bois dans cinq bouteilles de 30cL en plastique noir opaque et étanche à la lumière. Le cuilleron doit être retaillé pour pouvoir passer l'ouverture du flacon. L'étape du bain-marie dure ainsi moins longtemps car la totalité de la gélatine n'est pas chauffée avant chaque étendage. La maîtrise de la température avant prélèvement est également plus précise. Évidemment, cette manipulation est à réaliser sous une lumière inactinique.

- **Le dispositif de réchauffement**

Nous avons dans un premier temps imaginé un dispositif de bain-marie avec une développeuse Jobo. Un récipient lui aussi rempli d'eau permet de surélever la bouteille contenant l'émulsion pour éviter qu'elle ne flotte.

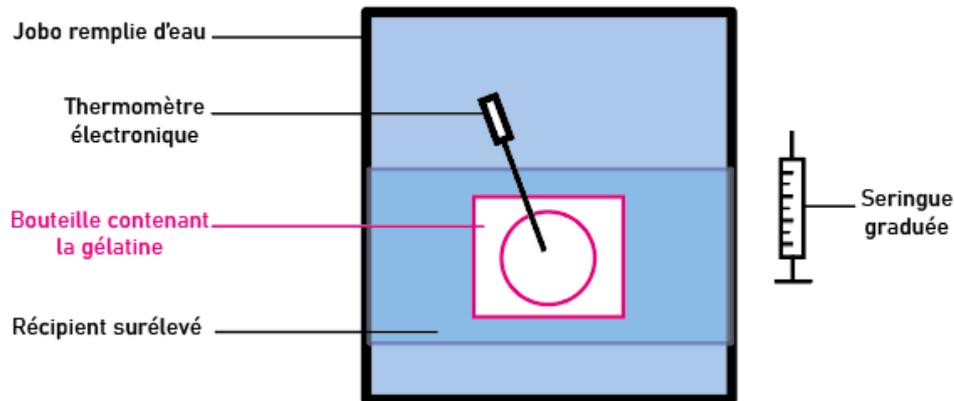


Schéma du premier dispositif de réchauffement de la gélatine.

Mais dans cette configuration, la température de l'eau varie, le contrôle de la consistance de la gélatine n'est pas optimal. Pour pallier à cette variation, nous décidons alors d'employer un cuiseur sous-vide. Placé sur une paroi du récipient, la tête chauffante totalement immergée, cet outil maintient l'eau à la température voulue. Ainsi nous évitons le refroidissement, et donc le durcissement, de la gélatine. En plaçant un thermomètre électrique dans l'eau, nous pouvons constater un léger différentiel avec la valeur indiquée par le cuiseur, mais il reste minime. Pour éviter que la bouteille ne flotte, elle est surélevée sur un support métallique immergé. Un collier de poids lui est aussi apposé autour du bouchon.

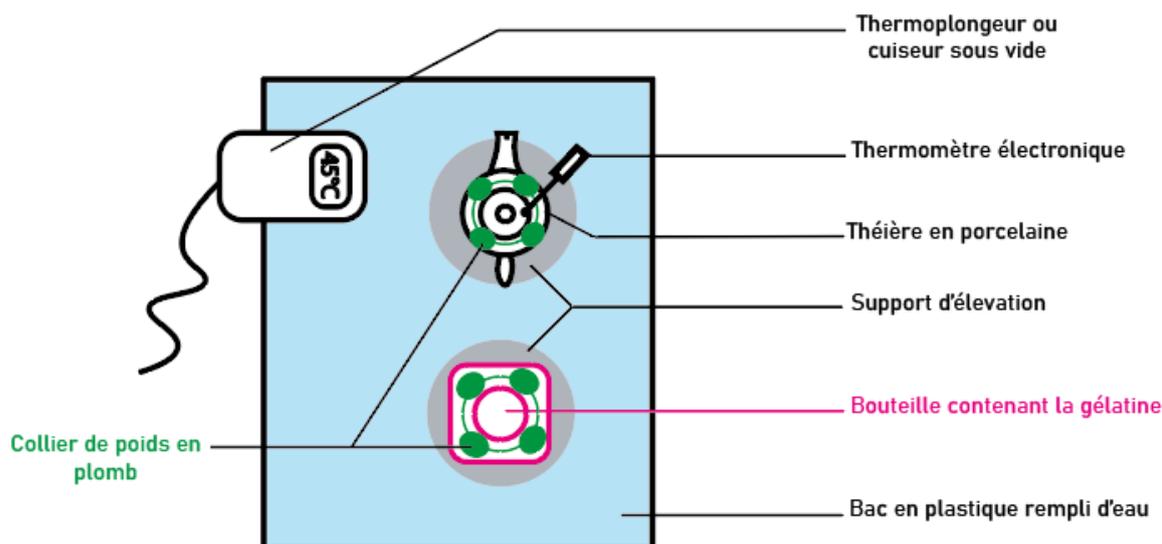


Schéma du second dispositif de réchauffement de la gélatine.

Afin de prélever de la gélatine dans la bouteille et la déposer sur la plaque de verre chaude, deux solutions se présentent à nous :

- La verser dans une théière, elle aussi chauffée au bain-marie, puis la transvaser dans un bécher, lui-même idéalement préchauffé dans une sècheuse à film. Les graduations de ce bécher permettent de quantifier la quantité de solution prélevée. Il est ensuite employé pour déposer la gélatine sur la plaque de verre.

Cette technique de prélèvement présente l'avantage de limiter l'apparition de bulles lors du couchage grâce à l'utilisation de la théière. Les bulles se traduisent après le séchage de la plaque par des petits trous indésirables dans la couche image.

- Prélever directement une dose convenable de gélatine à la seringue et passer à l'étendage. Le transfert direct de l'émulsion depuis la bouteille jusqu'à la plaque limite son durcissement avant le couchage. Grâce à une pression régulière sur le piston de la seringue, nous pouvons dessiner une ligne relativement précise sur la partie supérieure de la plaque et favoriser ainsi l'homogénéité et l'uniformité de l'émulsion photosensible. La quantité de gélatine utilisée est également mesurable grâce à la graduation. Il est tout de même nécessaire d'être précautionneux pendant le prélèvement. Si la quantité de gélatine contenue dans la bouteille est trop petite et la seringue mal positionnée, de l'air peut entrer et produire des bulles dans le tube, qui ensuite deviennent gênantes pendant le dépôt.

Pour nos expérimentations, nous choisissons la première alternative. La théière est disposée comme la bouteille, sur un support immergé et porte également des poids.

Après quelques essais, l'écran digital de la tête du cuiseur à vide, ou thermoplongeur, est couvert d'un carton occultant car il émet de la lumière. Par manque de rigueur, j'ai fait l'erreur de ne pas surveiller la température affichée. À cause de cela, le réglage de l'outil a changé, la température du bain-marie a considérablement augmenté. La gélatine a mûri. Son couchage sur la plaque n'était plus satisfaisant. La surface présentait beaucoup de défauts d'homogénéité et l'épaisseur de la couche était faible. Cela a nécessité le renouvellement de l'émulsion.

- ***Le support d'étendage***

L'étendage est réalisé sur une tablette chauffant Kaiser à 45°C maintenant la plaque chaude pendant le couchage de la gélatine qui reste ainsi liquide plus longtemps. Cet outil n'est pas vraiment idéal car la diffusion de chaleur n'est pas homogène sur toute sa surface. Un support spécifiquement conçu pour cette étape pourrait être fabriqué à l'aide de résistances par exemple. Mais par manque de temps, nous nous accommoderons de ce dispositif. Par ailleurs, il doit être parfaitement parallèle au sol pour ne pas imposer une inclinaison à la plaque, ce qui impacterait l'homogénéité de la couche de gélatine. Sa planéité est être contrôlée à l'aide d'un niveau à bulle et ajustée à l'aide de bouts de papier. Enfin, nous apposons une plaque de verre protectrice pour éviter des coulures de gélatine sur le support Kaiser.

Pour nos toutes premières expérimentations, nous utilisons une barre de couchage lisse qui imposait une certaine installation. En effet, la plaque à émulsionner était maintenue par trois bandes de verre d'épaisseur égale (2 mm) afin qu'elle reste statique lors de l'étendage.

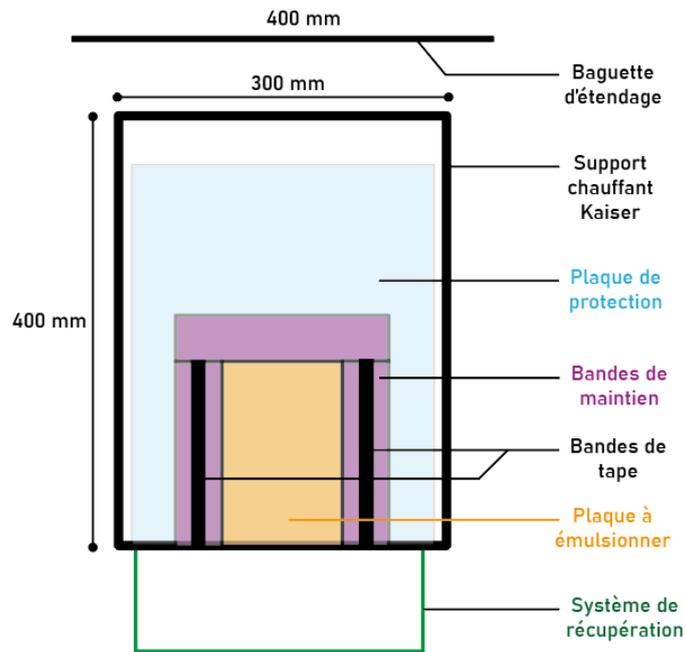


Schéma du premier dispositif d'étendage de l'émulsion sur la plaque de verre.

Ce système de cadre en verre était amovible pour être nettoyé à l'eau bouillante entre chaque coulage. Il était fixé au support avec du scotch de peintre mais ce système s'avérait assez laborieux. Retirer tous les bouts après chaque étendage prenait du temps et le maintien n'était pas parfaitement assuré. De plus, la gélatine coulait entre les différentes plaques de verre et se déposait sur le support chauffant. Sur les deux bandes latérales de maintien, nous superposions plusieurs bandes de ruban adhésif de masquage noir afin que la baguette d'enduction soit légèrement plus haute que la surface de la plaque. Ainsi, le nombre de couches de tape déterminait l'épaisseur de l'émulsion sensible.

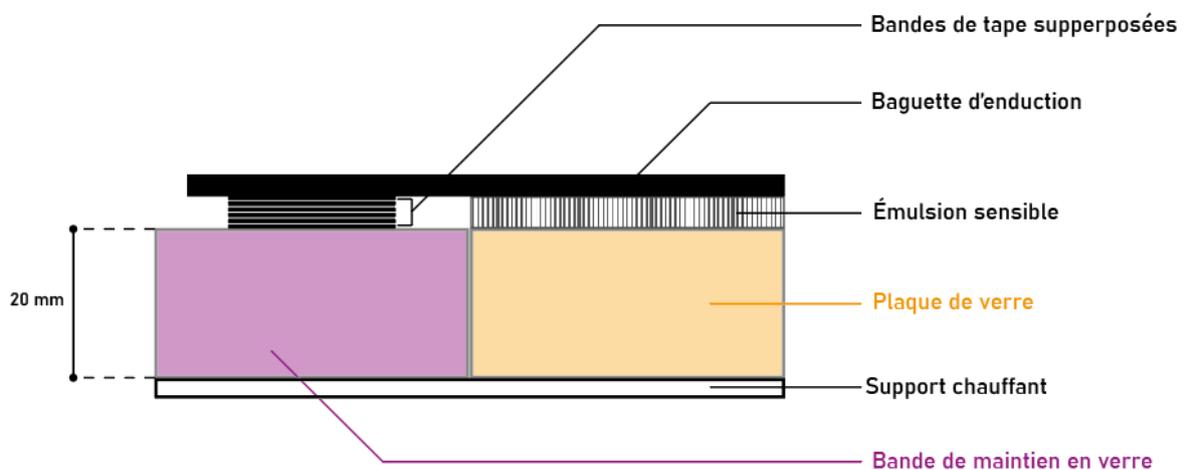
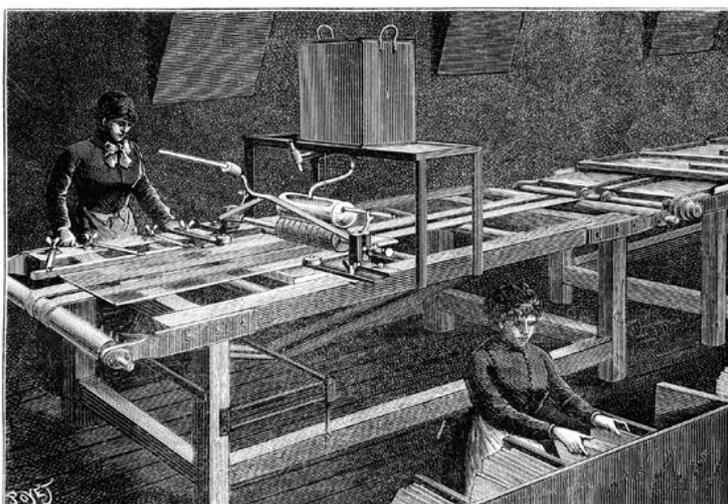


Schéma en coupe du dispositif de coulage.

Après plusieurs tests, les résultats n'étaient pas vraiment concluants et satisfaisants. La gélatine ne s'étalait pas uniformément et l'homogénéité de surface dépendait principalement de la minutie portée au collage des bandes de tape. Nous nous sommes donc décidés à utiliser une barre d'enduction filetée et à changer notre dispositif.

En se renseignant sur les forums de discussion, plusieurs techniques d'étendage sont débattues. La plus récurrente est l'emploi d'une barre d'étendage filetée. Les barres dites « de Mayer », ou « coating rod » dans la littérature anglophone, sont des tiges métalliques lisses entourées d'un fil très fin plus ou moins serré. Cette spirale permet un étendage plus homogène et uniforme de la gélatine sur la plaque de verre. Ces barres d'enduction peuvent équiper des machines comme être utilisées manuellement sur un plan dur mis à niveau. Elles sont utilisées dès l'industrialisation de la production de plaques émulsionnées. Sur des gravures représentant une usine de fabrication de plaques sèches de 1884, nous voyons que la gélatine est couchée sur les plaques grâce à des rouleaux présentant une forme similaire aux tiges de Mayer.



« Fabrication des plaques sèches photographiques. Couchage de l'émulsion de gélatino-bromure d'argent sur verre », gravure de Louis Poyet, tirée de l'article « Fabrication des plaques sèches photographiques », de la revue scientifique La Nature, Gaston Tissandier, édition de 1886, premier semestre de la quatorzième année, N°655, p.99-102.

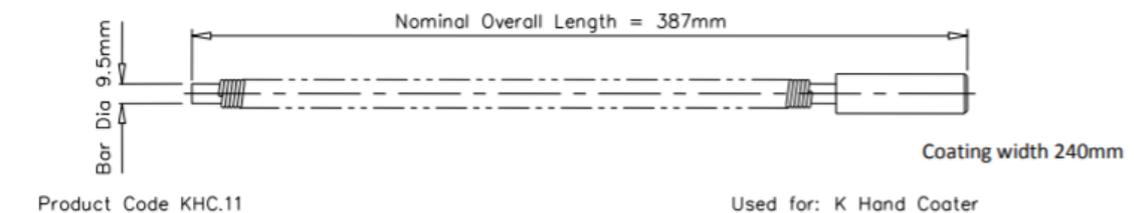
Un premier fournisseur, Stad-Revel, localisé en France, produit pour les professionnels des barres chromées profilées, lisses ou filetées. Après un échange avec Damien Dupire, responsable commercial de l'entreprise, je me suis tournée vers un second fournisseur français, Erichsen, qui propose des prix hors livraison plus abordables. Situé à Rueil-Malmaison, cette

société est spécialisée dans les équipements de mesures et de tests. Hormis la production de barres d'enduction, elle propose aussi des filmographes qui peuvent convenir pour des couchages très fins en bande étroite. Mais ces outils, certes complets et ergonomiques, restent relativement chers et inadaptés à notre procédé.

Barre N°	Code Couleur	Diamètre du fil		Film déposé	
		Inch	mm	Inch	µm
0	Blanc	0,002	0,05	0,0002	4
1	Jaune	0,003	0,08	0,0003	6
2	Rouge	0,006	0,15	0,0005	12
3	Vert	0,012	0,31	0,0010	24
4	Noir	0,020	0,51	0,0015	40
5	Corne	0,025	0,64	0,0020	50
6	Orange	0,030	0,76	0,0025	60
7	Marron	0,040	1,00	0,0030	80
8	Bleu	0,050	1,27	0,0040	100
9	Ocre	0,060	1,50	0,0050	125

Tableau récapitulatif des barres de couchage standard à spires jointives vendues par Erichsen.

Nous choisissons alors d'acheter simplement une tige que nous utiliserons à la main. L'épaisseur de notre émulsion dépend du diamètre du fil et de son enroulement autour de la barre. Ainsi, nous avons sélectionnée une tige à spires jointives, avec un fil de diamètre 1.27 mm pour une couche de gélatine humide d'une épaisseur de 100µm. Sa longueur utile est de 240 mm pour une longueur totale de 387mm. L'École nous prête également deux autres barres : une pour une émulsion humide très fine de 40 µm et une seconde pour une couche plus épaisse de 80 µm.



Côtes de la barre de couchage N°8 vendue par Erichsen.

En s'appuyant sur les vidéos de démonstration de Tod Gangler et de Ron Mowrey, nous réalisons quelques essais avec de la simple gélatine alimentaire. Nous choisissons finalement les barres fournies par l'École, produites par Ilford. Leur prise en main plus ergonomique

favorise un meilleur couchage. Nous mettons également de côté la barre qui permet d'obtenir une couche de 40 µm. Une couche d'émulsion trop fine est plus sujette à des défauts mécaniques comme le décollement ou les cassures. Notons qu'en séchant, l'émulsion se contracte et son épaisseur diminue légèrement.

Les autres techniques d'étendage proposées ne paraissent pas aussi précises et maîtrisées. Dans la vidéo « Coating glass dry-plates with silver gelatin emulsion » de la chaîne Lost Light Art, l'opérateur coule son émulsion à la seringue progressivement sur la surface de la plaque posée sur ses cinq doigts. Le surplus est reversé dans le bécher. Ce geste ne permet pas un contrôle rigoureux de la couche sensible et favorise l'apparition de bulles. Une autre alternative de couchage est détaillée et illustrée par Lionel Turban dans son article « Émulsion noir et blanc au gélatino-bromure d'argent » sur son site Disactis. Il emploie un support trois vis mis à niveau pour supporter sa plaque à émulsionner. Sous lumière inactinique, il prélève la gélatine avec une pipette et la dépose sur la partie gauche de sa surface. Une fois coulée, l'émulsion est « *répartie très vite dans les coins gauches de la plaque à l'aide d'une fine baguette de plastique en ne quittant jamais la surface de la plaque* ». Grâce à un geste de « *va-et-vient* », il étire rapidement la gélatine sur le reste de la plaque. Il précise ensuite : « *L'enduction ne doit pas prendre plus de 30 secondes car il faut ensuite égaliser l'émulsion en basculant légèrement la plaque de gauche à droite de visu.* ». Ce geste d'étendage, assez différent d'une plaque à l'autre, nous semble cependant moins régulier que l'emploi d'une barre de couchage spécifiquement adaptée.

Le dispositif de couchage est alors adapté à l'utilisation de cette tige. Nous abandonnons la superposition de bandes adhésives. Ainsi nous ne gardons que deux plaquettes en verre pincées au support pour le maintien de la plaque émulsionnée. Une plaque de verre spécifiquement adaptée est également disposée sur la surface Kaiser pour la protéger des coulures de gélatine. Notre premier essai de couchage dans cette disposition nous encourage à ajouter deux autres bandes de maintien en verre car la plaque suit le mouvement de la barre. Nous remarquons au cours de notre deuxième essai que les coulures de la gélatine sous la plaque compliquent sa translation vers le dispositif de refroidissement. Nous ajoutons alors une nouvelle plaque de verre entre notre surface sensible et la protection du support chauffant

pour diminuer leur adhésion. L'épaisseur des bandes de maintien et la hauteur de la plaque froide sont adaptées en conséquence.

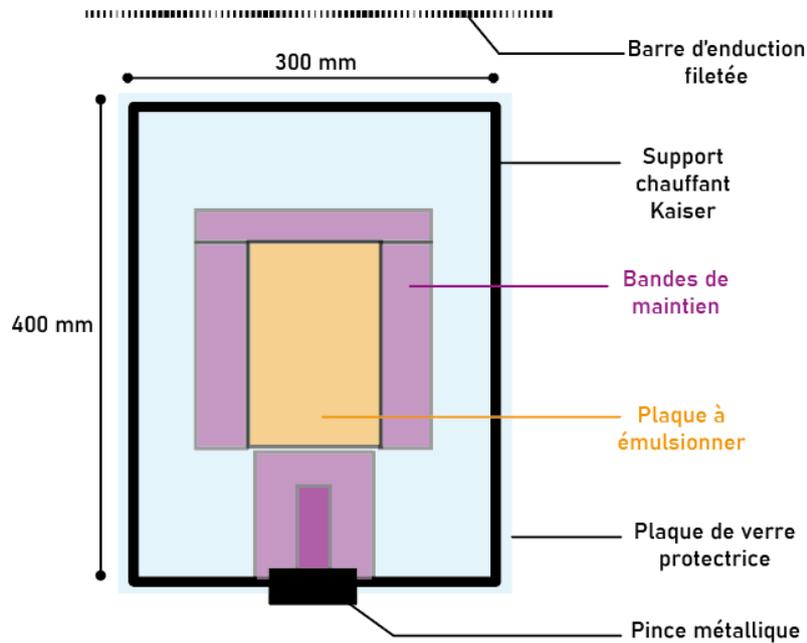
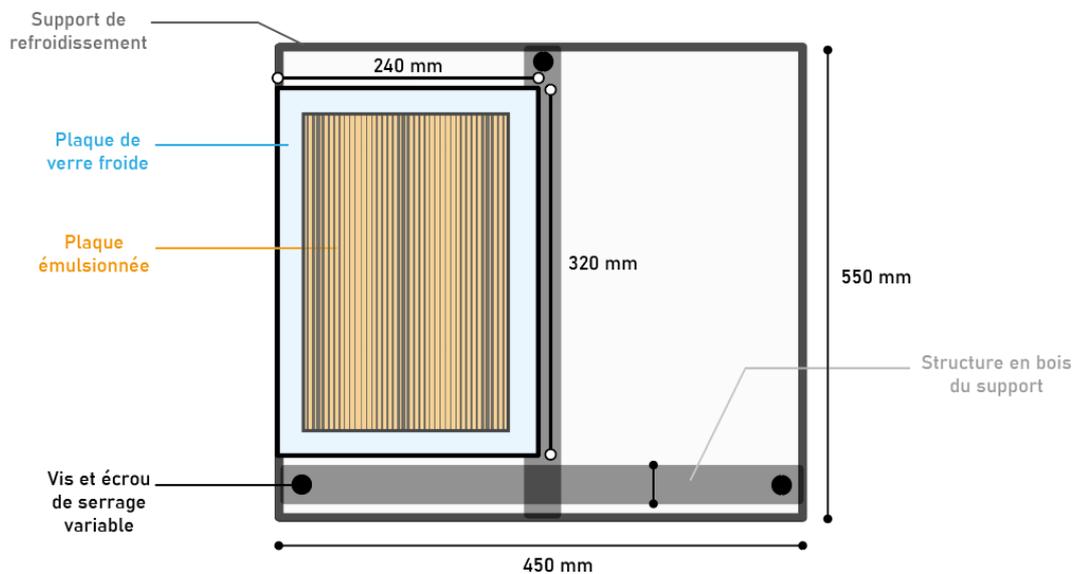


Schéma du second dispositif d'étendage de l'émulsion sur la plaque de verre.

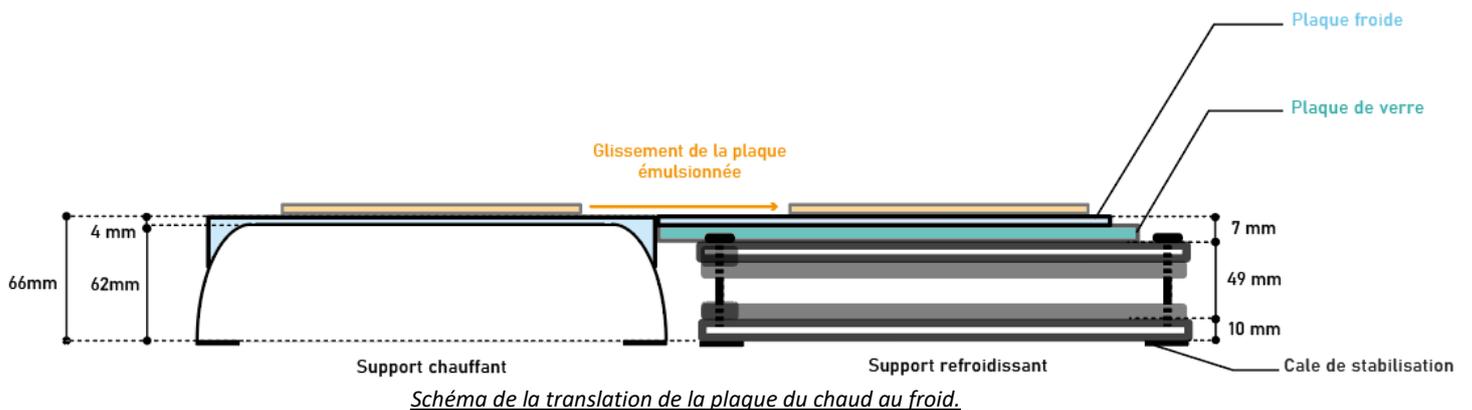
Le bac de récupération a également été retiré car il gênait la fin de notre geste d'étendage. Nous préférons nettoyer la plaque protectrice du support de chauffe à chaque cycle.

- *Le support de refroidissement*



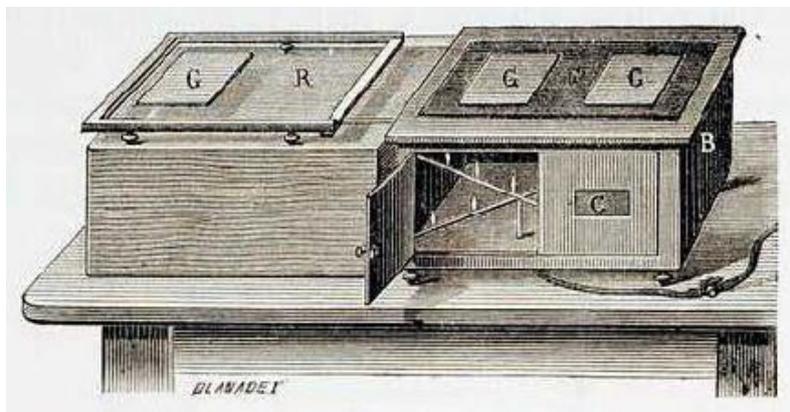
Dispositif de refroidissement dans la masse.

Pour la troisième étape du cycle de couchage, le refroidissement, nous avons imaginé un dispositif composé de deux plaques en verre épais, fixées entre elles par deux « T » parallèles en bois, dont l'espacement est ajustable en trois points grâce à des vis et des écrous. Comme le support chauffant, cette installation doit être parfaitement droite. Sa planéité est donc à contrôler à l'aide d'un niveau à bulles.



Sa hauteur doit également être ajustée. En effet, pour assurer un glissement fluide, rapide et sans à-coups de la plaque émulsionnée depuis le support chauffant jusqu'au support de refroidissement, leurs niveaux doivent être ajustés, sans oublier la plaque de verre froide. Elle est de même épaisseur que les autres plaques de verre, c'est-à-dire 2mm. Conservée pendant toute une nuit au congélateur, elle présente une température environnant les 5 °C. De format supérieur aux plaques de verre gélatinées, elle permet un refroidissement dans la masse (identique sur la totalité de l'émulsion), pour un durcissement et une tension homogène de la gélatine avant le séchage.

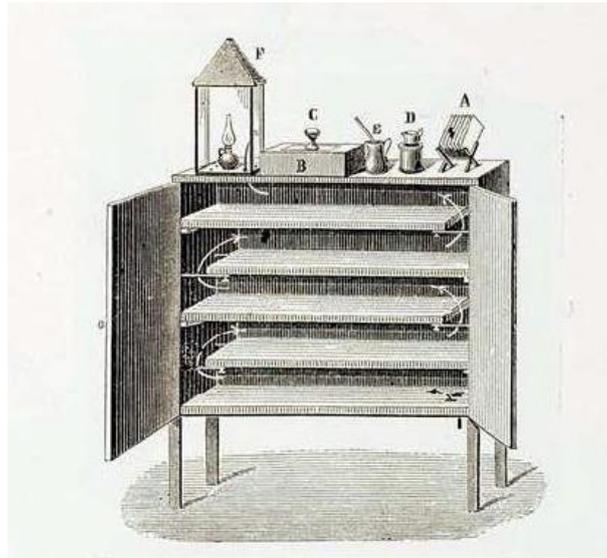
Ce système d'étendage ressemble, par structure deux partie, à certains dispositifs préconçus pour le couchage :



FABRE Charles, *Traité encyclopédique de photographie*, Tome deuxième, Paris : Gauthier-Villars et fils, 1890,p.246.

• La sécheuse à plaques

Enfin, la quatrième et dernière étape est le séchage de l'émulsion. La plaque sensible est disposée dans une sécheuse pour que la gélatine refroidisse pendant toute une nuit. Afin d'optimiser cette étape, nous avons décidé de concevoir un dispositif sur mesure, inspiré d'anciens modèles de sécheuses à plaque :



FABRE Charles, *Traité encyclopédique de photographie*, Tome deuxième, Paris : Gauthier-Villars et fils, 1890, p.249

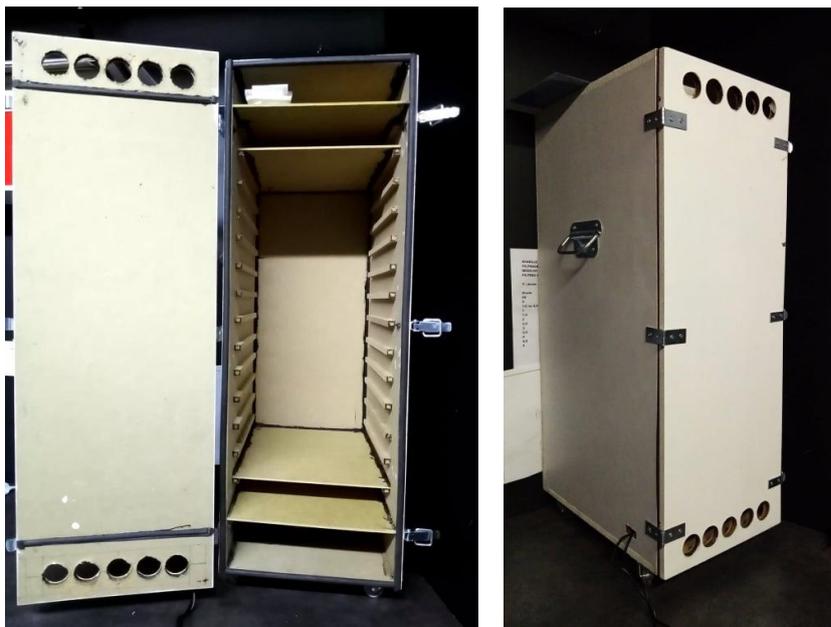
Notre dispositif est assez grand pour pouvoir stocker jusqu'à 12 plaques, au format 17x22 cm ou 22x28 cm, qui sont disposées à plat sur des tasseaux parallèles espacés de 21,5 cm et longs de 25 cm. Grâce à deux ventilateurs et des ouvertures placées en bas et en haut de la boîte, l'air circule et sèche en continu les émulsions, sans les chauffer. Pour occulter la lumière entrant par ces ouvertures d'aération, nous plaçons quatre parois, deux en bas et deux en haut, qui empêchent les rayons lumineux d'arriver jusqu'aux plaques. Ces fines parois sont légèrement plus petites que la profondeur de la boîte pour ne pas bloquer la circulation de l'air. En outre, elles permettent d'éviter le contact direct de l'air soufflé par ventilateur avec les gélatines.

Le matériel nécessaire est le suivant :

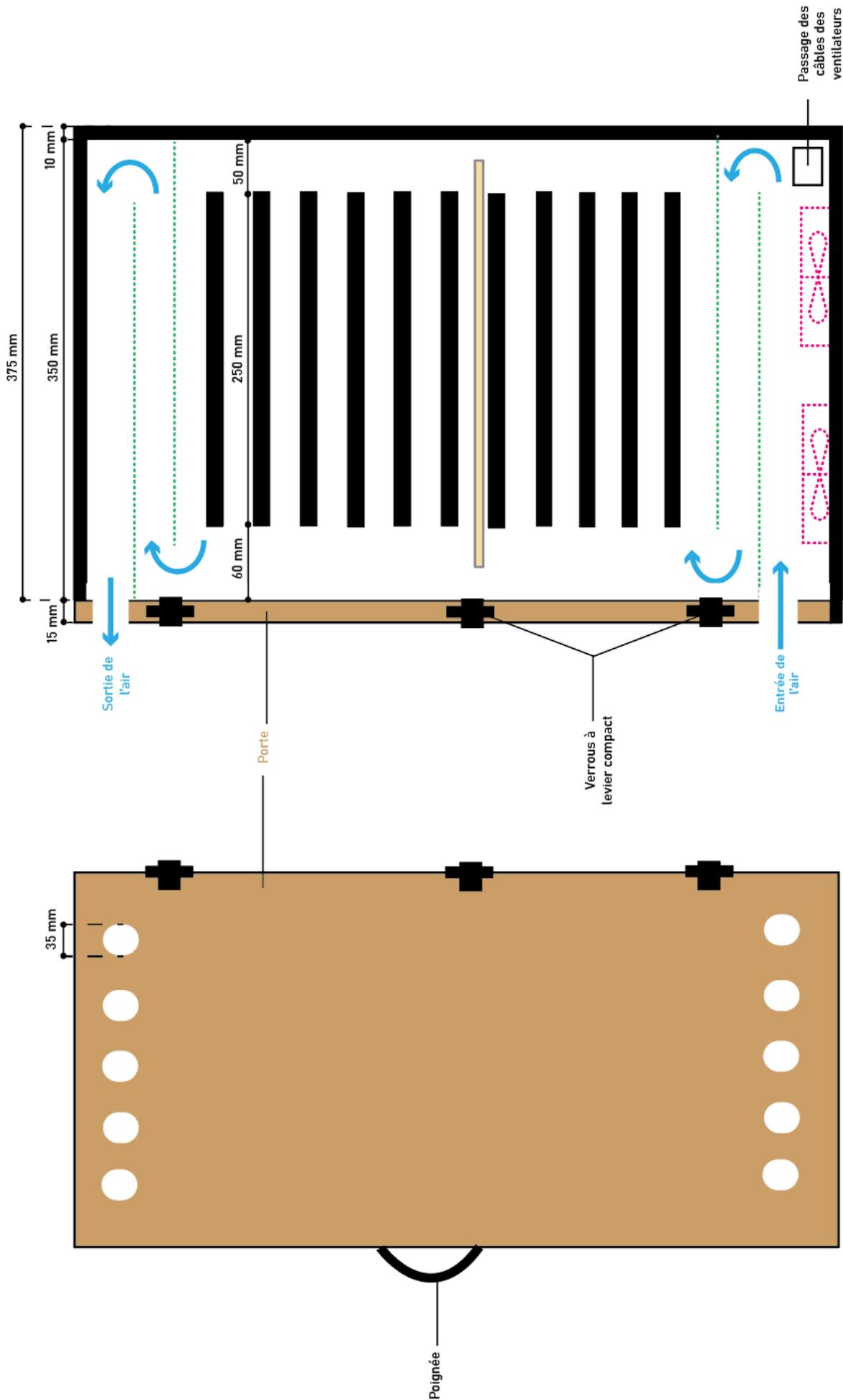
- Panneaux de bois médium épaisseur 10 mm
 - o 2 x Format 1 (Latéraux) = 700 x 375 mm

- 2 x Format 2 (Arrière et porte) = 700 x 260 mm
- 2 x Format 3 (Dessus et dessous) = 260 x 375 mm
- Panneaux de bois médium épaisseur 3 mm
 - 4 x Format 4 (Intérieur) = 250 x 300 mm
- Tasseaux épaisseur 10 mm
 - 5.5 m (250 mm x 22)
- 2 Ventilateurs USB
- Colle à bois ou clous
- 1 Poignée métallique
- 3 Verrous à levier compact
- 4 Roues
- Caoutchouc d'étanchéité

Les différents panneaux de bois sont simplement liés avec de la colle à bois, pour une fabrication rapide et efficace. Quatre petites roues et une poignée ont été ultérieurement fixées au dispositif pour faciliter son déplacement. Entre la porte et la structure de la boîte, nous disposons et collons un joint d'étanchéité en caoutchouc pour assurer l'absence d'entrée de lumière.



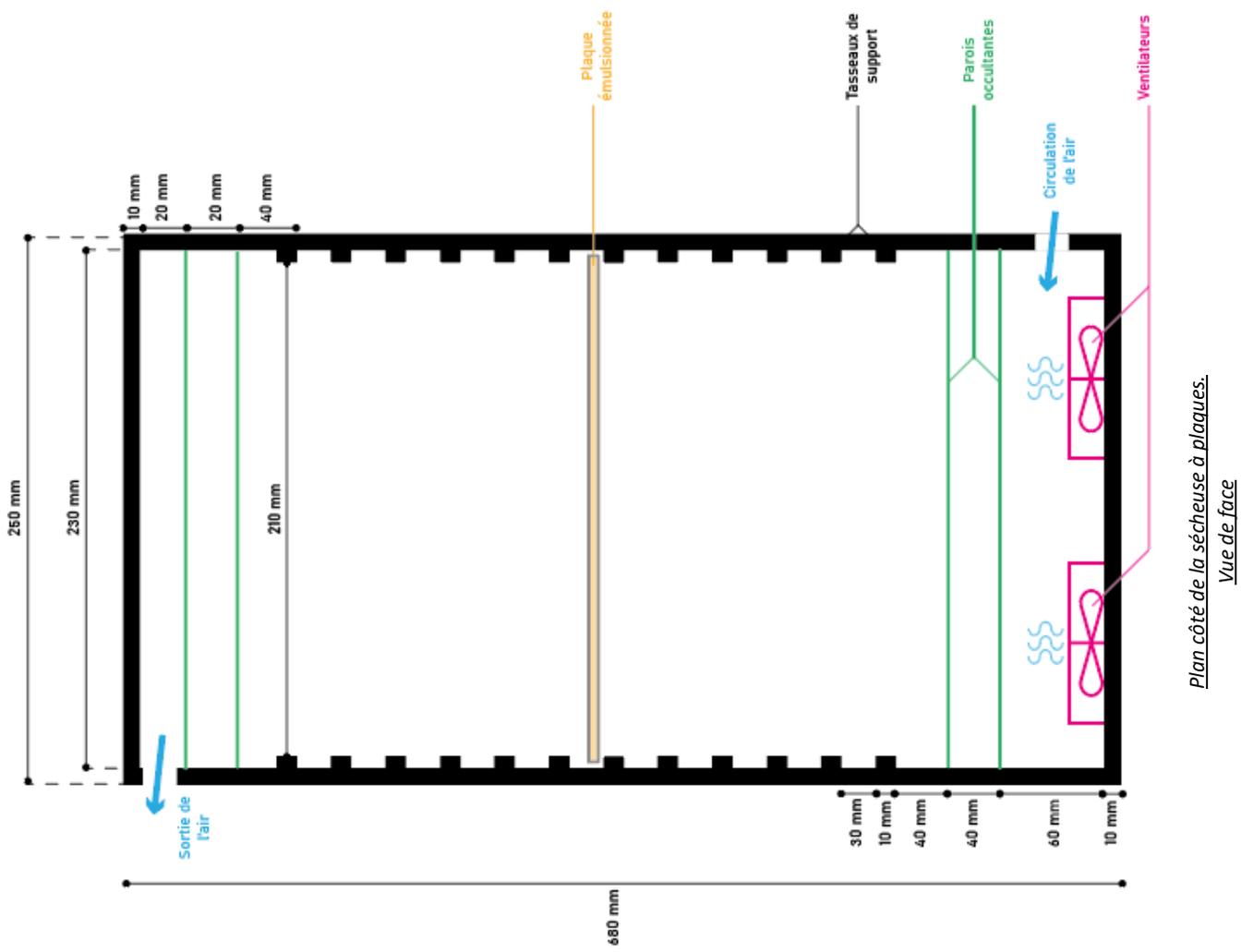
Photographies de la sécheuse à plaques, ouverte et fermée.



Plan côté de la sécheuse à plaques.

Vue latérale

Porte de la sécheuse à plaques.



4.1.2. Cycle de couchage d'une plaque

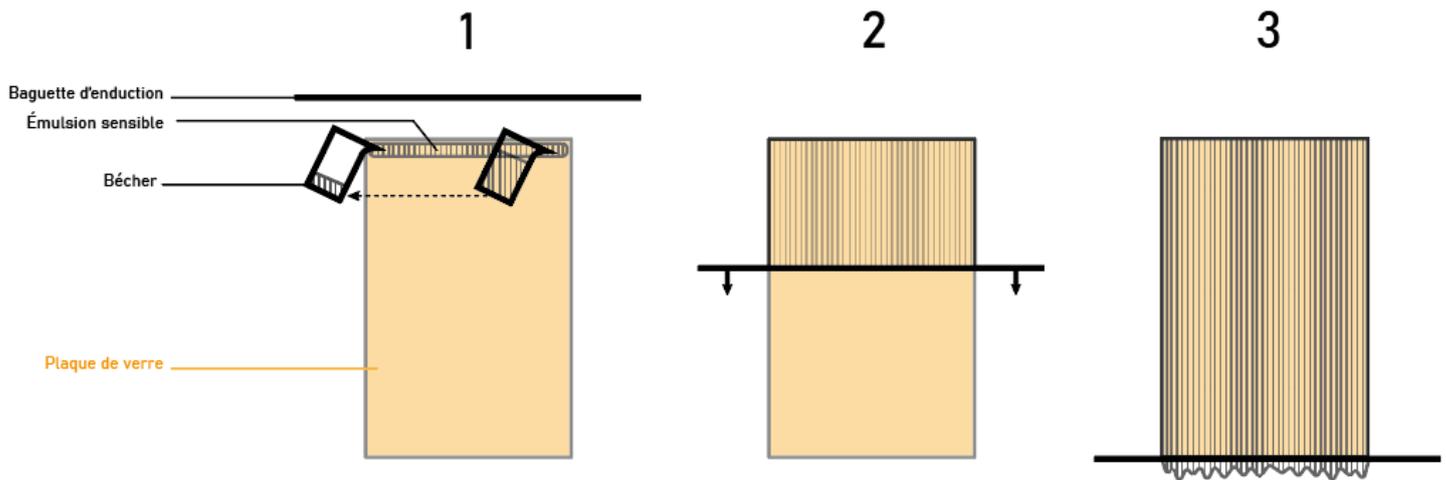
La durée du protocole de couchage d'une plaque peut être estimée à 15 minutes. Le cycle est le suivant :

- *Réchauffement de la gélatine photographique à 45°C dans la bouteille au bain-marie*
- *Remplissage et mise en marche de la bouilloire*
- *Versement de l'émulsion sensible dans la théière au bain-marie*
- *Mise en place de la plaque à émulsionner entre les bandes de maintien immobilisées sur le support chauffant*
- *Dépoussiérage de la barre d'enduction au sèche-cheveux*
- *Dépoussiérage de la plaque avec une soufflette*
- *Transvasement de l'émulsion dans un bécher*

Pour des plaques au format 17*22 cm, nous constatons qu'une quantité de 10mL d'émulsion est correcte. Pour un plus grand format, 22*24cm, nous prélevons 15mL de solution. Le surplus témoigne qu'une quantité moindre pourrait suffire mais elle reste nécessaire pour obtenir une couche homogène. Les quelques millilitres d'émulsion restantes dans le bécher après le dépôt sur la plaque peuvent être reversés dans la théière.

- *Étendage de la gélatine*

Une fois la gélatine déposée sur la largeur supérieure de la plaque avec le bécher, nous déplaçons la barre d'enduction du haut vers le bas en la tenant à ses extrémités. Ce geste de quelques secondes est déterminant pour l'obtention d'une surface d'émulsion lisse et homogène. Il impacte considérablement la qualité photographique de notre surface sensible. Il doit alors être très régulier et continu. L'estimation d'une vitesse de glissement convenable nécessite plusieurs essais. Une fois maîtrisée, cette vitesse doit être similaire pour toutes les plaques afin d'obtenir des émulsions relativement identiques.



Séquence d'étendage de l'émulsion sur les plaques de verre.

Quelques séances supplémentaires en laboratoire nous auraient permis d'expérimenter davantage ce geste. Dès la seconde journée d'essai, une certaine aisance se ressentait déjà mais restait insuffisante pour produire une série de plaques parfaitement identiques.

- ***Prélavage de l'équipement***

La barre d'enduction, le bécher et les bandes de maintien sont disposés dans un bac en plastique dans lequel nous venons verser l'eau chauffée par la bouilloire.

- ***Placement de la plaque froide sur le dispositif de refroidissement***

Pour faciliter l'étape suivante, nous plaquons la tranche de la plaque glacée en butée contre celle supportant la plaque sensibilisée.

- ***Glissement de la plaque sur le support de refroidissement dans la masse***

La plaque sensibilisée est déplacée latéralement vers le support de refroidissement. La plaque reste jusqu'à 2 minutes sur cette surface pour que la gélatine se tende. Les coulures de gélatine et le choc thermique entre les deux dispositifs rendent la manipulation plus délicate. Nous trouvons un geste convenable au bout de plusieurs essais. Nous poussons tout d'abord doucement la plaque avec une raclette en plastique pour entamer le glissement. Nous prolongeons ensuite le mouvement en plaçant nos pouces sur la tranche de la plaque au niveau

des coins pour une plus forte pression avec un meilleur contrôle. Utiliser le poussoir en plastique présente le risque de glisser et d'abimer la couche humide. En faisant attention à ne pas toucher la surface sensible, le glissement manuel est efficace, la plaque passe facilement d'un support à l'autre. La couche refroidit uniformément.

- ***Nettoyage de la barre d'enduction***

Pendant ces quelques minutes de refroidissement, la barre d'enduction est nettoyée. À l'aide d'une éponge et d'eau très chaude, la gélatine est retirée du filetage. La tige est ensuite essuyée avec un tissu propre avant d'être posée dans une sécheuse à films pour être parfaitement sèche. Elle y reste jusqu'à sa prochaine utilisation.

- ***Disposition de la plaque gélatinée dans la sécheuse***

La contrainte principale de cette manipulation est le décollement de la plaque émulsionnée. À cause du surplus de gélatine qui est venu se déposer sous la plaque pendant l'étendage et de la basse température de la seconde plaque, leur séparation s'avère délicate. Après plusieurs essais, nous trouvons la manipulation adéquate. Nous poussons doucement la plaque émulsionnée vers le bord de la plaque froide avec la raclette en plastique. Lorsqu'un coin dépasse, nous glissons notre doigt sous le verre et décollons ainsi délicatement la plaque. En la maintenant à plat, nous pouvons la glisser dans la sécheuse. Cette dernière est fermée et verrouillée.

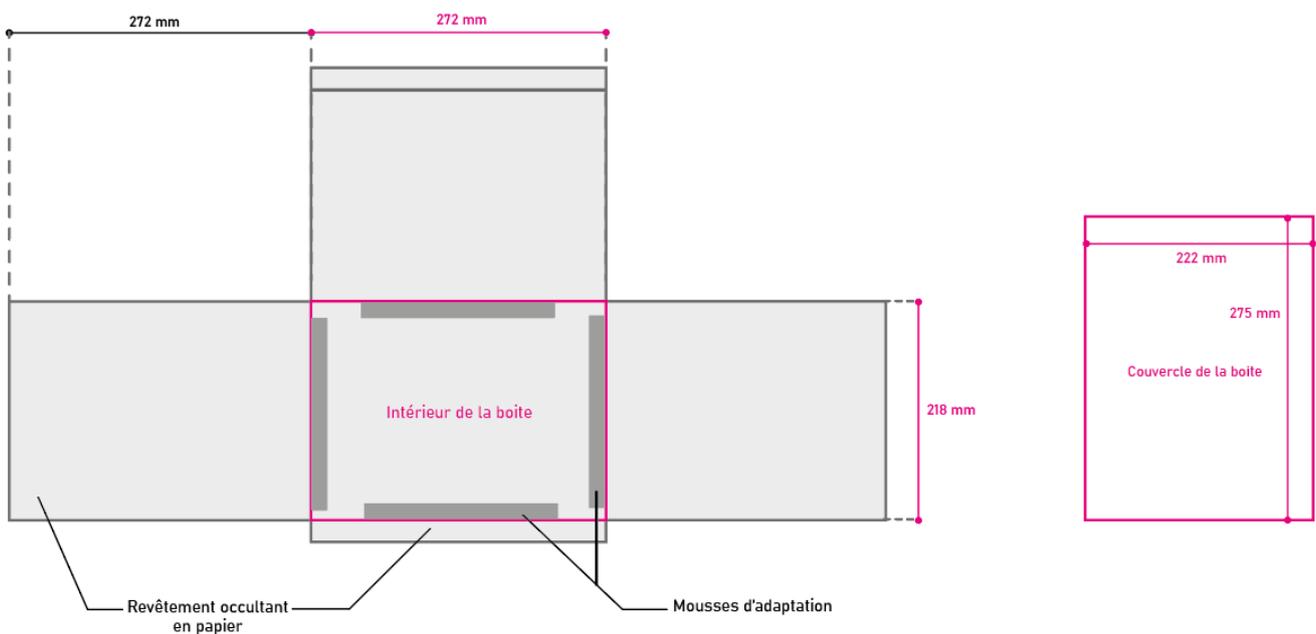
- ***Nettoyage de l'équipement***

Avant d'enchaîner avec le prochain couchage, tous les équipements doivent être nettoyés, car la gélatine durcit rapidement. En s'assurant que la sécheuse à plaques et la théière sont fermées, nous pouvons effectuer cette étape à la lumière blanche. Le béccher, les plaques de maintien et le poussoir sont donc lavés à l'eau chaude, rincés à l'eau déminéralisée puis séchés avec du papier essuie-tout. La plaque du support chauffant et celle du support froid sont aussi nettoyées avec une éponge et essuyées. Pour accélérer la procédure, une nouvelle plaque glacée peut être utilisée pendant que l'ancienne reste immergée. Il ne faut cependant

pas oublier de la replacer ultérieurement au congélateur. Si l'étendage échoue, la plaque de verre gélatinée subit le même traitement pour être réutilisée. Lorsque l'équipement est propre, nous le réinstallons et reprenons le cycle de couchage.

- **Transport des plaques émulsionnées**

Pour le déplacement des plaques sensibilisées sèches jusqu'au lieu de la prise de vue, nous avons imaginé un système de boîte de transport qui évite toutes altérations et dégradations de l'émulsion. Nous avons récupéré au laboratoire de l'École six boîtes cloches à recouvrement intégral, qui contenaient initialement des feuilles de papier argentique de tailles multiples. Nous les avons adaptées au format de nos plaques photosensibles grâce à des bandes de mousses. Nous avons ensuite disposé un revêtement en papier cartonné noir Canson dont les quatre volets se rabattent sur les plaques afin d'occulter davantage la lumière. Ce revêtement est préalablement dimensionné à partir des côtes du fond de la boîte puis il est découpé au scalpel. Pour éviter le contact des plaques avec ce papier poreux et rugueux, nous les protégerons avec des feuilles de papier de soie avant de les placer dans la boîte.



Plan côté d'un exemplaire de boîte de transport.

Par manque de temps et à cause des divers aléas liés à la pratique, le nombre de plaques utilisables est considérablement réduit. Comparé à nos estimations initiales qui s'élevaient à 24 plaques de test, nous terminons la dernière séance d'étendage avec 10 plaques au format 17x22cm et 7 au format 22x24cm. Nous continuons tout de même les expérimentations.

Au lancement du projet, un nombre important de plaques étaient prévu pour la réalisation des tests en laboratoire de développement. Par manque de temps et d'expérience pour le couchage des plaques sensibles, ce nombre a été considérablement réduit. Deux plaques au format 22x28cm sont découpées pour obtenir quatre plaques 14x22cm supplémentaires pour nos tests, qui s'ajoutent aux huit dernières plaques.

La découpe s'effectue sous lumière inactinique. Pour garder un trait de coupe précis, un patron guide est préalablement dessiné sur une feuille de papier du même format que la plaque de verre. Un trait est tracé pour indiquer l'emplacement de la césure. Le traçage de cette ligne prend en compte l'épaisseur du coupe-verre qui décale la roulette de coupe de quelques millimètres. Ce patron est placé et ajusté sous la plaque, avant le placement de la règle et l'entaille du verre. Pour protéger la surface sensible, dirigée vers le plan de travail, une fine feuille de papier de soie est disposée entre l'émulsion et le patron.

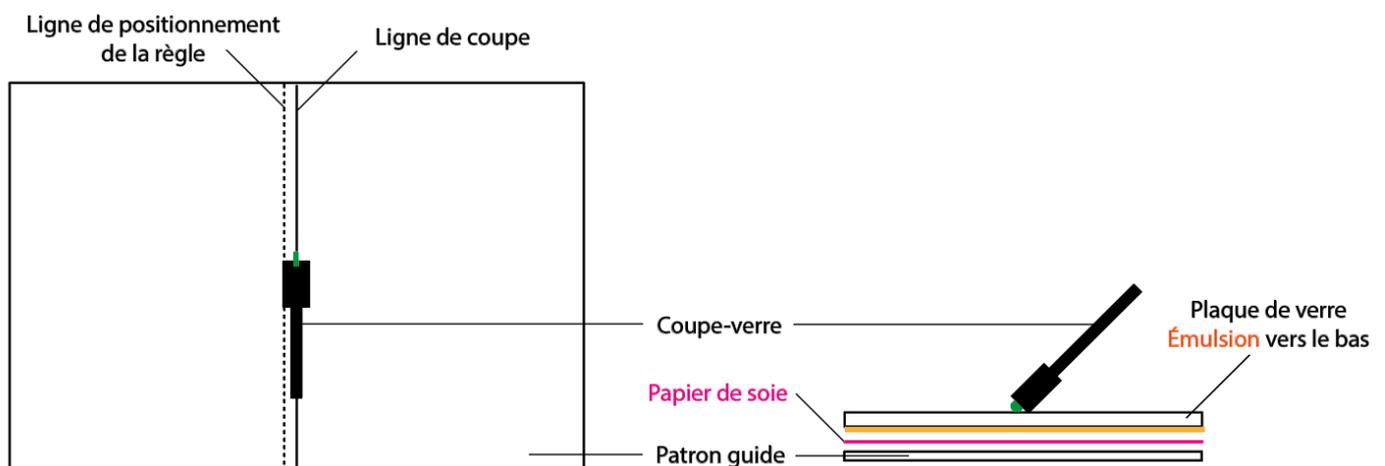


Schéma du dispositif de découpe des plaques photosensibles.

4.1.3. Détermination de la sensibilité des plaques

La sensibilité des plaques émulsionnées doit maintenant être calculée pour ensuite pouvoir déterminer notre temps de pose et effectuer les prises de vues.

Les problèmes liés à la gestion et à l'organisation du projet nous ont menés à des conditions d'étude peu optimales. L'exposition et le traitement des sensitogrammes sont réalisés chez Maxime Sicard, ami dévoué qui m'accompagne tout au long de l'analyse sensitométrique. L'agrandisseur est posé au sol, les bacs disposés dans la baignoire. Le nombre de plaques étant limité, celles au format 17x22cm sont découpées en deux. Lorsque toutes les solutions sont préparées, la lumière rouge de la salle de bain est allumée. L'éclairage produit par l'agrandisseur est mesuré avec un luxmètre et réglé pour atteindre une lumination de 30lx. L'ampoule éteinte, nous disposons notre plaque sensible, émulsion vers le haut, sur le plateau de l'agrandisseur. Pour faciliter la manipulation, nous avons conçu un piano en carton rigide adapté au format de nos plaques. Les bandes découpées et pliables permettent d'exposer la charte plusieurs fois sur la même plaque en minimisant la perte de surface inutilisée. Le carton est recouvert d'un papier de soie collé pour éviter toute dégradation de la surface émulsionnée. La charte est donc posée sur la bande émulsionnée découverte puis exposée. La charte est retirée, le volet occultant en carton est replacé pour recouvrir la bande insolée. La charte est déplacée et disposée au niveau de la prochaine bande.

Après le deuxième test, nous relevons sur l'image un vignetage assez important. Nous émettons l'hypothèse que les bandes en carton de notre piano ne se plaquent pas parfaitement à notre émulsion et laissent ainsi passer de la lumière. Nous changeons alors d'installation et employons une contacteuse. La vitre permet d'aplatir et de maintenir la charte contre la plaque afin d'éviter toute diffusion lumineuse. Cette nouvelle configuration nécessite un ajustement photométrique et la découpe des plaques sensibles en bandes de 4.5cm x 17cm pour pouvoir les exposer une à une. Malgré ce changement, le vignetage est toujours présent.

• *Développement des sensitogrammes*

La température des bains ne doit pas dépasser les 20°C pour ne pas détruire la gélatine. Nous préparons 1L de chaque solution en suivant les indications et les recettes des fabricants.

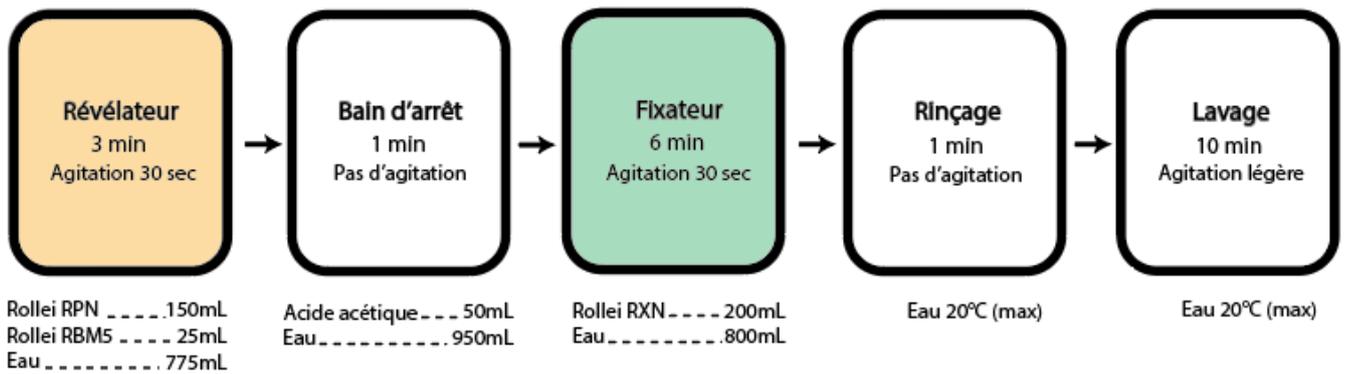


Schéma de la chaîne de traitement des sensitogrammes.

Les sensitogrammes finissent par sécher, posés inclinés sur un étendoir à vaisselle.

Sur la première plaque, nous exposons trois plages à 300lx, 600lx, et 1200lx. Les défauts de cette exposition ne tardent pas à apparaître. L'image se révèle très rapidement dans le premier bain et devient très dense. Nous relevons également un fort décollement pendant le bain d'arrêt. Le lavage ne peut être terminé, la couche de gélatine n'adhérant plus à la plaque. Nous émettons plusieurs hypothèses :

- L'exposition est trop longue
- Le révélateur est trop long ou trop concentré
- La dose de durcisseur dans le révélateur n'est pas assez élevée
- L'agitation est trop énergique
- La température des bains et/ou du laboratoire est trop élevée
- Le couchage n'est pas de bonne qualité

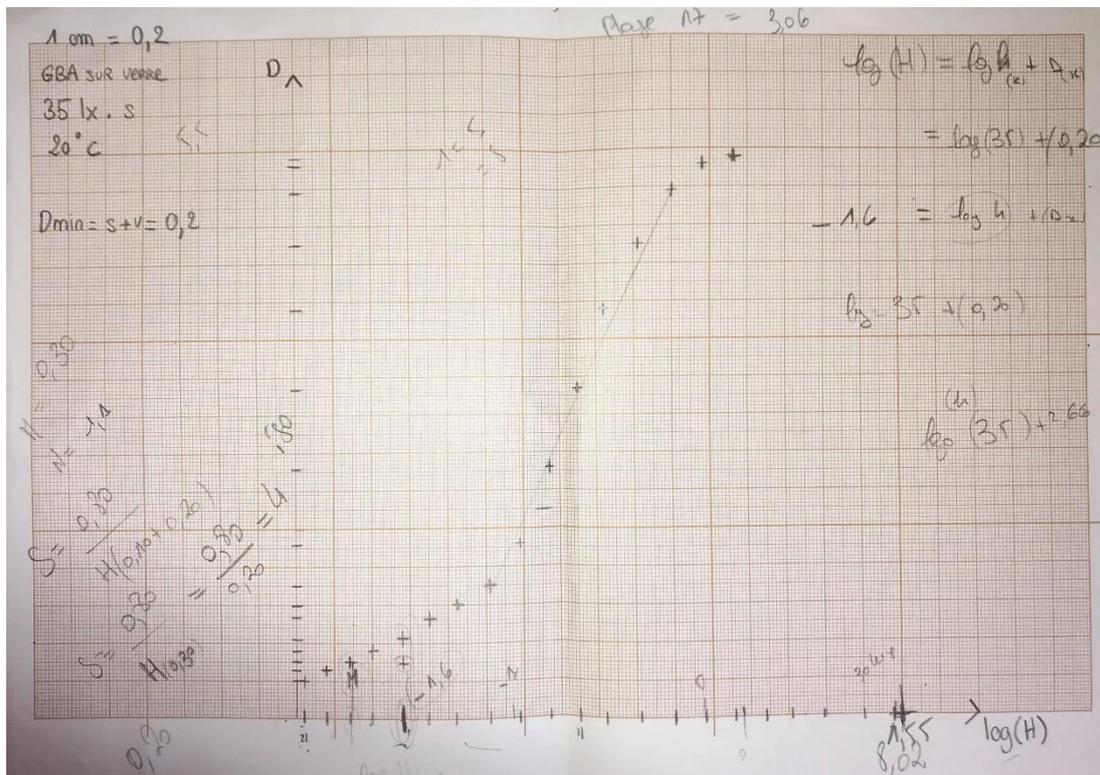
Pour notre seconde plaque, nous décidons alors de changer les valeurs d'exposition. Les valeurs d'éclairement sont de 14lx, 35lx, 75lx et 150lx. Nous mesurons également la température des bains, elle s'élève à 23°C. Les conditions pratiques ne permettent pas un contrôle précis et rigoureux de ce paramètre. Nous les refroidissons alors en y ajoutant quelques glaçons. L'agitation est aussi contrôlée et plus douce. Nous obtenons, avec la deuxième plaque exposée, des meilleurs résultats, les plages de la charte sont visibles. Mais le décollement reste assez important à partir du dernier lavage. Nous n'avons pas pris en considération la température de ce dernier bain. Nous le refroidissons alors de la même manière. Les bandes suivantes présentent une surface convenable à la sortie du fixateur mais qui se dégrade pendant le lavage

et le séchage. Les changements d'atmosphère entre la salle de bain et la cuisine, où se trouve le lavage, peut provoquer un choc thermique et fragiliser l'émulsion. Nous ne pouvons cependant pas développer de nouveaux sensitogrammes. Nous utilisons donc ces dernières bandes.

Une fois sèches, des mesures densitométriques sont réalisées, en évitant les défauts, assez nombreux, des images. Nous mesurons chaque plaque distinguable trois fois pour ensuite calculer une moyenne. C'est cette moyenne que nous utilisons pour le traçage de la courbe de rendu.

• **Analyse et traçage des courbes**

Pour le traçage de notre courbe, nous choisissons la plaque proposant la plus grande étendue utile, la plaque exposée à 35lux. Après une longue soirée de calculs, nous obtenons la courbe suivante :



Courbe sensitométrique tracée.

Avec l'aide de Maxime, nous déterminons une sensibilité de 4 ISO.

Malheureusement, par manque de temps, nous n'avons pu réaliser le tracé des autres courbes. La rédaction de notre étude de la courbe en pâtit également. Le temps accordé à la compréhension et la maîtrise du protocole sensitométrique n'était pas suffisant. L'analyse de la sensibilité n'est donc pas finalisée.

4.2. Capture et traitement des images

Le dispositif de prise de vue étant relativement lourd et délicat à déplacer, les photographies sont réalisées au laboratoire optique de l'École. Le laboratoire d'holographie, attenant à la pièce principale où est disposée l'installation de capture, est utilisé pour le chargement des plaques dans le châssis. Ainsi, la durée entre l'exposition de deux images est réduite. Une fois insolées, les plaques sont transportées jusqu'au laboratoire de Fabien Hamm pour les expérimentations chimiques.

4.2.1. Installation de la prise de vue

• *Choix du sujet*

Nous avons dans un premier temps pensé à un buste. Nous retrouvions ainsi la structure d'un visage sans l'inconvénient que représente un sujet vivant. Afin de souligner ce projet de recherche d'un trait d'humour, nous avons trouvé un buste de Louis Lumière en terre cuite réalisé par Henri-Paul Rey, conservé par Antiq-photo. Après avoir contacté le propriétaire Sébastien Lemagnen, nous avons obtenu son accord pour le prêt de la sculpture.

Nous avons néanmoins tenté de trouver une autre alternative, un objet plus petit qui s'intégrerait dans le cadre de l'image pour appuyer la sensation de relief. Dans cette perspective, nous avons cherché un masque, pour conserver l'idée du portrait, qui pourrait être tenu sur une tige fine. Un premier masque est emprunté à la « Fine compagnie » installée à Aubervilliers.



Photographie du premier masque trouvé.

Il présente des reliefs marqués qui peuvent être facilement soulignés avec l'éclairage. Il est cependant très large. Le choix d'un objectif 210 mm et d'une longueur de bielle fixe limite la taille du sujet. Un second masque est donc acquis, par manque d'organisation, quelques jours avant la prise de vues. Ce choix, hâtif, n'était pas judicieux. Le tissu doré et brillant qui revêt l'intégralité du masque est plus compliqué à éclairer qu'une surface mate. Cet objet propose également peu de détails en relief qui auraient facilité la différenciation des divers plans de netteté. La première idée du buste était plus pertinente.



Photographie du masque prêt pour la prise de vue.

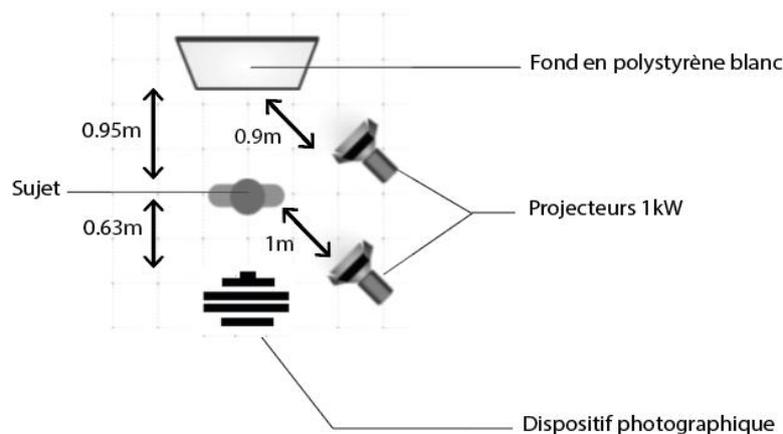
Le masque est disposé à la verticale, sa tige plantée dans un socle en polystyrène, lui-même fixé au socle en bois avec des bandes adhésives. Tourné légèrement de biais par rapport à

l'objectif, le sujet présente une profondeur réduite mais suffisante pour définir les cinq plans de netteté qui se succéderont au fil des prises de vues.

- *Première installation lumineuse*

En ce qui concerne l'installation lumineuse, l'urgence d'exécution et le calendrier très serré nous ont fait prendre de mauvaises décisions. Pour la première installation, nous avons favorisé la praticité et la rapidité de mise en place à une installation réfléchiée et cohérente dans le but de gagner du temps.

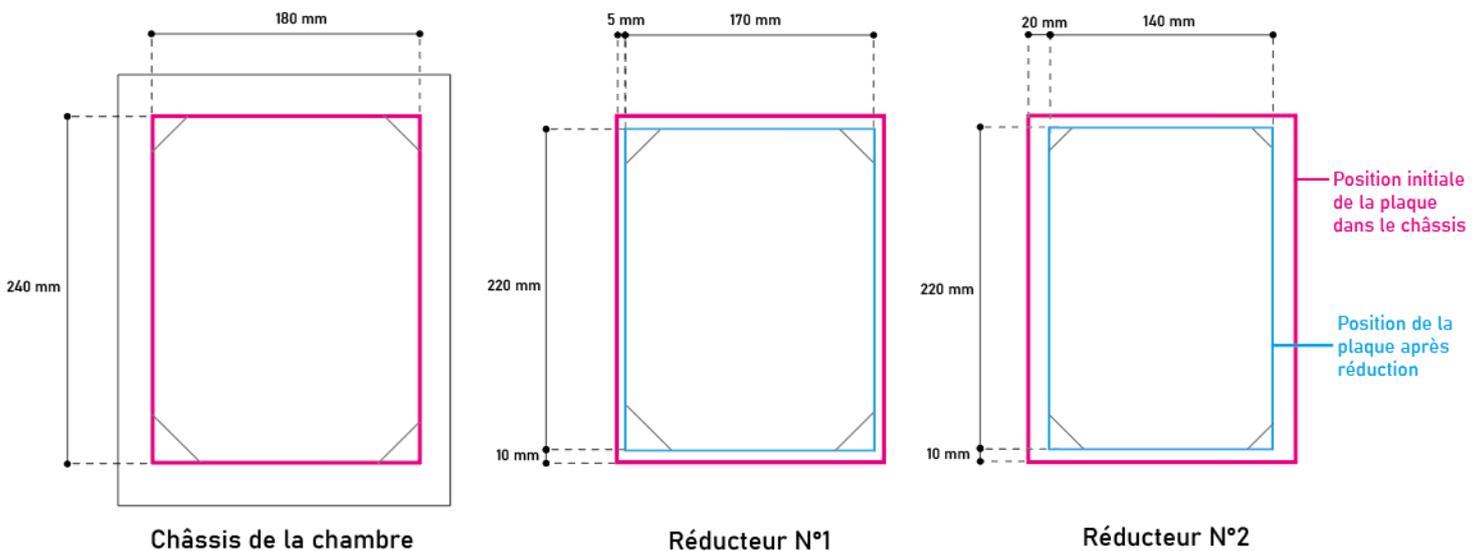
Le sujet est simplement installé à hauteur convenable sur des boites en bois. La position du dispositif, posé sur une table, est ajustée pour obtenir une distance de 63 cm entre la première lentille de l'objectif et le premier plan de netteté de notre masque. Le fond et le sujet sont chacun éclairé par un projecteur de 1kW dirigé à 45°. Toutes les fenêtres du laboratoire optique sont enfin occultées pour éviter une source de lumière supplémentaire non contrôlée.



Plan au sol de la première installation.

Cette disposition n'est pas pertinente. La lumière est bien trop puissante. Le fond blanc en réfléchit et en diffuse une grande quantité qui entraîne l'ajout de plusieurs filtres ND et une « mama » devant le projecteur. Après de nombreuses mesures avec la cellule, nous finissons par éteindre l'éclairage sur le sujet. L'organisation du laboratoire de chargement est également incertaine. La paille est petite et encombrée, un évier central gêne considérablement les manipulations dans l'obscurité.

Avant la prise de vue, deux réducteurs sont également conçus pour adapter le châssis au format de nos plaques tests.



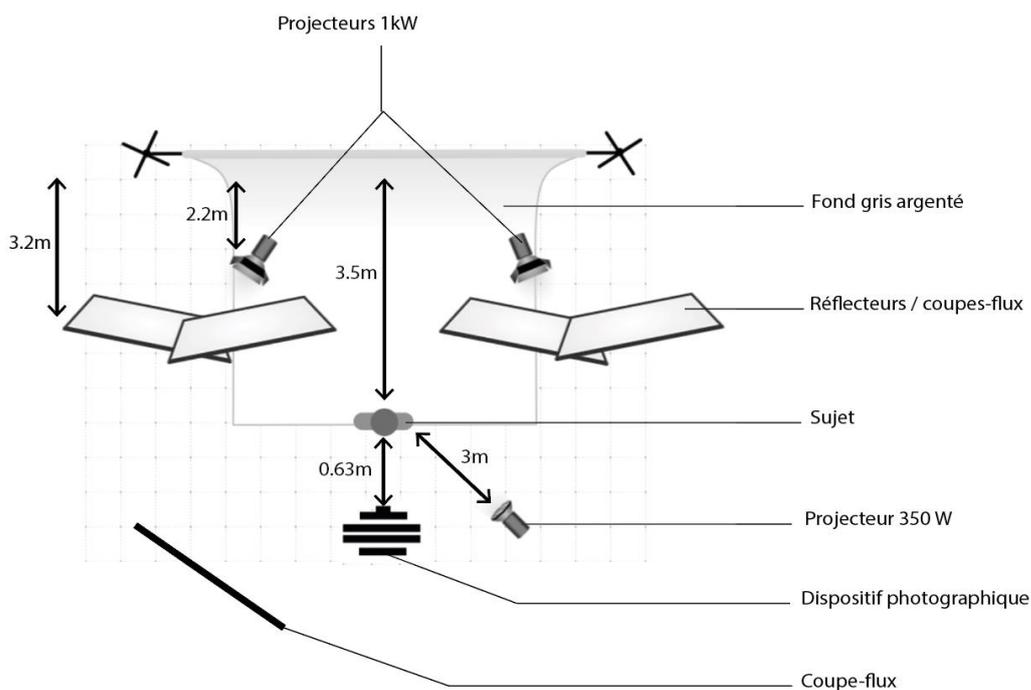
Plans côtés des deux réducteurs adaptés au châssis de la chambre.

Découpés dans du carton rigide de 2mm d'épaisseur, la finesse du cadre les rend très fragiles et limite leur fonctionnalité. Leur installation dans le châssis est délicate, même lumière allumée.

À partir de cette mauvaise installation technique, la première prise de vue ne pouvait que mal se dérouler. Les deux essais réalisés dans cette configuration se sont avérés laborieux. À commencer par le calcul du temps de pose. La sensibilité réduite et la nécessité d'une durée d'exposition assez longue pour pouvoir effectuer une rotation relativement régulière nous ont troublés. Nos différents résultats ne concordaient pas, nos estimations restaient incertaines. Parallèlement, le chargement des plaques dans le châssis était très problématique et long. Dans l'obscurité, nous avons découvert que les réducteurs, en plus de leur fragilité, ne s'adaptait pas correctement à toutes les plaques. Celles-ci présentent quelques millimètres de différence, la marge d'imprécision de la découpe initiale étant de 4mm. Leur insertion dans le réducteur puis dans le châssis était compliquée voire impossible. Un ultime essai a fini par provoquer la rupture du cadre d'un des deux adaptateurs. Cet échec a été rédhibitoire.

En fin de compte, cette première installation, qui se voulait rapide et efficace, nous a fait perdre du temps. Nous avons également utilisé deux plaques sensibles au format 14x22cm inutilement. Une seconde séance de prise de vue mieux organisée est réalisée le lendemain.

Pour commencer, le fond et le sujet sont éloignés pour pouvoir être éclairés plus indépendamment. Pour le fond, nous optons pour une toile tendue de plus grande envergure que le polystyrène blanc précédent. Cette toile est éclairée par deux projecteurs 1kW disposés en réflexion contre quatre réflecteurs qui jouent aussi le rôle de coupes-flux vis-à-vis du sujet et de l'appareil. La lumière est plus diffuse et plus homogène qu'avec la première installation. Le sujet est lui éclairé avec un projecteur 350W. La séance étant organisée du jour au lendemain, aucune source moins puissante n'était disponible. Nous l'avons alors éloignée. La « mama » est retirée pour ne laisser que quelques filtres ND. Enfin, nous remarquons que le bois clair de la platine avant du dispositif diffuse également de la lumière. Elle est recouverte d'un tissu noir opaque pour diminuer les réflexions. Le tissu est bien évidemment découpé pour laisser passer l'objectif.

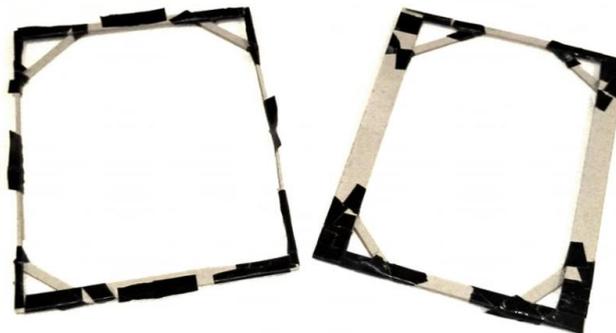


Plan au sol de la seconde installation.

Dans ces conditions, nous effectuons des mesures photométriques. En plaçant la cellule devant le masque, dirigée vers l'objectif, la lumière incidente est estimée à 30lx. Pour une ouverture à 4.5 et une surface sensible de 4 ISO, le temps de pose correct est évalué à 1/15^{ème} de seconde. Cependant, lorsque la mesure est réalisée en lumière réfléchie, la durée d'exposition proposée est 8 secondes. Après de multiples calculs, nous décidons d'effectuer une capture avec un

appareil numérique, plus précisément un Sony Alpha6500, réglé à une sensibilité de 100 ISO et une ouverture de 4.5, et en réalisant plusieurs mesures sur le sujet. Les valeurs sont ensuite converties pour une surface sensible de 4 ISO. L'éclairage est ajusté en conséquence jusqu'à obtenir un temps d'exposition de 15 secondes. Malgré ces tests numériques, nous restons sceptiques et insatisfaits vis-à-vis de nos estimations.

L'organisation de la pièce de chargement du châssis est également revue. L'évier est couvert pour agrandir la surface de la paillasse, les équipements et les objets inutiles sont débarrassés. L'ouverture du bas de porte est obstruée avec un tissu noir. L'achat et l'installation d'une lumière rouge inactinique aurait été judicieux pour optimiser l'étape du chargement. Enfin, les réducteurs sont retaillés et renforcés au niveau des angles avec des bandes de gaffer noir.



Photographies des deux adaptateurs.

Dans le but d'ergonomiser encore davantage l'étape au noir, nous les fixons directement au châssis pour faciliter l'insertion de la plaque. Une boîte de déchargement est aussi disposée sur la paillasse, prête à recevoir les plaques insolées. L'expérience est installée, les prises de vues peuvent être réalisées.

4.2.2. Le protocole des images expérimentales

Suite aux analyses sensitométriques, nous disposons pour nos premiers essais photographiques de six plaques au format 17x22cm et de quatre plaques au format 14x22cm. Les deux exposées lors de la première installation lumineuse, ne peuvent malheureusement pas être prises en compte. Seulement huit plaques au total peuvent être utilisées pour nos essais en laboratoire de développement.

Pour limiter le nombre de paramètres variables et pouvoir ainsi mieux analyser les contraintes liées à leur traitement chimique, la capture des huit photographies respecte un protocole rigoureusement identique :

- *Réglage de la mise au point sur un plan prédéfini*
- *Blocage de la mise au point en serrant la vis du plateau et les deux écrous à ailes*
- *Couverture de l'objectif*
- *Retrait du porte-dépoli*
- *Chargement de la plaque sensible dans le châssis*
- *Placement du châssis dans la chambre*
- *Retrait du rideau occultant intérieur*
- *Stabilisation du dispositif*
- *Retrait du capuchon de l'objectif et lancement du chronomètre*
- *Capture de l'image*
- *Remplacement du capuchon et du rideau occultant*
- *Déchargement de la plaque dans une boîte au noir*

La durée d'exposition de 15 secondes et la mise au point restent inchangées. Le dispositif de rotation n'est également pas actionné pendant la prise de vue pour une netteté similaire sur l'ensemble des images tests. Le bon fonctionnement du mécanisme sera vérifié avec les dernières plaques.

Grâce aux améliorations apportées à l'installation de la prise de vue, la seconde séance s'est mieux déroulée, et a été plutôt rapide. L'enchaînement des étapes était plus fluide, le chargement des plaques dans le châssis se faisait avec plus d'aisance. La bonne exposition du sujet reste néanmoins incertaine, malgré tous les tests sensitométriques et les multiples mesures photométriques. Nous n'avons pas pu étudier plus amplement le problème par manque de temps, mais il serait nécessaire de reprendre cet aspect du protocole pour nos expérimentations futures. Ne pas véritablement maîtriser l'exposition de nos plaques est un frein pour l'analyse approfondie du procédé qui nécessite par ailleurs une seconde exposition au cours du développement chimique.

Malgré cette confusion en terme d'exposition, nous procédons au développement des huit plaques insolées. Nous commençons par définir avec précision le traitement et le rôle de chaque plaque.

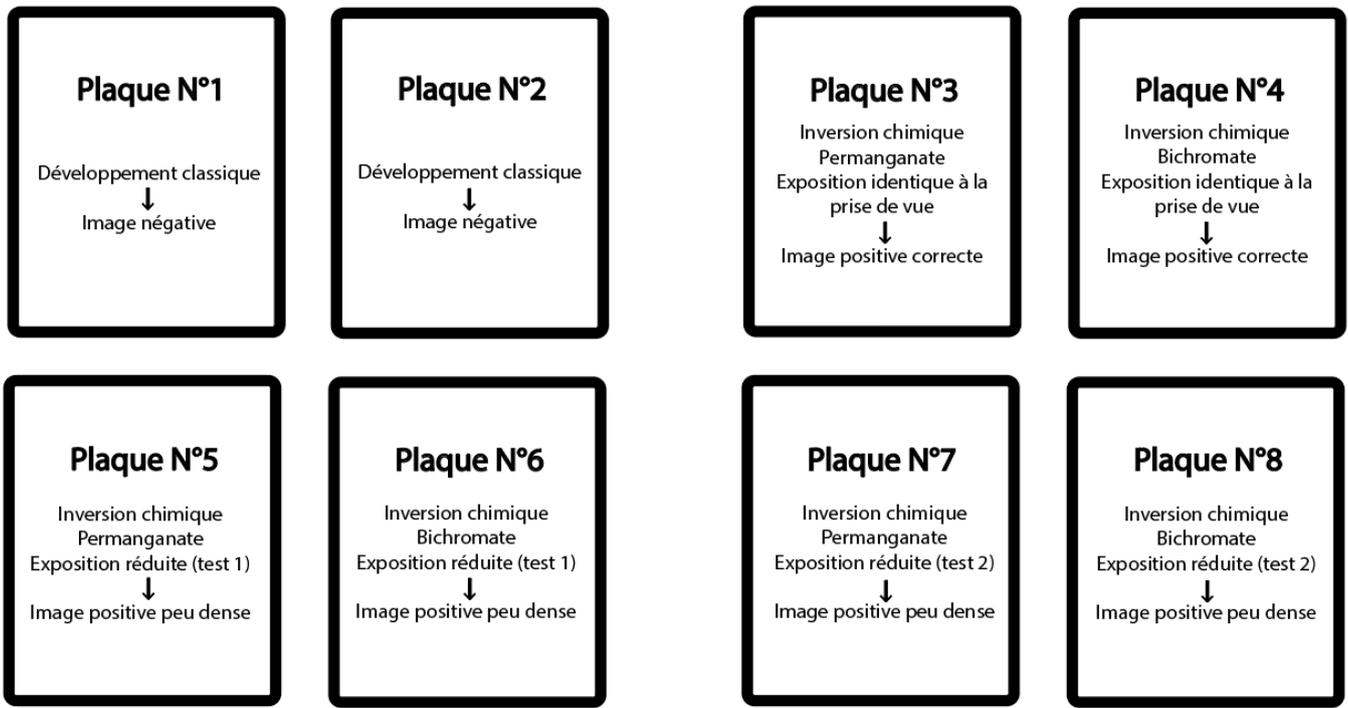


Schéma synthétisant l'utilisation de chaque plaque de test.

Deux premières plaques au format 17x22 cm sont traitées en reproduisant la chaîne de développement des sensitogrammes, afin d'obtenir au moins un négatif correct à étudier. Les six images restantes nous permettent de tester la chaîne d'inversion chimique. L'inversion est « la suite d'opérations qui permet d'obtenir une image positive sur la couche même qui a enregistré l'image négative ».

La chronologie des bains rappelle celle du traitement E6 des films couleurs positifs.

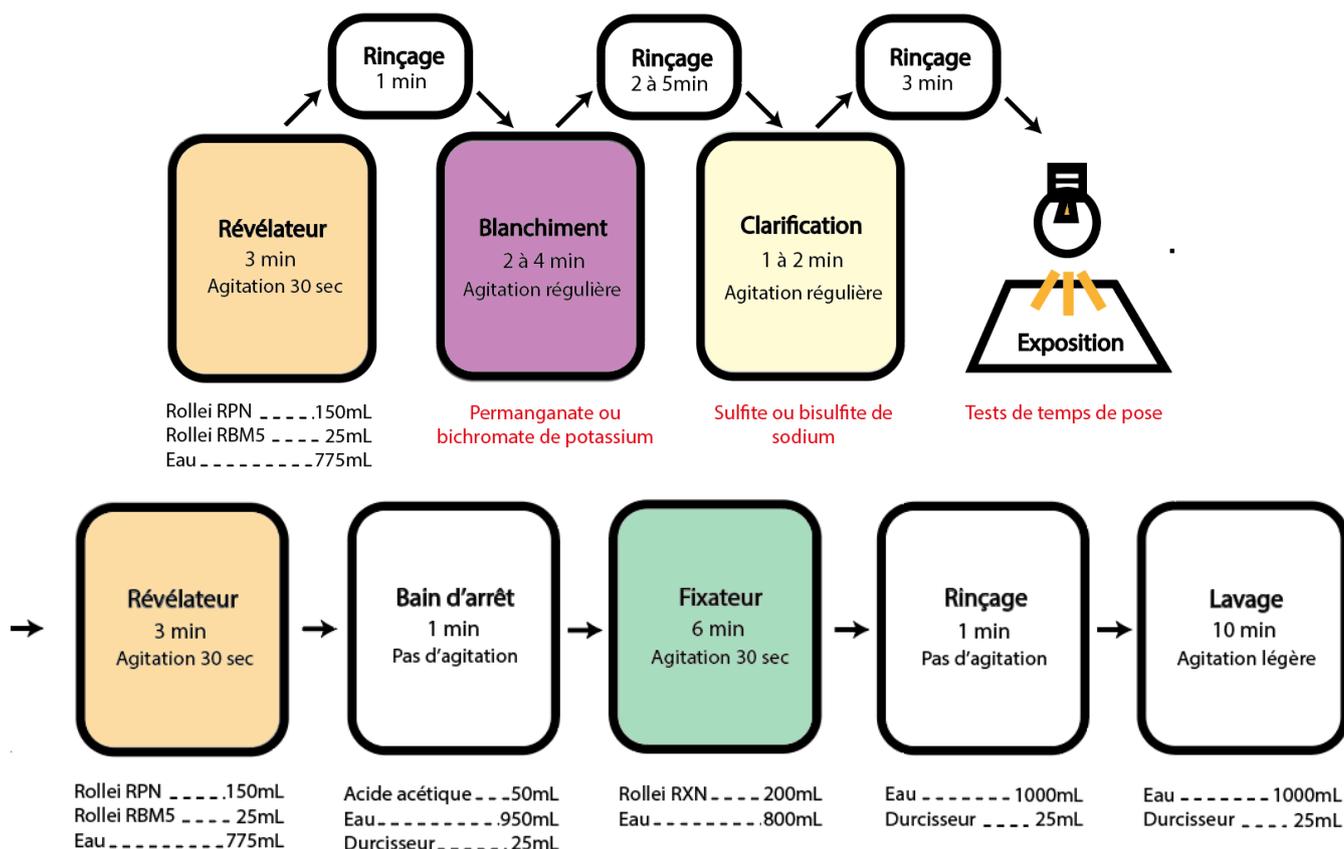


Schéma simplifié de notre chaîne d'inversion « positive ».

• Révélateur

La plaque insolée est d'abord développée, de la manière habituelle, dans un premier bain révélateur. Les ions argent Ag^+ insolés sont réduits par le développeur en atomes d'argent Ag . Nous continuons d'utiliser le révélateur Rollei RPN à contraste variable auquel nous ajoutons une petite quantité de durcisseur Rollei RBM5. Cet additif acide « améliore l'adhérence de la gélatine au verre et augmente la résistance mécanique de l'émulsion ».

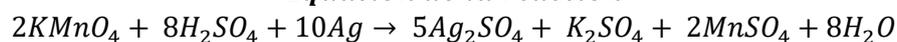
Avant de la plonger dans le révélateur, le verso de la plaque est nettoyé avec une éponge propre et de l'eau chaude puis essuyé avec du papier essuie-tout pour que les résidus de gélatine soient retirés. Si ces derniers sont révélés et traités, ils forment une couche d'argent à l'arrière de l'image dont le rendu est logiquement altéré. Dans ce cas, le dépôt doit être gratté. Cette manipulation est plus laborieuse et plus longue qu'un nettoyage rapide avant le traitement des photographies.

- **Blanchiment**

La plaque est ensuite rincée rapidement pour être transvasée dans un bain de blanchiment, ou bain d'inversion. Cette solution dissout l'argent métallique par des agents affaiblisseurs. Pour approfondir notre recherche, nous tentons de comparer deux bains d'inversion différents. Une première solution de blanchiment est préparée à partir de permanganate de potassium, une seconde à partir de bichromate de potassium.

En solution sulfurique, le permanganate de potassium $KMnO_4$ oxyde les atomes d'argent qui se transforment en sulfate d'argent Ag_2SO_4 . Le permanganate de potassium se réduit lui en sulfate de manganèse $MnSO_4$ et en sulfate de potassium K_2SO_4 .

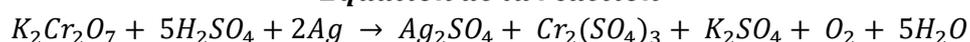
Équation de la réaction



Le permanganate de potassium se présente sous la forme de cristaux violets, ses solutions étendues sont d'un rose-violacé caractéristique.

Le bichromate de potassium $K_2Cr_2O_7$, vendu sous forme de cristaux rouges-orangés, est un oxydant puissant. Lui aussi préparé en solution sulfurique, il transforme le métal argent Ag en sulfate d'argent soluble dans l'eau. Simultanément, le bichromate de potassium se réduit en sulfate de chrome $Cr_2(SO_4)_3$ et en sulfate de potassium K_2SO_4 .

Equation de la réaction



Ces deux affaiblisseurs sont classés dans la catégorie des affaiblisseurs proportionnels mais en solution sulfurique, ils agissent davantage en profondeur et devraient donc être placés parmi les affaiblisseurs surproportionnels, avec le persulfate d'ammonium et la quinone par exemple. Leur action se concentre davantage sur les parties denses de l'image, plus riches en atomes d'argent. Ainsi, avec ce type d'affaiblissement, l'image peut perdre en contraste lors de l'inversion. Un troisième agent de blanchiment est souvent cité, le sulfate de cérium $Ce_2(SO_4)_3$, qui oxyde l'argent en sulfate d'argent soluble et se réduit lui-même en sulfate céreux $CeSO_4$. Ce bain cérique permet une action uniforme sur l'image mais coûte néanmoins plus cher.

Pour les dilutions et la durée de ces bains, nous reprenons les recettes proposées par Pierre Glafkidès dans son livre Chimie et physique photographiques :

Permanganate de potassium

4min

Permanganate de potassium	2 à 3g
Acide sulfurique	10 mL
Eau	1000 mL

Bichromate de potassium

2 à 3min

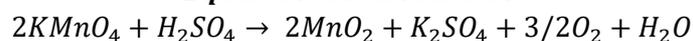
Bichromate de potassium	9.5 g
Acide sulfurique	12 mL
Eau	1000 mL

Il est important de noter qu'un excès d'acide peut se traduire par la formation de taches jaunes tandis qu'une trop forte concentration en bichromate peut entraîner la formation de chromate d'argent qui marque l'image de taches noires ou blanches. Suite au blanchiment de l'émulsion, la plaque doit être lavée pendant 2 à 5 minutes.

• Clarification

Pendant le blanchiment, la gélatine, réductrice, agit sur les agents d'affaiblissement. Une faible partie de permanganate de potassium est réduite en dioxyde de manganèse MnO_2 qui teinte l'image en brun.

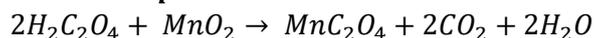
Equation de la réaction



Cela nécessite alors la clarification de l'émulsion avec un bain de bisulfite* $NaHSO_3$ ou de métabisulfite de sodium pour transformer le dioxyde en sels solubles de manganèse. Cette opération peut également être réalisée avec un bain d'acide oxalique qui se combine au dioxyde de manganèse pour former de l'oxalate de manganèse soluble dans l'eau.

*hydrogénosulfite de sodium

Equation de la réaction



Nous choisissons la dilution suivante :

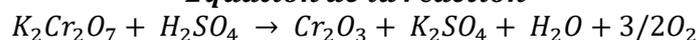
Clarification du permanganate de potassium

2 min

Eau 1000 mL
Bisulfite de sodium 50 mL
ou Métabisulfite de sodium..... 25g

De même pour le bichromate dont une petite proportion est réduite par la gélatine en oxyde de chrome Cr_2O_3 qui colore l'image de taches verdâtres.

Equation de la réaction



Elles sont éliminées grâce à une solution de sulfite de sodium Na_2SO_3 qui transforme ce sesquioxyde de chrome en sels solubles dans l'eau.

Clarification du bichromate de potassium

1 min

Eau 1000 mL
Sulfite de sodium anhydre 200 g

La plaque ne doit pas être immergée dans le sulfite plus de 1 minute car cela provoquerait l'affaiblissement de l'image. Si la durée d'immersion est plus longue, une portion du sulfite doit être remplacée par du bisulfite. Le bain de clarification est suivi d'un rinçage de 3 minutes.

• **Seconde exposition**

L'image négative dissoute, les ions argent résiduels non exposés lors de la prise de vue, sont insolés avant d'être révélés à leur tour pour fournir l'image positive correspondante. Les zones de basse densité sur le négatif s'assombrissent, tandis que les zones de haute densité sur le négatif restent blanchies et ne réagissent pas à la lumière. L'image est inversée. Cette seconde exposition impacte considérablement la densité de l'image finale obtenue. Elle doit

être ajustée en fonction de nos expérimentations. Pour le procédé de photo-stéréo-synthèse, la densité de chaque plaque doit être égale à la densité d'une image jugée « convenable » divisée par le nombre de photographies finalement superposées. Dans notre cas, nous prévoyons une superposition de cinq plaques. La densité, et logiquement le temps d'exposition, doit donc être divisée par 5 pour nos tests d'exposition.

Pour terminer, la plaque est développée de manière « habituelle », en suivant le premier protocole de développement mis en place pour le tirage des sensitogrammes.

Une autre alternative propose de remplacer la seconde exposition par un bain contenant une substance voilante à base d'hydrazine ou de semicarbazide tel que le chlorhydrate de semicarbazide, dilué à 10g/L. Cette substance peut être directement ajoutée au second révélateur. La maîtrise de la densité résultante est cependant moins précise.

4.2.3. Analyse des résultats expérimentaux

Le premier, et seul jour de nos essais de développement, la température du laboratoire s'élève à 20,3°C. Pour le traitement de l'émulsion sur un support en verre, le fournisseur conseille de ne pas utiliser des solutions allant au-delà de 20°C pour limiter les risques de la détruire. La température des bains est alors régulièrement surveillée avec un thermomètre électrique.

• Plaque N°1

Nous commençons par développer et fixer une plaque au format 17x22cm pour obtenir un négatif bien exposé. Avant même la fin de la chaîne, des forts décollements sont relevés sur la couche image qui rendent l'image sèche inexploitable. Nous émettons l'hypothèse que la plaque subit un choc réactif trop violent entre le révélateur et le bain d'arrêt. Nous ajoutons alors 25mL de durcisseur RBM5 dans ce dernier bain. La température des bains est également contrôlée, elle se situe entre 19.8°C et 20.1°C, ce qui reste correct. Elle reste donc inchangée.

En outre, nous remarquons que l'image latente apparaît rapidement dans le révélateur pour donner après 3 minutes une image très dense, ce qui n'est pas surprenant si nous prenons

en considération la surexposition du fond pendant la prise de vue. Au contraire, l'image du masque ne présente aucune modulation de densité. Sa silhouette ressort totalement transparente sur fond noir. Le masque a été mal exposé, aucun détail n'a été enregistré par la surface sensible.

- **Plaque N°2**

Après avoir ajouté le durcisseur au bain d'arrêt, nous décidons de couper en tranches la seconde plaque test au format 17x22cm pour multiplier les essais de développement négatif. Avec une première bande de dimensions 7x11cm, nous reproduisons le protocole à l'identique, en observant rigoureusement la réaction de la plaque dans chaque bain pour tenter de localiser le début du décollement de l'émulsion et ainsi définir son origine. La couche commence à se retirer à partir du bain de rinçage. Nous supposons une trop haute température des bains. Nous plaçons alors, directement dans les bacs, deux pains de glace dans l'eau de rinçage pour la refroidir. Nous y ajoutons également 25mL de durcisseur.

- **Plaque N°3**

Avec une deuxième bande 7x11cm, nous reproduisons le processus, mais cette fois-ci en lumière blanche pour faciliter l'observation du décollement. La température du bain de rinçage est mesurée à 13.3°C, celle des autres solutions est maintenue à 19.9°C. Dans ces conditions, aucun problème mécanique n'est relevé, hormis sur les tranches. Mais une fois sèche, la couche développée reste stable et adhère au support en verre.

- **Plaque N°4**

Nous reproduisons un traitement identique en tous points avec la dernière bande de 7x11cm, mais sous lumière inactinique. Le bain de rinçage est légèrement plus froid avec une température de 11.3°C. Comme avec la bande précédente, la gélatine ne se décolle pas. Notre chaîne de traitement négative est opérationnelle.

- **Plaque N°5**

Pour confirmer nos résultats, nous appliquons ce protocole pour le traitement d'une plaque 14x22cm exposée avec la première installation lumineuse. Nous savons, même avant de la révéler, que l'image est sous-exposée. Nous voulons simplement observer la réaction d'une surface émulsionnée plus grande dans les bains chimiques mais aussi obtenir un aperçu rapide de l'impact de la rotation du dispositif de prise de vue sur l'image. Aucun problème lié au traitement n'est à souligner. Malgré la densité importante de l'image, nous pouvons cependant deviner, en l'observant par transparence sur une table lumineuse, que la photographie n'est pas nette. Plusieurs silhouettes du masque sont clairement distinguables. La rotation du système est visible, l'image du plan de netteté ne reste pas nette. Notre mécanisme ne semble pas fonctionner.

- **Plaque N°6**

Nous développons une dernière plaque au format 17*22cm avec ce protocole pour obtenir un négatif correct, normalement bien exposé lors de notre seconde installation. Mais comme notre première plaque test, l'image apparaît très contrastée dès le bain révélateur. Aucune information est enregistrée par l'émulsion sensible au niveau de l'image du masque, qui reste une silhouette transparente sur fond noir. Notre exposition est donc totalement à revoir pour nos futurs essais.

- **Plaque N°7**

Après ce tâtonnement pour poser les paramètres du processus de développement du négatif, nous pouvons à présent expérimenter l'inversion chimique. Nous testons dans un premier temps le bain de blanchiment au permanganate de potassium associé à un bain de clarification au bisulfite de sodium. Pour l'exposition, nous choisissons d'insoler la plaque comme le sensitogramme qui présentait la plus grande étendue utile. Nous mesurons avec notre cellule un éclairage relativement uniforme de 10lx sur la surface éclairée par l'agrandisseur. Nous optons pour un temps de pose de 3 secondes pour obtenir un éclairage équivalent à 30lx par seconde.

À la fin du traitement, le problème est clair et évident. La gélatine est totalement transparente. Le chlorobromure d'argent résiduel n'a pas été suffisamment exposé, l'image positive n'a pas pu être révélée. Nous pouvons cependant positiver en remarquant l'efficacité du permanganate qui dissout presque intégralement l'argent qui constituait l'image du fond blanc. Une seule zone n'a pas été entièrement éliminée et témoigne d'un affaiblissement irrégulier et incomplet. Nous pouvons imaginer que le bain n'était pas assez long ou bien trop dilué par rapport à la quantité d'argent contenue dans la couche image. Des décollements sont également relevés dès le premier révélateur puis dans le bain de rinçage suivant. Nous émettons l'hypothèse que l'agitation du bain développeur était peut-être trop énergique, prolongée par un rinçage sûrement pas assez froid. Le couchage de l'émulsion pouvait également présenter des aspérités qui ont entraîné cette réaction.

- **Plaque N°8**

Comme précédemment, nous choisissons de placer un pain de glace dans chaque bain de rinçage et d'y incorporer 25mL de durcisseur. Nous augmentons également l'éclairage et le temps de pose de notre agrandisseur. Nous exposons notre plaque 17x22cm à 25lx pendant 10 secondes pour une quantité de lumière considérablement plus importante. Malgré tout, aucune image apparaît après 30 secondes dans le révélateur. L'insolation sous agrandisseur reste encore trop faible. Impulsivement, nous décidons d'allumer la lumière blanche du laboratoire pendant 2 secondes, la plaque toujours immergée dans le révélateur. En effet, « *si la lamination ne doit pas être trop faible, elle peut par contre atteindre 100 fois le minimum* ». Instantanément, l'image positive apparaît.

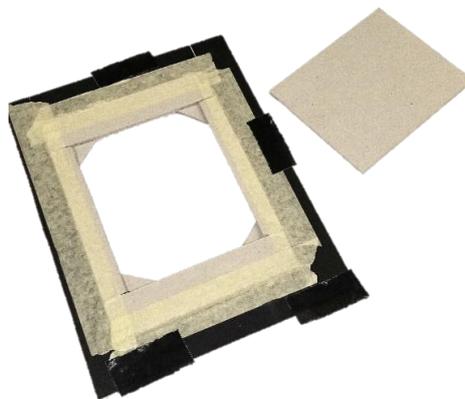
Après cette huitième plaque, nous n'avons malheureusement plus le temps de réaliser d'autres essais chimiques avec les plaques restantes. Les conclusions sont assez mauvaises. La principale erreur concerne l'exposition de l'image, tant à la prise de vue qu'en laboratoire. Le négatif présente un contraste beaucoup trop important, ainsi qu'aucun détail dans les moyennes et les basses densités. Le positif est, en conséquence, lui aussi trop contrasté et peu détaillé. Une nouvelle étude des relevés sensitométriques serait nécessaire en prenant le temps de bien de comprendre notre émulsion. En effet, la précipitation et la succession très rapide des différentes étapes du protocole de test n'ont pas favorisé une réflexion pertinente

et ont entraîné les mauvaises décisions. Condensées sur une semaine, les expérimentations étaient également très limitées. Nous n'avons pas pu tester le bain de blanchiment au bichromate et encore moins déterminer le temps de pose adéquat pour obtenir des plaques cinq fois moins denses. Notre échec lors de l'exposition des plaques était rédhibitoire.

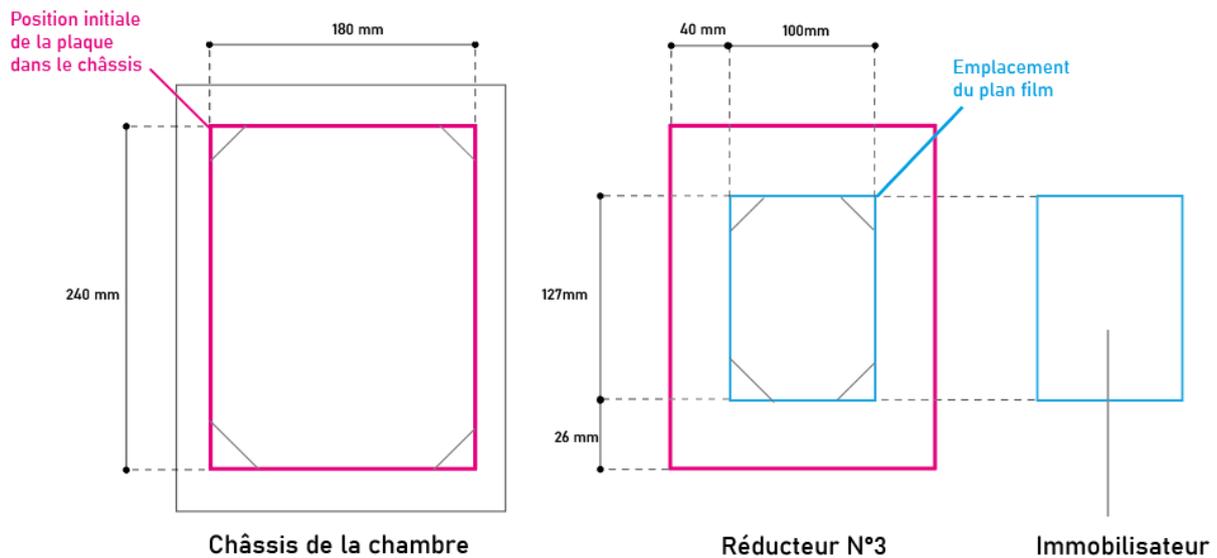
4.2.4. Réalisation des photographies finales

Pour pallier à ces confusions concernant l'exposition des plaques, les derniers essais suivent un protocole différent. Les prises de vues ne sont plus réalisées directement sur verre mais sur plans films. Cette étape assure l'obtention d'un négatif correctement exposé qui est ensuite tiré par contact sur une plaque au gélatino-bromure d'argent. Cette dernière est enfin développée selon la chaîne de traitement vérifiée lors de nos essais précédents.

Nous nous tournons d'abord vers l'achat de plans films Foma au format 13x18cm qui permet de couvrir les deux formats des plaques restantes. Cependant, l'équipement du laboratoire argentique de l'École n'est pas adapté à ce format. Nous décidons, en dernier recours, d'employer des plans films Ilford HP5+ 400 ISO de format 4"x5", prêtés par l'École. Ce changement nécessite une nouvelle adaptation du châssis. Un réducteur adapté à la finesse du film est conçu. Le cadre de maintien est bien sûr plus large, mais une pièce supplémentaire est nécessaire pour plaquer le film contre les quatre languettes angulaires. Nous découpons simplement un rectangle en carton de même épaisseur que le cadre et au format de la surface sensible. Ainsi, le plan film est correctement immobilisé et ne risque pas de glisser dans le châssis.



Photographie du troisième réducteur.



Plans côtés du nouveau réducteur.

Pour notre dernière séance, nous prévoyons l'exposition de dix plans films, deux par plan de mise au point. Le premier est insolé avec le dispositif immobile, le second avec le dispositif en rotation. Les deux images obtenues nous permettront d'analyser l'effet du dispositif de photo-stéréo-synthèse sur l'image. Le temps d'exposition est alors identique pour tous les films. En mesure de lumière incidente, notre cellule nous indique une durée d'exposition de $1/8^{\text{ème}}$ de seconde. Nous devons baisser l'exposition de 8 IL. Nous ajoutons en conséquence deux filtres ND9 et un filtre ND3 devant le projecteur pour obtenir un temps de pose de 16 secondes.

Le protocole de prise de vue reste ensuite assez similaire à celui des plaques des essais chimiques. À la seule, mais néanmoins importante, différence que le plan de mise au point est avancé toutes les deux prises de vues. Cette translation est effectuée en actionnant, dans le sens horaire, la manivelle en « T » liée à l'embase. Les cinq plans de mise au point sont prédéfinis et mesurés sur le sujet de telle manière :

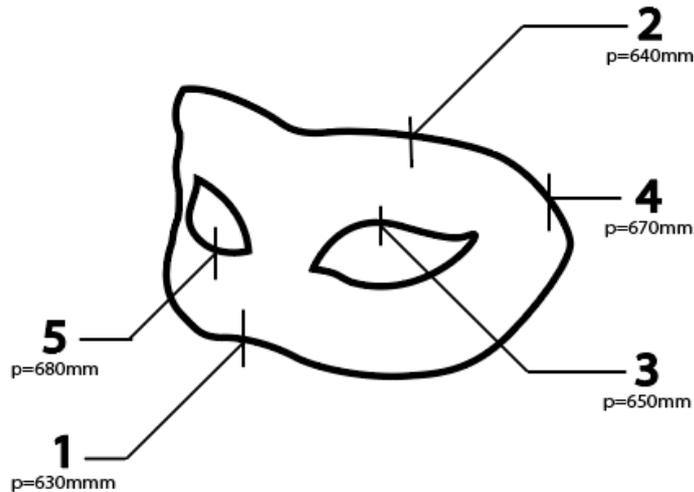


Schéma des cinq points du masque sélectionnés pour le réglage du plan de mise au point.

Le premier plan de netteté est placé sur le point du masque le plus proche de l'objectif, c'est-à-dire son nez. L'espacement en profondeur entre les cinq plans est plutôt régulier, allant de 1 à 2cm d'écart.

Une fois retiré du châssis, chaque film est placé dans une pochette noire opaque, elle-même rangée dans une boîte en carton, pour être déplacé jusqu'au laboratoire de développement lorsque les dix films sont exposés. Leur transport ne dure que quelques minutes. Ils sont ensuite immédiatement placés dans les cadres de développement adaptés à leur format. Le processus de traitement qui suit respecte l'équipement et la chaîne de traitement mise en place par Jules Nguyen, assistant du laboratoire de l'École :

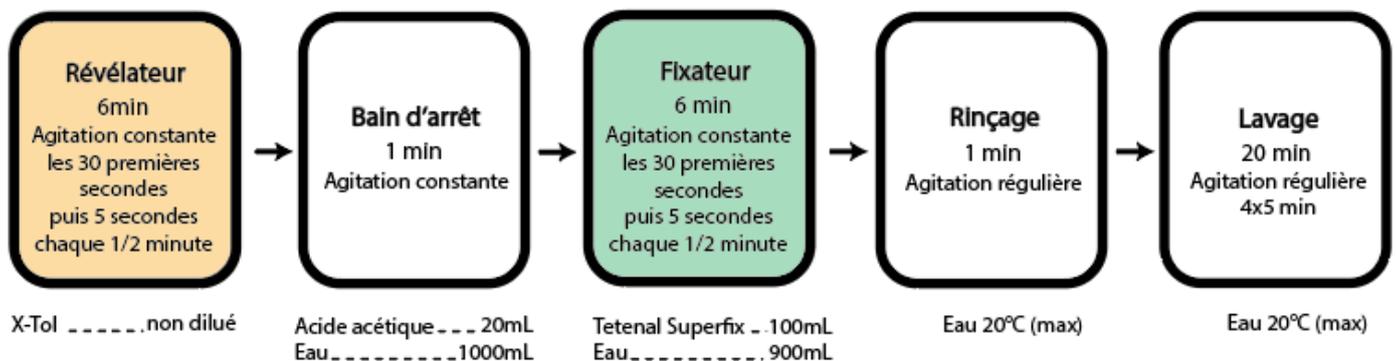


Schéma simplifié de la chaîne de développement des plans films.

Pour chaque bain, les dix plans films trempent en position verticale dans des cuves spécifiques à couvercle flottant. L'agitation s'effectue par un geste simple théorique, mais un peu délicat en pratique. La structure portant tous les cadres doit être sortie puis réimmergée régulièrement pendant le temps imposé. L'étroitesse des cuves complique la manipulation, exécutée dans l'obscurité totale. Le lavage final est suivi d'une immersion rapide dans une cuvette d'agent mouillant. Cette solution prépare le film au séchage de 30 minutes en sècheuse électrique qui clôture leur traitement. Les plans films sont nommés et numérotés pour optimiser leur numérisation et leur développement sur plaque de verre.

- ***Analyse des résultats***

Observés sur une table lumineuse, les plans présentent plus de détails que les négatifs sur verre. Le masque paraît mieux exposé. Son profil gauche reste néanmoins assez sombre, l'éclairage aurait pu être positionné plus frontalement et plus haut. Les brillances du revêtement doré appuient ce contraste qui limite la quantité d'informations reconnaissables. La distinction des derniers plans de netteté est alors plus complexe. Hormis la lumière, les plans de mise au point sont trop rapprochés et tendent à se confondre. Certaines images présentent en effet un flou très similaire. C'est notamment le cas des images réalisées au premier et au deuxième plan de mise point, dont la distinction requiert une fine analyse comparative.

1.A



1.B



2.A



2.B



3.A



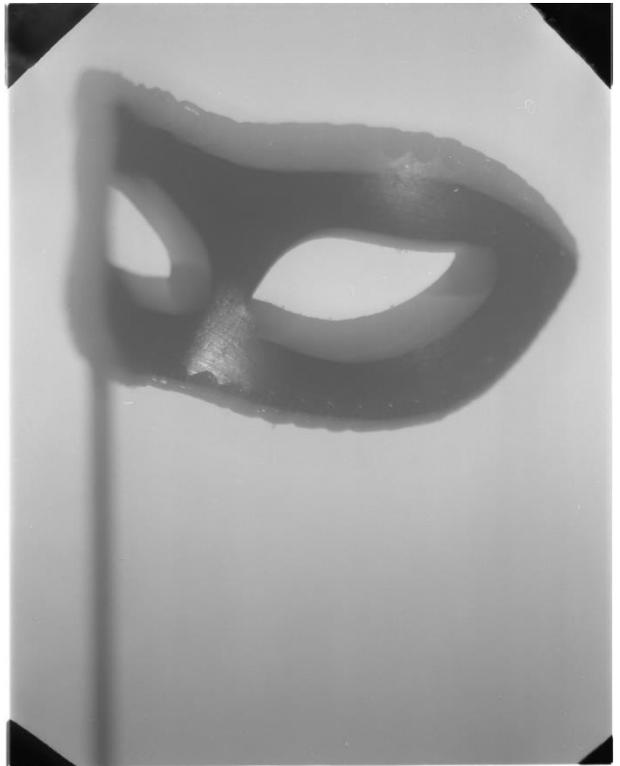
3.B



4.A



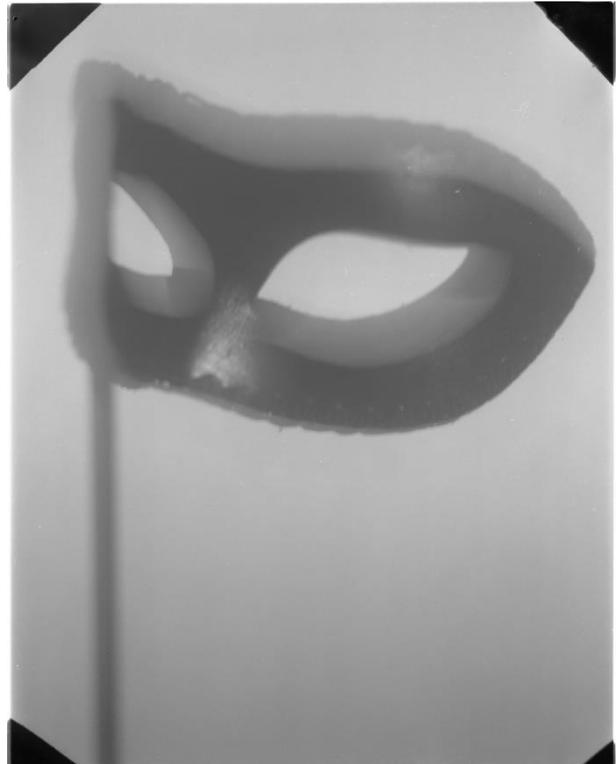
4.B



5.A



5.B



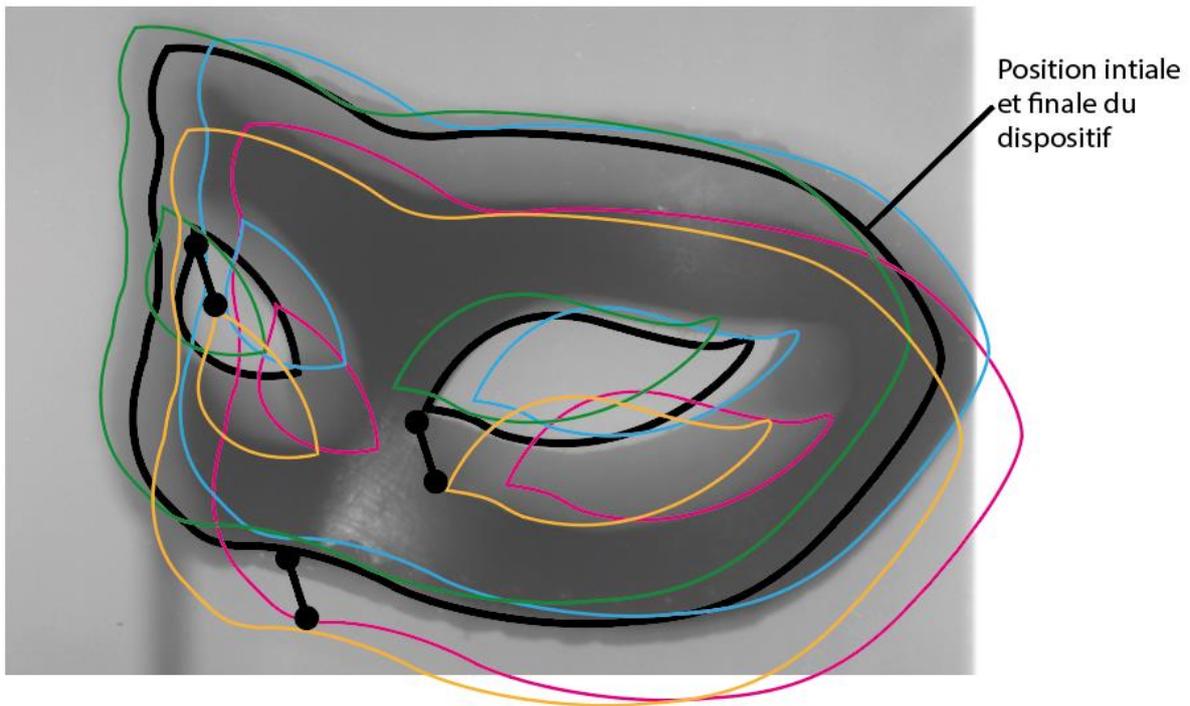
LÉGENDE

Plan de mise au point	Point visé
1	Nez
2	Arcade
3	Œil droit
4	Œil gauche
5	Extrémité droite du masque

A : Sans rotation du dispositif

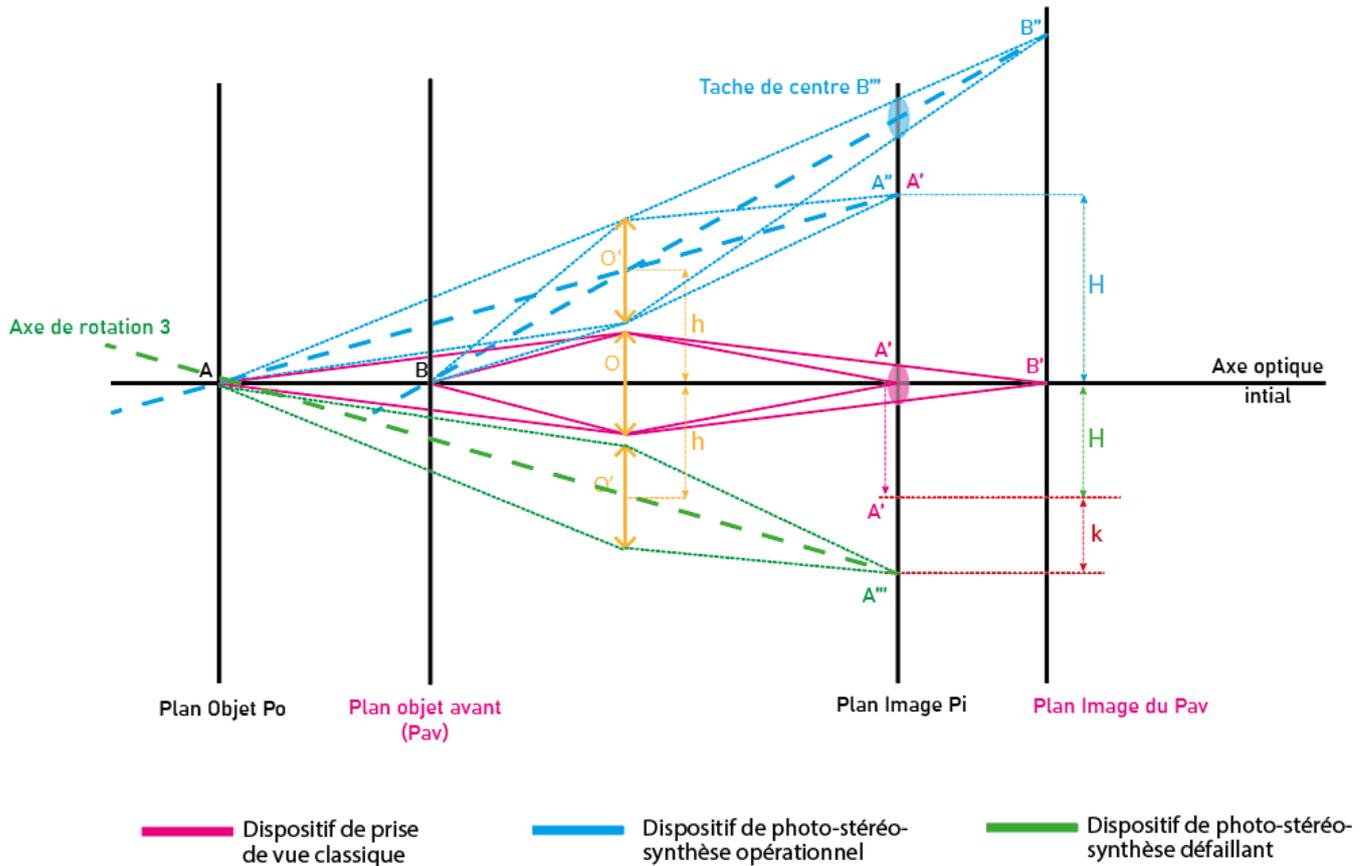
B : Avec deux rotations du dispositif

La différenciation est d'autant plus difficile lorsque les photographies sont réalisées avec deux rotations du système lors de la capture. Effectivement, elles sont presque entièrement floues. Nous retrouvons en effet la sensation d'une superposition de plusieurs silhouettes peu denses en rotation au centre du cadre.



Reproduction numérique des tracés effectués sur calque.

Ce rendu était prévisible. Le dysfonctionnement des bielles relevé dès leur conception ne nous permet pas de respecter l'une des contraintes optiques imposée sur lesquelles reposent le procédé de photo-stéréo-synthèse. Le rapport entre le déplacement h de la lentille et le déplacement corrélé H de la surface sensible défini par la relation N^2 ne peut être correct. Schématiquement, le point A' ne se superpose pas avec le point A''' après le déplacement H de la surface sensible.



Schématisation du décalage optique lié à la mauvaise conception des bielles.

Le schéma ci-dessus émet l'hypothèse que la taille des bielles avant (h) et arrières (H) est identique pour accentuer l'effet et simplifier le dessin. La distance k est l'écart en A' et A''' .

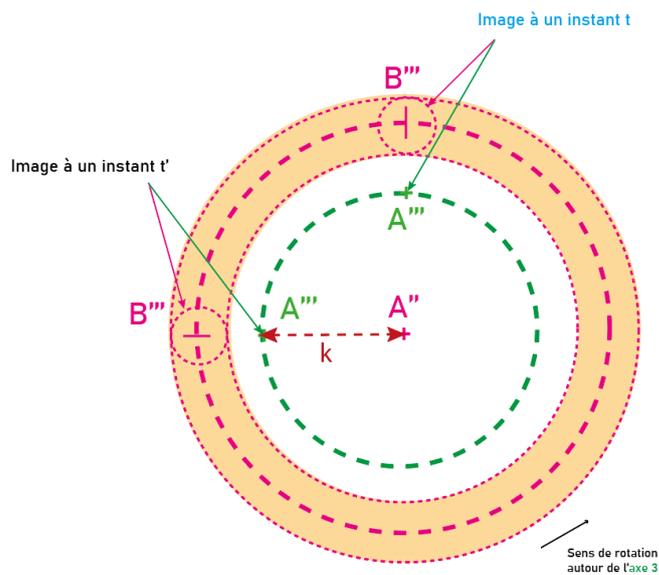
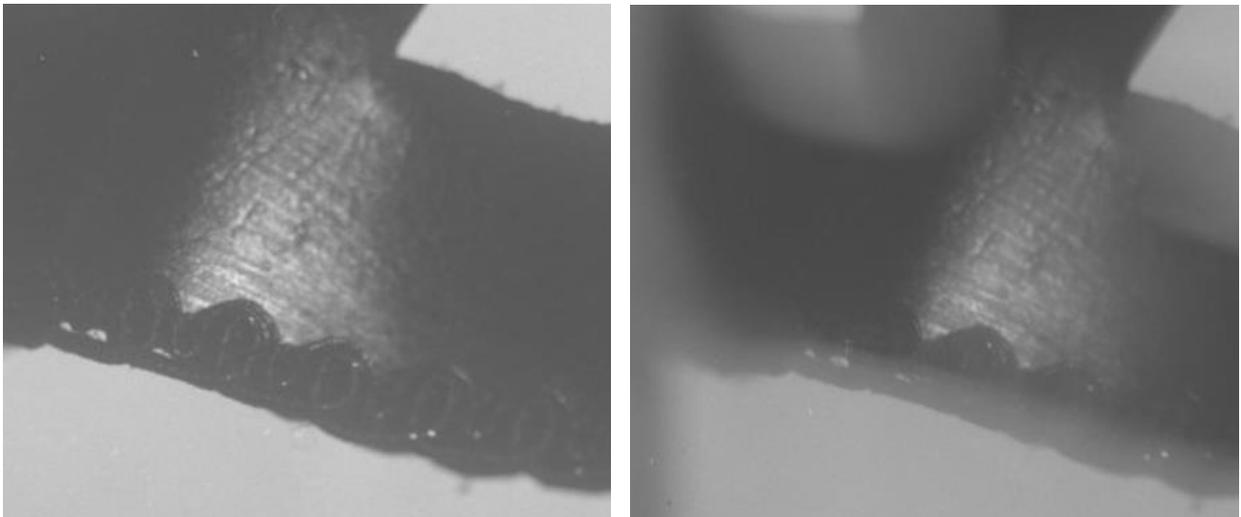


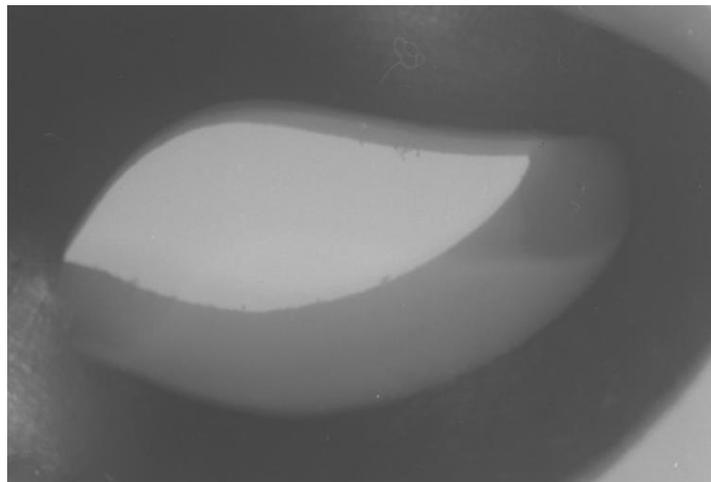
Schéma du décalage.

L'origine de cette erreur peut être également l'approximation du système de mesure du plan de mise au point. En effet, nous utilisons un mètre souple. L'emploi d'un mètre laser permettrait de préciser la distance entre le plan de mise au point et l'objectif.

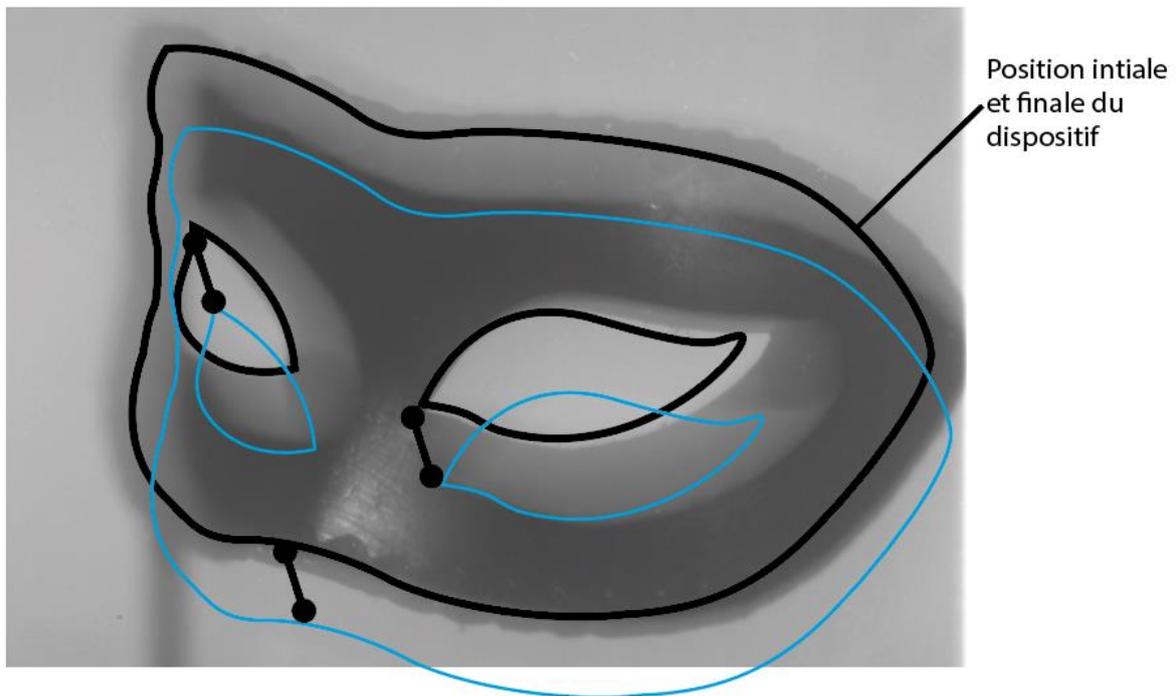
Ce décalage est clairement visible sur les photographies. Nous l'avons observé une première fois, bien avant les prises de vues, directement sur le dépoli en nous plaçant sous un drap noir. L'image n'était pas statique et se déplaçait pendant la giration. L'espace entre deux de ces « silhouettes » semble cependant régulier et quantifiable. Au premier plan de mise au point, les deux photographies présentent une sensation de netteté légèrement plus soutenue. Elles sont donc utilisées pour mesurer cet écart.



Détails de la netteté sur la pointe du nez, sans et avec rotation.



Détails des différentes silhouettes distinguables autour de l'œil.



Sur un papier calque positionné sur ce plan film, nous avons tracé les contours des différentes silhouettes de plusieurs couleurs en mettant en évidence la silhouette la plus distinguable. Cette dernière correspond à la position fixe de l'appareil. Pendant la capture, les deux tours étaient réalisés dès le lancement du chronomètre mais ils se terminaient bien avant le de pose. Le dispositif restait alors quelques secondes supplémentaires en position fixe. L'image de cette position est davantage visible et facilite les mesures. En effectuant plusieurs relevés entre deux points identiques de deux tracés, nous obtenons un décalage moyen de 1,2cm.

Pour approfondir notre analyse, nous traçons des segments reliant ces deux points. En dessinant un cercle par les deux extrémités de ce segment, nous obtenons théoriquement chemin parcouru par les images A'''. Le centre du cercle, ou de la couronne, représente le point où l'image devrait être si le dispositif fonctionnait. Le décalage dû à la défaillance de quelques bielles est d'environ 2 mm.

Cet écart est trop important, et la netteté trop réduite, pour que la superposition des photographies procure une sensation de relief. Nous tentons tout de même de tirer par contact sur plaque de verre trois plans films, exposés sans rotation du système et sur lesquels le plan de mise au point est relativement reconnaissable. Pour cette opération, nous découpons pour commencer trois plaques au format 22x28 cm pour obtenir 6 plaques au format 14x22cm.

Chacune est placée sous l'agrandisseur, le plan film est disposé au centre de sa surface. Une plaque de verre vient aplatir le plan film contre l'émulsion pour éviter toute diffusion lumineuse parasite entre le film et la couche image. Une fois l'exposition terminée, la plaque est traitée selon le protocole mis en place pour la prise de vues de test.

Malheureusement, nous n'avons pas pu aller plus loin. Les expérimentations doivent être continuées.

CONCLUSION

Les objectifs définis à l'aube de ce projet de reconstitution n'ont malheureusement pas été atteints. Malgré mon implication dans l'étude du dispositif et l'apprentissage des techniques artisanales, les résultats restent en demi-teinte.

Par manque d'expérience tant dans le domaine mécanique et que celui de la menuiserie, le dispositif reconstitué présente plusieurs soucis de conception, le principal concernant les bielles. La déviation de certains filetages et leur montage approximatif fragilisent considérablement le mécanisme de rotation. L'appareil ne permet pas d'obtenir, avec giration du système, une image nette. Il est inutilisable. Malgré l'apport de diverses pièces, le problème n'a pas été résolu. Cet inconvénient aurait pu être contourné par l'achat de pièces supplémentaires, pour produire plus de bielles que nécessaire et ainsi pouvoir les changer. Des connaissances en ingénierie auraient été utiles car j'ai pris conscience des problèmes liés aux tolérances de fabrication et de montage des éléments mécaniques. Au lancement du projet, je ne mesurais pas la complexité de la tâche. Maintenant, le démontage et la révision sont nécessaires pour espérer un jour obtenir un appareil opérationnel.

Mon engouement pour la reconstruction du dispositif m'a encouragée à me concentrer principalement sur cet aspect de la recherche. De fait, je ne me suis intéressée que trop tardivement à l'étude théorique et à la préparation des expérimentations chimiques qui n'ont alors pas pu être abouties. Une nouvelle analyse sensitométrique et des tests photographiques supplémentaires réalisés dans de meilleures conditions apparaissent naturellement pertinents pour la poursuite de la recherche. L'angoisse du calendrier et la précipitation de la fin de projet sont également à l'origine de mauvaises décisions. Je pense notamment au choix du sujet qui s'avérait tout à fait inapproprié pour nos tests.

Malgré ces erreurs techniques d'apprentissage et ce problème organisationnel, je garde le sourire. Ce projet de recherche, bien qu'imposant et plus ambitieux que prévu, a été très

épanouissant. La découverte et l'expérimentation de nouvelles techniques d'usinage, du bois comme du métal, ont suscité une réelle fascination. Les expérimentations en laboratoire ont également été instructives et représentent une bonne introduction au procédé du gélatino-bromure d'argent.

Réalisé avec l'aide indispensable de ma famille, ce projet de reconstitution me tient d'autant plus à cœur. Je reste fière des résultats, même s'ils ne sont pas à la hauteur de ce que j'envisageais. Et le projet n'est pas terminé. La poursuite et l'approfondissement des expérimentations sont envisagées. Plusieurs idées d'améliorations mécaniques et techniques sont déjà sujettes à réflexion. Mes échecs m'indiquent à présent les voies à ne pas emprunter, et ne détruisent en aucun cas l'espoir de pouvoir un jour observer mes propres images réalisées par photo-stéréo-synthèse.

BIBLIOGRAPHIE

RELIEF

Ouvrages :

- CAHEN Olivier, *L'image en relief : de la photographie stéréoscopique à la vidéo en 3D*, Paris, Masson, 1989.
- ALMIRON Miguel (dir.), JACOPIN Esther (dir.), et PISANO Giusy (dir.), *Stéréoscopie et illusion : Archéologie et pratiques contemporaines : photographie, cinéma, arts numériques*, Nouvelle édition Villeneuve d'Ascq, collection des Presses universitaires de Septentrion, 2018, 358 p. [En ligne] mis en ligne le 19 avril 2020. URL : <https://books.openedition.org/septentrion/24156>.
- DELORME André, *Psychologie de la perception*, Montréal, Etudes Vivantes, 1982.
- KINTZLER Catherine (dir.), *Peinture et musique : Penser la vision, penser l'audition*, Nouvelle édition Villeneuve d'Ascq, collection des Presses universitaires du Septentrion, 2002, 242 p. [En ligne] mis en ligne le 18 avril 2020. URL : <https://books.openedition.org/septentrion/69468>.
- HOCKHEIMER Max, ADORNO Théodor W., *La dialectique de la raison*, traduit de l'allemand par Eliane Kaufholz, Paris, Editions Gallimard, collection « Tel », 1983, 294 p. [1ère édition officielle : *Dialektik der Aufklärung (Dialectique des Lumières)*, Amsterdam, Edition Querido Verlag, 1947, 304 p.].
- BAUDELAIRE Charles, *Curiosités esthétiques*, Œuvres complètes de Charles Baudelaire vol. II, Paris, Editions Michel Lévy frères, collection de l'Université d'Oxford, 1868, 421 p. [En ligne], mis en ligne le 7 juin 2008. URL : <https://archive.org/details/curiosithesthti00baudgoog/page/n7/mode/2up>
- CHEROUX Clément, « La dialectique des spectres. La photographie spirite entre recreation et conviction », in CHEROUX Clément, FISCHER Andreas, *Le troisième œil. La photographie et l'occulte*, Gallimard, Paris, 2004, pp. 44-71.

Articles :

- MARTIN Pascal, « La photographie intégrale devient réalité », in *Cahier Louis-Lumière n°10*, Saint-Denis, École Nationale Supérieure Louis-Lumière, 2016.
- CIMENT Michel, « Entretien avec Wim Wenders », in *Positif*, n°602, avril 2011, pp. 29-33.

Catalogue d'exposition :

- Musée Carnavalet - Histoire de Paris, *Paris en 3D: de la stéréoscopie à la réalité virtuelle 1850-1950*, Paris Musée, Editions. Booth-Cibborn, 2000.

Mémoires :

- GISSELBRECHT Julie, *L'image en relief*, Mémoire de recherche en traitement des images (sous la direction de M. MARTIN Pascal), Paris, École Nationale Supérieure Louis Lumière, 1996. + annexes.
- JACOPIN Esther, *Stéréoscopie, scripte et continuité*, Mémoire de fin d'études du Département Scripte, La Fémis, 2013, 75 p.

PHOTO-STEREO-SYNTHESE

Ouvrages spécialisés :

- LUMIERE Louis, *Procédé de stéréo-synthèse-photographique par stratification*, brevet d'invention n°523 962, 21 janvier 1920.
- *Compte rendu de la séance du 8 novembre 1920*, les comptes rendus des séances de l'Académie des sciences, (juillet-décembre 1920), Tome 171, Gauthiers-Villards et Cie, Paris, 1920.
- LUMIERE Louis, *Reconstitution d'un volume dans l'espace – Photo-stéréo-synthèse*, 1920.
- Discours de FABRY Charles, *Jubilé Louis Lumière*, 6 novembre 1935, monographie imprimée, Paris, 1936, 122p. [Mise en ligne le 15 octobre 2007. URL : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k90567g.texteImage>].

Ouvrages :

- COUSTET Ernest, *La photographie stéréoscopique en noir et en couleur*, Editions Charles Mendel, Paris, 1925.
- MONPILLARD Fernand, *Macrophotographie et microphotographie*, Editions G. Doin, Paris, 1926.
- Société de chimie industrielle, *Jubilé de Louis Lumière*, Paris, 6 novembre 1935.
- COUSTET Ernest, *Traité général de photographie en noir et en couleurs*, , Librairie Delagrave, nouvelle édition entièrement refondue et mise à jour, Paris, 1933, p.662. [Mise en ligne en le 3 octobre 2014, URL : <http://cnum.cnam.fr/redir?12KE400>].

Articles :

- MARTIN Pascal, « La photo stéréo-synthèse, Louis Lumière et le relief », in. *Image Expert*, n°4, février-mars 1996.
- MARTIN Pascal, « La photographie intégrale devient réalité. », in. *Cahier Louis-Lumière*, n°10, décembre 2016, p149-165.
- CLERC L.-P., « La vision du relief par la photostéréosynthèse de M. Louis Lumière », in *La science et la vie*, Tome 19. N°56, Paris, 1921, pp 491-495.
- Le photographe, « Représentation photographique d'un solide dans l'espace », in *Le Photographe : organe des photographes professionnels*, Editions Sociétés Photovision, Paris, 20 décembre 1920.
- HERMANDINQUER Pierre, « La photographie intégrale », in *La Nature : soixante-troisième année*, premier semestre : N° 2944-2955, 1935.

Mémoire :

- MALECOT Franck, *Le procédé de photographie en relief de Louis-Lumière : « la Photo-stéréosynthèse »*, Mémoire de recherche en traitement des images (sous la direction de M. MARTIN Pascal), Saint-Denis, École Nationale Louis-Lumière, 2003, 84 p. + annexes.

Thèse :

- MARTIN Pascal, *Le flou est-il quantifiable ? Étude du flou-net de profondeur en photographie et en cinéma*, thèse de doctorat sous la direction de MICHEL Jean-Luc, Saint-Étienne, Université Jean Monnet, 2001.

OPTIQUE

- SIMON Gérard, *Archéologie de la vision : l'optique, le corps et la peinture*, Seuil, avril 2003, 304p.

CHIMIE

Ouvrages :

- BRAUN Gaston et Adolphe, *Dictionnaire de chimie photographique: à l'usage des professionnels et amateurs*, Paris, 1904. [Mise en ligne : 18-05-2009. URL : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k5564933k/f5.item.r=cyanotypie>].
- MONTEL Pierre, GLAFKIDES Pierre, *Cours de chimie photographique*, Le Temps Apprivoisé, Paris, 1992, 315 p.
- GLAFKIDÈS Pierre, *Chimie et physique photographiques*, Paris, Publications Paul Montel, 1976, 884 p.
- GOLDBERG Emanuel, *La formation de l'image photographique : Considérations photométriques et sensitométriques*, Paris, Publications Paul Montel, 1926, 200 p.
- BETTON Gérard, *Développement et tirage noir et blanc*, Paris, Presses Universitaires de France, 1978, 130 p.
- MOREAU Gustave, *La sensitométrie photographique et ses applications*, Paris, Gauthier-Villars, 1928, 320 p.
- CARROLL Burt H., HIGGINS George C. et JAMES Thomas H., *Introduction to Photographic Theory : The Silver Halide Process*, New York, Wiley-Interscience Publication, 1980, 358 p.
- RORET Nicolas-Edme, *Guide pratique et théorique du photographe*, traduit de l'italien de V.-J. Sella et annoté par E. de Valicourt, 1857. [Mise en ligne : 29-03-2011. URL : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k164243v/f1.item.r=cyanotypie>]
- TRUTAT Eugène, *Les tirages photographiques aux sels de fer*, Paris, 1904. [Mise en ligne : 09-02-2020. URL : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k1091235v/f5.item.r=cyanotypie>]

- DESMADET L., *Fabrication des encres et cirages : encres à écrire, à copier, de couleurs, métalliques, à dessiner, lithographiques, cirages, vernis et dégras*, Editeur Bernard Tignol, Paris. [Mise en ligne : 13-12-2016. URL : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k97581726>]
- FISCH A., *La Photocopie, ou Procédés de reproductions industrielles par la lumière d'une façon rapide et économique des dessins, plans, cartes, gravures, esquisses, écritures et tout tracé quelconque*, Paris, 1890. [Mise en ligne : 09-02-2020. URL : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k10912316/f13.item.r=cyanotypie>]
- MC ALLISTER Joseph, *Wet Plate Emporium, the photographic method of cyanotype printing on glass*, 2012. [URL : <https://www.dropbox.com/s/u4ne7nn62llised/glasscyanotype.pdf>]
- BLANQUART-EVRARD Louis-Désiré, *La photographie, ses origines, ses progrès, ses transformations*, Lille, 1869. [URL : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b8452738x/f19.item.r=>]
- FABRE Charles, *Traité encyclopédique de photographie, Tome deuxième*, Paris : Gauthier-Villars et fils, 1890, 1 vol. 400 p. [Mise en ligne le : 03/10/2014. URL : <http://cnum.cnam.fr/redir?8KE304.2>].

Vidéos :

- MC ALLISTER Joseph, *How to print cyanotype on glass ?*, 2014. [URL : <https://youtu.be/mygeYLcPuJM>].
- MC ALLISTER Joseph, *Glass Cyanotype Test 1: Ferric Ferrocyanide + Potassium Cyanide*, 2014. [URL : <https://youtu.be/tkzpTvWVj44>].
- Georges Eastman Musuem, *The Gelatin Silver Process, série Photographic processes*, 12 chapitres, 2014. [URL : <https://www.youtube.com/watch?v=VqWyJstBSoo>].
- Lost light art, *Reverse developing glass dry plates to direct positive, advanced film photography, Foma Emulsion*, 27 janvier 2021. [URL : <https://youtu.be/tbh3qQUXdzU>].

Articles :

- TARVIS Chad, “Albumen printing”, in *Alternative photography*, février 2010. [URL : <http://www.alternativephotography.com/albumen-printing/>]
- LOOS Ted, “Photography’s Stepchild Snaps Back”, in *The Nex-York Times*, février 2016 [URL : <https://www.nytimes.com/2016/02/06/arts/design/cyanotype-photographys-blue-period-is-making-a-comeback.html>]
- CHAPUIS Frédérique, “Marie Clerel – Et le soleil l'attend”, in *Télérama*, 2019. [URL : https://sortir.telerama.fr/evenements/expos/marie-clerel,n6102724.php?fbclid=IwAR3Yjmq0v62UKdhrkWpG8ELhP8Fij51pYNCdc16_JyZi4UnoA2kODI5CeVE]

Sites internet :

- GaleriePhoto : <https://galerie-photo.com/cyanotypie.html>
- Alternative photography : <http://www.alternativephotography.com/>
- Site de Rapahel Dellaporta [URL : <https://www.raphaeldallaporta.com>]

ÉBÉNISTERIE

- CHANSON Lucien, *Traité d'ébénisterie*, Editions Vial, Dourdan, 2004, 270 p. [1^{ère} édition en 1959].
- HOSCH Xavier, HENAUT Jacques, HAMON Olivier, *Dessin de construction du meuble : Dessin d'ameublement, assemblages et matériaux*, Tome 1, Editions Dunod, Malakoff, 2019, 174 p.
- ROMBAUTS René, *Cours d'apprentissage d'ébénisterie, à partir de mes cours d'apprentissage auprès de la chambre des métiers en 1966*, Association Les Copeaux, 2008, 232 p. [En ligne] mis en ligne le 25 octobre 2018. URL : <https://www.calameo.com/books/000760014ef93a023320c>

MÉCANIQUE

- J.F. Debongnie, L. Leloup, *Petit Lexique illustré de construction mécanique*.
- Pr. Abdennebi TALBI, *Cours de Dessin Industriel et de Construction Mécanique*, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Ecole Supérieure de Technologie Filière : Maintenance industrielle, 2006 – 2007.