HOLOLAB-FACTORY
JCT Mai 2025.

Retour d’expériences sur l’utilisation du photopolymère COVESTRO HX200

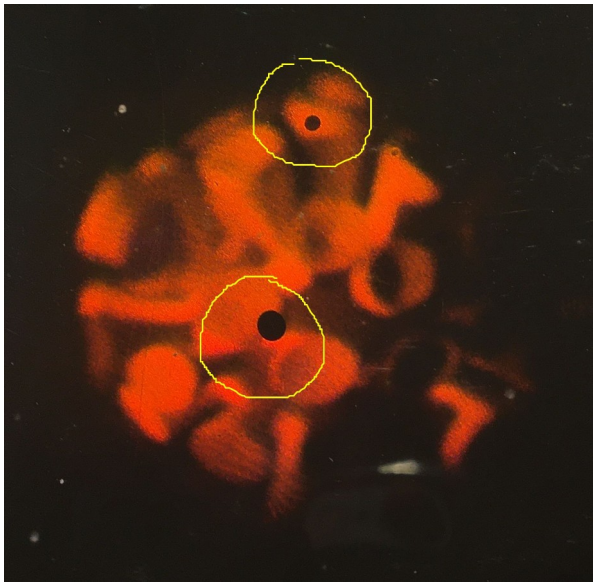
Bien que ce matériau présente de nombreuses qualités intrinsèques, (efficience de diffraction élevée, sensibilité panchromatique, absence de développement chimique, prix ...), il existe néanmoins quelques inconvénients à son utilisation et précautions d’emploi à considérer et respecter afin d’obtenir de bons hologrammes.

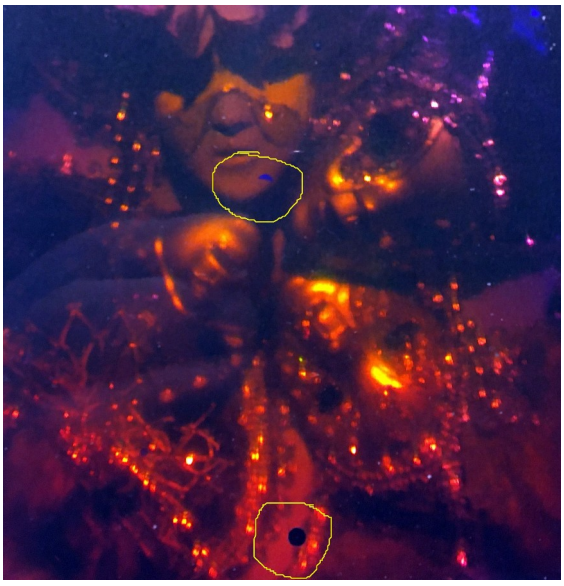
- Le substrat très fin (60 µ) du film HX200 est un Tri-acétate de cellulose (TAC) qui reste très sensible aux rayures et micro rayures.

- La finesse du film HX200 le rend également facilement déchirable lors des différentes manipulations liées à son laminage ou délaminage de son support d’enregistrement. (substrat de verre plan)

- Le film HX200 est très électrostatique, et sa surface active est collante (couche de monomères), ce qui en fait un véritable « attrape poussières » une fois son film de protection retiré.

- Si des bulles d'air ou des poussières sont emprisonnées entre le photopolymère et le substrat de verre lors du laminage du film, cela se traduit systématiquement après l'enregistrement, par des "taches ou bulles noires" bien visibles dans l'image à la restitution.
Lors du processus d'enregistrement, l'air emprisonné dans ces bulles subit une élévation de température due à l'effet du rayonnement lumineux. Cette augmentation de température induit alors la formation de zones de bougés thermiques localisées.



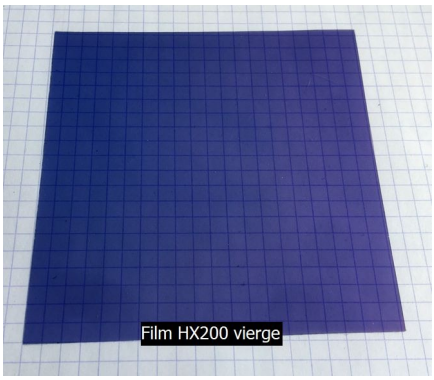


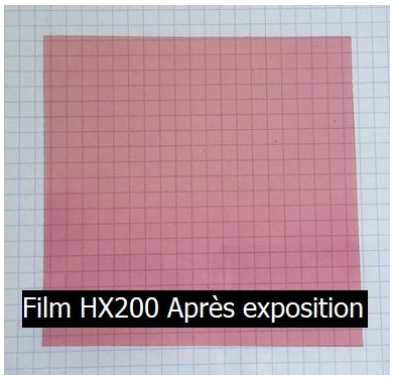
- D’où la quasi nécessité de le manipuler et de laminer ce film sous une hotte à flux laminaire (surpression d’air filtré), pour garantir une pose correcte sur la plaque de verre.

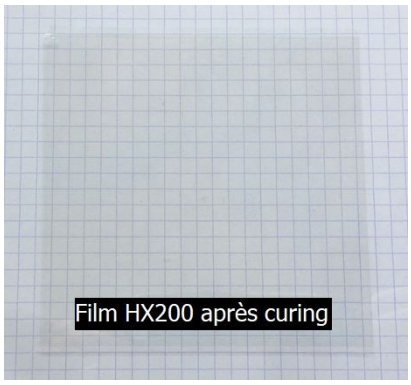
- Même après l’opération finale de post Curing (exposition aux UV), le film HX200 reste sensible aux solvants présent dans les colles des supports adhésifs noir contrecollé coté émulsion, ou les peintures en aérosol utilisées pour noircir le dos du film. Les peintures acryliques quant à elles adhèrent assez mal sur ce support.

- Lorsque le film est vierge, il présente une coloration (bleutée) importante, liée aux pigments utilisés pour sensibiliser le film aux différentes couleurs.

Pour le cas d'un enregistrement d'hologramme de type Denisyuk, le manque de transparence lié à cette coloration du film HX200, limite encore l'efficience maximum atteignable, en réduisant le ratio Réf/Objet qui est bien plus favorable pour un film argentique panchromatique, qui est quant à lui, pratiquement transparent.







- Pour un même objet holographié, l'efficience ou rendement de diffraction global d'un hologramme de réflexion couleur (RGB) de type Denisyuk, enregistré sur du HX200 a été analysée et comparée à l'efficience maximale obtenue sur ce même support, pour un enregistrement monochromatique (une seule couleur) .

- Les résultats obtenus montrent clairement que l'efficience globale de l'hologramme couleur (RGB), est inférieure de 2 à 3 fois à celle d'un même hologramme monochromatique.

- Le film HX200 présente une sensibilité marquée à la non-uniformité lumineuse du faisceau laser de référence. Ce phénomène se traduit par des zones sombres de délimitation bien visibles dans l'image reconstruite, et ce malgré une apparence initiale visuelle trompeuse, d'uniformité de la zone de couverture.

- Le recours à l'utilisation d'un power-meter optique bien calibré pour chaque longueur d'onde respective, parait essentiel pour garantir une uniformité optimale de la zone de couverture lumineuse. De même, sans utilisation d'un filtre spatial et compte tenu de la forte sensibilité à cette non uniformité d'exposure, les figures de diffraction des poussières éventuellement présentes dans l'objectif ou sur des miroirs par exemple, seront ainsi bien marquées et visibles dans l'image finale.





- Dans le cadre de l'utilisation de trois lasers indépendants (RGB) pour l’enregistrement d’hologrammes en vraies couleurs, il est impératif pour s’assurer d’un bon rendu chromatique ou balance des couleurs, de bien équilibrer la distribution et d’obtenir une uniformité quasi parfaite de la zone de couverture du format de film enregistré, et ce pour chaque couleur.

- Le rendu du bleu est meilleur pour le choix d’une longueur d’onde à 473nm qu’à 488nm.

- Choix d’une exposition RGB par tirs simultanés ou tirs séquentiels :

Concernant l'optimisation de la balance chromatique, il est préférable d'exposer de manière simultanée (en même temps) les trois couleurs primaires plutôt que de procéder par des « tirs séquentiels », c'est-à-dire en enregistrant successivement les différentes couleurs rouges, vertes et bleues.
Le choix d’une approche séquentielle, produit une forte prépondérance chromatique significative lors de la restitution finale de l’hologramme. Elle est attribuable à l’efficience plus élevée obtenue pour la première couleur initiale enregistrée, au détriment des deux suivantes.

- D’intrigantes pulsations lumineuses (flashs) plus ou moins rapides et intenses, semblant émaner de la surface du photopolymère HX200 durant la phase active de photopolymérisation lors de l’enregistrement de l’hologramme, peuvent parfois être observées.

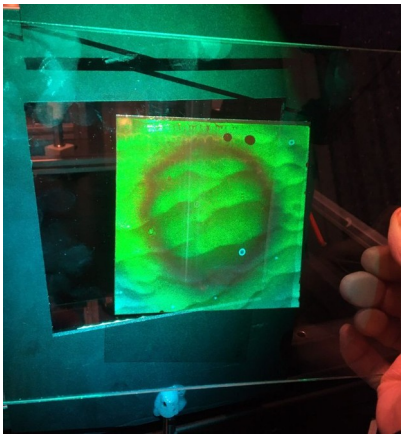
Je pense qu’il s’agit là, de la visualisation d’interférogrames lumineux, qui seraient générés par les réactions d’exothermicité du photopolymère HX200, et/ou par d’éventuelles sources de perturbations vibratoires possibles.

- **La densité de puissance lumineuse : un paramètre crucial.**

La densité de puissance lumineuse (P_R) est définie comme l'énergie lumineuse reçue par unité de surface, exprimée en milliwatts par centimètre carré (mW/cm^2).
Pour le HX200, la densité définie dans le datasheet de COVESTRO est de $4,6mW/cm^2$, mais elle reste spécifique au montage particulier réalisé et décrit par le fabricant pour cette caractérisation.
De fait, elle ne peut correspondre au cas réel d’un enregistrement d’hologramme de type Denisyuk conventionnel. L’angle de référence n’est pas à Brewster (56,7° réflexions minimales) mais est de 22°, la polarisation est non adaptée (S contre P), l’épaisseur du substrat est très épais (diffusant thermique), le ratio est compensé (Réf/objet égal à 1) au niveau de l’émulsion, et l’objet à holographier est non absorbant et non diffusant, puisque simulé par un miroir réfléchissant.

- L’expérimentation en conditions réelles et usuelles montrent tout autre chose, et met en évidence une nouvelle problématique directement liée à ce niveau énergétique de densité de puissance (P_R), par l’apparition de « zones de bougés » générés par l’échauffement thermique du HX200 et/ou du substrat de verre, lors de l’exposition durant sa phase de photopolymérisation.

Cette dilatation thermique, se traduit par des « zones de bougés » (présence d’un voile ou de tâches sombres centrales ou centrales annulaires), notamment plus sensibles pour les couleurs vertes et bleues, aux longueurs d’ondes plus serrées que pour le rouge.



- Le seuil critique relevé lors de nos expérimentations, semble ne pas devoir excéder **0.75 mW/cm²** en énergie cumulée (R+G+B) pour un film de 10x10 cm, laminé sur un substrat de verre plan de qualité ordinaire, de 4 ou 6 mm d'épaisseur et de format 19x24cm.
Le dépassement de ce seuil génère systématiquement ces défauts de zones de bougés thermiques indésirables.

- Un « sandwichage » du film entre deux plaques de verre (dont une peut être de type anti-reflet) permet d'améliorer la diffusion thermique du HX200 à travers ces deux substrats, et permet ainsi d'élever le seuil critique de 0.7mW/cm2 à près de 1.05mW/cm², sans générer ces problèmes.

- Bien qu'onéreuses, l'utilisation de plaques de verre en borosilicate (verre trempé) possédant un coefficient de dilatation thermique très faible, reste la meilleure solution pour s'affranchir de cette problématique de « bougés thermiques ».

- Si le recours à l'utilisation de l'angle de Brewster pour l'enregistrement d'un hologramme de type Denisyuk présente des avantages notables en termes de réduction des pertes énergétiques et des réflexions parasites par une transmission accrue du rayonnement, cette approche ne se révèle pas aussi avantageuse qu'espéré. En effet, elle produit au moins trois inconvénients majeurs.

Premièrement, il est impératif que le faisceau référence soit non divergent et parfaitement collimaté (rayons parallèles) pour que la condition de Brewster soit respectée.

Deuxièmement, à cette valeur angulaire (~56°) cela produit de longues ombres portées sur l'objet ce qui n'est pas toujours du meilleur effet, et troisièmement, il est nécessaire d'utiliser un angle de restitution presque rasant pour retrouver la condition de Bragg à sa reconstruction, en raison du décalage angulaire constaté.

- **Décalage angulaire de Bragg lors de la reconstruction des hologrammes.**

Lors de nos essais réalisés avec le photopolymère panchromatique **Bayfol HX200**, nous avons constaté, pour les hologrammes de type réflexion, un décalage angulaire entre l'angle utilisé lors de l'enregistrement et l'angle auquel l'efficience de diffraction est maximale lors de la reconstruction. Ce phénomène, que l'on peut désigner sous le terme de *décalage angulaire de Bragg* **(*angular Bragg shift*)**, se traduit par une variation de l'angle de reconstruction optimal par rapport à la géométrie initiale d'enregistrement.
Dans nos conditions expérimentales, ce décalage est de l'ordre de **8 à 10°**. Il convient donc d'en tenir compte dès la préparation de l'enregistrement lorsque l'on souhaite obtenir un angle de reconstruction précis.

Exemple pratique : si l'objectif est de reconstruire l'hologramme avec une efficience de diffraction maximale pour un angle de 30°, il peut être nécessaire de réaliser l'enregistrement avec un angle d'environ 40°, afin de compenser le décalage observé.

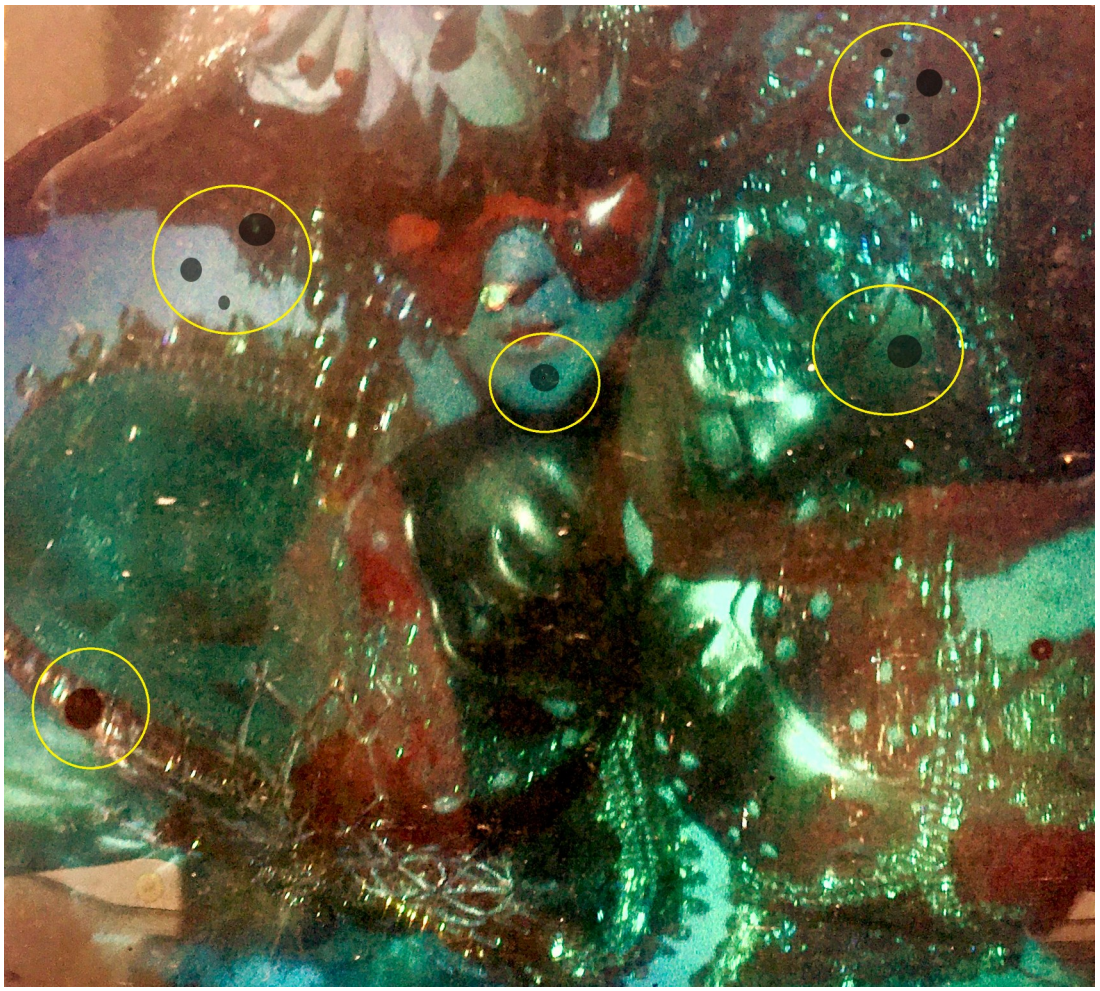
Cette correction angulaire constitue une valeur expérimentale indicative, constatée sur nos hologrammes en réflexion réalisés avec le Bayfol HX200. Elle devra être vérifiée en fonction des conditions d'enregistrement et de reconstruction, ainsi que de la géométrie optique utilisée. Il est donc recommandé de réaliser des essais préalables pour déterminer précisément la correction à appliquer à chaque configuration.

Hololab-Factory

JCT mai 2026

Procédure de laminage optimisé du photopolymère HX200 pour la réduction des inclusions particulaires

Si, comme nous, vous utilisez le photopolymère HX200 pour l'enregistrement de vos hologrammes, vous avez probablement été confronté au problème récurrent de l'apparition de petites taches noires venant dégrader de manière irréversible le rendu final de vos réalisations (voir photos ci-dessous).



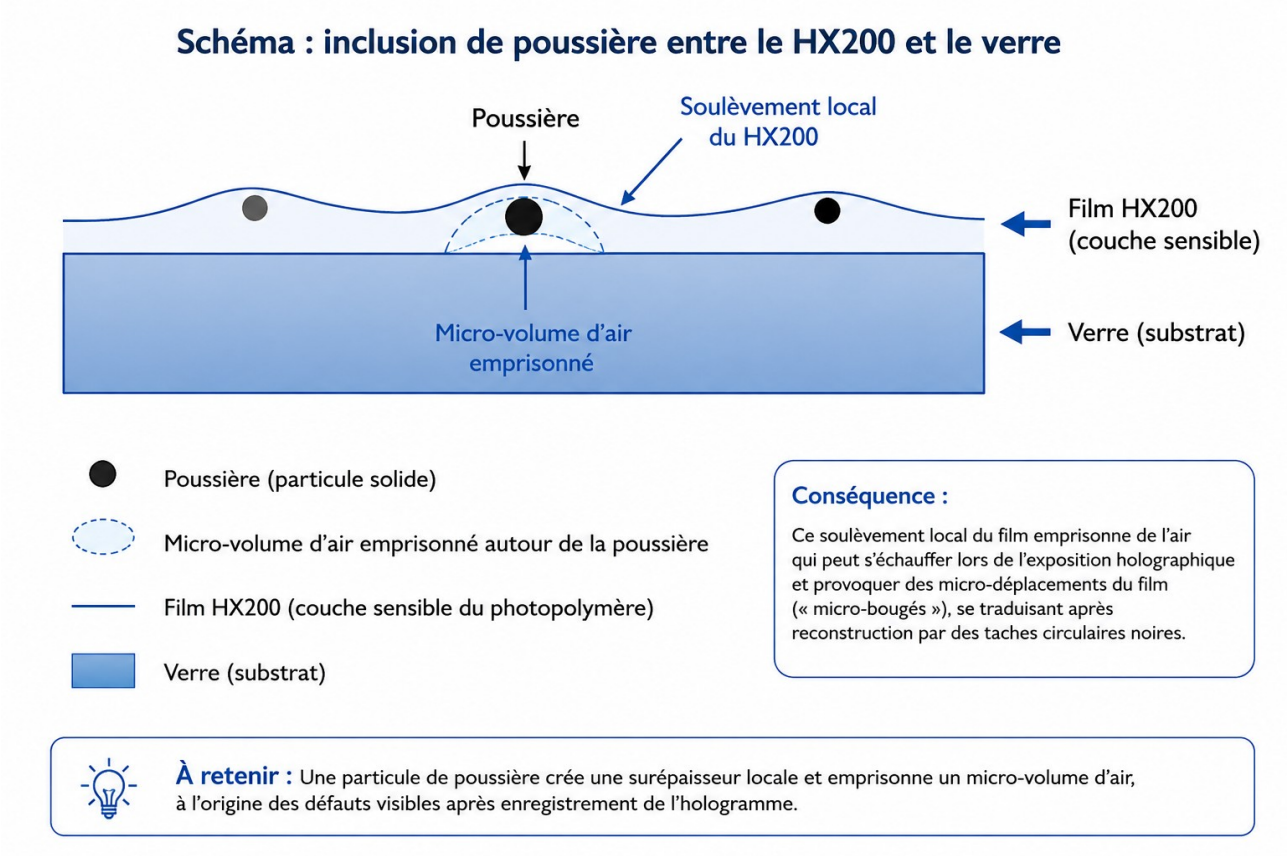
Ces défauts sont principalement générés par la présence de poussières qui viennent se déposer, par effet d'attraction électrostatique :

- soit directement sur la plaque de verre.
- soit sur la couche sensible adhésive du HX200.

Cette contamination intervient généralement :

- au moment du retrait du film de protection du HX200.
- et/ou lors de l'opération de laminage du film sur le substrat de verre ou tout autre support, souvent réalisée à l'aide d'un rouleau presseur.

Origine des taches noires



Ces inclusions particulaires, visibles à l'œil nu pour les plus importantes ou à la loupe pour les plus fines, créent localement une surépaisseur entre le photopolymère et le substrat.

Cette surépaisseur emprisonne alors également une faible quantité d'air autour de la particule emprisonnée. Lors de l'exposition holographique, cet air peut s'échauffer légèrement et provoquer des micro-déplacements localisés du film (« micro-bougés »).

Après reconstruction de l'hologramme, ces perturbations se traduisent par l'apparition de taches circulaires noires plus ou moins visibles selon :

- la taille de la particule ;
- la quantité d'air emprisonnée ;
- les conditions d'exposition.

Solutions testées et validées

À ce jour, nous n’avons pas encore trouvé de solution miracle garantissant une suppression totale du problème dans un environnement standard. En pratique, seule une opération de laminage réalisée en salle blanche permettrait d’éliminer totalement cette problématique.

Néanmoins, plusieurs solutions combinées, ont permis de réduire de manière très significative l’apparition de ces défauts.

1. Réduction des charges électrostatiques

L’utilisation d’un générateur d’ions négatifs s’est révélée particulièrement efficace pour neutraliser les charges électrostatiques présentes :

- sur les plaques de verre ;
- sur le film HX200 ;
- ainsi que dans l’environnement immédiat de travail.

Cette neutralisation limite fortement l’attraction des poussières vers les surfaces sensibles.

---

2. Laminage sous flux d’air filtré

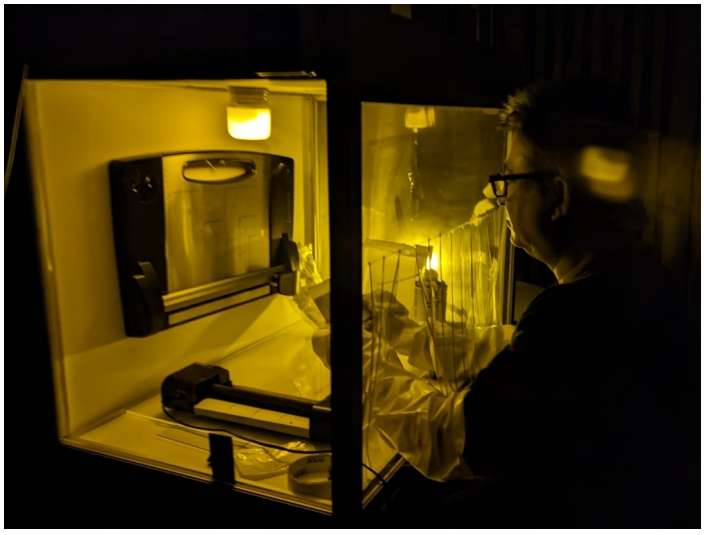
La réalisation du laminage sous une Flowbox en surpression d’air filtré permet de réduire considérablement la quantité de particules en suspension dans la zone de travail.

Cette solution améliore sensiblement la propreté de l’environnement pendant les opérations critiques de manipulation du film.

Il vous est possible de fabriquer vous même une telle petite hotte à surpression d’air, comme cet exemple trouvé sur Youtube (**https://urls.fr/1gaYdp**) ou comme celle que nous avions fabriquée avant de faire l’acquisition d’un modèle industriel.



Flow Box à surpression d’air filtré



Flow Box « fabrication maison » en mode opératoire

3. Nettoyage approfondi des substrats

Un nettoyage extrêmement rigoureux des plaques de verre avant utilisation est indispensable.

Nous recommandons :

- un nettoyage au « blanc de Meudon » (carbonate de calcium)
- un rinçage abondant avec de l'eau déminéralisée ;
- un nettoyage final à l'alcool isopropylique ;
- l'utilisation de lingettes in-tissées non pelucheuses ;
- un soufflage à l'air filtré ;
- ainsi qu'une inspection systématique sous éclairage rasant avant le laminage du film.

4. Prévention des contaminations humaines

Une part importante des contaminations provient directement de l'opérateur :

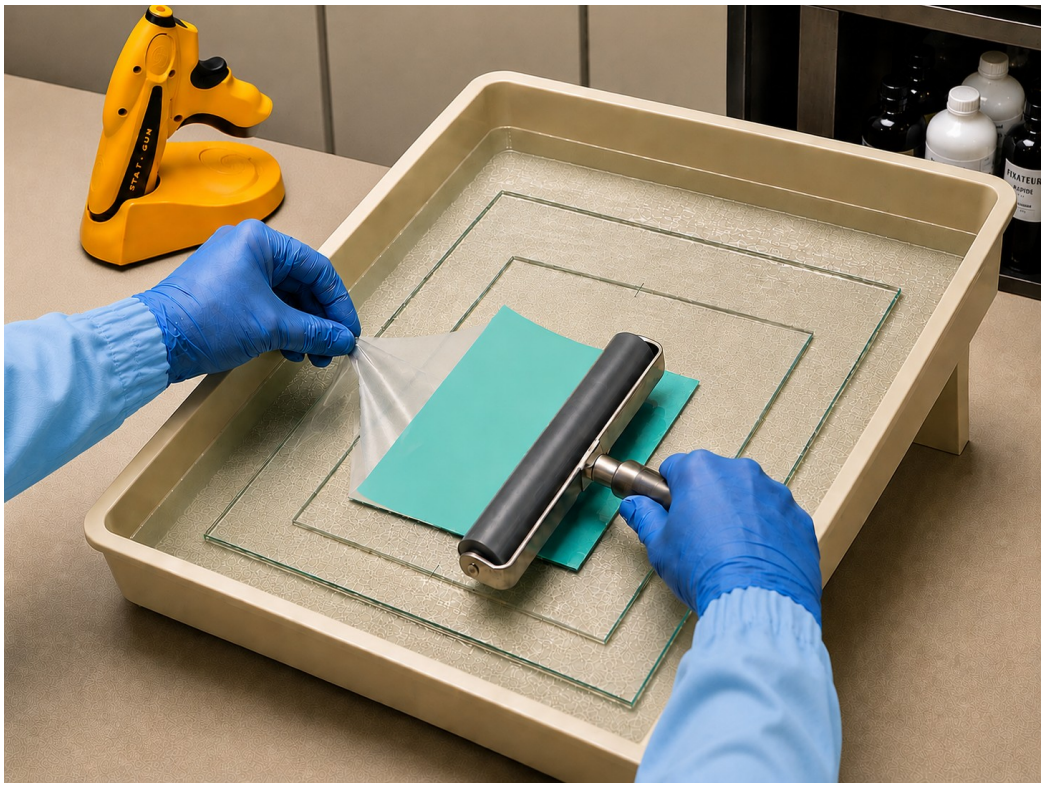
- fibres textiles ;
- poussières ;
- squames de peau ;
- cils, cheveux ou microfibres.

Pour limiter ces apports, nous utilisons :

- une combinaison anti-poussière portée par-dessus les vêtements ;
- des gants latex ou nitrile ;
- ainsi qu'une manipulation réduite au strict minimum.

5. Laminage sous immersion liquide

L'une des méthodes les plus efficaces que nous ayons testées consiste à réaliser le laminage sous immersion dans de l'eau filtrée et déminéralisée.



Cette technique présente plusieurs avantages :

- Cela n’altère pas la qualité du film HX200
- Réduction importante des poussières en suspension ;
- Limitation des effets électrostatiques ;
- Amélioration du contact entre le HX200 et le substrat ;
- Diminution du risque d’emprisonnement d’air.

Cette méthode demande cependant :

- une eau déminéralisée filtrée ;
- un environnement propre ;
- ainsi qu’une manipulation soigneuse afin d’éviter toute contamination secondaire.



Manipulation du photopolymère HX200 sous environnement à air filtré avec protections anti-contamination.



Hotte à flux laminaire utilisée pour les opérations critiques de laminage et d’inspection.

Conclusion

Le laminage du photopolymère HX200 est une opération particulièrement sensible aux contaminations particulaires et aux phénomènes électrostatiques.

Même s’il reste difficile d’obtenir un résultat parfaitement exempt de défauts en dehors d’un environnement de type salle blanche, la combinaison :

- d’un contrôle électrostatique,
- d’un environnement propre,
- d’un nettoyage rigoureux,
- et d’un laminage sous immersion,

permet d’améliorer très significativement la qualité finale des hologrammes et de réduire fortement l’apparition de ces taches noires, liées aux inclusions de poussières.