

ATELIER DU VERDIER

LaserAtelier

Le manuel de l'atelier

Du dessin FreeCAD au trait de lumière : graver, marquer et découper au laser sur une fraiseuse PrintNC pilotée par LinuxCNC.

≈ **211 heures pour en arriver là**, du 15/07/2026 au 06/08/2026 : ≈ 182 h de développement (553 commits, 262 versions) et ≈ 29 h d'atelier, dont **11,4 h de laser** chronométrées sur les 70 fichiers gravés — 495 m de trait brûlé et 283 mesures relevées sur le bois. Le code est écrit par Claude (Anthropic) ; Christophe Le Verdier décide, éprouve chaque version sur le bois et tranche.

Version 2.99.40

Manuel complet — installation & utilisation
Juillet 2026 · licence LGPL-2.1-or-later
laser.atelierduverdier.fr



Sommaire

1. Bienvenue — d'une petite macro à un atelier	3
2. La philosophie : mesurer plutôt que deviner	4
3. Le matériel : PrintNC, LinuxCNC & le laser	6
4. Installation	10
5. L'interface : barre d'outils & menu	11
6. Prise en main : votre premier marquage	15
7. Les modes de l'atelier	16
7.1 Graver & marquer	16
7.2 Découper & projeter	33
7.3 Tester & calibrer	35
7.4 Le Job combiné	51
8. La calibration, cœur du système	52
9. Réglages, profils & sauvegarde	54
10. Sécurité machine : ce qu'il faut avoir compris	57
11. Astuces & bonnes pratiques	58
12. Dépannage — questions fréquentes	59
13. Annexe : glossaire & liens	60
14. Journal de l'atelier — ce qui a changé, et pourquoi	61

1 Bienvenue

D'une petite macro Python à un atelier laser complet.

Si vous détestez lire les manuels — moi aussi. Alors celui-ci va droit au but : de quoi comprendre l'esprit de l'outil, l'installer, et graver votre première pièce sans vous perdre.

LaserAtelier n'est pas né d'un grand plan. À la mi-juillet 2026, il n'existait qu'une **petite macro Python** pour FreeCAD, écrite pour un besoin précis : marquer un motif au laser sur la fraiseuse, contour plus hachures, avec la bonne astuce pour ne pas fatiguer le relais du module laser. Quelques centaines de lignes, une seule boîte de dialogue.

En une dizaine de jours, ce petit bout de code a grossi — un mode, puis un autre, puis le suivi de surfaces courbes, la découpe multi-passes, la calibration... Jusqu'à devenir ce qu'il est aujourd'hui : un **véritable atelier de fabrication laser** intégré à FreeCAD, avec vingt modes et un système de calibration fondé sur la mesure.

13 juillet 2026

La toute première macro, `texte_hachures_laser` : générer le G-code d'un marquage (contour + remplissage par hachures) à partir d'un motif FreeCAD, avec déjà la stratégie « relais » qui deviendra une signature de l'atelier — armer le laser *une seule fois* par travail et ne moduler que la puissance.

14 juillet 2026

Une grappe de macros spécialisées apparaît en une journée : projection d'un motif sur une surface 3D, suivi de hauteur *continu* pendant les déplacements, découpe multi-passes à plat, collage de hachures sur un solide. Chaque idée testée dans son coin.

15 juillet 2026

`laser_atelier` (1 777 lignes) réunit tout dans un seul script à cinq modes. C'est le brouillon grandeur nature du futur atelier.

... puis le workbench

Le script devient un **atelier FreeCAD** à part entière : sept modules propres, vingt modes, un système de calibration, des profils par laser, une documentation. La version décrite ici est la **2.99.40**.

POURQUOI CETTE HISTOIRE COMPTE

Parce qu'elle explique la forme de l'outil. LaserAtelier a été façonné par l'usage réel, une frustration après l'autre, sur *une machine précise* — pas conçu sur le papier. C'est pour ça qu'il colle au grain du bois plutôt qu'aux belles théories.

2

La philosophie

Trois principes tiennent tout l'atelier.

1. Mesurer plutôt que deviner

La divergence d'un faisceau, la largeur réellement brûlée, le trait de scie (kerf) d'une découpe, la teinte d'un gris sur du MDF : rien de tout cela ne se devine correctement. LaserAtelier part donc systématiquement de **mesures réelles** que vous faites une fois, au pied à coulisse ou à l'œil, et qu'il conserve.

L'exemple le plus parlant est le **défocus**. Pour noircir une surface, on écarte volontairement le bec du point focal : le faisceau diverge, le point s'élargit, un seul passage suffit à remplir. Mais de combien élargir ? Plutôt qu'un angle de divergence supposé, l'atelier le calcule à partir de *deux mesures* : le diamètre du point au foyer, puis à un défocus de test connu. Le reste est de la géométrie.

2. Respecter la machine

Le laser n'est pas une broche comme les autres. Sur cette PrintNC, la puissance est asservie à la *vitesse réelle* par la couche HAL de LinuxCNC : à l'arrêt, la puissance retombe à zéro. Toute une famille de « pièges » en découle (on ne peut pas graver un point en restant immobile, par exemple), et l'atelier est construit pour les éviter d'office. Le chapitre Sécurité machine y revient — c'est le seul passage vraiment important à lire avant de lancer un vrai travail.

3. La pièce gravée est le juge

Le troisième principe s'est imposé de lui-même, à l'usage. Les défauts les plus coûteux de cet atelier n'ont été trouvés ni par un test automatique, ni en relisant le code : ils ont été vus **sur le bois, ou en regardant la machine travailler**. Un logiciel ne vérifie que ce qu'il sait déjà mettre en doute ; la pièce, elle, ne ment pas.

Quelques exemples réels, tous repérés à l'œil :

- Une **planche nuancier** gravée a révélé que des tons portant la même noirceur rendaient très différemment, qu'un ton ne gravait rien du tout, et que les plus foncés laissaient des auréoles de roussi. Rien de cela n'apparaissait dans la table de mesures.
- Un **dégradé sorti tout noir** a mis au jour une chaîne de calibration photo fausse de bout en bout — et le fichier de contrôle censé la valider était faussé exactement de la même manière qu'elle. Un outil de vérification qui partage le défaut de ce qu'il vérifie ne peut rien détecter.
- **Quatre bandes gravées à énergie identique mais à quatre vitesses** ont démontré que la noirceur dépend aussi du temps d'exposition. Le modèle interne, qui ne connaissait que l'énergie, était structurellement incomplet : aucune correction de formule n'aurait pu le sauver.
- Le **mouvement de la tête**, simplement observé pendant un travail, a trahi des allers-retours inutiles dans les tramages à points — 18 % de déplacement à vide en trop, pour une gravure identique.

D'où une manière de travailler : graver de petites planches de contrôle, les regarder vraiment, et faire remonter ce qui cloche. Une observation du type « cette case est plus foncée que l'autre alors qu'elle devrait être plus claire » vaut mieux qu'un long raisonnement — c'est une *mesure*, et elle tranche.

À RETENIR

Si un résultat vous surprend, la question n'est presque jamais « quel réglage magique ? » mais « qu'est-ce que je n'ai pas encore *mesuré* ? ». Calibrez d'abord, gravez ensuite. Et si la pièce contredit le calcul, c'est la pièce qui a raison.

3

Le matériel

Une fraiseuse, un contrôleur, un module laser — et comment ils se parlent.

LaserAtelier a été mis au point sur une configuration précise. Il fonctionne ailleurs, mais tout le modèle (collisions, focale, dialecte G-code) part de ce trio.

La fraiseuse : PrintNC + LinuxCNC

La machine hôte est une **PrintNC**, une fraiseuse CNC robuste pilotée par **LinuxCNC 2.9.x**. Le laser y est monté comme un outil supplémentaire : l'atelier produit du G-code RS-274 standard, chargé et exécuté comme n'importe quel programme d'usinage.

Le module laser : LaserTree LT-80W-AA-PRO

Le profil par défaut est le module diode **LaserTree LT-80W-AA-PRO**, dont le capot carré a été retiré pour que le bec puisse suivre des surfaces courbes sans accrocher. De cette géométrie viennent le modèle de collision du cône (`NOZZLE_*`) et la table de focale.

Le dialogue laser ↔ contrôleur : la stratégie « relais »

Le laser est câblé comme la **broche 1** (`$1`) de LinuxCNC ; son alimentation 24 V passe par un relais. Allumer/éteindre ce relais à chaque trait l'userait et ralentirait tout. D'où l'astuce présente depuis la première macro :

- ▶ on **arme** le laser une seule fois en début de travail (`M3 $1` à puissance nulle) ;
- ▶ entre les traits, seul le mot `S` change — `S0` pour un déplacement, la puissance réglée pour graver ;
- ▶ on **désarme** une seule fois à la fin (`M5 $1`, puis `M2`).

Le relais et l'alimentation ne subissent donc qu'un cycle par travail, quel que soit le nombre de traits.

TROIS DIALECTES G-CODE

Par défaut l'atelier écrit pour **LinuxCNC**. Deux autres dialectes existent pour d'autres contrôleurs (**GRBL** et **grblHAL**) : ils se choisissent par profil laser dans les Préférences, et l'atelier adapte automatiquement l'armement, la sélection de broche et le lissage de trajectoire. Vous n'avez jamais à écrire ces différences à la main.

GRBL ET GRBLHAL — ÉCRIT D'APRÈS LES SPÉCIFICATIONS, JAMAIS ÉPROUVÉ SUR UNE MACHINE

Tout ce que ce manuel affirme sur les réglages, les largeurs brûlées et les gris vient de *planches gravées* sur la machine de développement, qui tourne sous **LinuxCNC**. Les dialectes **GRBL** et **grblHAL** n'ont, à ce jour, **jamais fait tourner une seule ligne sur une machine réelle**.

Ce n'est pas pour autant du code jeté par-dessus l'épaule. Le G-code qu'ils produisent a été **relu et mis sous test**, et voici précisément ce qui est garanti : aucune commande inconnue de GRBL (ni **M67 / M68**, ni **G64**, ni **G10**, ni sélecteur de broche **\$n**) ; tout en ASCII ; aucune ligne au-delà des **128 octets** du tampon de réception de GRBL (la plus longue mesurée fait 86 caractères) ; l'armement en mode laser (**M4**), le désarmement et la fin de programme bien présents ; et grblHAL qui conserve sa table d'outils là où GRBL la met en commentaire. Ce contrat est vérifié sur quatre familles de jobs à chaque exécution des tests.

Ce qui reste à vérifier sur une vraie carte est donc simple à énoncer : que le contrôleur *accepte* ce fichier, que le laser tire à la bonne puissance, et que les prérequis annoncés (**\$32=1** pour le mode laser, **\$30** égal à l'échelle de puissance) suffisent. Cette relecture a d'ailleurs servi tout de suite : elle a trouvé un **M67** qui traînait dans le désarmement de *tous* les jobs GRBL, ajouté une heure plus tôt pour LinuxCNC — chaque job aurait fini sur une erreur, et rien ne l'aurait signalé.

Une limite à connaître, celle-là physique. Les tramages photo produisent des jobs très denses : un portrait de 120 × 180 mm au pas 0,30 fait **172 000 blocs** pour près de 6 Mo. LinuxCNC lit ça depuis un fichier local ; une carte GRBL alimentée *en série* devient elle-même le goulot, et la gravure avance au rythme de la liaison plutôt que de la mécanique. Les cartes récentes (ESP32 lisant une carte SD ou en WiFi) échappent à cette limite. Dans le doute, sur GRBL : privilégier les modes géométriques (marquage, découpe, hachures) ou un pas de trame plus grand.

Lissage de trajectoire (G64)

Chaque job laser LinuxCNC déclare sa propre tolérance d'angle : **G64 P0.05**. C'est l'écart maximal toléré à l'intérieur d'un virage pour ne pas avoir à s'y arrêter. Cinq centièmes sont très en dessous du trait brûlé le plus fin qu'on sache mesurer (0,10 mm) et cinquante fois sous le plus large (2,60 mm) : invisible sur la pièce, mais décisif sur la durée d'une gravure hachurée qui change de direction des dizaines de milliers de fois.

Deux pièges valent d'être connus, car les deux vont à l'envers de l'intuition. Un **G64 nu** ne veut pas dire « pas de lissage » : il veut dire « lisse à la vitesse maximale, sans borne d'écart ». Ajouter un **P** ne relâche donc pas la machine, il l'encadre. Et surtout, un fichier qui n'écrit **aucun G64** n'est pas neutre : il hérite de la ligne de démarrage de la machine. Si celle-ci impose une tolérance très serrée — un micron, par exemple

— la machine s'arrête net à chaque changement de direction, et la gravure traîne sans qu'on comprenne pourquoi.

Une exception assumée : le **test des offsets X/Y** n'émet aucun G64 . Il grave une croix dont la géométrie d'angle *est* la mesure ; là, le lissage fausserait ce qu'on cherche à lire. Le principe général : lisser convient à ce qu'on brûle, jamais à ce qu'on mesure.

Le mot S arrête la machine — et M67 ne l'arrête pas

Le lissage ci-dessus ne suffit pas si quelque chose d'autre force l'arrêt. Sur la PrintNC, **un changement de puissance entre deux blocs arrête le mouvement**, même sur des segments parfaitement alignés. Ce n'est pas une déduction : deux fichiers de géométrie *rigoureusement identique* — 200 segments de 0,30 mm à F800, laser désarmé — ont tranché. Celui à S constant passe fluide ; celui dont le S change à chaque bloc saccade, à l'oreille, sans ambiguïté.

La facture est lourde là où la puissance module à chaque pixel. Un portrait en lignes gravées de 120 × 180 mm — **172 614 blocs** de 0,30 mm de médiane, 72,3 m à F800, donc 1 h 30 de coupe pure — est parti pour **4 heures**. Soit ~76 ms par bloc là où 0,30 mm à F800 n'en demande que **22,5** à vitesse constante. Or un bloc de 0,30 mm *parcouru avec arrêt aux deux bouts* coûte ~45 ms à l'accélération de cette machine (600 mm/s², d'après son .ini) — la tête n'atteint même pas F800, elle accélère et freine sans jamais tenir la vitesse demandée. Le compte n'y est pas au dixième près, mais l'ordre de grandeur a **désigné le mécanisme avant que l'expérience ne le confirme** : ce qui coûte cher n'est pas de graver, c'est de s'arrêter.

La sortie qu'il fallait s'appeler M67 E0 Q<valeur> : une sortie analogique **synchronisée avec le mouvement**. La valeur est appliquée au début du bloc suivant *sans vider la file de trajectoire*. Sa jumelle M68 fait l'inverse — immédiate, et elle arrête le mouvement : ne pas les confondre. On garde donc un escalier de puissance, un palier par segment, mais la machine ne s'arrête plus entre les paliers.

La case « **Puissance par M67** » des Préférences bascule les onze points du code qui émettent une puissance, dans les six familles de générateurs — tous ensemble, ce qui n'est pas un détail : le câblage machine étant commun, un générateur resté en S alors que la machine écoute l'autre canal graverait **blanc**, sans erreur, pendant des heures. Côté machine, le HAL **ajoute les deux sources** : l'une vaut toujours zéro, donc les deux modes fonctionnent et les anciens fichiers restent valides. Aucun basculement coordonné à orchestrer.

Et sur GRBL ou grblHAL ? M67 n'y existe pas — c'est un code LinuxCNC. Mais le problème ne s'y pose pas : le **mode laser** de GRBL (\$32=1 , armement en M4) traverse les G1 consécutifs *sans s'arrêter* quand seule la puissance change, et fait suivre la puissance à la vitesse réelle. C'est la raison d'être de ce mode. La case « Puissance par M67 » est donc ignorée sur ces deux dialectes, et ce n'est pas une limitation : chacun résout la même difficulté à sa façon, LinuxCNC par une sortie synchronisée, GRBL par un planificateur qui sait que S ne doit pas casser le mouvement.

Une confusion de vocabulaire à ne pas refaire. motion.analog-out-00 s'appelle « analogique » dans LinuxCNC, mais ce n'est *pas* une tension : c'est un simple pin numérique, et sur la PrintNC il alimente le **rapport cyclique du PWM**. Autrement dit, « faire varier le PWM pendant un déplacement linéaire » — l'intuition de départ, formulée bien avant qu'on trouve M67 — était exactement la bonne. Le mot « analogique » a fait croire qu'il fallait du matériel analogique alors que la chaîne PWM convenait déjà. Le PWM n'a jamais été la limite ; le canal du G-code l'était.

Deux pistes ont été explorées et écartées avant celle-là, chacune par la mesure. Câbler `spindle.1.at-speed`, qui n'avait jamais été relié — les à-coups ont persisté ; la ligne reste, elle est juste, elle ne réglait pas ce problème. Et réduire le nombre de niveaux de puissance pour allonger les segments : de 161 à 8 niveaux, la longueur moyenne ne passe que de 0,36 à 0,73 mm sur une photographie réelle. Un segment par pixel est structurel sur une image bruitée, et huit niveaux de gris auraient abîmé l'image pour rien.

SÉCURITÉ — LE BON SENS D'ABORD

Un laser de gravure aveugle et brûle. Lunettes adaptées à la longueur d'onde, ventilation/extraction des fumées, jamais de matériaux qui dégagent des vapeurs toxiques (PVC...), et on ne quitte pas la machine des yeux pendant un tir. Ce manuel parle logiciel ; la sécurité physique reste sous votre responsabilité.

4

Installation

Cinq minutes, une seule fois.

LaserAtelier *est* son dossier : le dépôt se clone directement dans le dossier **Mod** de FreeCAD. Il n'y a rien à compiler.

1

Cloner le dépôt dans le dossier des ateliers de FreeCAD :

```
git clone https://github.com/atelierduverdier/LaserAtelier \
~/local/share/FreeCAD/v1-1/Mod/LaserAtelier
```

(adaptez **v1-1** à votre version de FreeCAD.)

2

Redémarrer FreeCAD. L'atelier est chargé au démarrage ; un redémarrage suffit à prendre en compte l'installation comme toute mise à jour ultérieure.

3

Choisir l'atelier « LaserAtelier » dans le sélecteur d'ateliers (la liste déroulante en haut de FreeCAD). La barre d'outils et le menu de l'atelier apparaissent.

4

Ouvrir le Guide rapide (première icône). Il rappelle en une page l'ordre conseillé des opérations.

MISE À JOUR

Comme le dépôt vit dans le dossier **Mod**, une mise à jour se fait par un simple `git pull` dans ce dossier, puis un redémarrage de FreeCAD. Vos réglages et vos photos ne sont pas dans le dépôt : ils sont conservés à part (voir Réglages & sauvegarde).

OÙ SONT MES DONNÉES ?

Les réglages tiennent dans un unique fichier `laser_atelier_config.json` rangé dans le dossier de données de FreeCAD (hors dépôt). Les photos de résultats sont rangées dans un sous-dossier `photos_resultats/` de l'atelier lui-même, pour survivre à l'effacement des originaux. Tout cela s'exporte en un `.zip` depuis les Préférences.

5 L'interface

La barre d'outils et le menu « Atelier Laser », bouton par bouton.

Une fois LaserAtelier choisi dans le sélecteur d'ateliers, tout tient dans neuf barres d'outils nommées et un menu unique. Voici à quoi ils ressemblent et ce que fait chaque bouton.

Dès que vous sélectionnez l'atelier **LaserAtelier**, deux choses apparaissent : un jeu de **barres d'outils** en haut de FreeCAD, et un **menu** « Atelier Laser ». Les deux contiennent exactement les mêmes commandes, dans le même ordre, séparées par thème.

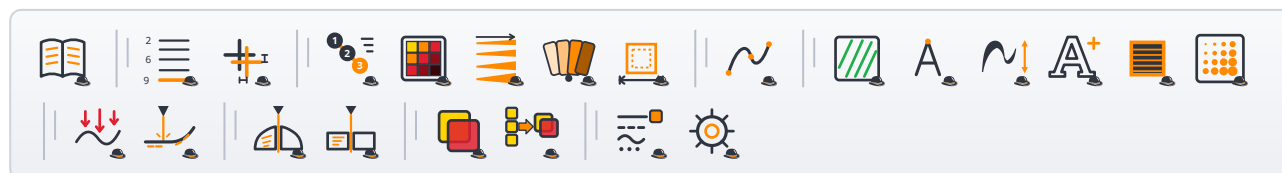
Neuf barres nommées, plutôt qu'une seule

Jusqu'à la v2.72, tout tenait dans une barre unique où les groupes n'étaient marqués que par de fins séparateurs — invisibles en pratique. L'atelier déclare désormais **neuf barres distinctes**, chacune portant son nom : *Découverte*, *Calibrer le laser*, *Ajouter un matériau*, *Dessins*, *Gravure à plat*, *Sur surface 3D*, *Découpe*, *Assemblage*, *Référence et réglages*. Une barre nommée se **déplace**, se **masque** et se **replie** séparément — c'est le seul découpage que FreeCAD sait faire nativement. Chacune reçoit en plus un fond légèrement teinté, un renfort visuel qui ne porte jamais l'information à lui seul : le nom reste la référence.

À savoir une fois : FreeCAD mémorise la position d'une barre **par son nom**. Le passage d'une barre à neuf a donc remis les icônes à l'endroit par défaut, une fois, et il a fallu les replacer à la main. Ces noms ne bougeront plus sans prévenir.

La barre d'outils

De gauche à droite, les boutons suivent le fil du travail : d'abord la découverte, puis la calibration du laser et l'ajout d'un matériau, ensuite les dessins, la gravure à plat, la surface 3D, la découpe, l'assemblage, et enfin la référence et les réglages.



Les commandes dans leur ordre réel (icônes à taille réelle). Chaque intervalle correspond à une barre nommée ; les deux dernières familles partagent la barre « Référence et réglages ».

Le menu

Atelier Laser	
	Guide rapide
	Bande de calibration défocus
	Test des offsets X/Y du laser
	Assistant matériau
	Grille de test puissance/vitesse
	Test rampe puissance/vitesse (lignes)
	Nuancier matériau
	Motif de calibration kerf
	Importer un dessin SVG
	Hachures 2D (géométrie)
	Texte (trait simple)
	Calligraphie (pleins et déliés)
	Texte gravé (contour)
	Gravure remplie (noir)
	Gravure photo (trame de points)
	Projeter sur surface 3D
	Marquage de motif (plat ou courbe)
	Découpe multi-passes sur surface courbée
	Découpe multi-passes (matériau plat)
	Job combiné (plusieurs opérations)
	Jobs sélectionnés → job combiné
	Catalogue (planche d'exemples)
	Préférences

Le menu **Atelier Laser** reprend la barre à l'identique. Chaque trait de séparation marque un **groupe** — c'est la logique de tout l'atelier, du dessin au réglage.

Le repère surligné, *Marquage de motif*, est le mode le plus utilisé au quotidien.

Astuce : survolez un bouton, une infobulle résume ce qu'il fait *et* ce qu'il attend en sélection (par exemple « sélectionne le motif projeté ET le modèle 3D »).

Sélectionner APRÈS avoir ouvert un panneau

Un panneau capture la sélection à son **ouverture**. Si vous ouvrez Marquage puis cliquez le trait, il ne voit rien — et c'est le genre de chose qui fait croire à une panne.

Les cinq modes qui travaillent sur une sélection (Hachures, Gravure remplie, Marquage, et les deux Découpes) portent donc un bouton « **Reprendre la sélection de la vue** ». Depuis la v2.10, une ligne juste au-dessus dit en permanence ce que montre la vue 3D : en gris « identique à celle du panneau » (le bouton reste inactif, il n'y a rien à faire), en rouge « *N* objets — différente » dès que vous avez cliqué ailleurs. Le bouton s'allume alors tout seul.

Vos réglages en cours ne sont jamais remplacés : seule la géométrie à graver change. C'est la raison pour laquelle la reprise reste un bouton et non un automatisme — reprendre une sélection recharge aussi la recette attachée à cette forme, qui écraserait sans prévenir la puissance et la vitesse que vous venez de saisir.

Que fait chaque bouton

Découverte

 **Guide rapide** — rappelle en une page l'ordre conseillé des opérations. À ouvrir en cas de doute.

Import de dessins

 **Importer un dessin SVG** — lit un `.svg` et crée un objet par tracé d'origine, sans détour par le DXF. Aucune sélection requise.

Graver & marquer à plat

 **Hachures 2D** — prépare un remplissage par hachures (objet), à graver ensuite. Aucun G-code ici.

 **Texte (trait simple)** — écrit un texte « bâton » monotrait, prêt à graver.

 **Calligraphie (pleins et déliés)** — grave une vraie police calligraphique en un passage : la largeur du trait est portée par la hauteur Z.

 **Texte gravé (contour)** — trace le pourtour exact des lettres d'une police classique, empattements compris. À graver ensuite avec Marquage ou Gravure remplie.

 **Gravure remplie** — noircit une surface fermée (défocus calibré + contour repassé).

 **Gravure photo** — reproduit une image en niveaux de gris (huit tramages).

Sur surface 3D

 **Projeter sur surface 3D** — colle un motif 2D sur une surface courbe (préparation).

 **Marquage de motif** — grave le tracé, à plat ou en suivant une surface. Le cœur de l'atelier.

Découpe

 **Découpe sur surface courbée** — découpe multi-passes qui suit le relief.

 **Découpe matériau plat** — découpe multi-passes à plat, avec compensation de kerf.

Assemblage

 **Job combiné** — enchaîne plusieurs opérations en un seul fichier, un seul armement.

 **Jobs → job combiné** — rassemble en un job combiné les jobs déjà sélectionnés dans l'arbre.

Calibration : première utilisation du laser



Bande de calibration défocus — ★1 · mesure le point laser à plusieurs hauteurs. Une fois par laser, pas par matériau.



Test des offsets X/Y — ★2 · aligne le laser sur la fraise (valeur pour tool.tbl). À refaire seulement après démontage/remontage.

Calibration : ajouter un matériau



Assistant matériau — point d'entrée : grave les planches, saisis les mesures, le modèle se déduit tout seul.



Grille de test — ★3 · balaie une matrice puissance/vitesse sur une chute.



Rampe puissance/vitesse — complément de ★3 : des lignes à réglages croissants, pour un repérage visuel rapide.



Nuancier matériau — le registre des gris mesurés, pour la gravure en niveaux de gris/photo.



Motif de calibration kerf — ★4 · mesure le trait de scie de la découpe, si tu comptes découper ce matériau.

Référence



Catalogue — grave une planche d'exemples réels, une fois les deux groupes ci-dessus faits.

Réglages



Préférences — machine, profils laser, sauvegarde export/import — et la case « **Puissance par M67** », qui décide si la puissance suit le mouvement ou arrête la machine à chaque changement (chapitre dédié).

OÙ SONT LES BOUTONS « GÉNÉRER », « APERÇU »... ?

Ils ne sont pas dans la barre : ils vivent *dans le panneau* de chaque mode, en bas. La barre d'outils ne sert qu'à **ouvrir** un mode ; tout le reste se passe dans son panneau (à gauche de FreeCAD).

6 Prise en main

Votre premier marquage, pas à pas.

Objectif : graver un texte ou un motif simple à plat, pour vérifier toute la chaîne — du dessin au fichier envoyé à la machine.

- 1 Dessiner ou choisir un motif.** Une esquisse (Sketch), une face plane, un texte Draft. Pour un texte « bâton » propre en un seul trait, utilisez le mode **Texte (trait simple)**, qui crée un fil prêt à graver.
- 2 Le sélectionner** dans l'arbre ou la vue 3D, puis lancer le mode **Marquage de motif**.
- 3 Régler la puissance et la vitesse.** En cas de doute, partez d'un préréglage matériau, ou d'abord une **Grille de test** (voir plus loin) pour trouver le bon couple sur votre bois.
- 4 Vérifier avec l'aperçu.** Le bouton **Aperçu photo** peint un rendu réaliste de la gravure ; le bouton **Aperçu de cadrage** génère un petit fichier qui ne trace que le rectangle englobant, laser éteint, pour vérifier que la pièce est bien placée sous la machine.
- 5 Générer le G-code.** Le bouton « Générer et sauvegarder le G-code... » propose un nom de fichier adapté au mode (par exemple `marquage.ngc`) et l'enregistre.
- 6 Cadrer, puis graver.** Sur la machine : chargez d'abord le fichier de cadrage pour positionner la pièce, puis le fichier de gravure. Ne quittez pas la machine des yeux.

L'ORDRE QUI ÉVITE LES MAUVAISES SURPRISES

Calibrer → tester sur chute → cadrer → graver. Une grille de test de deux minutes sur une chute vous épargne une pièce ratée.

7

Les modes de l'atelier

Vingt outils, quatre familles. Voici à quoi sert chacun.

Chaque mode ouvre un panneau organisé de haut en bas dans l'ordre où l'on travaille. Les modes de test et de calibration suivent tous la même trame : ① **Graver** (les réglages du tir), ② **Entrer les mesures** (la donnée relevée, saisie sur place), ③ **Photo du résultat** (pour garder une trace).

7.1 Graver & marquer

Faire une marque, un texte, une image — sans découper



Marquage de motif (plat ou courbe)

Graver le tracé d'un motif filaire — le cœur de l'atelier.

Sur une pièce **plate** : on sélectionne le motif 2D, la gravure se fait à plat. Sur une pièce **courbe** : le motif doit d'abord être posé sur la surface avec le mode *Projeter sur surface 3D* (§ 7.2) ; on sélectionne ensuite le motif projeté (**Motif_Projete**) **et** le modèle 3D d'origine *ensemble*, pour que le relief soit sondé exactement pendant le marquage et que la distance focale reste constante. Sans le modèle 3D, le Z n'est qu'interpolé entre les points projetés.

Propose cinq styles de trait (plein, tirets, pointillé, vague défocus, point élargi par défocus), tous suivant le relief.

Réglages clés : puissance · vitesse · style de trait · suivi de surface (motif projeté + modèle 3D).

Fichier : `marquage.ngc`





Chaque style porte son petit schéma, affiché sous le sélecteur : trait continu, tirets, points, vague qui enfle et rétrécit, point élargi constant, et les trois dégradés. Le dessin fait en un coup d'œil ce qu'un paragraphe explique mal — notamment la différence entre « **dégradé de largeur** » (des hachures qui s'épaississent selon leur position, donc une zone ombrée du clair au foncé), « **dégradé de largeur le long du tracé** » (un seul trait en fuseau, qui suit son parcours) et « **dégradé de puissance le long du tracé** » (largeur constante, teinte qui fonce).

Dégradé de largeur (le long du tracé) : le trait qui s'affine

Le mode **Marquage** compte désormais **huit styles de trait**, et **trois** d'entre eux s'appellent « dégradé » sans faire la même chose. Deux font varier la **largeur** — c'est d'eux qu'il est question ici, et la différence vaut d'être comprise une fois pour toutes ; le troisième fait varier la **puissance** et a sa propre section juste après.



STYLE	LA LARGEUR SUIV...	SUR UNE SPIRALE
Dégradé de largeur (sur la pièce)	la position du point, projetée sur une direction réglable (un angle). Pensé pour des hachures : chaque trait s'épaissit selon où il se trouve, donc la zone s'ombre du clair au foncé — le pendant du « remplissage en dégradé » de la Gravure remplie	la largeur varie de gauche à droite : les tours extérieurs et intérieurs se ressemblent
Dégradé de largeur (le long du tracé)	le parcours — l'abscisse curviligne, du premier au dernier point du trait	un vrai fuseau, large à l'extérieur et fin au centre

Les deux font varier la **LARGEUR**, à **puissance constante**. C'est le point qui trompe, et il vaut d'être dit franchement : le G-code de ces styles garde un **S** unique du début à la fin et ne fait monter que le **Z**. Sur un dégradé 0,3 → 3 mm, la machine passe de Z+0 à **Z+47 mm** avec la même puissance. Un trait dix fois plus large reçoit donc dix fois moins d'énergie par millimètre carré : il n'est pas *plus noir*, il est *plus large* — et souvent plus pâle.

Sur des **hachures**, l'effet se lit quand même comme un dégradé de teinte, parce que des traits plus larges *couvrent* davantage : la zone fonce d'un bord à l'autre. C'est pour ça que ce style existe. Sur un **trait seul**, il n'y a rien à couvrir, et on obtient simplement un trait qui s'élargit.

Faire varier aussi la puissance. Une case à cocher, sous les deux largeurs, superpose une **rampe de puissance** au dégradé de largeur : S suit le même parcours, de la valeur de début à celle de fin. C'est la réponse au défaut ci-dessus, et elle vient d'une gravure — une spirale de 0,3 à 4 mm à S1000 constant est sortie *marbrée* au bout large (fluence effondrée d'un facteur 13) et *creusée et carbonisée* au bout fin, au foyer. Décochée, le G-code est exactement celui d'avant.

Le bouton « **Compenser la fluence** » remplit la puissance de fin avec celle qui donnerait la *même teinte* qu'au début : S proportionnel à la largeur, le même modèle que le style vague. Et il dit franchement ce que ça vaut — sur ce fuseau 0,3 → 4 mm, la teinte constante demanderait **S75** au bout fin, soit **sous la plus basse puissance jamais mesurée** sur ce bois (S200 sur hêtre à F800). En dessous, la table de largeurs ne dit plus rien : le trait peut ne pas marquer du tout, et le panneau l'écrit au lieu de proposer un réglage inconnu.

La conclusion à garder : sur un rapport de largeurs de 13×, une teinte uniforme *n'existe pas*. Ancrer à l'autre bout — S900 au foyer — demanderait S12000 au bout large, quatre fois plus que la machine ne sait donner. Il faut donc choisir : resserrer l'écart de largeurs, ou accepter que la teinte varie. La rampe permet au moins de placer ce compromis là où on veut, au lieu de le subir.

Ce que fait la teinte, elle, dépend du bois et se lit dans le nuancier mesuré — pas d'une règle simple. Sur le hêtre de l'atelier, un même 0,3 → 3 mm à S800 donne : à F800 une teinte qui tombe de 100 à 63 %, à F1500 une teinte qui *monte* de 74 à 83 %, à F2000 une qui redescend de 66 à 55. L'aperçu photo affiche cette teinte-là, morceau par morceau.

Deux cases suffisent : **largeur au début** et **largeur à la fin**, en millimètres. L'atelier en déduit la hauteur de bec par la calibration du point — sur la machine de l'atelier, 4 mm de large demandent **+64,8 mm** de remontée. Attention à la borne basse : le point au foyer mesure 0,30 mm, donc **on ne descend pas sous 0,30** optiquement (le 0,10 mm des « lignes gravées » est une largeur *brûlée*, pas le point).

Chaque trait sélectionné porte sa rampe entière. Sélectionner deux lignes donne deux fuseaux identiques, quelle que soit leur longueur — le résultat ne dépend donc pas de l'ordre dans lequel l'atelier enchaîne les tracés, qui est choisi pour raccourcir le trajet et non pour dessiner.

Et sur un cercle ? C'est la question à se poser, car une boucle fermée revient sur son point de départ. Deux réponses, au choix dans le panneau : **marche visible** (la largeur va du début à la fin le long du tracé, donc un ressaut net là où la boucle se referme — littéral et prévisible) ou **aller-retour** (la largeur de fin est atteinte à *mi-parcours*, puis redescend : la boucle se referme sans aucun raccord). Sur un trait ouvert l'option est ignorée — elle contredirait « largeur à la fin ».

Ces réglages se rangent dans les **préréglages** du panneau, avec le style et tout le reste : c'est là que se constitue la bibliothèque de traits. Au passage, les champs du dégradé n'étaient jusqu'ici *ni* mémorisés d'une session à l'autre *ni* enregistrés dans un préréglage — un fuseau réglé se perdait à la fermeture du panneau. C'est réparé.

Dégradé de puissance : le vrai dégradé de teinte

C'est le troisième dégradé, et il fait exactement l'inverse des deux autres : le bec **ne bouge pas** et c'est la **puissance** qui rampe le long du tracé. Deux cases : **puissance au début** et **à la fin**, en S. Clair au départ, foncé à l'arrivée.

Une nuance qui a d'abord été écrite à l'envers ici. Le bec immobile veut dire que le *point optique* ne change pas — mais le trait *brûlé*, lui, suit quand même la puissance, parce qu'à basse puissance seul le cœur du faisceau dépasse le seuil de brûlure du bois. Mesuré sur hêtre au foyer à F800 : **0,10 mm à S200 contre 0,30 à S1000**, soit 3×. Ce style est donc d'abord un dégradé de *teinte*, avec un trait qui s'épaissit en même temps — ce qui reste sans commune mesure avec un fuseau, où la largeur varie d'un facteur 11 sur la même sélection. L'aperçu peint désormais cette variation.

C'est le style à prendre quand on veut un dégradé de *gris* sur un trait. Les deux « dégradés de largeur » ne savent pas le faire : en montant le bec à puissance constante, ils élargissent le trait et le pâlisent plutôt que de le foncer.

Il partage toute la mécanique du fuseau, parce que c'est *la même rampe* — elle interpole une valeur le long de l'abscisse curviligne, peu lui importe que cette valeur soit une hauteur ou une puissance. Il en hérite donc les mêmes garanties : **chaque trait porte sa rampe entière**, et sur une **boucle fermée** le même choix marche visible / aller-retour — utile ici, car un ressaut de teinte à la fermeture d'un cercle se voit beaucoup.

Deux garde-fous : la consigne est **bornée à l'échelle de la machine** (une valeur au-delà de S max est ramenée à S max), et le champ « Puissance » global se grise, puisqu'il ne sert plus à rien quand la puissance est rampée. Côté machine, ce style change la puissance à chaque point : avec « Puissance par M67 » coché, ça ne coûte rien (cf. chapitre 3) ; sans lui, chaque changement de S arrête le mouvement.

Mesurer sur la photo, dans FreeCAD

Un bouton fait tout : redresser, ranger, poser à l'échelle.

Dans la section qui grave les planches, sous les boutons « Planche 1/2/3 », le bouton « **Redresser une photo de planche...** » enchaîne toute la manœuvre : on choisit une ou **plusieurs** photos (les gros plans sont acceptés), on confirme les cotes de la mire, on clique les quatre croix dans la fenêtre OpenCV, et l'atelier redresse la perspective, range l'image dans les *photos du résultat* avec la date et l'échelle en description, puis la **pose dans le document à sa taille exacte en millimètres**. Plus aucune taille à recopier.

Le redressement s'exécute avec le python **du système**, pas celui de FreeCAD : OpenCV n'existe pas dans l'AppImage, et le sous-traiter évite d'alourdir les dépendances du workbench.

Un piège propre aux AppImage, réglé une fois pour toutes. FreeCAD impose PYTHONHOME à tout son environnement : un python *système* lancé depuis lui allait donc chercher sa bibliothèque standard dans l'AppImage et mourait sur « *Failed to import encodings module* » avant même d'exécuter une ligne. Le sous-processus reçoit maintenant un environnement débarrassé de PYTHONHOME, PYTHON-

PATH , LD_LIBRARY_PATH et des variables de plugins Qt — ces dernières comptent autant, OpenCV ouvrant sa fenêtre avec Qt6 et ne devant surtout pas charger celles de l'AppImage.

Les cotes sont proposées, jamais imposées. Le dialogue pré-remplit ce que la mise en page *actuelle* produirait, mais la planche qu'on tient peut être plus ancienne — ses vraies cotes sont gravées dessus, sous la réglette. On lit sur le bois, on corrige si besoin.

Et pour mesurer sans changer de panneau : l'outil Ligne du Draft affiche bien la distance, mais il occupe le panneau des tâches — qui est *exclusif* dans FreeCAD, donc impossible de garder la grille de saisie ouverte à côté. D'où le bouton « **Mesurer A → B dans la vue 3D** » placé *dans* la saisie des mesures : on clique la case à remplir, puis le bouton, puis les deux extrémités dans la vue — et la distance atterrit dans la case. Aucun aller-retour. La case visée est **nommée à l'écran** (« *Cible : S1000 / F800 (foyer)* ») avant que vous pointiez : une valeur tombée dans la mauvaise case ne se voit pas, elle ressemble à une mesure.

Ce qui n'a *pas* été automatisé, et c'est délibéré : **où s'arrête la brûlure**. Les bords d'un trait gravé ne sont pas droits — c'est le grain qui décide — et le jugement reste à l'œil, sur le profil moyenné. Seul le placement, qui est du calcul exact, passe à la machine. La détection automatique des traits est d'ailleurs ce qui a échoué le plus souvent sur ce projet (étiquettes prises pour des traits, roussi compté comme brûlure) ; ici rien n'est *cherché* dans l'image, la mise en page est simplement rejouée. Conséquence utile : les planches **déjà gravées** en profitent sans être regravées. Sur une planche 2, une grille de défocus ou une photo sans fiche, le cadrage à la souris revient tel quel.

Elle est désormais une fonction à part, source unique comme pour la planche 1 : le générateur la grave, le cadrage la rejoue. **Le défocus entre dans la clé** — le même couple (S, F) existe à chaque niveau, et sans lui on cadrerait le bon trait du *mauvais bloc* : une largeur parfaitement plausible, à une hauteur qui n'est pas celle qu'on croit.

Vérifié sur les planches réelles : **20 cases sur 20** cadrées à chaque niveau de la planche 2, et **6 sur 20** sur la 2b — ce qui est juste, elle ne grave que trois puissances et deux vitesses. Là où la planche ne porte aucun trait, rien n'est proposé : un cadre faux ressemblerait à une mesure, ne rien proposer se voit. Le seuil, lui, reste à l'œil.

Un document nommé « Atelier » est désormais créé quand il n'y en a aucun — à l'activation de l'atelier, et de nouveau à l'ouverture d'un panneau pour le cas du document fermé en cours de séance. **Jamais** quand un document est déjà ouvert : on n'ajoute pas un onglet vide à côté du travail en cours.

La fiche de grille porte désormais le **défocus** et le **pas** de balayage, et la fenêtre de lecture les affiche dans deux champs **corrigeables**. Une planche gravée avant cette version ne peut pas régénérer sa fiche : la fenêtre le dit alors en clair — « fiche sans régime, saisis le défocus et le pas, sinon ces tons iront se ranger au foyer » — au lieu de laisser passer un zéro silencieux pour une mesure.

Le point est indiqué parce que c'est *lui* qui décide du régime ; la hauteur n'en est que le moyen. Sans accent et en capitales : une étiquette gravée se lit de loin et de biais.

Le nom du fichier ne suffisait pas — **il ne suit pas le bois, et c'est le bois qui survit**. Même leçon que le « 2b » gravé « 2 » : une planche retrouvée sur l'établi doit dire d'elle-même dans quelles conditions elle a été brûlée.

Le plancher se *mesure*, il ne se choisit pas. Les écarts entre cases sont du bois intact, partout sur la planche : 25 de ces zones se lisaient de **0,0 à 9,8 %** (moyenne 3,6, écart-type 2,2), quand les huit cases les plus claires se lisaient de 1,1 à 5,1 % — entièrement dedans. Le plancher vaut **moyenne + 2 écarts-types** (8,1 % ici) et non le maximum : un seul reflet ou un nœud emporterait le maximum, et le plancher avec.

Ces cases s'affichent « — » et non « 0 », et ne sont **pas versées** au nuancier : une case que le laser n'a pas marquée n'est pas un ton de zéro, et les deux se lisent autrement à l'établi. Les dix cases écartées sont exactement les dix que Christophe voit vides.

Deux correctifs, pas un. Le couple est déballé comme dans les six autres appels du fichier ; et surtout, **la fenêtre dit désormais ce qui casse** au lieu de rester muette, le détail partant dans la vue Rapport. « Rien à l'écran » est le pire des diagnostics : il ne distingue pas une panne d'un mauvais réglage.

Vérifié sur la vraie planche : **36 cases lues**, bois nu 155 contre noir 23 (132 niveaux d'écart), noirceurs de 1 à 100 %. Et le sens est **conforme au bois** — la noirceur monte vers la droite sur les six rangées et descend quand la vitesse monte sur les six colonnes.

Le contrôle par la réglette choisissait, parmi les lignes périodiques de l'image, celle qui portait le *plus de traits*. Vrai sur une planche de calibration nue ; faux dès que la planche porte une grille remplie : les rangées de cases donnaient **111** transitions à 30 px contre **112** à 50 px pour la réglette. **Une voix d'écart** — et selon l'endroit exact où l'on clique les croix, c'est tantôt l'une tantôt l'autre qui l'emporte.

Le vrai séparateur était déjà dans les données, inutilisé : la **régularité**. La réglette gravée est à 0,99-1,00 (des traits identiques au millimètre), les hachures à 0,6-0,8 (leur remplissage bave et se recouvre). Le classement se fait désormais sur la régularité, la quantité ne départageant que des lignes également régulières — c'est là que l'argument d'origine tient vraiment. Vérifié sur la vraie photo : 50,06 px/mm, et douze essais avec les croix secouées de ± 12 px tombent tous à moins de 0,4 %.

Les sections numérotées échappent désormais à l'accordéon et s'ouvrent par défaut. On peut toujours les replier *à la main* : c'est le repli automatique, que personne n'avait demandé, qui est retiré. L'état « replié » enregistré pour ces sections n'était pas un choix non plus, mais la trace du défaut : il est effacé **une seule fois**, et seulement pour elles.

Le bouton qui produit le résultat ne vit jamais derrière un pli que quelque chose d'autre peut refermer.

Les deux repères sont proposés, montrés et déplaçables. Le bois nu est cherché dans les *écarts entre cases*, seuls endroits restés intacts, et reculé de 20 % du bord pour ne pas mesurer la bavure de brûlure. Le noir max est la case la plus sombre. Les deux se traînent à la souris : une ancre posée sur un reflet ou une ombre décalerait *tout* le nuancier en rendant des pourcentages d'allure parfaitement normale, et **un choix qu'on ne voit pas est un choix qu'on ne peut pas corriger**.

Si les deux repères sont séparés de moins de 30 niveaux de gris, l'atelier **refuse de chiffrer** et dit pourquoi : sous ce seuil on diviserait du bruit par du bruit. La lecture est éprouvée sur une planche peinte de toutes pièces, dont on connaît la noirceur de chaque case : elle la retrouve à **0,3 point près**, et dans le bon sens.

Le cadrage est le plus grave des trois : il sert justement à vérifier que la pièce tient, et il traçait un rectangle amputé des 25 mm de réglette. On aurait cadré, jugé que ça passe, puis gravé dans le serre-joint. Les quatre appels au générateur passent maintenant par *un seul* point qui décide des arguments de la mire, et un test compte les appels pour qu'aucun nouveau ne l'oublie.

Le correctif avait pourtant été écrit — mais le script qui l'appliquait a échoué sur une vérification suivante, et le fichier n'a donc jamais été enregistré. Le contrôle de syntaxe est passé : un fichier inchangé reste du Python valide. Et la vérification « bout en bout » appelait les fonctions internes directement, en enjambant la ligne cassée. **Le chemin éprouvé était celui qu'on écrivait, pas celui qu'on clique.** Le test appelle désormais le bouton lui-même.

La mire apparaît aussi dans la vue 3D. Elle n'existait que dans le G-code : on ne pouvait pas voir ce qu'on allait graver, ni vérifier que la planche tient sur la chute — alors que la mire l'agrandit de 25 mm en bas. Un aperçu qui ne montre pas ce qui sera gravé ne sert à rien.

Le défaut vient désormais de l'appelant. Une section qui porte l'entrée d'un nouveau chantier s'ouvre la première fois ; une section repliée à *la main* le reste, parce que c'est un choix et qu'il prime. La case de la mire a sa propre section, « Mesure sur photo ».

La mire est gravée **au foyer** même quand les cellules sont défocalisées : une référence de mesure floue ne se mesure pas. À côté du G-code, l'atelier dépose une **fiche** qui donne chaque case dans le *repère de la mire* — jamais en coordonnées machine, puisque le fichier est recadré au zéro pièce à l'écriture et qu'une coordonnée machine serait fautive d'une translation dès le fichier suivant.

Pourquoi la noirceur ne se lit pas comme une largeur. Un millimètre reste un millimètre quelle que soit la lampe, et c'est pour ça que l'outil de profil sort un chiffre absolu. Un gris, non : change l'exposition et tout se décale en bloc. La mesure se fera donc entre **deux repères pris dans la même photo** — un bout de bois nu et la case la plus noire — ce qui est exactement l'échelle que le panneau annonce déjà, « 0 = matériau intact, 100 = noir max ». En dessous de 30 niveaux d'écart entre les deux repères, l'atelier refuse de chiffrer plutôt que de diviser du bruit par du bruit.

14,17 s → 0,12 s pour ouvrir le panneau. La suite de tests payait la même note sans le dire : un de ses fichiers est passé de 16,7 s à 1,1 s. Le garde-fou posé compte les *lectures de configuration* et non les secondes — un seuil en temps est bruité par la machine, un compteur ne l'est pas.

Elle avait été mise à F200 et appelée « la plus sûre » parce que c'était le régime avec la plus grosse marge au-dessus du plancher de *mesure*. C'était confondre deux sûretés. **Une marge de mesure n'est pas une marge de gravure** : un trait large à basse vitesse est large surtout parce que le temps de pose est long, et c'est ce temps qui brûle.

L'atelier avait pourtant le chiffre qui le prédisait. L'indice d'énergie $S/(\text{pas} \times F)$, affiché sur la gravure remplie depuis le carré carbonisé du 30 juillet, vaut **5,7×** le noir le plus économe mesuré à F200

contre **2,8×** à F1000. Il n'était simplement montré nulle part sur ce tramage, dont le verdict ne parlait que de contraste et de couverture — deux façons de regarder la *largeur*. Il y figure désormais, avec les deux repères gravés cités dans le message : un seuil qu'on ne peut pas rattacher à du bois se lit comme un caprice.

Le seuil d'alerte est à 4,0 et non à 2,0 comme celui du remplissage : à 2,0 il crierait sur F1000, le régime que le bois vient de valider. **Un avertissement qui accuse ce qui marche s'apprend à s'ignorer.** C'est un seuil à deux points, à resserrer quand une troisième planche en donnera un de plus.

Deux recettes livrées en dépendaient. « Portrait Hêtre — lignes gravées » et la similigravure gravaient au pas 0,30 pour un trait de 0,18 : 0,12 mm de bois nu entre chaque ligne, **40 % de la surface**. Elles gravaient des rayures. Les deux sont recalées sur la mesure ; la première passe à F200 au pas 0,34, le seul régime qui fasse vraiment enfler le trait sous le plafond S900 de l'atelier (1,94×). C'est plus lent, et c'est le prix de la vérité : à F800 le trait n'enfle plus que de 1,33× sous ce plafond, et le tramage refuse — à juste titre.

Un tableau inventé est pire qu'un tableau vide. Vide, l'atelier refuse et renvoie à l'établi. Inventé, il répond — de façon plausible, et pour toujours.

La case se choisit désormais *dans* la fenêtre, par une liste déroulante « La mesure ira dans... » qui contient toutes les cases de la grille, dans l'ordre du bois. Au premier appel elle se pose sur la première case encore **vide** — on reprend là où l'on s'était arrêté. Et si la grille est verrouillée, l'atelier le dit et propose de l'ouvrir, au lieu de renoncer en silence.

Et le bouton « **Retenir** → **case suivante** » range la largeur, avance d'une case et revient au choix du trait *sans fermer*. L'ordre suit celui du bois : une colonne de vitesse à la fois, du haut vers le bas — exactement la disposition des traits sur la planche, donc l'œil parcourt l'écran et le bois de la même façon. Un ordre par lignes obligerait à sauter d'une colonne de vitesse à l'autre entre chaque mesure.

Pourquoi c'est bien mieux qu'un clic. Le bord d'une brûlure n'est pas une ligne : à 60 mm de défocus c'est une **rampe de 0,7 mm** entre le bois franc et le noir franc. Mesuré sur une planche réelle : une lecture prise sur *une* colonne va de 2,36 à 3,96 mm — **1,60 mm de hasard** selon l'endroit visé — quand la même largeur lue sur le profil moyenné ne bouge que de 0,22 mm lorsqu'on déplace le seuil de 40 à 60 %. Moyenner divise l'incertitude par sept.

Les repères 40/50/60 % sont tracés sur la courbe et les lignes démarrent au seuil 50 %, mais ce ne sont que des *propositions* : c'est vous qui décidez où s'arrête la brûlure — bord du noir franc ou bord du roussi — et la seule règle est de vous y tenir sur toute la planche. Le recadrage est manuel lui aussi : la détection automatique des traits est ce qui a échoué le plus souvent sur ce projet.

Écrit en police **mono-trait** et non en 7 segments : cette dernière ne connaît que les chiffres, S, F, le point et le tiret, donc elle aurait gravé un nom quasi vide — et dans le bois, ça ne se voit qu'après coup. Un nom trop long **rétrécit** plutôt que de déborder sur le repère en croix, qui reste la référence. L'en-tête du G-code le répète, mais c'est le bois qui fait foi : lui seul survit à la régénération du fichier.

S600/S800/S1000 × F200/F400, et rien d'autre. À ces hauteurs le point fait 3 à 4 mm : la fenêtre où le trait marque encore est mince, il n'y a pas de place au-dessus de S_{MAX} , et *ralentir* est le seul

moyen de remonter la fluence. Ces six valeurs sont exactement des lignes et des colonnes de la grille de saisie ② — une planche qui graverait S850 produirait une mesure que le tableau ne saurait pas afficher, ce qui serait absurde après avoir brûlé du bois pour l'obtenir. **30 mm n'y figure pas** : il tombe entre 15 et 36, donc déjà interpolé. Et une case blanche est une *donnée* : à 60 mm, S600 ne marquera sans doute pas, et c'est le seuil du matériau à cette hauteur.

Repère utile pour vos propres mesures : une colonne qui affiche la *même* largeur à cinq puissances différentes n'est pas un plateau physique, c'est une grandeur passée sous votre plancher de mesure. Laissez-la telle quelle — l'atelier saura la refuser.

Le nom du fichier porte désormais le **laser actif** : `LT-80W-AA-PRO_planche1_20260801-0745_redresse.png`, et la fiche `.json` le répète. Ce n'est pas de l'étiquetage : une largeur brûlée *n'a de sens que pour le module qui l'a gravée*. Deux diodes différentes donnent deux tables différentes — et à l'inverse, quelqu'un qui possède le **même** module peut reprendre ces mesures telles quelles, sans refaire une heure d'établi. Sans le nom du laser sur le fichier, cette réutilisation demande de se souvenir, ce qui revient à dire qu'elle n'aura pas lieu. Le nom vient du **profil laser actif** : renommez-le avec la référence de votre module (Préférences → Profils laser) et tout le reste suit.

Un défaut trouvé au premier usage réel, le 01/08/2026. La case visée était lue au moment du clic sur le bouton — c'est-à-dire *après* que le bouton ait pris le focus, donc jamais. Le panneau répondait « aucune case n'avait le focus : clique une case AVANT » à quelqu'un qui venait exactement de le faire. Elle est maintenant **mémorisée** quand la case prend le focus, ce qui couvre aussi le geste normal : désigner la case, *puis* zoomer dans la vue 3D (ce qui y déplace le focus), et seulement ensuite mesurer.

Redresser la photo, l'importer, mesurer à l'outil Ligne.

La mire rend la photo *mesurable*, et la mesure se fait très bien dans FreeCAD — trouvaille de l'atelier le 31/07/2026. Le tout en trois temps :

1. Redresser. `outils/redresser_photo.py` (python du système, avec OpenCV) demande de cliquer les quatre croix, puis sort une image redressée à une échelle **exacte et choisie**, par exemple 50 pixels par millimètre. C'est indispensable : une photo tenue à la main n'est jamais perpendiculaire, et FreeCAD met une image à l'échelle de façon *uniforme* — il ne sait pas corriger une perspective. Sans redressement, toutes les mesures sont biaisées et rien ne le signale.

2. Importer. Le script affiche la taille exacte à donner à l'image dans FreeCAD. L'échelle est alors juste partout : plus aucune calibration à faire.

3. Mesurer à l'outil **Ligne** de l'atelier Draft, directement sur les traits. L'avantage sur un algorithme est réel : c'est *vous* qui décidez où s'arrête la brûlure — bord du noir franc ou bord du roussi — à fort grossissement, et avec le même critère d'un trait à l'autre. Aucun seuil automatique ne sait faire ce choix à votre place. La seule règle : s'y tenir sur toute la planche.

ZOOOMEZ — **c'est la seule chose qui limite vraiment la précision.** À l'écran, un clic vaut environ *un pixel*. Si la planche entière tient dans la fenêtre, ce pixel représente ~0,16 mm, soit la moitié d'un

trait de 0,30 : mesurer à ce zoom-là donnerait ± 50 % d'erreur. La calibration, elle, est excellente — sur l'essai du 31/07/2026, deux repères espacés de 240,00 mm ont été mesurés à **239,85**, soit 0,06 % d'écart, ce qui ne représente que 0,0002 mm sur un trait de 0,3. **L'échelle n'est jamais le problème ; le zoom l'est.** Zoomez jusqu'à voir le grain du bois et jusqu'à ce que le bord de la brûlure devienne une transition large de plusieurs pixels — c'est là, et seulement là, que se décide où vous placez la limite.

Vérification. Mesurez les deux diagonales entre croix opposées : dans un rectangle elles sont rigoureusement égales, donc un écart trahit une photo de biais. Sur l'essai du 31/07, le redressement a ramené la perspective de 1 % à **0,05 %**, et les intervalles de 10 mm de la règle sortent à 499,8 px pour 500 attendus, dispersés de 0,37 % — soit 0,04 mm sur 10.

Ce contrôle est né d'un défaut, le 01/08/2026 : **256-86** — la taille de l'*image* redressée — saisi à la place de **240-70**, les cotes de la *mire*. L'image sortait 6 % trop large et **23 % trop haute**, soit un trait de 0,30 mm lu 0,37. Les deux contrôles qui existaient — écart des diagonales (0,03 %) et rapport des cotes — étaient passés tous les deux, et pour la même raison : **ils se calculent sur les mêmes quatre points que le redressement lui-même.** Un contrôle qui relit ses propres données ne contrôle rien.

Un piège corrigé, qui vaut d'être connu : passés dans un ordre croisé, les quatre points produisaient un redressement en « nœud papillon » — image détruite, chiffres parfaitement plausibles, aucun avertissement. Le script remet donc les points en ordre tout seul, refuse un quadrilatère croisé, et contrôle que les proportions ressemblent au rectangle annoncé. **L'ordre des clics n'a plus d'importance.**

La mire de mesure gravée sur les planches

Une règle et quatre repères, gravés en même temps que la planche.

Les **Planches 1 et 2** portent désormais leur propre **mire de mesure** : une règle graduée au millimètre sous la planche, et **quatre repères en croix** aux coins d'un rectangle dont les cotes sont *rondes* et annoncées dans l'en-tête du G-code. Il suffit alors de photographier la planche pour en mesurer les traits.

Pourquoi gravée plutôt que posée ? Une règle d'acier posée sur la planche est 0,5 à 1 mm *au-dessus* de la surface : en macro elle est vue sous un angle légèrement différent du trait qu'on mesure — parallaxe. Une graduation gravée partage son plan, et surtout son **repère machine** : elle hérite de la précision de positionnement de la CNC, pas de celle d'une règle du commerce.

Pourquoi quatre repères et pas un ? Quatre correspondances permettent de corriger la **perspective**, pas seulement l'échelle — une photo tenue à la main n'est jamais perpendiculaire, et c'est l'erreur dominante. La base est longue exprès : l'erreur d'échelle vaut l'incertitude sur le centre d'un repère divisée par la longueur de base, soit 0,06 % pour 0,05 mm sur 80.

Gravée lentement, et c'est délibéré. La règle, ce sont des dizaines de petits traits séparés par des rapides, donc autant d'accélération. À F1200 le support en PLA de l'atelier vibrait et les repères sortaient *ondulés* — ce qui ruine exactement ce qu'on leur demande, un centre net. Réglages par laser :

S150 à F300 par défaut. Pour un repère, un trait un peu gras mais droit vaut bien mieux qu'un trait fin qui serpente.

Ce qu'elle a déjà servi à trouver. Le 31/07/2026, elle a permis de mesurer sur photo un trait annoncé à 0,30 mm par la table : il faisait **0,50**. Valeur ensuite confirmée au pied à coulisse. La table des largeurs au foyer décrivait un état de la machine qui n'existait plus.

Gravure remplie (noir)

Noircir une surface fermée par un remplissage.

Utilise le **défocus calibré** pour élargir le point et remplir vite, avec un contour repassé net par-dessus. Le remplissage se glisse volontairement *sous* le contour pour éviter le liseré pâle sur les bords.

Le parcours est **optimisé** : les traits de remplissage sont gravés de proche en proche plutôt que dans l'ordre où les hachures sont calculées. Sur une forme à trous (orbites, cavités, contre-formes de lettres), chaque ligne de hachure est coupée en un nombre de morceaux différent de sa voisine, et sans ce tri la tête traverse la pièce d'un bout à l'autre entre deux traits. Mesuré sur un crâne réel : **56 m de déplacements à vide ramenés à 5 m**, pour une gravure rigoureusement identique — juste beaucoup moins d'allers-retours.

Le panneau annonce si le remplissage sera **plein ou rayé** : il compare le trait réellement *brûlé* (mesuré avec la planche de calibration, pour le matériau du bloc « Nuancier matériau ») au pas de hachure demandé. Trop étroit, il reste du bois nu entre deux passes et la gravure sort grise ; l'atelier resserre alors les hachures, mais rallonge le job d'autant — d'où la suggestion d'un réglage mesuré qui couvre le pas d'un seul coup, plus noir et plus vite. Choisir un ton dans « Nuancier matériau » (style de trait **plein**) propose du même coup l'espacement qui donne un remplissage plein avec ce ton précis — une seule décision au lieu de deux ; l'espacement reste modifiable ensuite pour aller plus vite sur un aplat, au prix d'un remplissage moins net.

Une seconde ligne annonce l'**énergie**, parce qu'un aplat peut être parfaitement plein et complètement *surcuit* — les deux échecs sont opposés et vérifier l'un ne dit rien de l'autre. Elle compare l'énergie déposée par mm² ($S / (\text{pas} \times \text{vitesse})$) à celle du réglage **noir le plus économe** que vous ayez mesuré sur ce matériau, les deux calculés de la même façon. Au-delà du double, le bouton « Alléger » applique ce réglage-là — puissance, vitesse *et* pas — : même noir jugé, moins d'énergie, et d'autant moins de temps. C'est un coût qui est annoncé, pas un dommage : l'atelier ne sait pas prédire la carbonisation, qui dépend du matériau. Ce garde-fou vient d'un carré S1000/F800 au foyer, au pas 0,26 : trait brûlé 0,30 mm, donc verdict « plein » parfaitement exact — et sorti carbonisé.

Réglages clés : puissance · vitesse · défocus · contour. **Fichier** : `gravure_remplie.ngc`

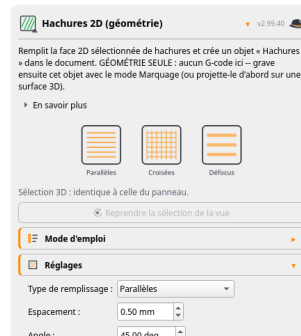


Hachures 2D (géométrie)

Préparer un remplissage par hachures, comme objet.

Crée dans le document les traits de remplissage (parallèles, croisées) d'une face — une étape de *préparation* : aucun G-code n'est produit ici, on grave ensuite ces hachures avec le Marquage.

Réglages clés : espacement · angle · type. **Sortie** : objet « Hachures_... »



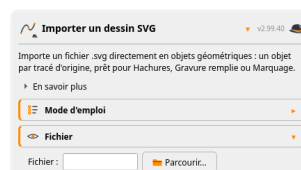
Importer un dessin SVG

Faire entrer un dessin vectoriel dans le document, proprement.

Lit le `.svg` directement et crée **un objet par tracé d'origine**, sélectionnable individuellement, prêt pour Hachures, Gravure remplie ou Marquage. Sans le détour par le DXF, qui émiettait un crâne de 23 tracés en plus de **210 fragments** et sa plomberie de calques : ici, 23 tracés donnent 23 objets. La couleur de remplissage de chaque tracé est reprise sur l'objet, simplement pour les distinguer à l'œil sans rouvrir Inkscape.

Les courbes sont converties en petits segments — comme partout ailleurs dans l'atelier — avec une **flèche de 0,02 mm**, très en dessous de la largeur brûlée : aucun facettage visible, même sur une grande courbe douce. Hors périmètre, annoncé et non silencieux : `<use>`, dégradés, masques et images bitmap embarquées — chacun produit un avertissement en console, jamais un échec.

Réglages clés : fichier. **Sortie** : un objet « Tracé SVG ... » par tracé





Texte gravé (contour)

Tracer le POURTOUR exact des lettres d'une police, empattements compris.

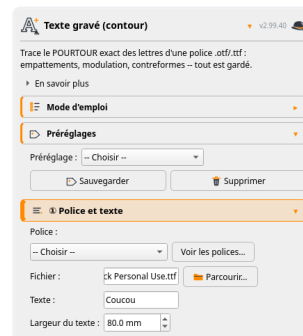
Le pendant du mode Calligraphie, et le choix entre les deux tient à la police. Une calligraphie est le dessin d'une **plume** : son axe médian EST le geste, et Calligraphie le restitue avec ses pleins et déliés par la hauteur Z. Une police **classique** n'a pas de plume — son contour est son dessin, et en extraire un axe donne une armature filiforme où les empattements se réduisent à de petites barres au pied des fûts.

Ce n'est pas une affaire de précision. Mesuré, un DejaVu Serif passé au squelette couvre 97,5 % de la lettre et déborde *moins* que La Graziela. C'est le principe qui ne convient pas, pas l'exécution.

On prend les vraies courbes de la police, pas un contour retracé sur une image : **fontTools** lit les Béziers du fichier, aplaties à 0,02 mm — très au-dessous de la plus fine brûlure mesurée, donc invisible sur la pièce. Les contreformes (le trou d'un « o », d'un « e ») sont des contours à part entière.

Le mode ne grave pas : il **pose les contours dans le document**, comme le mode Texte pose ses fils. Enchaîne avec **Marquage de motif** pour des lettres creuses, ou **Gravure remplie** pour des lettres pleines — aucune hachure n'est réécrite ici, c'est le mode d'à côté qui la fait, et il la fait mieux.

Réglages clés : police · texte · largeur en mm. **Sortie** : objet fil (contours fermés)





Calligraphie (pleins et déliés)

Graver un texte dans une vraie police calligraphique, en un seul passage.

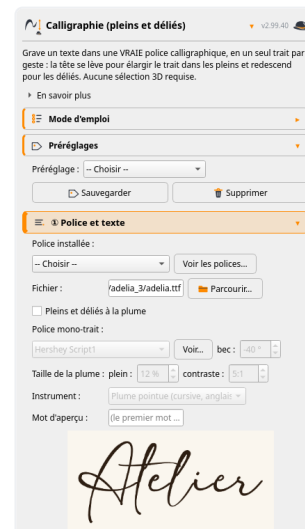
Deux sources de pleins et déliés (v2.78.0). Soit on les **extraît** d'une police calligraphique — le squelette et la largeur locale sont lus dans le dessin de la lettre —, soit on les **calcule** sur une police **mono-trait** avec une plume simulée. Une police mono-trait *est* un squelette : elle ne porte aucune épaisseur, il n'y a rien à en extraire. Mais il y reste une information exacte, la **direction** de chaque trait, et c'est tout ce dont une plume à bec large a besoin :

$$\text{largeur} = \text{mini} + (\text{maxi} - \text{mini}) \times |\sin(\text{angle du trait} - \text{angle du bec})|$$

Le fût qui traverse le bec sort épais, le trait qui court dans son axe sort fin. Cochez « Police MONO-TRAIT, pleins et déliés simulés à la plume » et le fichier .otf est ignoré. Deux réglages décident du résultat : l'**épaisseur du plein** (16 % de la hauteur de capitale par défaut) et le **contraste** demandé (16:1). Livré à 6 % et 5:1, le mode rendait 3,1:1 et Christophe l'a jugé d'un mot : « c'est une police un peu plus épaisse quoi ». Il avait raison — ses propres polices calligraphiques demandent 26:1 (Blacksword) et 31:1 (Aston Script), et une plume est **grasse** : c'est ce qui la distingue d'un trait épaissi. Au-delà de 22 % les pleins s'empâtent et les contreformes se ferment. **Deux instruments (v2.80.0)**, et c'est le premier réglage à choisir. Le **bec plat** — une lame de largeur fixe tenue à un angle fixe — ne dépend que de la **direction** : un trait qui monte est aussi plein que le même qui descend. C'est l'italique, la gothique, l'onciale. La **plume pointue** est une pointe souple qui s'écarte sous la **pression**, et on n'appuie qu'en **descendant** — pousser une pointe vers le haut l'accroche dans le papier. Pleins sur les descentes, déliés filiformes partout ailleurs : c'est l'anglaise, et c'est ce qu'il faut prendre avec une police **cursive**. Un bec plat sur une cursive met des pleins dans les remontées, là où aucune main n'en met — ça se voit sans qu'on sache dire pourquoi. Un **schéma vivant** est posé sous les champs : quatre traits en éventail, du vertical au couché, redessinés à chaque molette avec le rapport obtenu sous chacun. Un schéma figé aurait montré *un* cas ; celui-ci montre le vôtre — « je ne comprends pas comment fonctionne le bec et le contraste ». Le bec, lui, est à 25° : à 0° les fûts sont épais et les barres fines, mais la barre du « A » tombe au minimum et disparaît presque ; au-delà de 45° le contraste s'inverse. Ça vaut pour les **45 polices** mono-trait, et la direction y est *lue* plutôt qu'estimée sur un squelette tramé — donc sans les déviations aux croisements que celui-ci coûte.

Une police calligraphique est un **contour rempli** : la graver au trait perdrait ce qui en fait la calligraphie, l'alternance des pleins et des déliés. Ce mode en extrait le **squelette** — la ligne que la plume a parcourue — et la **largeur locale**, puis confie la largeur au fuseau Z. La tête se lève pour élargir le point dans les pleins et redescend pour les déliés. Rien n'est rempli ni repassé : un plein est un endroit où la tête était *haute*.

La taille est le seul levier. La largeur du trait vient du dessin de la police mise à l'échelle, et le plafond est la plus large brûlure *mesurée* du matériau : aucune puissance n'élargit un trait au-delà. Passé une certaine taille les pleins sont donc tronqués — le verdict le dit, et donne la largeur qui



tiendrait. Sur le hêtre de l'atelier à F200 (0,18 à 3,43 mm), une écriture anglaise à fort contraste plafonne vers 130 mm de large ; à 200 mm, 39 % du tracé est hors de portée.

Les polices ne sont pas fournies. Les calligraphies du commerce sont presque toutes en licence « usage personnel » : le mode lit le fichier `.otf` / `.ttf` sur votre disque et ne le copie nulle part. Graver pour soi ne pose pas de question ; revendre en demanderait une licence commerciale.

Le défaut que la question a révélé. Réassigner la forme d'un `Part::Feature` remet son placement à zéro : sur ce type d'objet, le placement EST celui de la forme. Vérifié — un tracé posé en (100, 50) tourné de 30° y retournait dès qu'on le reconstruisait, sans un mot. Le mode Calligraphie le faisait déjà depuis sa création. Le placement est désormais gardé et remis, dans les deux modes.

Essayé et rejeté : redresser le trajet aux croisements. L'axe médian de deux traits qui se croisent n'est pas deux droites — près du croisement le disque inscrit enfle et son centre est tiré vers l'intersection. Mesuré sur deux barres dont on connaît les axes : 10 % de la largeur à 90°, 20 % à 30°, 30 % à 20°, et une italique cursive n'est faite que de croisements rasants. Un filtre moyennneur corrige bien la déviation, mais il rabote de vraies courbes : sur le vrai enchaînement, Blacksword passe de 30 à 38 gestes — donc huit relevages, transits et plongées de plus — et Swirly perd 0,7 point de couverture, pour redresser deux dixièmes de millimètre. La déviation est une propriété de l'axe médian de cette lettre, pas un défaut : elle se réduit en choisissant une police dont les traits se croisent moins à plat.

Réglages clés : police · texte · largeur en mm · matériau · avance · puissance maxi. **Sortie :** objet fil + fichier G-code



Texte (trait simple)

Écrire un texte « bâton », un seul trait par branche.

Une police monotrait (façon table traçante) idéale quand le remplissage n'a pas de sens — les lettres à trou notamment. Crée un fil dans l'arbre, à graver ensuite avec le Marquage.

Les caractères qu'une police ne connaît pas sont **repliés** plutôt que perdus : « cœur » devient « coeur » sur celles qui n'ont pas la ligature, et ce qui reste introuvable est *nommé* dans la console.

Réglages clés : texte · police (spécimen visuel) · hauteur · espacements · alignement. **Sortie :** objet fil

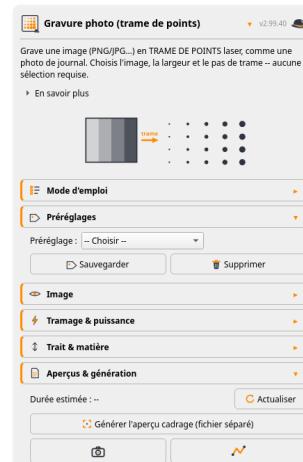




Gravure photo (trame de points)

Reproduire une image en niveaux de gris.

Sept tramages, nommés ici *exactement* comme dans le menu déroulant du panneau : **Diffusion (Floyd-Steinberg)** — densité de points identiques ; **Durée variable** — un point par case, la durée du pulse fait le gris ; **Lignes calibrées (nuancier)** — puissance par pixel via la courbe du nuancier ; **Diffusion en lignes (points fins, rapide)** — même diffusion, mais en balayage continu ; **Gros points Z (taille variable, artistique)** — c'est le *diamètre* du point qui rend le gris, par un Z propre à chacun ; **Similigravure (trame 45°, sans calibration)** — la trame des journaux, le gris est une *surface* ; **Lignes gravées (trait qui enfle)** — un trait continu dont l'*épaisseur* rend le gris. Une *mire* grave le même dégradé par les sept tramages, en bandes numérotées, pour les comparer d'un coup sur une chute — chaque bande dans son régime, faute de quoi la comparaison mentirait : les deux tramages à grain au foyer, et les lignes gravées à la vitesse où leur trait enfle encore.



Le fuseau : la largeur vient de la HAUTEUR

Moduler la **puissance** donne une valeur par case : la largeur change donc par **marches d'un pas**. Invisible au foyer au pas 0,20 mm, très visible en défocus au pas 1,16. Christophe, le 03/08/2026, croquis à l'appui : « cela me fait des lignes à étages... je pensais que la tête en Z allait se lever progressivement, ce qui aurait pour conséquence de grossir le trait progressivement ». Il avait raison, et le 0,1 → 1 mm qu'il dessinait n'est de toute façon *pas* atteignable par la puissance : au foyer elle ne donne que 0,12 → 0,20.

La case « **Fuseau : la HAUTEUR fait la largeur** » change donc le moteur : la tête se lève progressivement le long du trait, le point s'élargit, et la spirale devient un fuseau **continu** — du plus fin que le bois sache faire à sa plus large brûlure **mesurée**. Sur le hêtre de l'atelier : **0,18 → 3,43 mm**. Réservé à la spirale, qui est un trait unique : le Z n'y a jamais de fin de rangée à rattraper.

La puissance suit la largeur, sinon le large sort *pâle* : à S constant, un trait vingt fois plus large reçoit vingt fois moins d'énergie par mm² — c'est exactement ce qui avait donné une spirale marbrée au bout large et carbonisée au bout fin en juillet. S est donc proportionnel au diamètre, puis **borné à la plage mesurée**, et le panneau dit où la borne mord plutôt que de servir une recette inventée.

Le prix est le DÉTAIL, et il se chiffre. L'axe Z fait 1500 mm/min ; le trait ne peut donc pas grossir plus vite qu'une certaine pente. Sur hêtre, la course est de **54 mm**, si bien qu'un fuseau complet demande **14 mm** de trace à F200 et **32 mm** à F400 — soit 8 motifs en travers d'une image de 117 mm, ou 3,6. Le verdict l'annonce *avant* de graver, parce que c'est ce chiffre, et lui seul, qui dit ce que le mode saura rendre.

Pourquoi le générateur borne cette pente lui-même : **au-delà, LinuxCNC ne refuse pas**. Il ralentit tout le mouvement pour que le Z suive — donc le temps de pose change, donc la noirceur, sans que rien ne le dise. Le rabotage a d'ailleurs l'effet recherché : il *lisse*. Deux conséquences pratiques : la

spirale est échantillonnée finement le long de l'arc (0,4 mm) et non au pas radial, sans quoi la largeur changerait encore par marches de 3,4 mm ; et le bois nu n'est plus franchi à l'avance rapide, qui crèverait le budget de pente juste là où le fuseau redescend le plus vite.

Baisser la limite de pente n'est PAS le levier : passer de 7,5 à 3,0 fait gagner 13 % de temps pour une image visiblement plus molle, et 1,0 efface le visage. Le rabotage n'est pas coupable non plus — il *re-tire* 18 % du déplacement Z que l'image réclame. Les vrais leviers sont la **taille** (le temps va comme le carré) et le **pas**. Corollaire pour qui annonce une durée : elle doit sortir de l'estimateur sur le G-code émis, jamais d'un **trajet / vitesse** calculé sur le XY — celui-là est optimiste de 25 à 80 %.

L'avance rapide sur le bois nu, mais seulement là où le Z est plat. La première version l'interdisait partout, pour protéger le budget de pente. Vrai là où la tête monte ; faux hors de l'image, dans les coins que la spirale traverse puisqu'elle va jusqu'à la demi-diagonale — là le Z ne bouge pas. Sur une image de 50 mm au pas 1,0 ces coins font **41 % du trajet**, et l'interdiction coûtait un quart du job (56 → 43 min).

Une précision, parce qu'elle évite de courir après un mirage : le ruban de Vertigo est **symétrique** autour de la spirale — ses deux bords sont posés à $\pm$ largeur/2 sur la bissectrice. L'asymétrie qu'on croit voir vient de sa fenêtre d'échantillonnage, ancrée par son *coin* et non par son centre : la largeur en un point reflète l'image une demi-fenêtre plus bas à droite. Inutile de construire un ruban asymétrique pour l'imiter.

L'angle tourne la TRAJECTOIRE, pas seulement l'image. Tourner l'image seule grave le sujet *penché* avec des lignes droites — l'exact contraire de ce qu'on veut, constaté sur l'aperçu avant correction. Le bon couple : on échantillonne l'image tournée de $-\theta$ (les rangées horizontales y traversent le sujet à $+\theta$), *puis* on tourne la trajectoire de $+\theta$. Le sujet revient droit, les lignes restent à θ . Le cadrage suit la boîte tournée, et le rectangle gravé grandit — $50 \times 76 \rightarrow 116 \times 119$ mm à 30° — donc la largeur demandée est agrandie d'autant pour que le **sujet** garde sa taille. Réservé aux deux fuseaux : les trois autres tramages en balayage passent par un émetteur horizontal par construction.

À noter : les repères 6,4 / 13,2 ont été relevés sur le tramage en *rangées*, au foyer, avec des traits de 0,2 mm. Trois planches disent maintenant que la cible utile est plus basse sous le fuseau.

Et mettre le seuil blanc à 0. Le seuil coupe le faisceau dans les clairs, ce qui hache la spirale en pointillés — l'inverse du rendu visé, où le trait ne se coupe JAMAIS et où les clairs sont simplement fins. C'est l'intention d'origine du mode (« jamais de bois nu »), et ici c'est la bonne.

Vérifie le dégagement : la course annoncée par le verdict, au-dessus de la pièce, plus la hauteur de bec. Le verdict le rappelle au-delà de 40 mm — ce qui n'arrive plus qu'aux pas très larges.

Né d'un rendu essayé sur muffinman.io/vertigo. Le SVG qui en sort n'est pas gravable tel quel : c'est le **contour d'un ruban** (donc deux traits par tour une fois importé, qui fondent en aplat), et il module l'épaisseur de **0,02 à 0,80 mm** quand ce laser sait faire **0,10 à 0,30** au foyer — la moitié basse de sa gamme est sous le plancher de la machine. Ici la modulation sort de la table de largeurs **mesurée**, comme partout ailleurs dans l'atelier.

Le format décide. Mesuré sur le portrait réel (120 × 180 mm, pas 0,16, F1000, plafond S900) : la spirale grave la même longueur que les rangées (70,7 contre 72,6 m) mais parcourt **159 m à vide contre 19,9**, parce qu'elle couvre le disque circonscrit — sur un format 2:3, les coins sont 70 % de surface en plus. 91 min et 42 Mo, contre 75 min et 6 Mo en rangées. Sur un **carré** 120 × 120, elle retombe à 55 min et 25 Mo. **Ce tramage est fait pour un sujet carré ou rond** — ce qui est aussi, précisément, l'esthétique du rendu qui l'a inspiré.

Réglages clés : image · pas de trame · tramage · gamma. **Fichier :** gravure_photo.ngc



Catalogue (planche d'exemples)

Graver une planche d'exemples réels, numérotés.

Une planche de référence qui grave des exemples concrets (styles de trait, gravure remplie) avec leurs réglages, pour voir le *vrai* rendu sur votre matériau plutôt que de l'imaginer.

Fichier : catalogue.ngc



7.2 Découper & projeter

Traverser le matériau — ou habiller une surface 3D

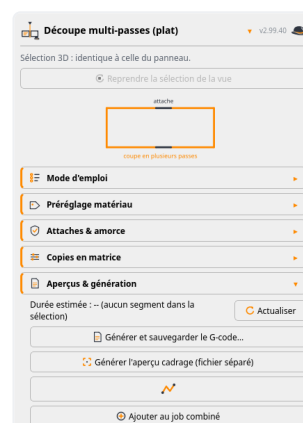


Découpe multi-passes (matériau plat)

Découper une pièce à plat, en plusieurs passes.

Enchaîne les passes à la profondeur voulue avec compensation de **kerf** (le trait de scie mesuré au préalable) pour des cotes justes.

Réglages clés : puissance · vitesse · épaisseur · nb passes · kerf. **Fichier :** decoupe_plat.ngc



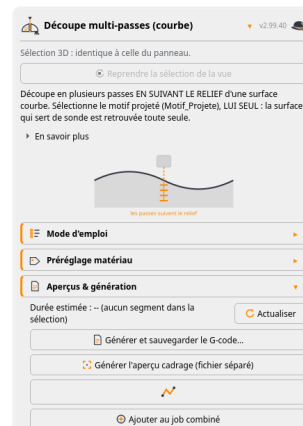


Découpe multi-passes sur surface courbée

Découper en suivant le relief d'une surface.

Comme ci-dessus, mais la hauteur suit une surface de référence. (À ce jour, les attaches ne sont posées qu'à plat.)

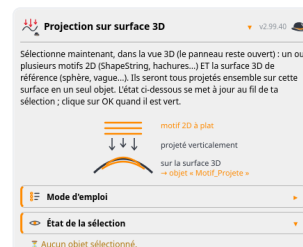
Fichier : decoupe_courbe.ngc



Projeter sur surface 3D

Coller un motif 2D sur une surface courbe.

Projette un texte ou des hachures sur une sphère, une vague... par projection verticale sur le solide. Étape de **préparation** : produit l'objet **Motif_Projete** que le Marquage grave ensuite en suivant le relief. C'est le **préalable à toute gravure sur pièce courbe** (§ 7.1).



Trois choses que l'ordre des opérations impose, et qui ne vont pas de soi. Christophe, 05/08/2026 : « faut les faire avant puis les projeter, c'est pas évident ».

- **Tout se prépare à plat, y compris le remplissage.** Un remplissage ou des hachures ne sont pas un réglage de gravure : c'est de la **géométrie**, le tracé même que le laser suivra. Il faut donc les fabriquer sur la forme plane *avant* de projeter. Une fois galbés, la Gravure remplie et les Hachures ne savent plus les faire — elles travaillent en 2D — et le disent désormais au lieu de sortir une planche blanche (v2.99.3).
- **Tous les motifs d'un coup, pas un par un.** On sélectionne l'ensemble des motifs 2D *et* la surface : ils partent en UN seul **Motif_Projete**. Le mode a été écrit pour ça dès l'origine, précisément pour éviter de le répéter motif par motif.
- **La projection tombe à la verticale.** Chaque point descend droit sur la surface : seule sa position X/Y compte, sa hauteur n'a aucune importance. Une paroi verticale ne reçoit donc rien (ses triangles sont invisibles vus de dessus), et sous un surplomb c'est la surface **la plus haute** qui prend le motif.

Sortie : objet « Motif_Projete » (motif + modèle 3D à sélectionner ensemble au marquage)

7.3 Tester & calibrer

Trouver les bons réglages — et les garder

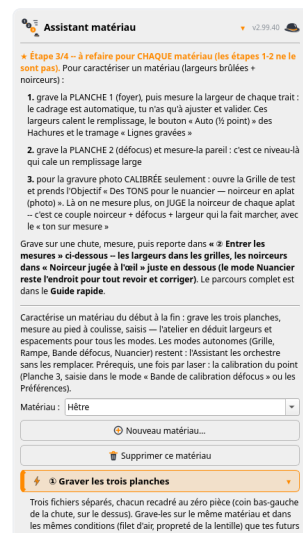


Assistant matériau

Caractériser un nouveau matériau du début à la fin, dans un seul panneau.

Regroupe les **trois planches** de calibration (foyer, défocus, largeur du point), la saisie des mesures au pied à coulisse, une photo du résultat et les déductions (largeurs brûlées, espacements de remplissage) — le **point d'entrée recommandé** pour un nouveau matériau, à la place des planches et grilles séparées. Une section ④ résume l'état du modèle (feed-aware ou non, tons mesurés) avec une **sonde d'interpolation** pour prévoir une largeur avant de graver.

Fichiers : `planche1_foyer.ngc` · `planche2_defocus.ngc` · `planche3_point.ngc`





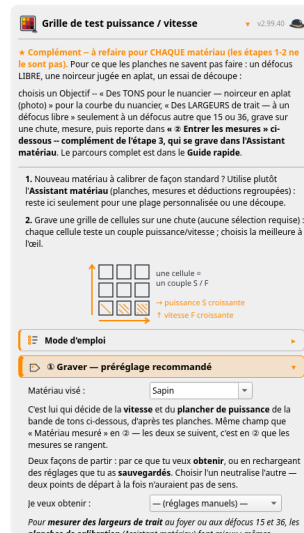
Grille de test puissance/vitesse

Balayer une matrice de réglages sur une chute.

Grave une grille où puissance et vitesse varient case par case.

Un menu « Objectif » propose une recette de départ ; le style de remplissage est réglable. On lit la meilleure case à l'œil. Aucune sélection n'est requise : la grille fabrique ses propres cases, contrairement au mode *Gravure remplie* qui attend une face.

Le menu « Objectif » en tête de la section ① remplit d'un coup *toute* la grille — mode, plages S/F, remplissage, défocus des cellules — selon la **donnée que vous cherchez à obtenir**. Il y en a cinq, et ce ne sont pas cinq variantes du même essai : chacun produit une mesure que les autres ne peuvent pas produire.



OBJECTIF	CE QU'IL GRAVE, ET CE QU'ON EN TIRE
Des TONS pour le nuancier – clairs, au point élargi	16 cases en aplat, du très clair (S200/F4000, $\approx 5\%$) au foncé (S600/F1000, $\approx 74\%$), point élargi à ≈ 1 mm. Complète le bas du nuancier : les tons clairs sont ceux qui manquent presque toujours, parce que les planches de largeurs ne les atteignent pas.
Des LARGEURS de trait – à un défocus libre	Traits isolés et horizontaux , à défocus 15 mm et en vitesse lentes . C'est lui qui débloquent la photo calibrée et le « ton sur mesure » — détaillé plus bas. À n'employer que pour un défocus <i>autre</i> que 15 ou 36 : à ces deux niveaux la Planche 2 fait le même travail avec un cadrage de mesure automatique.
Des TONS pour le nuancier – noirceur en aplat (photo)	Des aplat s, pas des traits : une seule vitesse, un seul défocus, le pas d'une vraie photo. C'est la planche qui alimente la courbe noirceur → énergie — détaillée plus bas.
Une DÉCOUPE – trouver le réglage qui traverse	Contours seuls (aucun remplissage, aucun cadre), S400 → S1000 sur F100 → F600 : on cherche la case qui traverse proprement en une passe . C'est le seul

objectif en mode découpe, et le seul dont la réponse se lit en retournant la chute.

Chaque objectif affiche sa **note** sous le menu : ce qu'il faut mesurer, où le reporter, et les pièges propres à cette planche. Les valeurs restent modifiables à la main après coup — l'objectif est un point de départ, pas un verrou.

Trajet des tramages à points

Dans les tramages à points, chaque point est gravé par un **micro-trait** — jamais par une pause faisceau allumé, qui ne graverait rien sur cette machine. Les points sont parcourus en serpentín, une ligne sur deux inversée, pour économiser du déplacement.

Encore faut-il que le micro-trait lui-même suive ce sens. Gravé toujours de gauche à droite, il obligeait la tête, sur une ligne parcourue vers la gauche, à se placer avant le point, brûler vers la droite, puis reculer au-delà du point suivant : un aller-retour par point. Sur 2400 points, corriger le sens ramène le déplacement à vide de 955 à 787 mm — **18 % de moins**, pour une gravure rigoureusement identique.

Ce correctif avait été appliqué à la trame de points et à la mire, mais **pas au tramage « Gros points Z »**, qui a gardé le défaut un mois de plus. Rien ne pouvait le signaler : le G-code était valide et l'image gravée juste — seul le *bruit* de la machine trahissait le va-et-vient, et c'est ainsi qu'il a été retrouvé. Sur un portrait de 134 × 201 points, cela faisait **26 600 changements de sens** et 5,3 mètres de déplacement inutile. Un test interroge maintenant les **sept** tramages, et non celui qu'on vient de réparer : il compte les inversions de sens à l'intérieur d'une même ligne, et la réponse attendue est zéro.

La noirceur ne dépend pas que de l'énergie : la vitesse compte aussi

Expérience faite : quatre bandes gravées à énergie par millimètre *rigoureusement identique* — à F650, F1000, F1500 et F2000 — ne rendent pas la même chose. **Plus c'est lent, plus c'est foncé**. La bande à F650 saturait au noir dès le deuxième palier là où celle à F2000 tenait jusqu'au sixième.

Le **temps d'exposition** intervient donc, en plus de l'énergie. Conséquence directe : une courbe noirceur → énergie n'est valable **qu'au voisinage de la vitesse à laquelle elle a été mesurée**. Et une courbe bâtie sur des tons relevés à des vitesses différentes — les clairs vite, les foncés lentement — est incohérente d'entrée, sans qu'aucune formule puisse la rattraper.

D'où la manière de calibrer : graver **une seule bande, à une seule vitesse**, dans les conditions exactes d'une photo (même défocus, même pas de balayage), en juger les paliers, et s'y tenir ensuite.

Section « Trait & matière » : graver dans le régime de la calibration

Quatre réglages du mode **Gravure photo** sont indissociables et tiennent désormais dans une seule section : le **matériau** (donc la calibration de référence), la **vitesse des lignes**, la **largeur du point** et le **pas de trame**. Ils étaient auparavant dispersés dans trois sections différentes, ce qui rendait leur incohérence invisible.

Le piège : la « largeur du point » pilote en coulisses la **hauteur Z**, donc le défocus. Si elle ne correspond pas au défocus auquel vos tons ont été mesurés, la courbe ne s'applique plus. Et l'écart n'est pas proportionnel mais **en carré du rapport des diamètres** : un point 1,45 fois plus serré concentre la même puissance sur une surface 2,1 fois plus petite. Cas réellement rencontré : nuancier mesuré à défocus 15, panneau réglé sur 8,75 — toutes les photos calibrées sortaient uniformément noires, sans le moindre message.

Un **verdict en direct** s'affiche maintenant sous les trois champs. Il compare le défocus ET la vitesse demandés à ceux de la calibration, signale le recouvrement (pas plus fin que le trait = chaque point repassé plusieurs fois, ou pas plus large = bois nu entre les lignes), et propose un bouton qui aligne largeur et vitesse d'un clic. Le volet « régime » ne concerne que le tramage « Lignes calibrées », seul à consulter la courbe.

Lignes gravées : le trait enfle, et les gros traits ne servent à rien

Une ligne continue par rangée, faisceau jamais coupé, dont l'**épaisseur** rend le gris : fine dans les clairs, épaisse dans les foncés, comme une gravure sur cuivre. Là encore le gris est une géométrie — mais lue cette fois sur les **largeurs brûlées mesurées**, pas sur le nuancier. Conséquence directe : plus jamais de bois nu, ce qui était le reproche fait au premier portrait calibré, dont 27 % de la surface n'était pas gravée du tout.

Ce mode s'est longtemps gravé **au foyer**, et rien d'autre. Le raisonnement était que ce qui compte n'est pas la largeur absolue mais le **rapport** entre le trait le plus fin et le plus épais : en défocus le point est déjà large, sa taille est fixée par la géométrie du faisceau, et la puissance n'y change presque rien. La table de juillet donnait 3,0× au foyer contre 1,6× à 15 mm — l'affaire semblait close.

Un sélecteur « **Défocus du trait** » propose donc, à côté du foyer, les hauteurs **réellement mesurées** pour le matériau — et elles seules. Ce n'est pas une prudence de principe : entre deux niveaux le modèle interpole, et un niveau qui ne porte qu'une seule puissance rend la même largeur à S200 et à S1000, soit un rapport de 1,00× que rien à l'écran n'expliquerait. Une hauteur libre offrirait surtout des régimes muets.

Ce qu'on échange. Au foyer, un portrait de 120 mm au pas 0,20 fait 600 rangées ; à défocus 15 au pas 1,20, il en fait 100. Il y a donc six fois moins de détail — et c'est le but : « ce n'est pas le nombre de lignes qui compte, c'est le style donné au portrait par l'épaisseur de ligne, même s'il y a moins de détails » (Christophe, 03/08/2026). Le rendu quitte le grain photographique pour la gravure sur bois. Le verdict du panneau nomme la hauteur dans sa première phrase, parce qu'une plage sans son régime

ne dit pas de quelle gravure elle parle : 0,12 → 0,20 mm et 0,67 → 1,16 sont le même bois, la même vitesse, et deux gravures sans rapport.

Le contraste réellement obtenu, lui, est l'**écart de couverture** : de fin/pas à épais/pas, ce dernier plafonné à 100 %. Ce n'est pas le rapport $1 - \text{fin}/\text{épais}$, qui ne dépend pas du pas et resterait figé pendant que l'image change à vue d'œil. Et cet écart passe par un **maximum au pas qui vaut exactement le trait le plus épais** : au-dessus les noirs n'atteignent jamais 100 %, en dessous ils y sont déjà et seuls les clairs s'assombrissent. Sur hêtre à F800 (0,10 → 0,30 mm) : **67 points au pas 0,30**, mais 50 au pas 0,40 comme au pas 0,20 — resserrer le pas *noircit* l'image sans lui rendre du contraste. Le panneau affiche l'écart réel et nomme le pas optimal.

Mesures relevées sur hêtre. Au foyer, la largeur brûlée n'est pas la taille du point : c'est **l'endroit où le profil du faisceau franchit le seuil de brûlure du bois** — et ce point-là se déplace beaucoup quand la puissance monte. D'où le 3×, là où le défocus plafonne à 1,4×.

Deuxième fait mesuré : la vitesse ne change rien tant qu'on reste dessous — 0,10 à 0,30 mm à F200, F400 et F800, autant prendre la plus rapide — mais à partir de **F1500 la largeur est plate** à 0,10 mm quelle que soit la puissance. Au-delà le trait n'enfle plus du tout, le mode n'a plus d'objet, et le panneau le dit franchement plutôt que de graver des lignes uniformes.

Entre les deux, rien n'est plat : le haut de la plage **s'effondre progressivement**, et c'est le piège de ce mode. Le trait le plus épais tombe à 0,23 mm à F1000 et à 0,17 mm à F1200, quand le plus fin ne bouge pas. Le premier portrait gravé dans ce tramage l'a été à **F1000 au pas 0,30** : 43 points de contraste au lieu de 67, soit un tiers de la gamme perdu — et le résultat, sans surprise, « pas concluant du tout ».

VITESSE	TRAIT	RAPPORT	CONTRASTE AU PAS 0,30
F200 à F800	0,10 → 0,30 mm	3,0×	67 points
F1000	0,10 → 0,23 mm	2,3×	43 points
F1200	0,10 → 0,17 mm	1,7×	24 points
F1500 et au-delà	0,10 mm, plat	1,0×	aucun

Le panneau ne refusait alors rien — la plage n'était pas plate — et son conseil visait *le pas* : « contraste maximal au pas 0,23 mm ». Conseil exact et pourtant trompeur, car il se calcule sur la plage mesurée **à la vitesse demandée** : le suivre aurait aligné le pas sur une plage déjà amputée, alors que le pas était bon et qu'il suffisait de ralentir. La règle est donc **la vitesse d'abord, le pas ensuite** : au-delà de la plus rapide utile, le panneau nomme cette vitesse et chiffre ce qu'on récupérerait, avant tout conseil sur le pas.

Troisième fait, celui-là relevé à l'œil et non au pied à coulisse : ces tramages ont besoin de **place**. Le gris y est rendu par la forme d'une marque visible à l'œil nu — épaisseur du trait, diamètre du point — et il faut assez de marques en travers du sujet pour que le motif s'efface derrière lui. Le portrait raté mesurait 80 mm de large : le grain se voyait plus que le visage. **Viser 100 mm au minimum**, et le

panneau le rappelle sous la grille pour les trois tramages concernés (gros points Z, similigravure, lignes gravées). Ce n'est pas une mesure, c'est un jugement d'atelier — mais il vient d'une planche gravée.

Un piège à connaître si ce code est repris : la table des largeurs brûlées **borne aux mesures**. Sous la plus faible puissance relevée, elle renvoie la largeur du bord — si bien que S0 semble donner un trait de 0,10 mm alors qu'il ne grave rien. Un tramage qui promet une ligne jamais coupée ne doit donc jamais descendre sous la plage mesurée ; les niveaux partent de la plus faible puissance *réellement mesurée*.

La zone F800-F1500 n'avait jamais été mesurée

Les colonnes de saisie au foyer étaient 200, 400, 800, 1500, 3000 : **rien entre 800 et 1500**. Or c'est exactement là que ce tramage se joue. Sur le hêtre de l'atelier, à F800 le trait va de 0,10 à 0,30 mm, à F1500 il est *plat* à 0,10 quelle que soit la puissance. Tout ce que l'atelier annonçait entre les deux — « F1000 → 0,23 mm », « F1200 → 0,17 » — était une **droite tracée entre deux mesures**, jamais une mesure. Personne n'avait brûlé une ligne à F1000 pour la mesurer, et c'est pourtant ce chiffre qui décidait de refuser une vitesse.

La **Planche 1** grave donc désormais sept vitesses (200, 400, 800, **1000, 1200**, 1500, 3000), et la grille de saisie ② a les colonnes correspondantes. Deux points intérieurs suffisent à encadrer l'effondrement ; quatre rendraient la grille illisible dans un panneau étroit. L'enjeu est concret : si le trait tient sa pleine plage jusqu'à F1200, un portrait passe de 69 à environ 46 minutes.

Le palier le plus bas n'est pas « rien » : le blanc sortait gris

Le piège du paragraphe précédent a une conséquence que personne n'avait tirée. Puisque le niveau le plus bas de ce tramage est la **puissance la plus faible mesurée** — S200 sur hêtre, soit un trait de 0,10 mm — un pixel **blanc pur** gravait un vrai trait. Au pas 0,30, cela fait **33 % du bois brûlé pour représenter du blanc**. Un fond blanc sortait donc gris uni, et toute la photo s'en trouvait assombrie : le contraste tenait dans 33 → 100 % au lieu de 0 → 100.

Le plus gênant est que l'atelier l'écrivait depuis toujours. L'en-tête de chaque fichier annonce (Trait : 0.10 a 0.30 mm -- couverture 33 a 100 %) : le chiffre était là, calculé, imprimé — et rien ne le consommait. Constaté en cours de gravure le 31 juillet 2026, sur le bois, comme toujours dans cet atelier.

Pourquoi ce mode n'avait pas de seuil de blanc, et pourquoi c'était une erreur de raisonnement.

Il a été conçu sur le principe « jamais de bois nu », en réponse au portrait calibré qui laissait 27 % de la planche vierge. Mais ces 27 %, c'étaient des *trous dans les demi-teintes* — le bois refusant de marquer là où il aurait dû. Laisser le *fond blanc* intact est l'inverse : c'est exactement ce que « blanc » veut dire. Les deux ont été confondus, et la règle appliquée trop largement.

Le champ « **Seuil blanc** » est donc actif pour ce tramage aussi. Sous cette noirceur, le bois reste nu. Deux points valent d'être connus :

- **Le mouvement reste continu.** Le faisceau s'éteint, la tête ne s'arrête pas : une plage blanche à l'intérieur d'une rangée est traversée par un **G1** à la même avance, puissance nulle — jamais un **G0**. Le seuil *demi-*

nue même le nombre de changements de puissance, donc il ne peut qu'aider le problème décrit au chapitre 3.

- **C'est une marche** : sous le seuil, bois nu ; au-dessus, le trait apparaît d'un coup à 33 % de couverture. Sur un fond blanc franc c'est précisément ce qu'on veut ; sur un dégradé doux vers le blanc, cela pose un contour visible. D'où la deuxième option ci-dessous.

Plafonner la puissance : la largeur n'est pas la profondeur

Un fait relevé à l'établi le 31 juillet 2026, en pleine gravure, et qu'aucune mesure de l'atelier ne pouvait annoncer : à pleine puissance sur hêtre à F800, le trait fait bien les 0,30 mm promis — mais il **creuse**. La surface ressort **striée** au lieu d'être marquée.

La raison est simple et vaut d'être retenue : la table des largeurs brûlées ne connaît que la **largeur**. La **profondeur** n'a jamais été mesurée, et elle ne se déduit pas de la largeur. Le modèle est donc muet sur ce point — comme il l'était sur le temps d'exposition avant les quatre bandes à énergie égale. D'où un réglage à la main plutôt qu'un calcul : le champ « **Puissance maxi du trait** », qui borne la puissance du trait le plus noir.

Plafonner rogne le haut de la plage, et le verdict affiche aussitôt ce que ça coûte. Sur hêtre à F800, au pas 0,30 :

PLAFOND	TRAIT LE PLUS ÉPAIS	COUVERTURE MAXI	CONTRASTE
S1000 (aucun plafond)	0,30 mm	100 %	67 points
S950 (95 %)	0,29 mm	96 %	62 points
S900 (90 %)	0,28 mm	92 %	58 points
S800 (80 %)	0,25 mm	83 %	50 points

Et ces points perdus sont en grande partie théoriques — établi le 31/07/2026, sur hêtre à F800, au foyer, pas 0,30, par deux mesures indépendantes. D'abord **deux portraits jumeaux**, le même fichier gravé à 100 % puis à plafond S900 (parcours rigoureusement identique, seule la puissance change) : noirceur d'ensemble équivalente, mais des **noirs profonds plus denses à 90 %** — la surface sous 30 % de luminance passe de 20,4 à 22,6 %. Ensuite une **planche de dix aplats** de S600 à S1000, classée à l'œil : le classement est *parfait* par groupes de puissance, mais dans le groupe de tête **S925 est jugé le plus foncé, devant S950, S975 et S1000**. Autrement dit la noirceur **sature vers S900-950** ; au-delà on creuse sans noircir. **92 % est le réglage retenu à l'atelier**. Une précision qui compte : l'œil ne distingue rien en dessous de ~75 S d'écart sur ce bois, donc régler ce plafond au S près n'a aucun sens — et le constat vaut pour *ce* bois à *cette* vitesse, à regravier ailleurs.

Sur le papier, à 90-95 % la perte reste modeste — 5 à 9 points sur 67 — pour un bois qui n'est plus entamé. En dessous, on paye vite : les noirs cessent d'être pleins et il reste du bois nu entre les lignes. Le plafond ne fabrique jamais une largeur intermédiaire : il retire des *paliers mesurés*, et garde ce qui a été relevé au pied à coulisse en dessous. Réglé sur S max, il n'a aucun effet.

Un plafond descendu *sous* la plus faible puissance mesurée ne laisse plus aucune plage où le trait puisse enfler : le mode refuse, et le message accuse alors le **plafond** — pas la vitesse, qui n'y est pour rien.

Fond pointillé : combler la marche

Le sélecteur « **Sous le seuil** » décide ce que devient une case passée sous le seuil de blanc :

CHOIX	CE QUI EST GRAVÉ	QUAND
Bois nu	Rien du tout. Net et franc.	Fond blanc franc, dessin encré, logo — le cas le plus courant.
Pointillé dégressif	Le trait le <i>plus fin</i> , mais intermittent , de plus en plus clairsemé vers le blanc pur.	Photographie, dégradé doux vers le blanc, ciel.

L'intérêt du pointillé est qu'il fait ce que la *largeur* ne peut pas faire. La table des largeurs s'arrête à la puissance la plus basse mesurée : en dessous de 0,10 mm de trait, il n'y a rien. Espacer ce trait le plus fin est donc le **seul moyen de descendre sous le plancher du mode**. La couverture balaie alors continûment 0 → 33 % au lieu de sauter, et la marche disparaît.

La trame employée est **ordonnée** (matrice de Bayer 4×4), pas une diffusion d'erreur : déterministe, elle ne bave pas d'une ligne sur l'autre et ne coûte rien par pixel — et ce tramage tient à ne faire aucune diffusion, ce qu'un test vérifie.

Un réglage a dû être corrigé pour que le raccord soit exact. Au-dessus du seuil, la plage de noirceur restante est désormais **remise à l'échelle** sur toute la plage de largeurs. Sans cela, un seuil à 8 % rendait les paliers les plus fins inutilisables : la case la plus claire encore gravée sortait à 0,116 mm au lieu de 0,10 — une partie de la plage mesurée gâchée, et 5 points de couverture d'écart entre les deux branches. Mesuré après correction : **33,3 % de part et d'autre du seuil**, le raccord est franc-bord. À seuil nul le remappage est l'identité, donc les fichiers déjà gravés restent reproductibles.

Le verdict « Trait & matière » le dit maintenant *avant* de graver : à seuil nul, il annonce en toutes lettres que le blanc pur gravera tant de pour cent de couverture. À 0, le comportement d'origine est conservé à l'identique — faisceau jamais coupé.

Et il le dit en ROUGE. Il l'écrivait déjà, mais sous une coche verte : personne ne lit un avertissement sous un ✓. Un aperçu au fond gris uni est parti comme ça le 31 juillet 2026 alors que le panneau l'annonçait mot pour mot. Sur ce tramage, un seuil à 0 rend donc le verdict rouge — et il rappelle au passage que le choix « Sous le seuil » est alors sans effet, puisque rien ne passe sous un seuil nul.

Similigravure : quand le gris cesse de dépendre du bois

Les cinq premiers tramages demandent au bois de *rendre* un gris — par la puissance, par la durée, ou par la densité de points identiques. Près du seuil de brûlure, le bois n'en fait qu'à sa tête : c'est le fil qui tranche, et les demi-teintes sortent irrégulières. Le sixième tramage supprime le problème à la racine.

La **similigravure** est la trame des journaux : une maille régulière à 45°, où c'est le **diamètre du point** qui rend le gris. Chaque point est brûlé à fond, toujours pareil. Le gris n'est plus une réponse du matériau mais une **surface**, donc de la géométrie. Aucun nuancier n'est consulté, aucune courbe, aucun régime à respecter.

La maille est portée par les vecteurs (k, k) et $(-k, k)$ du réseau de pixels. En posant $u = x+y$ et $v = y-x$, ces deux vecteurs deviennent $(2k, 0)$ et $(0, 2k)$: la maille se lit en arithmétique entière exacte, l'angle vaut 45° *sans arrondi* — donc pas de moiré — et elle compte $2k^2$ pixels, soit autant de niveaux de gris. Chaque maille allume ses N pixels les plus proches du centre, avec $N = \text{noirceur moyenne} \times 2k^2$: la surface couverte vaut exactement la noirceur demandée. Vérifié de 0 à 100 % de noirceur, à un pixel de maille près.

Un détail qui ne se voit pas à l'œil mais fausse l'image : les rangs d'allumage sont classés autour du **point du réseau**, alors qu'une simple division entière découpe des cases décalées d'une demi-maille. Sans recentrage, le gris appliqué à un point vient d'une zone voisine et non de l'endroit où le point sera brûlé — l'image glisse d'une demi-maille et les points s'y étalent. C'est un test de compacité, pas l'œil, qui l'a trouvé.

La promesse « surface = noirceur » tient à une condition : **les lignes de balayage doivent se toucher**. Un trait plus étroit que le pas laisse du bois nu entre les lignes, les points sortent peignés et toute l'image s'éclaircit dans le même rapport. Sur hêtre au foyer à F2000, le trait brûlé ne fait que 0,10 mm : le pas doit suivre, ou il faut ralentir. Le panneau compare les deux et prévient, chiffre à l'appui.

L'aperçu photo : voir la planche avant de la brûler

Le mode **Gravure photo** affiche un rendu du résultat sur fond bois — une vignette dans le panneau, et un **Aperçu photo** plein format au bouton. Chaque tramage y est peint *comme il grave* : densité de points pour les diffusions, diamètre variable pour les gros points Z, gris continus pour les lignes calibrées.

Ça n'a pas toujours été le cas. La vignette traitait tout ce qui n'était pas « Durée variable » comme un tramage Floyd-Steinberg : le tramage **Lignes calibrées**, qui grave des gris continus modulés pixel par pixel, s'affichait en points noirs et blancs. Un portrait a été gravé sans que rien ne signale que ses demi-teintes étaient trop claires — l'aperçu *ne pouvait pas* le dire.

Pour les lignes calibrées, l'aperçu ne refait surtout pas ses propres calculs : il appelle la **fonction même du générateur** pour convertir chaque noirceur en puissance, puis remonte de la puissance à la noirceur obtenue. Il ne peut donc pas montrer autre chose que ce que la machine recevra. Ce détournement rend visibles deux pertes que la noirceur demandée cache : les pixels sous le **seuil blanc**, qui laissent le bois nu, et les ombres **écrasées sur la puissance maximale**, qui perdent toute nuance entre elles. L'aperçu en annonce les pourcentages.

Une mesure hors de son domaine reste un piège. Les tramages à points brûlent en micro-traités dont la vitesse vient de la *durée du pulse* — souvent F200 à F1200, alors qu'un nuancier est mesuré bien plus vite. Interrogé hors de sa plage, le nuancier renvoie la valeur du bord **sans le signaler** : le point le

plus bref et le plus long ressortaient à la même noirceur, et l'aperçu affichait une photo parfaitement plate qui avait pourtant l'air d'une mesure. L'atelier compare désormais le régime du tramage aux vitesses réellement mesurées ; hors plage, il bascule sur le modèle théorique et l'écrit : « gris théoriques... à valider sur une chute ».

La puissance se calcule sur la largeur MESURÉE du ton visé

La fluence d'un ton vaut $P / (\text{largeur} \times \text{vitesse})$, où la largeur est celle du trait *réellement brûlé*, relevée au pied à coulisse. Elle varie beaucoup avec la puissance : sur le hêtre, de 0,40 mm sur les tons clairs à 1,00 mm sur les noirs, pour un point optique de 1,16 mm — à faible puissance, seul le cœur du faisceau dépasse le seuil de brûlure.

Pour viser une noirceur, l'atelier réinverse donc cette fluence **avec la largeur mesurée de ce ton-là**. L'identité se referme exactement : $S = \text{fluence} \times \text{largeur} \times \text{vitesse}$ redonne l'énergie par millimètre du ton qui avait produit cette teinte. Vérifié sur les six tons du hêtre, à 1,7 % près.

Y substituer une largeur géométrique casse cette identité. Une version antérieure utilisait le pas de balayage : une cible à 10 % réclamait alors S230 au lieu de S120, près du double d'énergie, et la mire sortait noire sur toute sa longueur.

À défaut de largeur mesurée : le pas, pas la largeur du trait

La courbe du nuancier est calibrée sur des **traits isolés**, gravés espacés, en un seul passage. Une photo, elle, balaie des lignes qui **se recouvrent** : un trait de 0,80 mm posé tous les 0,30 mm repasse près de trois fois sur le même bois. Convertir la fluence en puissance avec la *largeur du trait* délivrait donc près du triple de l'énergie voulue, et toute gravure calibrée sortait noire — y compris la bande 3 de la mire, censée justement valider la calibration.

Ce qui compte n'est pas la largeur d'un trait mais **de combien on avance entre deux lignes** : l'énergie reçue par unité de surface vaut $P / (\text{pas} \times \text{vitesse})$. La puissance se calcule donc sur le **pas**, et la largeur disparaît d'elle-même de la formule — signe qu'on tient la bonne grandeur. Cas inverse : si le pas dépasse la largeur, il reste du bois nu entre les lignes et c'est alors la largeur qui gouverne ce qui brûle.

Les recettes photo : une affirmation, pas un raccourci

Une recette n'est pas un confort d'ergonomie, c'est une **affirmation** : « avec ces réglages, ce matériau rend ces gris ». Les quatre recettes livrées jusqu'à la v2 visaient toutes le MDF, aucune ne couvrait les deux tramages sans calibration — et la recette calibrée MDF demandait un point de **0,80 mm**, soit un défocus de 8,75, alors que son propre nuancier est mesuré à **12,20**. L'erreur allant comme le *carré* du rapport des diamètres, cela faisait **1,56 fois** trop de densité de puissance. Et le *gamma* **1,5** de ces recettes, justifié par un commentaire « photos saturées », ne faisait que compenser ce mauvais régime au lieu de le corriger.

Les six recettes de la v2 sont chacune adossée à une mesure relevée dans la configuration, et le gamma est revenu à **1,0** : le régime remis d'aplomb, un gamma neutre redevient le bon point de départ. Un test refuse désormais toute recette calibrée hors du régime de ses propres tons — défocus, vitesse dans la plage mesurée, et pas qui ne dépasse pas la largeur brûlée du ton le plus *foncé*. Ce der-

nier critère mérite sa nuance : un ton clair brûle forcément plus fin, et le bois nu qu'il laisse est précisément ce qui le rend clair. Exiger la couverture sur le ton le plus clair ferait resserrer le pas pour rien.

Le test applique aussi chaque recette pour de vrai et exige que le panneau rende un verdict **vert** dessus. Une recette qui ne passe pas son propre verdict n'est pas une recette.

Deux choses que ces recettes ont obligé à réparer, et qui valent pour tout l'atelier : un pré réglage désignait son tramage par son **rang** dans la liste (réorganiser la liste l'aurait retourné sur un autre tramage, en silence — il porte maintenant une clé), et le **matériau n'était pas mémorisé du tout** alors que tout le régime en dépend, si bien qu'une session repartait sur le premier matériau du nuancier sans le dire.

Objectif « Des **LARGEURS** de trait — à un **défocus libre** »

C'est celui qui débloque la **gravure photo calibrée** et le « ton sur mesure ». Ces deux fonctions s'appuient sur une courbe noirceur → énergie qui n'accepte QUE les tons réunissant trois choses : un **défocus**, une **noirceur jugée** et une **largeur mesurée**. Un nuancier riche en noirceurs mais sans largeurs ne leur sert à rien — c'est le piège classique, et il est silencieux.

L'objectif règle la grille à **défocus 15 mm**, en **vitesse lentes (F200 à F800)**, avec un espacement de hachures de **3 mm**. Ce chiffre n'est pas arbitraire : à ce défocus le point fait environ 1,15 mm, il reste donc près de 2 mm de bois nu entre deux traits, et chaque trait se mesure seul au pied à coulisse. L'objectif voisin, « grille au foyer », ne convient pas ici : une largeur mesurée au foyer n'entre pas dans la courbe.

Le défocus s'applique aux **cellules seules**, via le champ « Défocus des cellules ». Les **étiquettes d'axe et le cadre restent au foyer**, donc nets et lisibles. Écarter tout le job en montant la « Hauteur (Z) de test » défocaliserait aussi les chiffres, qui baveraient — et cette hauteur, mémorisée d'une session à l'autre, resterait ensuite collée dans tous les jobs suivants. Choisir un objectif remet toujours la hauteur de test au foyer.

Pourquoi si lent ? En défocus, le point est environ quatre fois plus large qu'au foyer, donc la densité de puissance chute d'autant : un trait *isolé* cesse de marquer bien avant les vitesses où vivent les tons clairs. Une première version de cet objectif visait F1000 à F4000 — la plage des tons du nuancier — et 18 cases sur 25 sont sorties vierges sur du hêtre. Conséquence à accepter : le haut de l'échelle de noirceur restera peut-être sans largeur mesurable. C'est une limite physique, pas un réglage à forcer ; mesurez ce qui est lisible.

Cette planche-ci se **mesure**, elle ne se juge pas : un aplat ne se juge pas sur des traits espacés de 3 mm. Pour la *noirceur*, enchaînez sur l'objectif « Des TONS pour le nuancier — noirceur en aplat » décrit juste en dessous, qui grave des aplats dans les conditions d'une photo et pré-remplit la saisie du ton. Une dizaine de cases bien réparties du clair au foncé suffisent à faire repartir la courbe.

Attention à ce que « largeur » veut dire pour la version en aplat : c'est *l'espacement des hachures* qu'il faut saisir, pas une mesure au pied à coulisse. En balayage, ce qui gouverne l'énergie reçue par le bois n'est pas la largeur d'un trait mais **de combien on avance entre deux passes**. Saisir la largeur du

trait à la place fausse le calcul d'un facteur qui peut atteindre 8. Les deux gravures de la même grille ne se saisissent donc pas de la même façon : à 3 mm on note la *largeur brûlée*, à 1 mm on note la *noirceur* et l'espacement comme largeur.

Objectif « Des TONS pour le nuancier — noirceur en aplat »

C'est l'objectif qui alimente la **courbe noirceur** → **énergie**, donc la photo calibrée et le « ton sur mesure ». Il grave une bande d'**aplats** — pas des traits isolés — dans les conditions exactes d'une photo : même vitesse, même défocus, même pas de hachure que la gravure visée.

Une seule vitesse, et c'est toute sa raison d'être. La noirceur ne dépend pas que de l'énergie : à énergie par millimètre rigoureusement égale, plus c'est lent, plus c'est foncé. Une courbe bâtie sur des tons mesurés à des vitesses mélangées est donc incohérente par construction — c'était le cas, les clairs à F2000 et les foncés à F650, et aucune correction de formule ne pouvait la sauver. Corollaire à accepter : cette calibration ne vaut que pour la vitesse, le défocus et le pas gravés. Changer l'un des trois pour la gravure finale la sort de son régime.

Les puissances sont volontairement dans le désordre. Rangées par ordre croissant, les cases se jugent les unes par rapport aux autres et l'œil reconstruit une progression régulière qui n'existe pas : une première série ainsi jugée est ressortie en progressions arithmétiques exactes, avec 11 % de paires inversées par rapport à l'ordre réel des énergies. Chaque case porte sa puissance gravée en dessous, la lecture reste directe.

Sur un matériau jamais mesuré, rien n'est recalé — et c'est dit. La première planche est alors un **repérage** : ses cases vierges sont elles aussi une mesure. Reportez-les en ② avec une noirceur de 0, et la bande suivante partira du bon plancher. Un ton jugé au-dessus de 0 rouvre également la vitesse — indispensable, puisqu'une largeur en défocus ne se mesure qu'aux vitesses lentes des planches (F800 au plus) ; sans cela l'atelier rabattrait la bande à F800 indéfiniment, même après l'avoir vue marquer plus vite.

Le report se fait **sur place**, dans « Noirceur jugée à l'œil » au bas de la section ② : plus d'aller-retour vers le mode Nuancier avec les valeurs retenues de mémoire. Choisir cet objectif **pré-remplit la vitesse, le défocus et la largeur** — cette dernière valant l'espacement des hachures, comme expliqué plus haut. Pré-remplir vaut mieux qu'avertir : c'est l'erreur qui fausse la courbe d'un facteur 8. Il ne reste à saisir que la noirceur jugée et la puissance de la case.

Le défocus de la planche est libre

Le champ « Défocus des cellules » accepte n'importe quelle hauteur, et la saisie ② **ouvre une grille pour celle-là** — même si ce niveau n'a jamais été mesuré. Elle en ouvre une aussi pour chaque niveau déjà mesuré sur le matériau. Auparavant il n'existait que deux grilles, 15 et 36 mm : graver à 25 mm ne menait nulle part, la mesure n'avait aucune case où aller. Une hauteur à moins de 2 mm d'un niveau existant réutilise sa grille plutôt que d'en créer une jumelle.

Un niveau ne compte que s'il est mesuré comme un niveau, c'est-à-dire sur au moins **deux puissances**. Une mesure unique ne dit rien de la variation en puissance : l'atelier lui donnerait la même largeur à S200 et à S1000, ce qui aplatirait tout l'intervalle qu'elle borne. Concrètement, quatre relevés

isolés faits à la rampe Z faisaient chuter la largeur annoncée à S1000/F200 de 2,26 à 1,50 mm à 30 mm de défocus — et deux pas de hachure n'avaient plus aucun réglage capable de les couvrir. Ces relevés restent enregistrés et visibles ; ils reprennent tout leur poids dès qu'une *deuxième puissance* est mesurée au même défocus.

Enregistrer ne détruit plus les mesures hors grille

Le bouton « Enregistrer les mesures » reconstruisait la table du matériau à partir des seules grilles affichées : **tout ce qu'elles ne pouvaient pas montrer disparaissait**. Sur le hêtre de l'atelier, un clic aurait supprimé **27 des 54** mesures en défocus — celles dont la puissance, la vitesse ou le niveau sortaient des grilles. Il fusionne désormais : seules les cases que les grilles occupent sont remplacées, le reste est conservé, et la confirmation indique combien de mesures hors grille ont été gardées.

Ce que l'objectif grave = ce que la saisie ② accepte

Les deux objectifs « Largeurs brûlées » gravent exactement les puissances et les vitesses de la grille de saisie ② : chaque case gravée a une case où être saisie. Ce n'était pas le cas — l'objectif au foyer gravait F400/1800/3200/4600/6000 quand la saisie n'a de colonnes que pour 200/400/800/1500/3000, soit quatre vitesses sur cinq sans destination. La cause tient à un détail : une plage min/max/nombre répartit ses paliers *linéairement*, alors que les colonnes de saisie forment une progression *géométrique* ; aucune plage ne peut les décrire. Ces deux objectifs portent donc désormais la liste exacte de leurs paliers, tirée des mêmes constantes que la grille de saisie, et les champs de plage sont verrouillés tant qu'un tel objectif est actif — avec les valeurs réellement gravées affichées en dessous.

Fichier : grille_test.ngc



Test rampe puissance/vitesse (lignes)

Une série de lignes à réglages croissants.

Plus rapide qu'une grille pour dégrossir un seuil (à partir de quand ça marque, à partir de quand ça traverse). L'option **Rampe Z** fait aussi monter le défocus le long de chaque ligne : le moyen le plus simple de mesurer un ton EN DÉFOCUS avec sa largeur, à reporter d'un clic (« + Ajouter ce ton ») dans le Nuancier — ce qu'exige le « ton sur mesure » pour interpoler. Des traits verticaux continus traversent toutes les lignes tous les **5 mm de défocus**, chiffrés au pied : le nombre gravé **est le défocus**, celui qu'on retape dans le champ — pas la cote machine. La nuance n'est pas cosmétique : avec un foyer à 8 mm, graduer tous les 5 mm de *hauteur* gravait « 10 15 20 25 » pour des défocus de 2, 7, 12 et 17, si bien qu'un « 15 » lu sur la planche désignait un défocus de 7 — et le rangement automatique au niveau standard le plus proche l'aurait mélangé aux mesures faites à 15, sans un mot (corrigé en v1.97.1).

Fichier : test_rampe_puissance.ngc



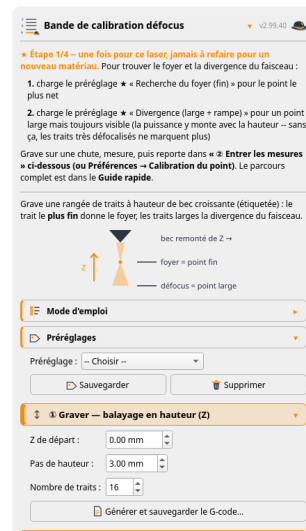


Bande de calibration défocus

Mesurer le point laser à plusieurs hauteurs.

Le pilier du remplissage : grave des repères à différents défocus, que vous mesurez et saisissez. C'est ce qui rend la gravure remplie *mesurée* plutôt que devinée.

Fichier : calibration_defocus.ngc





Nuancier matériau

Le registre des gris mesurés sur un matériau.

Associe une teinte de gris à un réglage, pour la gravure photo calibrée et les « tons sur mesure ». Pas d'étape de gravure ici : c'est le carnet partagé où l'on note ce qu'on a observé. Le « ton sur mesure » (Marquage) a besoin d'au moins 2 tons EN DÉFOCUS avec largeur mesurée — voir Rampe puissance/vitesse ci-dessus.

La **planche physique** (section ②) se règle en **colonnes**, et l'encombrement s'affiche pendant qu'on règle. Passé quelques dizaines de tons, peu de colonnes donnent une bande étroite et très haute qui gaspille la chute : 83 tons sur 5 colonnes font 122×587 mm, les mêmes sur 10 colonnes font 232×322 mm. Le nombre de cercles ne change pas, seule la forme de la planche.

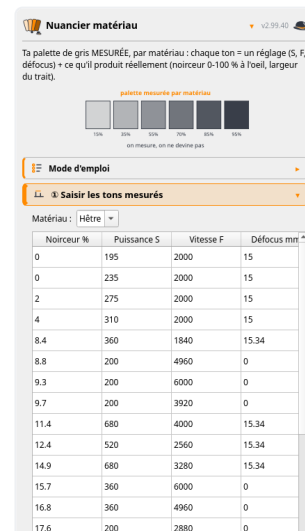
Les cercles font **Ø14 mm** et leur étiquette est **empilée sur trois lignes** (noirceur, puissance, vitesse). Sur une seule ligne, « 100% S1000 F1000 » réclamait 58 mm de large pour une cellule qui en offrait 27 : le texte était réduit jusqu'à son plancher de lisibilité (2,2 mm) et débordait quand même sur la cellule voisine — 89 des 117 tons mesurés se chevauchaient. Empilé, le bloc ne fait plus que 14 mm de large, le texte retrouve sa taille nominale de 3 mm et il reste 8,6 mm de jeu entre deux étiquettes voisines.

Au moment de graver, le bloc « Nuancier matériau » des modes Marquage et Gravure remplie ne se limite plus à ce carnet : il propose aussi les **largeurs brûlées mesurées dans la Grille de test**. Les deux tables restent séparées — le nuancier juge une noirceur à l'œil, la grille mesure une largeur au pied à coulisse — mais elles s'affichent ensemble, ce qui permet de choisir un réglage *par sa largeur de trait* et pas seulement par sa nuance. Rien n'est recopié : ajouter ou retirer une mesure se voit aussitôt dans la liste.

Un menu « **Classer par** » (noirceur, largeur de trait, défocus) regroupe et trie la liste selon ce qu'on cherche, avec la valeur du critère en tête de chaque ligne : on ne parcourt plus une longue liste plate. Une valeur non mesurée s'affiche « -- » plutôt qu'un zéro trompeur : un point de grille n'a pas de noirceur, et beaucoup de tons n'ont pas de largeur.

Le bouton « **Choisir dans le nuancier...** » montre cette même liste en **pastilles cliquables** plutôt qu'en lignes de texte : chaque disque est teinté par la noirceur mesurée du réglage, sous les mêmes titres de groupe. On compare des nuances à l'œil, comme sur la planche gravée, au lieu de lire des nombres. Cliquer une pastille applique son réglage, exactement comme la liste — c'est la même liste montrée autrement, pas une seconde source qui pourrait diverger.

Une pastille **hachurée** vient de la grille de largeurs brûlées : sa largeur est mesurée mais sa noirceur n'a jamais été jugée, et lui inventer un gris la ferait passer pour une mesure. Sa légende affiche alors la largeur qu'on connaît, plutôt qu'un « -- % » inutile.

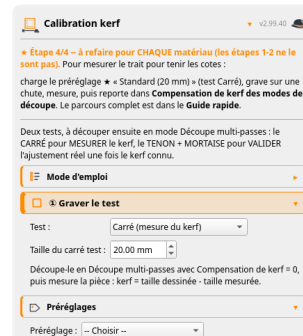




Motif de calibration kerf

Mesurer le trait de scie de la découpe.

Crée un carré (et un tenon+mortaise de validation) à découper avec compensation nulle : $\text{kerf} = \text{cote dessinée} - \text{cote mesurée}$. La valeur se reporte dans les modes de découpe.



Test des offsets X/Y du laser

Aligner le laser sur la broche/fraise.

Grave un repère (avec la fraise et le laser) dont l'écart des croix donne le décalage X/Y à reporter dans la table d'outils `tool.tbl` de LinuxCNC.

Fichier : `test_offsets_laser.ngc`



7.4 Le Job combiné

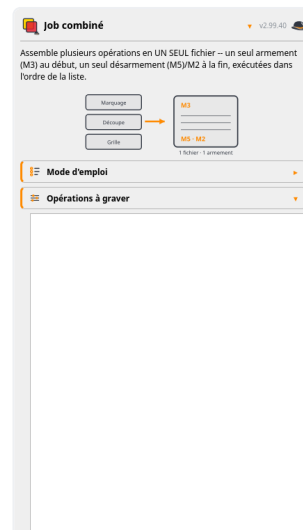


Job combiné (plusieurs opérations)

Enchaîner plusieurs opérations en un seul fichier.

Rassemble marquage, gravure, découpe, grille... en **un seul travail** avec un seul armement du laser au début et un seul désarmement à la fin — transitions plus rapides, et une hauteur de sécurité commune pour ne jamais plonger au mauvais endroit entre deux opérations. Son aperçu de cadrage trace *un seul* rectangle englobant global. Les modes combinables s'y ajoutent par un bouton, sans ressaisir leurs réglages.

Fichier : `job_combine.ngc`



8

La calibration

Le cœur du système — ce qui sépare un beau résultat d'un coup de chance.

Tout l'atelier repose sur une poignée de mesures que vous faites une fois par matériau et par laser. Elles se saisissent sur place, dans la section « ② Entrer les mesures » de chaque panneau.

Le modèle de défocus (deux mesures)

Un cône de divergence linéaire calibré sur **deux mesures réelles** : le diamètre du point au foyer, puis à un défocus de test connu. De là, l'atelier sait le diamètre du point à n'importe quelle hauteur, donc l'espacement idéal des hachures pour un remplissage plein en un passage. Le remplissage est *rentré* du rayon du point pour rester à l'intérieur du tracé.

La largeur réellement brûlée

Attention : la largeur qui compte pour l'espacement du remplissage n'est pas le point *optique* mais la largeur **brûlée**, mesurée. La **Planche 2** en grave une grille $S \times F$ à chaque niveau de défocus que vous décidez de mesurer (historiquement 15 et 36 mm, mais le champ est libre depuis la v2.2) ; l'atelier interpole en (S, F) puis entre les deux niveaux qui encadrent votre défocus de travail. C'est ce qui a supprimé le liseré pâle que masquait, avant, un contour repassé.

Le nuancier

Pour la photo et les « tons sur mesure », l'atelier relie une **teinte de gris** à une dose (puissance/vitesse) à partir des tons que vous avez gravés et mesurés — une courbe lissée qui traduit « je veux ce gris-là » en réglage machine.

Préréglages & profils par laser

Vos bons couples puissance/vitesse se rangent en **préréglages** par matériau. Et comme un bleu 450 nm et un infrarouge 1064 nm ne partagent ni gris, ni largeurs, ni doses, chaque **profil laser** garde *ses propres* nuancier, largeurs et préréglages. Basculer de laser bascule toutes ces données d'un coup.

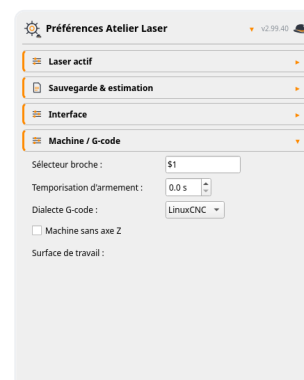
L'ORDRE DE CALIBRATION CONSEILLÉ

C'est celui que le Guide rapide affiche, et il se lit en deux temps. **Une fois par laser** (à refaire seulement après un changement optique ou un démontage) : ★1 **Bande de calibration défocus**, pour trouver le foyer et la divergence — chargez le préréglage ★ « Recherche du foyer (fin) » puis ★ « Divergence (large + rampe) » ; puis ★2 **Test des offsets X/Y**, pour aligner l'axe du laser sur celui de la broche (à reporter dans `tool.tbl` ; à sauter en GRBL ou sur un laser seul). **Puis une fois par matériau** : ★3 **Grille de test puissance/vitesse**, qui caractérise le bois — largeurs brûlées *et* noirceurs, via ses objectifs successifs ; et ★4 **Calibration kerf** si vous comptez découper ce matériau. Une fois ces mesures saisies, la plupart des modes « savent » se régler seuls.

9 Réglages, profils & sauvegarde

Tout ce qui se règle une fois pour toutes.

Le panneau **Préférences** centralise les réglages machine. Les plus utiles :



RÉGLAGE	À QUOI ÇA SERT
Laser actif	Basculer entre profils laser (cloner / renommer / supprimer). Chaque profil a sa calibration <i>et</i> ses données (nuancier, largeurs, préréglages).
Dialecte G-code	LinuxCNC (défaut), GRBL ou grblHAL — par profil.
Puissance par M67	Le réglage qui change le plus de choses. Coché, la puissance voyage par <code>M67 E0 Q...</code> , une sortie synchronisée avec le mouvement, au lieu du mot <code>S</code> . Sous LinuxCNC, un <code>S</code> entre deux <code>G1</code> arrête la machine — mesuré, 76 ms par bloc au lieu de 22,5 — ce qui saccade tous les tramages modulés et les rallonge d'un facteur 3. Décoché, rien ne change pour les jobs à puissance constante. Sans effet en GRBL, qui ne connaît pas <code>M67</code> et n'a pas le problème. Le détail au chapitre 3.
Lire les limites dans le <code>.ini</code> LinuxCNC...	Le bouton qui remplit les trois suivants. Ce sont les seuls réglages de l'atelier qui ne soient ni mesurés au bois ni choisis : la machine les déclare dans son fichier de configuration, autant les y lire plutôt que de les deviner. Le panneau dit ensuite d'où vient chaque nombre (section et clé du <code>.ini</code>). Les champs sont remplis ; c'est OK qui enregistre. Le fichier lu est retenu, pour qu'une relecture après un changement de config machine tienne en deux clics.
Vitesse rapide (estimation)	La vitesse des déplacements <code>G0</code> <i>supposée</i> pour estimer la durée d'un job. À aligner sur le <code>MAX_LINEAR_VELOCITY</code> de votre machine, sinon l'estimation ment — la laisser à 650 quand la machine fait 8000 sur-estime de 80 %. Entre 6000 et 8000, en revanche, l'écart mesuré sur 70 fichiers réels n'est que de 0,4 % : sur des courses de quelques millimètres c'est l'accélération qui gouverne, jamais la vitesse de pointe.
Accélération (estimation)	Même principe : à aligner sur le <code>MAX_ACCELERATION</code> de votre <code>.ini</code> . C'est elle qui décide du coût des dizaines de milliers de changements de direction d'une gravure hachurée.
Vitesse Z max (pente du fuseau)	Celui-ci change la gravure , contrairement aux deux précédents : il fixe la pente que le fuseau s'autorise en Z, donc la finesse du motif. À 1500 au lieu de 3000 mm/min, un fuseau complet exige deux fois

plus de trace (5,3 mm au lieu de 2,7 à F200) — moitié moins de motifs sur la même image. Trop bas ne coûte que du détail ; **trop haut est le mauvais sens** : LinuxCNC ralentit alors tout le mouvement pour que le Z suive, le temps de pose change, donc la noirceur, sans rien afficher. Dans le doute, lisez-le dans le `.ini`.

Puissance S max	L'échelle de puissance (0...S_max) ; les panneaux s'y adaptent, aucune valeur codée en dur.
Puissance de cadrage	Si > 0, le rectangle de cadrage est parcouru faisceau très faible, pour <i>voir</i> la zone sur la pièce sans marquer.
Bec & focale	Le cône anti-collision et la table de focale du module laser.

Exporter / importer (sauvegarde)

Deux boutons rendent tout cela portable et sûr :

- ▶ **Exporter réglages + photos** : rassemble la configuration et toutes les photos de résultats dans un `.zip`. À mettre en lieu sûr dès que vous avez accumulé des mesures.
- ▶ **Importer une sauvegarde** : restaure un `.zip` (la configuration est validée, les photos extraites proprement). Le panneau se ferme ensuite, pour ne pas réécrire par-dessus la config fraîchement importée.

LE VRAI « À NE PAS OUBLIER »

Faites un export `.zip` après chaque grosse séance de calibration. Vos mesures (nuancier, largeurs, offsets) valent bien plus de temps que le fichier ne pèse.

10 Sécurité machine

Le seul chapitre vraiment obligatoire. Une page, trois idées.

1. Puissance asservie à la vitesse — jamais de point immobile

La couche HAL multiplie la puissance par la vitesse réelle du déplacement. **À l'arrêt, la puissance tombe à zéro.** Conséquence : on ne peut pas graver un point en restant immobile et en attendant (une temporisation **G4** faisceau allumé ne graverait *rien*). Tous les points de l'atelier sont donc de *micro-traits* : un court déplacement dont la vitesse reproduit le temps d'exposition voulu. Vous n'avez pas à y penser — l'atelier le fait — mais c'est la raison de bien des choix internes.

2. Le laser reste « armé » tout le travail

Grâce à la stratégie relais (chapitre 3), le module est réputé prêt à tirer du début à la fin ; c'est la valeur **S** qui fait foi. Un **S0** pendant un transit = pas de tir. Ne vous fiez donc pas à l'armement pour juger si « ça tire » : fiez-vous à S.

3. Transit à hauteur de travail, cône anti-collision

Le bec sans capot peut suivre des surfaces courbes, mais peut aussi accrocher. L'atelier transite à la hauteur de travail plus une petite marge (plutôt que de remonter loin puis replonger), et vérifie le cône du bec. En job combiné, une hauteur de sécurité *commune* évite qu'une opération replonge au mauvais endroit après une autre.

AVANT CHAQUE VRAI TRAVAIL

Cadrez (fichier de cadrage, laser éteint) pour vérifier le positionnement, gardez les lunettes, la ventilation en marche, et un œil sur la machine. Le logiciel gère la logique ; le reste, c'est vous.

11

Astuces & bonnes pratiques

Ce qui fait gagner du temps et du matériau.

Voir avant de graver

L'**Aperçu photo** peint un rendu réaliste du résultat (chaque trait à sa largeur brûlée et à sa teinte, superposés sur un fond bois). Utile pour juger un remplissage ou comparer des styles sans consommer de bois. Sa fidélité dépend de la qualité de votre planche de largeurs.

Toujours cadrer

Le fichier de **cadrage** ne trace que le rectangle englobant, laser éteint : trente secondes pour être sûr que la pièce est bien sous la machine. En job combiné, ce rectangle couvre l'ensemble des opérations.

Tester sur chute

Une **grille de test** ou une **rampe** de deux minutes sur une chute du *même* matériau vaut mieux qu'un réglage « au feeling ». Le bois varie d'une planche à l'autre.

Ranger ses réglages

Un bon couple trouvé ? Enregistrez-le en pré-réglage. Une belle teinte ? Ajoutez-la au nuancier. Vous construisez peu à peu une bibliothèque qui rend l'atelier de plus en plus autonome.

UN CARNET DE FROTTEMENTS

Gardez une note de ce que vous avez dû refaire à la main, de ce qui vous a surpris dans un panneau, de l'information que vous auriez voulu voir au moment de graver. Chaque ligne est une amélioration future *justifiée par l'usage* — la meilleure feuille de route qui soit.

12 Dépannage

Les questions qui reviennent.

La gravure est plus pâle que prévu.

Presque toujours une question de calibration : la planche de largeurs de brûlure n'a pas été mesurée à votre défocus de travail, donc l'espacement du remplissage est extrapolé. Gravez la planche de défocus à plusieurs niveaux et saisissez les mesures.

Les cotes de découpe sont fausses de quelques dixièmes.

Le kerf n'a pas été mesuré (ou pas reporté). Découpez le carré de calibration à compensation nulle, mesurez, saisissez la valeur.

Le laser n'est pas aligné avec la fraise.

Faites le test des offsets X/Y et reportez l'écart des croix dans `tool.tbl` de LinuxCNC.

Un point/pointillé ne marque rien.

Rappel du chapitre 9 : pas de tir à l'arrêt. Les points doivent être des micro-traites — c'est le cas partout dans l'atelier ; si vous bricolez un G-code à la main, ne posez jamais de `G4` faisceau allumé.

Ma gravure photo saccade et dure trois fois trop longtemps.

Sous LinuxCNC, c'est presque toujours la puissance qui voyage par le mot `S` : un changement de `S` entre deux `G1` **arrête le mouvement**, et les tramages modulés en changent à chaque pixel. Cochez « **Puissance par M67** » dans les Préférences et régénérez le fichier — la puissance passe alors par une sortie synchronisée avec le mouvement, et la machine ne s'arrête plus entre les paliers. Sur GRBL/grblHAL la case est sans effet, et c'est normal : leur mode laser (`$32=1`) résout déjà la même difficulté. Vérifiez aussi que l'**accélération** déclarée dans les Préférences correspond bien au `MAX_ACCELERATION` de votre `.ini`, sinon l'estimation de durée ment sans que rien ne le signale.

Où sont passés mes réglages après réinstallation ?

Ils sont hors dépôt (fichier de config + `photos_resultats/`). Restaurez votre `.zip` d'export via « Importer une sauvegarde ».

13

Annexe

Glossaire & liens.

Glossaire

TERME	DÉFINITION
Défocus	Écart volontaire entre le bec et le point focal ; élargit le point pour remplir vite.
Kerf	Largeur du trait enlevé par la découpe (le « trait de scie ») ; à compenser pour des cotes justes.
Nuancier	Table reliant une teinte de gris mesurée à une dose (puissance/vitesse) sur un matériau.
Fluence	Énergie déposée par unité de surface ($\propto$ puissance / (largeur $\times$ vitesse)) ; gouverne la teinte brûlée.
Cadrage	Parcours du seul rectangle englobant, laser éteint, pour vérifier le positionnement.
Armement	Mise en route unique du laser (relais) en début de travail ; la puissance réelle reste pilotée par le canal choisi — <code>S</code> par défaut, <code>M67</code> si la case des Préférences est cochée.
<code>M67</code>	Commande LinuxCNC réglant une sortie synchronisée avec le mouvement (<code>M67 E0 Q...</code>) : la valeur prend effet au bloc suivant <i>sans vider la file de trajectoire</i> . C'est ce qui permet de moduler la puissance pixel par pixel sans arrêter la machine, là où un <code>S</code> l'arrête. Sa jumelle <code>M68</code> est immédiate et <i>arrête</i> le mouvement — ne pas les confondre. N'existe pas en GRBL, qui n'a pas ce problème (Préférences, chapitre 3).
Job combiné	Plusieurs opérations réunies en un fichier, un seul armement/désarmement.

Liens

- ▶ Dépôt du code : github.com/atelierduverdier/LaserAtelier
- ▶ Site & documentation en ligne : laser.atelierduverdier.fr
- ▶ Machine hôte : PrintNC · LinuxCNC 2.9.x
- ▶ Module laser de référence : LaserTree LT-80W-AA-PRO



LaserAtelier v2.99.40 — Atelier du Verdier

Le petit chapeau en coin de chaque icône est la signature de l'atelier.

Manuel généré en juillet 2026 · licence LGPL-2.1-or-later.

14

Journal de l'atelier

Ce qui a changé, version par version — et pourquoi.

*Tout ce qui précède décrit l'atelier **tel qu'il fonctionne aujourd'hui**. Ce chapitre-ci raconte comment il en est arrivé là. On peut l'ignorer entièrement pour se servir de l'atelier : rien ici n'est nécessaire pour graver.*

Il n'est pas là par nostalgie. Presque chaque entrée nomme une **mesure** — une largeur au pied à coulisse, un temps de job chronométré, une case de planche restée vierge, un bruit de tête entendu à l'établi — et c'est cette mesure qui a tranché, pas un raisonnement. Quand un réglage paraît bizarre ou trop prudent, l'entrée qui le concerne dit en général *pourquoi* il est ainsi, et ce qui a été essayé avant.

Ces entrées étaient auparavant dispersées dans les chapitres de modes, au fil des livraisons : quarante-cinq s'étaient empilées dans la seule section « Mesurer sur la photo », et six racontaient sous *Calligraphie* des changements qui concernaient le Nuancier ou la Grille de test. Le mode d'emploi y perdait son fil. Elles sont ici telles quelles, de la plus récente à la plus ancienne ; le titre en gras de chaque entrée nomme son sujet.

Versions 2.80 et au-delà — 67 entrées

M7 ou M8 : c'est le câblage qui tranche (v2.99.39). Christophe, le lendemain de la livraison de l'assistance d'air : « je viens de monter la pompe et connecté en **mist M7** [...] je suis sur ma LinuxCNC, M8 cela doit être pour LightBurn Falcon ». Exact — et la veille, l'atelier posait **M8 en dur**, copié du fichier LightBurn du Falcon2. RS274 distingue **M7 (brouillard)** de **M8 (arrosage)** : ce sont deux sorties, donc deux broches HAL, et **celle qui n'est pas câblée ne fait rien du tout**. Le fichier serait resté parfaitement valide, le job aurait gravé — sans air, et rien ne l'aurait dit. C'est la forme la plus discrète de défaut : un G-code irréprochable qui ne fait pas ce qu'on croit. La case devient donc un **choix** — Non / M7 / M8 — réglé **par profil laser**, ce qui tombe juste puisqu'un profil *est* une machine : M7 sur la PrintNC, M8 sur le Falcon, chacune garde le sien. **M9** ne change pas : il coupe les deux, quel que soit celui qui a ouvert. **Et les configs de la veille se reprennent toutes seules** : `_cast_air` accepte un booléen et traduit un `true` de v2.99.37 en M8. Sans cette reprise, `_apply_settings_config` aurait vu une valeur invalide, averti dans la console, gardé le défaut — et coupé l'air, sans que personne ne relie la cause à l'effet. §7 gèle que demander M7 n'émette **aucun** M8 et réciproquement ; §8 gèle la reprise. Trois sabotages rougissent, dont celui qui retire M7 de la liste des Préférences — un réglage qui existe et reste inatteignable n'est pas livré.

L'atelier ne savait pas ce que la machine peut atteindre (v2.99.38). Christophe, en regardant la fiche de son Creality Falcon2 : « elle a une petite surface de gravure, ce n'est pas ma table de 120 x 120 cm ». Sa PrintNC fait **1200 × 1200**, le Falcon2 **400 × 415**. Un motif dessiné pour l'une part droit dans les butées de l'autre : le contrôleur lève une alarme de limite logicielle *en plein job*, ou tape dans le cadre — et ça se découvre la pièce en place, le bois entamé. **Vérifié dans le code : la notion n'existait pas**. L'emprise du parcours était bien calculée (`gcode_bbox_xy`), mais uniquement pour recadrer au zéro pièce et assembler les

jobs combinés ; rien ne la comparait à une course machine. D'où le réglage « **Surface de travail (X × Y)** », **par profil laser** puisqu'un profil est une machine, et un contrôle à l'écriture. **On juge sur le G-code tel qu'il sera écrit**, jamais sur le dessin : le recadrage a déjà eu lieu, le cadrage et les marges de survol sont dedans — c'est la seule emprise qui décrive ce que la machine va parcourir. **La position compte autant que la taille** : un motif de 100 × 100 tient largement dans 400 × 415, et pas s'il est posé à X350. Un contrôle qui ne regarderait que les cotes laisserait passer exactement le cas qu'on veut attraper. **On avertit, on ne refuse pas** : la course déclarée est un réglage, pas une mesure, et un refus sec jetterait un G-code qui n'existe nulle part ailleurs — même politique que l'avertissement d'épaisseur. **0 = inconnue et rien ne se déclenche**, pour que personne n'hérite d'un refus pour un réglage qu'il n'a jamais vu. **Trois défauts trouvés dans le test lui-même**, et c'est la partie instructive : le contrôle des chiffres cherchait « 500 » et « 400 » n'importe où dans le message, or le bloc « Emprise du parcours » les contient de toute façon — un message dont la raison était vidée passait ; et le faux dialogue de fichier rendait une chaîne vide, ce que l'écriture lit comme « Annuler », donc elle repropose, le faux répond « oui », **et ça tournait sans fin** : le sabotage ne faisait pas rougir le test, il le *figeait*. Quatre sabotages rougissent désormais.

L'assistance d'air, et un fichier qui a vraiment gravé (v2.99.37). Christophe a envoyé le G-code d'une pièce faite sur son Falcon 2 — du LightBurn 1.3.01, profil GRBL. **Zéro mot Z sur 22 734 lignes** : la confirmation qui manquait au correctif livré le matin même. **M4**, S800 sur une échelle de 1000, commentaires acceptés : le dialecte GRBL de l'atelier vise juste. Un seul manque, et il est réel : **M8 / M9**, l'assistance d'air, que LightBurn pose systématiquement et que l'atelier n'émettait jamais. D'où la case « Assistance d'air », **par profil laser**. **Greffée sur CMD_ARM / CMD_DISARM** plutôt que dans chaque générateur : ces deux gabarits sont émis par les dix familles — 35 et 50 points d'appel — et un **M8** posé dans chaque générateur en aurait mis un par opération d'un job combiné, rallumant une pompe déjà en marche. **L'ordre vient du fichier, pas d'un raisonnement** : LightBurn pose **M8** juste après **M4** et **M9** AVANT le **M5** final ; on reproduit tel quel. **Et le test a corrigé son auteur**. Il exigeait « exactement un **M8** » — mon hypothèse, pas une exigence : la planche défocus grave son cadrage, désarme, s'arrête sur un **M0** pour qu'on vérifie le placement, puis réarme. Deux **M8**, et ils sont justes — un **M8** sur une pompe qui tourne ne fait rien. Ce qui doit être unique, c'est la **coupure** : un **M9** de trop et la fin du job grave sans air, sans qu'un mot le dise. Un second repère faible a été corrigé dans la foulée : « dernier trait gravé » cherché sur le mot **S** tombait à la ligne 16 d'un fichier qui en compte 557, parce qu'un marquage pose sa puissance une fois puis enchaîne des **G1** nus — le contrôle passait sans rien contrôler. **Ce que la case coûte est dit** : l'air change la brûlure (halo brun avec, propre sans), c'est la variable cachée qu'aucune planche de mesure n'enregistre, et la basculer change le régime dans lequel tes largeurs ont été mesurées.

Un graveur de table sans axe Z (v2.99.36). Christophe : « j'ai un petit laser Creality Falcon 2, mon atelier laser est compatible ? ». Le dialecte **GRBL** existait et convenait — **M4** en mode laser, pas de **\$1**, pas de **G64**, pas de **T / M6**. Ce qui bloquait était ailleurs, et il a fallu le mesurer pour le voir : **tout** fichier produit ici porte des mots **Z**. Même un marquage à plat, Z de travail à 0 et survol à 0, sort encore un **G0 Z5.0000** — la hauteur de sécurité de début et de fin, **+ 5.0** en dur dans le générateur. Sur une machine à mise au point manuelle, le contrôleur accepte ce mot, croit déplacer un axe absent, y passe du temps, et lève une alarme de limite logicielle si elles sont actives (course Z nulle). D'où la case « **Machine sans axe Z** » des Préférences, réglée **par profil laser** puisqu'un profil est une machine. **Le retrait se fait à la sortie**, dans l'assainisseur, passage obligé des dix familles de générateurs : un seul point à écrire, un seul à tester, et le

prochain mode en hérite sans qu'on y pense. Les mouvements qui n'étaient que du Z disparaissent entièrement, plutôt que de laisser un **G0** orphelin que le contrôleur lirait comme un déplacement vers la position courante. **ET ÇA S'ANNONCE QUAND LE Z PORTAIT DE L'INFORMATION**, ce qui fait la différence entre un outil et un piège : ôter une hauteur de survol ne change rien à ce qui brûle, ôter un Z qui variait pendant un **G1** supprime le défocus, le fuseau ou le suivi de relief — sur le style « vague », **192 mouvements gravés** changeaient de hauteur, et le fichier le dit en tête comme la console. **Le correctif s'est piégé lui-même**, sur le piège que ce dépôt documentait déjà : la première version collait cette alerte *après* la parenthèse fermante, si bien que l'interpréteur l'aurait lue comme du CODE. §3 le gèle. **Et un sabotage n'a pas rougi** : deux garde-fous indépendants protègent l'idempotence, en casser un seul laisse la propriété debout — c'est écrit dans le test, pour qu'on n'en conclue pas la prochaine fois que le contrôle est décoratif. Ce que le réglage coûte est dit sans détour, dans l'info-bulle et dans le README : toute la moitié défocus de l'atelier devient hors de portée.

Les quatre derniers panneaux trop larges (v2.99.35). Il restait quatre panneaux qui débordaient de la vue des tâches et se faisaient rogner à droite : Calligraphie **861 px**, Assistant 781, Texte gravé 712, Texte contour 670, pour une vue qui en fait **573**. Ils sont à 538 / 568 / 333 / 504. **Aucune des trois causes n'était celle qu'on aurait devinée**, et c'est tout l'intérêt de les avoir mesurées une par une : (1) une **liste déroulante impose son entrée la plus longue** comme largeur minimale — 588 px pour le sélecteur de police et ses 45 entrées — et `setSizeAdjustPolicy` n'y change rien, elle ne touche que `sizeHint` quand c'est `minimumSizeHint` que la mise en page consulte ; (2) une **case à cocher ne revient jamais à la ligne**, si bien que deux libellés-phrases valaient 565 et 595 px à eux seuls ; (3) les **sept colonnes de la grille de mesures** réclamaient 91 px chacune, soit 749 px de grille. Remèdes : la boîte fermée est plafonnée mais **la liste déroulée garde sa pleine largeur** (on ne rogne que l'affichage de la sélection, jamais le choix) ; les deux libellés sont raccourcis, l'explication passée en info-bulle ; les cases de mesure perdent leurs flèches — personne ne clique trente-six fois pour saisir 0,36, on tape ce que le pied à coulisse a lu — et descendent à 66 px, là où **Qt lui-même en réclame 88**. **Deux fausses pistes payées avant d'y arriver**, toutes deux du même genre : la première salve de mesures rendait exactement les mêmes chiffres au pixel près, parce que les mises en page gardent leur minimum **en cache** et qu'il faut les invalider — le correctif fut d'abord posé et resta sans effet pour cette seule raison ; et la largeur de case réservait un chiffre de trop avant la virgule, laissant la grille à 644 px sur 749. §5 et §6 gèlent les deux propriétés, y compris que « 10.00 » reste **entièrement lisible** — une mesure tronquée à l'écran serait pire qu'un panneau trop large. La liste des panneaux tolérés est désormais **vide**.

La machine se décrit elle-même, on cesse de la deviner (v2.99.34). Trois réglages de l'atelier n'étaient ni mesurés au bois ni choisis : la **vitesse rapide**, la **vitesse max de l'axe Z** et l'**accélération**. Ils étaient *supposés*, avec des valeurs d'usine prudentes que rien ne signalait comme telles — Christophe avait corrigé les siennes à la main, un nouveau venu héritait des suppositions. **La vitesse rapide ne méritait pas qu'on la poursuive** : mesurée sur les 70 fichiers gravés, l'écart 6000 contre 8000 vaut **+0,4 %** de durée annoncée (+2 % au pire), parce qu'à 600 mm/s² un rapide de quelques millimètres n'atteint jamais sa vitesse de pointe — c'est l'accélération qui gouverne, et elle était juste. **La vitesse Z, si**. Elle ne sert pas qu'à estimer : elle fixe la pente que le fuseau s'autorise. À 1500 au lieu de 3000, la pente est divisée par deux et la longueur de trace nécessaire à un fuseau complet **double** — 5,3 mm au lieu de 2,7 à F200 —, soit moitié moins de motifs sur la même image. Ce n'est pas une estimation qui se trompe, c'est du détail perdu à la gravure. **Et relever le**

défaut à l'aveugle aurait été le mauvais sens : trop bas ne coûte que du détail, trop haut fait ralentir tout le mouvement par LinuxCNC pour que le Z suive — le temps de pose change, donc la noirceur, sans qu'un mot le dise. Écrire ici la machine de Christophe aurait remplacé une supposition par une autre et livré ce piège à qui a un Z lent. D'où le bouton « **Lire les limites dans le .ini LinuxCNC...** » dans les Préférences : le fichier de configuration de la machine déclare ces trois nombres, il suffit de les y lire. Sur la PrintNC il rend **8000 / 3000 / 600** — exactement ce que Christophe avait saisi à la main, ce qui est la preuve que le lecteur sert. Les champs sont remplis, pas enregistrés : c'est OK qui écrit, et le panneau **affiche d'où vient chaque nombre** (section et clé du `.ini`) — un chiffre dont on ignore l'origine finit retapé à la main six mois plus tard, ce qui est le problème même que ce bouton clôt. Les pouces sont convertis, les `[AXIS_*]` priment sur les `[JOINT_*]` (sur un portique le nombre de joints ne suit plus celui des axes), et un fichier illisible ne remplace **rien**. Quatre sabotages rougissent.

La config s'écrivait sans filet (v2.99.33). À la question « est-ce une bonne v3, ou ai-je oublié quelque chose ? », voici ce qui manquait. `save_config` faisait `open(chemin, "w")` : le fichier est **vidé avant** d'être réécrit. Une coupure à cet instant — FreeCAD qui segfaute, ce que ce dépôt documente — et les **283 mesures** prises au pied à coulisse disparaissent. C'est la seule chose irremplaçable du projet ; le reste se reclone. Et les dernières sauvegardes dataient du **29 juillet**, faites à la main, alors que le fichier avait grossi de 42 à 78 Ko depuis : huit jours sans filet. L'écriture passe désormais par un fichier temporaire puis `os.replace`, qui est **atomique** — à tout instant le fichier en place est l'ancien complet ou le nouveau complet, jamais un moignon —, avec un `.bak` (l'état d'avant le dernier enregistrement) et une photographie par jour, plafonnée à dix. **Le correctif s'est piégé lui-même**, et c'est la leçon : un `import time` oublié dans la copie de sûreté faisait échouer *tout* `save_config`, en silence — le filet empêchait le devoir. Ils sont séparés, et §5 du test le gèle. **Un test capricieux corrigé au passage** : `test_largeur_panneaux`, qui bâtit 22 panneaux, rougissait une exécution sur trois en parallèle avec un message vide — la signature, déjà documentée ici, d'une destruction de widgets Qt qui rend un code non nul. Même remède que `test_panneaux` : sortie explicite, vérifiée par un sabotage placé AVANT elle. Trois suites complètes d'affilée : 47 vertes.

Une face invalide gravait blanc, en silence (v2.99.32, trouvé à l'audit). Audit complet demandé par Christophe. Un seul défaut de gravure en est sorti, mais il est du genre le plus coûteux : `Part.Face([contour, trou])` sans orienter le trou rend une aire de **400,196 mm²** là où 399,804 était attendu — le trou *s'ajoute* — et `isValid()` répond False. Le hachurage l'acceptait et rendait **UN segment de 0,5 mm** pour une pièce de 20 × 20 mm. C'était atteignable : les faces d'un objet sélectionné étaient renvoyées telles quelles, d'où qu'elles viennent — autre atelier, macro, import. Le constructeur de l'atelier, lui, oriente correctement ; il n'était pas consulté quand la forme portait déjà des faces. Elles sont désormais rebâties depuis leurs contours : **96 hachures et 1 333 mm de trait** au lieu de 1 et 0,5. **Le piège du piège** : cette face *se tessellise* (124 triangles), donc le contrôle habituel de cette maison ne la voyait pas — c'est `isValid()` qui parle, et uniquement sur les faces venues du dehors ; celles que l'atelier bâtit lui-même restent jugées à la tessellation, une face sur fils tangents pouvant rester invalide sans gêner.

Un bouton pour réunir des dizaines de tracés en un seul (v2.99.31). Christophe, devant les 267 tracés de son dessin : « j'ai plein de tracés que j'ai sélectionnés, il me faudrait un bouton pour les regrouper tous en 1 seul ». Un dessin au trait arrive en autant d'objets que de tracés — ce qui est *juste* pour un remplissage calculé tracé par tracé, et pénible pour tout le reste. « Fusionner les tracés sélectionnés » rejoint la barre « Dessins », à côté de l'import : **un bouton, pas un panneau** — il n'y a rien à régler, une boîte n'aurait ajouté

qu'un clic. Les originaux sont **masqués et rangés, jamais supprimés** : le remplissage se calcule par tracé, qui a fusionné doit pouvoir revenir en arrière — et l'arbre se replie quand même. **Le test a trouvé un plantage avant l'usage** : FreeCAD lève une `RuntimeError` si un objet entre dans DEUX dossiers, or l'import range désormais par calque — fusionner ce qu'on vient d'importer, le cas exact de Christophe, tombait dessus. Un tracé déjà rangé reste où il est. **Et un piège de test documenté ailleurs a resurgi** : `import InitGui` attrape celui d'un AUTRE workbench, FreeCAD mettant chaque `Mod/<wb>/` sur `sys.path` — le fichier se lit par son chemin.

L'import range par calque, ou à défaut par couleur (v2.99.30). Christophe : « si dans le fichier SVG ou LightBurn il y a des couleurs, pourrais-tu importer les objets dans des dossiers séparés par couleur ? là j'ai une longue liste d'objets ». Son fichier en produit **267** — l'arbre devient illisible et rien ne dit ce qui va ensemble. Le parcours du SVG retient désormais le `<g>` qui contient chaque tracé, et l'import crée un dossier par lot : le **calque d'abord**, parce qu'il porte l'intention du dessinateur (un LightBurn traduit le nomme `calque_9`), la **couleur ensuite**, seule séparation disponible sur un SVG quelconque. Vérifié sur son dessin : 267 objets en 4 dossiers — Calque 9 (244), Calque 10 (21), Calque 2 et Calque 21 — et **rien à la racine. Aucun dossier quand il n'y a qu'un lot** : ce serait un clic de plus pour retrouver exactement la même liste. Le test vérifie aussi que le rangement ne perd ni ne duplique un tracé, et ses trois sabotages rougissent.

Les projets LightBurn s'importent par la même icône (v2.99.29). Christophe : « sur la même icône on peut choisir un fichier soit SVG soit LightBurn, le programme faisant la distinction suivant l'extension ». C'est fait : `.lbrn` et `.lbrn2` sont traduits en SVG à côté du fichier d'origine — il reste consultable, et un import rejoué ne reconvertis pas — puis importés par le lecteur existant. **Aucun mode de plus** pour un format d'échange. La conversion a quitté `outils/` pour `svg_import.py` : l'atelier doit pouvoir l'appeler, et une copie dans un script à part aurait divergé au premier correctif — le script n'est plus qu'une façade, et sa sortie a été comparée octet pour octet avant/après le déplacement. **Le test a rattrapé une couleur perdue** : le `stroke` était posé sur le groupe de calque, or `resolve_fill_color` lit le stroke PROPRE de l'élément et n'hérite pas — les trois calques revenaient de la même couleur, séparés dans le fichier et confondus dans le document. Et un contrôle s'est révélé incapable d'échouer : il examinait le chemin à `PrimList` explicite, dont les primitives restent des segments quoi qu'il arrive ; c'est le contour implicite qui bascule quand le marqueur `c0x1` est pris pour une coordonnée.

La projection non plus n'a plus besoin qu'on lui désigne la surface (v2.99.28). Christophe, capture d'un « Sélectionne au moins un motif 2D et une surface 3D de référence » : « la projection n'a pas besoin de la boîte avec l'aide et tout le reste, juste un menu déroulant pour sélectionner l'objet 3D, ou s'il n'y en a qu'un le prendre par défaut ». Marquage et Découpe courbe le faisaient depuis la v2.99.26 ; la projection, qui est l'étape *d'avant*, l'exigeait encore — l'incohérence sautait aux yeux à l'usage et à personne en relisant le code. Le motif seul suffit désormais : un solide sélectionné garde la priorité, sinon le seul du document est pris, sinon une liste classée par recouvrement en XY demande lequel. La ligne d'état dit « trouvée seule » plutôt que de le taire. **Le panneau reste**, contrairement à ce qui était suggéré : il sert à projeter PLUSIEURS motifs d'un coup, et son aide est déjà repliée — c'était l'exigence qui gênait, pas le texte.

Cinq textes enseignaient encore l'ancien geste (v2.99.27). Le mécanisme de la v2.99.26 était en place et Christophe s'est quand même fait dire de sélectionner le solide : « j'ai sélectionné mon motif 2D et il m'a dit

que je devais sélectionner la forme aussi. Je veux le menu ». Le menu *était* là — c'est l'avertissement de la commande, son infobulle et le mode d'emploi du panneau qui réclamaient toujours « TOUS LES DEUX EN MÊME TEMPS ». **Un correctif que sa propre documentation contredit n'est pas livré.** Les cinq textes sont alignés — pour **Marquage et Découpe courbe**, qui partagent ce mécanisme —, et §6 du test balaie les sources à la recherche de ces formulations : il en a lui-même trouvé deux que la première passe avait manquées, dans le mode Découpe.

La surface à sonder se trouve toute seule — et deux tiers du mécanisme existaient déjà, en silence (v2.99.26). Christophe : « au lieu de sélectionner le Pad ET Motif_Projete, le même système que pour la projection : une boîte déroulante, ou s'il n'y en a qu'un le prendre par défaut ». **Lu dans sa session avant de coder quoi que ce soit** : son « Motif_Projete » portait déjà `LaserAtelierSurfaceRef` pointant sur son Corps, et `split_selection` retrouvait la surface avec le **seul** motif sélectionné. Il sélectionnait les deux depuis des jours parce que **rien ne le lui disait** — et le message d'après-projection le lui conseillait même explicitement, à tort. Le message est corrigé, et une ligne du panneau dit désormais d'où vient la surface : sélectionnée, mémorisée, seul solide du document, ou choisie. Ne manquait vraiment que le troisième temps, celui qu'il demandait : sans mémoire, un seul solide est pris d'office, plusieurs déclenchent une liste classée par recouvrement en XY. Partagé par **Marquage et Découpe courbe**, qui avaient le même code. **Une pièce d'essai s'est révélée incapable d'échouer** : le bon solide y était créé en premier, donc il arrivait en tête par simple ordre du document et supprimer le classement ne changeait rien. Le lointain est maintenant créé avant — et le sabotage rougit.

Le calque d'aperçu restait, et le panneau aussi (v2.99.25). Christophe, capture à l'appui : « j'ai toujours un calque de visible dans Aperçus de remplissage », et « après le message de ce qu'il faut faire, il serait bien de fermer la boîte, car là on doit cliquer sur OK ». Le masquage d'après-projection ne couvrait que le dépôt et les formes sélectionnées ; le **calque d'aperçu** — plat, posé 0,05 mm sous le motif — se voyait donc en travers du relief, exactement ce qu'on cherchait à retirer. Il part avec les autres. Et le panneau **se ferme** une fois son travail fait : fermeture *avant* l'affichage, message sans parent — même geste que « Ajouter au job combiné », qui l'avait déjà réglé de cette façon. La liste de ce qu'on masque est extraite en fonction pour être éprouvée sans interface, et les deux sabotages rougissent.

Après la projection, la vue se dégage — et plusieurs solides ne font plus hésiter (v2.99.24). Deux demandes de Christophe une fois la procédure enfin fluide. **Un** : « passer les compounds 2D en hide afin de garder juste le motif sur la surface 3D, comme cela ça facilite la visualisation de ce qu'il faut sélectionner » — les formes à plat qui ont servi sont masquées après coup, **jamais supprimées**, et le message dit lesquelles. **Deux** : « si j'ai plusieurs objets 3D dans le document, comment ça se comporte ? » — la projection étant un raycast *vertical*, une surface qui ne recouvre pas le motif vu de dessus ne peut rien recevoir. Les candidats sont donc classés par recouvrement en XY et proposés avec leur pourcentage, le plus probable en tête. **Deux pièges de test au passage**, tous deux du même genre — un contrôle incapable d'échouer. Sans interface, un `Part::Feature` n'a pas de `ViewObject` : vérifier le masquage sur les vrais objets ne prouvait rien, la fonction est donc éprouvée sur des doublures qui en ont un. Et le balayage anti-pièges a signalé la *docstring* qui explique justement le piège du `hasattr` : un contrôle qui interdit d'écrire la leçon pousse à ne plus l'écrire, il distingue maintenant une citation entre accents graves d'un véritable appel — vérifié dans les deux sens.

Un Body PartDesign comptait pour deux surfaces (v2.99.23). Christophe, en majuscules : « J'ESSAYE TA PROCÉDURE MAIS ÇA NE FONCTIONNE PAS ». Lu dans sa session : deux « Remplissage à projeter » de 17 288 arêtes — il avait donc cliqué **deux fois** — et **aucun Motif_Projete**. La cause : son « Corps » (Body PartDesign) et son « Pad » sont le **même volume**, mais tous deux ont des faces et une épaisseur. Le bouton en comptait deux, concluait « plusieurs surfaces possibles » et renonçait à projeter — en le renvoyant à la manœuvre manuelle, c'est-à-dire exactement la complication qu'il venait de signaler. Un candidat contenu dans un autre (le Pad est dans l'InList du Body) est désormais écarté ; vérifié sur son document : « Corps, Pad » devient « Corps ». Et s'il reste vraiment plusieurs surfaces, le bouton **demande laquelle** au lieu de renvoyer l'utilisateur à la main — répondre « débrouille-toi » était le défaut de fond.

Graver un aplat sur du relief tient maintenant en un bouton (v2.99.22). Christophe, après avoir refait la manœuvre trois fois : « en résumé je n'y comprends rien, il faut simplifier la procédure ». **Sa logique était pourtant juste** — remplir à plat, sélectionner le motif et le Pad, projeter, marquer — mais elle butait sur un fait que rien n'annonçait : **le remplissage n'est pas un objet**. Il n'existe qu'à l'intérieur du panneau, alors ce qu'il projetait était la forme d'origine, c'est-à-dire son seul contour : « j'ai juste le contour », trois fois de suite. Deux corrections, et la première est la vraie : le dépôt contient désormais **les hachures ET le contour**, donc l'objet posé *est* la gravure. Ensuite seulement, le bouton — rebaptisé « **Projeter ce remplissage sur une surface 3D...** » — enchaîne la projection quand une seule surface est présente, et nomme la dernière étape. Trois gestes n'en font plus qu'un. **Un contrôle de test s'est révélé incapable d'échouer** au passage : il vérifiait « plus d'arêtes que le contour », ce qui restait vrai avec les hachures seules (256 contre 8). Il compte maintenant exactement `hachures + contour`, et son sabotage rougit.

Une consigne juste, lue au mauvais moment, se lit comme un reproche (v2.99.21). Christophe avait tout fait : hachures déposées (13 656 arêtes, à plat), projetées sur son galbe — son « Motif_Projete » passait de 1 739 à **3 184 mm** de trait, contour *plus* hachures. Il en était à la dernière étape. En ouvrant Gravure remplie pour l'ajouter au job combiné, il s'est fait réciter **les quatre étapes depuis le début**. Le message était exact et inutile : il parlait à quelqu'un qui commence, pas à quelqu'un qui finit. Or une forme galbée est presque toujours une projection, donc quelqu'un qui a déjà tout fait. Le refus mène désormais par le cas fréquent : « SI CETTE FORME EST DÉJÀ PROJETÉE, tu y es : ouvre **Marquage de motif** en sélectionnant ce motif ET le modèle 3D — c'est là que se trouve **Ajouter au job combiné** », les quatre étapes n'arrivant qu'ensuite, pour qui part de zéro. Le test vérifie non seulement que les deux noms sont dits, mais qu'ils sont dits **AVANT** ; son sabotage remet les étapes en tête.

Le verdict de finesse comptait les faces au lieu de peser l'encre (v2.99.20). Corrigé **le jour même**, et c'est une image qui l'a démenti. Christophe voulait projeter son remplissage sur son galbe ; avant de lui faire manipuler quoi que ce soit, trois rendus ont été posés côte à côte — hachures seules au pas 1 mm : des **tirets épars** ; contour seul : un **dessin au trait** propre mais creux ; contour + hachures fines : le **noir massif** qu'il cherchait, cheveux, robe et lettrage compris. La v2.99.19 conseillait pourtant « le contour seul les noircit ». **Faux** : elle raisonnait sur la MÉDIANE des largeurs, et un dessin au trait compte des dizaines de rubans minuscules qui ne pèsent rien. Mesuré sur sa pin-up : médiane 0,104 mm, mais **97,4 % de l'aire** vit dans des rubans de 0,12 mm ou plus, et **DEUX faces en portent 85 %** (0,29 et 0,35 mm de large). Le contour n'en noircit que 2,6 %. `analyse_finesse` pèse désormais par l'AIRE et conseille un pas — la moitié de la médiane *en aire*, soit **0,17 mm** sur ce dessin (3,3 m à graver, contour compris). Le centile bas a été essayé puis

écarté : quelques poussières de face le tiraient à 0,02 mm, un pas que personne ne veut graver. §5 du test gèle le piège, et son sabotage rejoue mot pour mot le contresens de la veille.

Un dessin au trait ne se hachure pas — et l'atelier le dit enfin (v2.99.19). Christophe : « les hachures sur ma forme ne se font pas, mais cela doit être dû aux épaisseurs de traits ». **C'était exactement ça**, et son dessin le chiffre : 96 faces de **0,104 mm** de large en médiane (la plus large 0,745) pour 272 mm² d'encre — au pas d'1 mm, **96 faces sur 96** sont plus fines que le pas. Le hachurage ne rend pourtant pas zéro, il rend *pire* : 561 segments de **0,25 mm de long en médiane**, espacés d'un pas entier le long de rubans larges d'un dixième de millimètre. Il pointille le trait. Et la longueur de segment ne bouge pas quand on resserre le pas (0,251 mm à pas 1,0 ; 0,253 à pas 0,08) : ce sont des **traversées**, pas des remplissages. **Ce qui noircit ces rubans, c'est le CONTOUR** : ses deux lignes sont distantes de 0,104 mm et la brûlure mesurée sur le hêtre fait 0,12 à 0,20 mm — elles se rejoignent, le ruban sort plein. 1 738 mm de contour contre 3 401 mm de hachures au pas 0,08 pour le même noir : le contour est aussi le plus économe. **Le programme le savait déjà** — **in-set_face_robuste** saute les traits fins « le contour les noircit » — mais en silence, et une soirée y est passée. Un troisième verdict compare désormais la largeur RÉELLE des formes ($2 \times \text{aire/périmètre}$, exact pour une bande) au pas, et nomme l'issue : le contour si la brûlure couvre le ruban, un pas plus fin sinon. **Muet sur un aplat** : un avertissement permanent ne se lit plus. Conséquence pour le relief : sur un dessin au trait, « on ne peut faire que du marquage » n'est pas une limite — c'est la réponse juste.

Un aplat ne pouvait pas atteindre une surface 3D (v2.99.18). Christophe : « il y a un souci sur la projection de surface remplie sur une surface 3d, ça ne fonctionne pas ». Sa session, lue **en lecture seule**, a tranché sans hypothèse : son « Motif_Projete » porte 10 564 arêtes, et projeter « MotifSVG001 » (10 491) en rend **exactement 10 564** — là où projeter l'aperçu de remplissage en rendrait 10 521. Il avait donc projeté le **contour seul**, et le Marquage gravait un pourtour. **Ce n'était pas une erreur de sa part** : Gravure remplie calcule ses hachures et les envoie droit dans le G-code, sans rien déposer dans le document — il n'y avait donc rien à projeter. Le refus du mode sur une forme galbée lui conseillait pourtant de « projeter le résultat », un geste que **seul Hachures 2D** permettait. Un bouton « **Déposer les hachures dans le document** » pose désormais ces traits comme objet, avec leur rentrée de bord et leur espacement ; le refus décrit les quatre étapes dans l'ordre, et le mode d'emploi du panneau aussi. **Le contour n'a pas besoin de ce bouton** : c'est la forme d'origine, déjà projetable. Chaîne vérifiée sur sa propre géométrie, toujours sans rien créer chez lui : 96 faces → 561 hachures → 639 arêtes drapées de Z=6,48 à 15,12 mm sur son Pad. **Piège rencontré en écrivant le test** : une projection sur un pavé *incliné* reste PLANE (0,0000 mm d'écart) — c'est la courbure, pas l'inclinaison, qui met le remplissage en défaut, et la pièce d'essai a dû devenir un cylindre.

L'aperçu photo se zoome, et il a la finesse pour (v2.99.17). Christophe : « dans la visualisation photo, il est possible d'avoir plus de résolution et zoomer ? ». **Deux plafonds se cumulaient, et le second annulait le premier** : le rendu s'arrêtait à 2200 px de côté — ce qui ramenait une pièce de 120 × 160 mm de son échelle naturelle (24 px/mm) à 13,2 — puis la boîte d'affichage réduisait le tout à **900 px**, soit ~7 px/mm. Un trait brûlé de 0,30 mm y tenait sur **deux pixels** : il n'y avait rien à juger. Le rendu monte à 4000 px (mesuré : au-delà l'image ne bouge plus, c'est l'échelle qui décide — 0,59 s → 1,58 s, 14 → 46 Mo), et la boîte devient une vraie visionneuse : molette pour zoomer jusqu'à 8×, glisser pour déplacer, « Ajuster » et « 100 % ». Elle sert **huit** aperçus, pas seulement celui-là. **Le zoom est ancré sur le curseur**, pas sur le centre : on zoome pour regarder un détail précis, et centré il fuit hors de l'écran à chaque cran. L'aperçu du tramage photo passe de 900 à 2400 px, soit quatre pixels par rangée gravée au lieu de deux, pour 0,13 s → 0,17 s. **Ce qui n'a PAS**

été touché : le plafond de la grille de simulation. Le porter de 250 000 à un million de cases laisse la grille rigoureusement identique (404 × 608) — c'est le pas qui la fixe, pas le plafond, et le relever n'aurait grossi que les mêmes cases.

Un titre de section rognait la moitié du panneau (v2.99.16). Christophe, capture à l'appui : « dans gravure remplie j'ai un problème d'affichage ». Les boutons « Corriger » et « Alléger » des deux verdicts étaient coupés, et le texte du verdict énergie s'arrêtait au milieu. **Rien à voir avec ces rangées** : le panneau exigeait **693 px** alors que la vue des tâches en fait ~570, et tout ce qui dépassait à droite était rogné. La cause : le nom du matériau était écrit **dans le titre du QGroupBox** — « Puissance vs défocus -- inutile : Hêtre a des tons mesurés ». Un titre de QGroupBox ne revient **jamais** à la ligne : sa largeur devient la largeur minimale du groupe, donc du panneau entier. Le titre reste court désormais et la raison passe dans l'étiquette, qui se plie : **693 → 547 px**. **Ce qui a démasqué la vraie cause, c'est d'avoir mesuré chaque piste séparément** : raccourcir la case à cocher ne changeait *rien* (693 px avant comme après), déplacer le bouton sous l'étiquette non plus. Le défaut n'apparaît qu'**au-delà de ~11 pt**, ce qui explique qu'il ait vécu si longtemps : à la police par défaut tout tenait. Le test balaie les **22 panneaux** à 13 pt ; quatre débordent encore pour des raisons qui leur sont propres (un tableau de mesures dans l'Assistant, des rangées étiquette + champ ailleurs) et sont **nommés** plutôt que le seuil abaissé — cette liste ne peut que rétrécir.

Déplacer ou ajouter une opération ne recalcule plus le job (v2.99.15). La v2.99.14 avait rendu la *réouverture* gratuite, mais un ajout, un déplacement ou une suppression régénérerait encore tout le fichier. La durée est désormais la **somme des durées par opération**, chacune retenue par sa signature : déplacer ou supprimer coûte **0,00 s** (contre 3,59), ajouter une opération **0,11 s** — seule la nouvelle est calculée. **Le prix est une approximation, et il a été mesuré avant d'être accepté** : un fichier complet n'est pas tout à fait la somme de ses parties, car une opération estimée seule paie une approche que le fichier raccourcit, la précédente ayant laissé la tête à côté. **Cet écart est un nombre de transits, pas un pourcentage** — le borner en pourcentage aurait été une erreur : il va de +0,01 % (une grosse forme et une minuscule) à +10,55 % (six minuscules espacées de 300 mm, soit 24 s sur 3m50s), alors qu'en secondes **par opération** les mêmes mesures tiennent toutes sous 4 s. Le test plafonne à 10 s par opération — 1,3 m de transit à l'avance rapide, plus que la diagonale d'un plateau. Il vérifie aussi **le sens** de l'erreur : la somme surestime, jamais l'inverse, car promettre un job plus court qu'il n'est serait le défaut qui coûte. Le nombre exact reste calculé à l'écriture du fichier. **Deux autres pistes ont été mesurées puis écartées** : mémoriser les *corps* de G-code laissait 3,46 s par clic et aurait retenu 42 Mo de texte par opération ; et une correction analytique des transits, qui semblait évidente, a fait passer l'écart de 10,55 à **31 %** — elle a été jetée plutôt que rafistolée.

Le job combiné recalculait tout à chaque ouverture (v2.99.14). Christophe : « à chaque fois que je vais dans les job combiné, l'ordinateur souffle, il recalcule tout ? » — oui. Pour afficher la seule ligne « Durée estimée », le panneau générait le job **entier**. Mesuré sur un remplissage de 150×200 mm : **1 685 610 lignes de G-code en 7,38 s**, relues en 1,67 s pour en tirer un nombre — à chaque ouverture, plus une fois par clic dans la liste. La reconstruction des opérations depuis leurs Jobs, elle, ne coûte que 0,10 s : **c'est bien la durée qui souffle, à 99 %**. Un mémo à une case garde le résultat entre deux ouvertures : **8,99 s puis 0,12 s**, soit 75×. **La première version ratait complètement le vrai chemin**, et c'est le point à retenir : elle comparait les opérations par l'*identité* de leurs objets, alors que l'ouverture du panneau les **reconstruit** depuis les Jobs — tout y est neuf à chaque fois. Elle passait quatre tests sur synthèse et régénérerait quand même ses trois ouvertures sur trois, à cause de deux dictionnaires de style sur dix-huit paramètres. La signature compare

désormais des **contenus** (nombre d'arêtes, longueur cumulée, points extrêmes, réglages, styles). **La propriété qui prime reste que l'aperçu ne mente jamais** : vérifié en changeant l'avance dans le Job — 30m41s devient 4h27m09s, et le panneau régénère. Le test rejoue le chemin réel, Job compris ; son sabotage montre que c'est la *seule* section qui aurait attrapé le défaut.

Le remplissage noircissait la silhouette entière (v2.99.13). Christophe, une pin-up Ricard importée en SVG : « le remplissage se fait mal », confirmé par l'aperçu du job combiné. Mesuré : **23 965 mm² d'encre**, dont **une seule face de 22 796 mm²** couvrant les 136×323 mm du dessin — le visage, la robe et les glaçons sortaient pleins. **Deux explications ont été écrites, puis tuées par la mesure** : l'import perdait le sens d'enroulement des sous-chemins (faux — le rechaînage des arêtes rend les *mêmes* 144 boucles), et la règle de remplissage aurait dû être `nonzero` plutôt que `pair/impair` (faux aussi — sur ce dessin les deux règles donnent 95 polygones pleins et la *même* encre au mm² près). Les deux correctifs ont été retirés. **La vraie cause** : un dessin au trait est fait de rubans posés les uns sur les autres, donc ses trous **se chevauchent** — ici 3 paires sur 27,33 mm². `Part.Face([contour] + [trous])` suppose des trous disjoints : la face sort invalide et **muette à la tessellation**, donc inhachurable. Le chemin rapide abandonnait alors tout le lot à Bullseye... qui rend le contour **sans ses trous**. La face en défaut est désormais rebâtie par **soustraction booléenne** ; deux réparations moins coûteuses ont été essayées et mesurées fausses (`fix()` gonfle la face à 33 313 mm² en effaçant les trous, fusionner les seuls trous chevauchants donne 12 337 mm² et reste muet). Résultat : **6 801 mm² d'encre**, et contre un rendu de référence du même SVG, **92 % de l'encre couverte** pour 2,2 % en trop. Curiosité utile : la somme des polygones annonçait 5 605 mm² là où la coupe rend 5 633 — l'écart *est* le recouvrement compté deux fois, à 0,01 mm² près, donc c'est le modèle polygonal qui avait tort.

Un axe d'origine faisait tomber FreeCAD (v2.99.12). Christophe : un SVG importé, redimensionné sous Draft, posé sur sa surface — « j'ai voulu faire une projection et FreeCAD a crashé ». Son document lu en lecture seule et la panne **reproduite en headless**, jamais dans sa session (la règle de la maison : un motif OCC risqué a déjà segfaulté son FreeCAD et perdu du travail non sauvé). **Le motif n'était pas en cause** : ses 10 491 arêtes se projettent en 0,4 s pour 345 Mo, et 40 000 en 1,6 s. **Le coupable est un axe d'origine.** Les `App::Line X/Y/Z` d'un Body ont une épaisseur Z *nulle* — le classement les prenait donc pour des motifs 2D — et une longueur de **2×10¹⁰⁰ mm**. `drop_edges_to_surface` les discrétise alors tous les millimètres : 2×10¹⁰⁰ points demandés. Mesuré : 10 millions de points en 2,1 s pour une arête de 10 000 km — à 2×10¹⁰⁰, l'allocation ne revient jamais. Et ces axes sont **visibles par défaut** dans un document PartDesign, donc cliquables : les attraper demande juste un clic un peu large. Tout objet dépassant **10 mètres** d'envergure est désormais écarté de la sélection, *sur sa boîte englobante* — donc sans jamais lire sa géométrie — et l'atelier dit lesquels et pourquoi. Le seuil est large exprès : le test vérifie qu'une planche de 2 m passe encore.

Sept générateurs que personne n'éprouvait (v2.99.11). Nouvelle chasse aux bugs vers la v3. **Cinq familles balayées n'ont rien donné, et c'est un résultat** : les trois caches du programme ont des clés d'invalidation complètes (celui du remplissage couvre exactement les cinq arguments de son constructeur) ; aucun argument par défaut mutable ; les trente `max()` / `min()` sur séquence sont tous précédés de leur garde ; le `setEnabled` soupçonné dans la Découpe à plat est le bon motif (état initial posé avant la restauration, qui refait vivre le signal) ; et les deux panneaux qui génèrent depuis OK — Catalogue et Photo — suivent l'ancienne convention, pas un défaut. **Le vrai trou était ailleurs** : en comptant les 26 générateurs de `la-`

`ser_core` et en cherchant leur nom dans les tests, **sept n'y figuraient nulle part** — dont `filled_engraving`, `flat_multipass` et `curved_cut`, *c'est-à-dire les modes qui coupent vraiment du bois*. `tests/test_generateurs_muets.py` les fait tourner et tient les invariants qui se paient sur la machine : fin par **M2** (sans quoi LinuxCNC attend indéfiniment), aucun commentaire non fermé (le programme entier est refusé au chargement), aucun octet non-ASCII, aucun **G4** faisceau allumé. **17 507 lignes de G-code** passent désormais sous ce filet, et les trois sabotages échouent bien. Les sept passent : aucun bug de plus ce tour-ci — mais un générateur muet est un générateur dont personne ne saura dire, le jour où il casse, depuis quand il est cassé.

Le fichier était à jour, mais pas ce qu'on regardait (v2.99.10). Christophe a retesté : ton clair mis en job, puis assombri dans le job, validé — « je vais voir dans le job combiné et le rendu photo est toujours clair ». **Ma correction de la veille protégeait le G-code, pas l'aperçu.** La reprise des réglages avait lieu au moment d'écrire ; la liste, la durée estimée, l'aperçu du trajet et l'aperçu photo lisaient tous l'instantané d'origine. Or *un aperçu qui ne montre pas ce qu'on va obtenir est pire que pas d'aperçu : il donne la confiance sans la justifier* — la règle que ce dépôt avait déjà tirée du fuseau peint en trait uniforme et de l'aperçu combiné qui peignait la teinte théorique. La reprise a lieu désormais **dès l'ouverture du panneau**, ce qui met d'un coup les quatre affichages d'accord, **et** une seconde fois avant d'écrire — entre les deux on a pu remanier la liste. Elle est **partagée, pas recopiée** : le test refuse deux exemplaires, parce que de deux copies une seule finirait par être corrigée, et c'est l'autre qui mentirait.

Le job combiné gravait des réglages périmés (v2.99.9). Christophe : « j'ai changé un remplissage pour le mettre plus foncé, mais quand je vais dans les combinés, cela ne le prend pas en compte ». Exact, et **ce n'était pas un désagrément d'affichage : il aurait gravé l'ancien réglage**, et ne l'aurait vu que sur le bois. Une opération du job combiné est un **instantané** — `_build_combined_operation` capture les arêtes *et* les réglages au moment de l'ajout, et modifier le job ensuite ne les touche pas. C'était défendable tant que la liste se remplissait juste avant de graver ; ça ne l'est plus depuis que les Jobs de l'arbre permettent de revenir régler un mode des heures plus tard. Chaque opération mémorise désormais **le Job dont elle vient**, et la génération **reprend leurs réglages courants avant d'écrire** — pas après, car le dire après coup ne réparerait rien : c'est le fichier qu'on grave qui doit être à jour. Ce qui ne peut pas être repris est **nommé** plutôt qu'avalé : une opération ajoutée depuis son mode (sans job), une autre dont le job a été supprimé. Et un rafraîchissement qui échoue n'empêche pas de graver ce qu'on a — il le dit, et le fichier part avec les valeurs mémorisées.

Deux familles de modes, et l'atelier s'y perdait aussi (v2.99.8). Christophe, après avoir enchaîné texte, remplissage, hachures, projection, contour puis job combiné, et reçu « Job Hachures — mode non combinable » : « je ne comprends pas le flux de travail [...] **si ce n'est pas clair pour moi, cela ne le sera pas pour un nouvel utilisateur** ». C'est la bonne mesure, et il avait raison sur les deux plans. **D'abord un vrai défaut** : un Job est un signet vers une *génération de G-code*, or les Hachures n'en produisent aucune — elles fabriquent une forme que le Marquage grave ensuite. Elles s'en créaient pourtant un, qui ne pouvait rien faire : non combinable, une case « Grave » sans objet, une couleur de calque sur une source qu'on ne grave pas. *Projection, Texte, Texte gravé et Calligraphie fabriquent aussi des formes et n'ont jamais créé de Job : les Hachures étaient l'exception*. Elles n'en créent plus — et les Jobs des documents déjà faits restent nommés, iconifiés et rouvrables, avec un refus qui **dit quoi faire** au lieu de « mode non combinable ». **Ensuite le fond** : la distinction que tout le reste suppose n'était écrite nulle part. Le Guide s'ouvre désormais sur

« Deux familles de modes » — celles qui fabriquent une FORME, celles qui GRAVENT — et rappelle l'ordre imposé sur une pièce courbe : tout à plat, puis projeter d'un coup, puis Marquage ou Découpe courbe sur l'objet projeté *plus* le modèle 3D.

Pourquoi l'atelier DÉPLACE au lieu de copier (décision, pas de version). Christophe : « ne vaudrait-il pas mieux faire une copie de la source dans Formes à graver et garder l'original là où il se trouve ? » L'idée se tient pour l'arbre, et elle est refusée pour une raison de fond : **une copie est une seconde source de vérité.** Rouvrir un texte ou une calligraphie reconstruit l'objet *d'origine* ; la copie garderait l'ancien tracé, et le job pointant dessus graverait le texte périmé — vu seulement sur le bois. C'est la famille exacte du job combiné qui gravait de vieux réglages, de l'aperçu qui montrait une surface morte, et du Job qui doit rester un signet et non une deuxième vérité. Un `App::Link` éviterait la divergence, mais ajoute un objet par forme, affiche la géométrie deux fois et laisse indécis lequel des deux un job doit viser : écarté aussi, après l'avoir posé sur la table. Rappel de ce que le rangement fait réellement : il ne touche **jamais** une forme classée dans un Body, une Part ou un dossier de l'utilisateur — seulement celles qui traînent à la racine, c'est-à-dire nulle part en particulier — et un groupe FreeCAD n'est qu'une organisation d'arbre, l'objet gardant son nom, son placement et ses liens.

L'atelier range enfin ce qu'il crée (v2.99.7). Christophe : « le job hachures_paralleles n'est pas dans Aperçus de remplissage ». Sa remarque porte, mais pas là où elle semble : **cet objet n'est pas un aperçu** — un aperçu ne se grave jamais, celui-ci est le tracé même que le laser suivra. Sa place est parmi les **Formes à graver**. Il n'y était pas parce que le rangement ne se déclenchait qu'à la création d'un **job** : or les Hachures n'en créent aucun (elles ne produisent que de la géométrie, le G-code vient ensuite du Marquage), si bien que leur objet restait à plat dans l'arbre, à côté du dossier plutôt que dedans. Les **quatre points de fabrication** — hachures, projection, texte gravé, calligraphie — rangent désormais leur résultat. **Sans casser l'organisation de l'utilisateur** : une forme qu'il a lui-même classée dans un Body ou une Part n'est pas démenagée, et le test le vérifie autant que le rangement lui-même. Le rangement est aussi *silencieux* : un dossier récalcitrant ne doit jamais empêcher de fabriquer une forme.

L'ordre des opérations n'était écrit nulle part (v2.99.6). Christophe : « faut les faire avant puis les projeter, c'est pas évident ; donc il faut d'abord faire tous les réglages en 2D et projeter tout un par un ? » **Une question qui n'est pas un bug est quand même un défaut** : la v2.99.3 avait ajouté un refus qui nomme le bon ordre, mais rien ne l'expliquait *avant* qu'on se trompe. Le mode d'emploi du panneau Projection porte désormais les trois faits que l'ordre impose. **Un** : tout se prépare à plat, *y compris le remplissage* — un remplissage n'est pas un réglage de gravure, c'est la **géométrie** que le laser suivra. **Deux** : tous les motifs d'un coup et non un par un — le mode a été écrit pour ça dès l'origine, mais son mode d'emploi ne le disait pas. **Trois, et il n'était écrit nulle part** : la projection **tombe à la verticale**, donc seule la position X/Y compte, une paroi verticale ne reçoit rien (ses triangles sont ignorés, invisibles vus de dessus) et sous un surplomb c'est la surface la plus haute qui prend le motif.

Le balayage était trop étroit, et Projection payait la différence (v2.99.5). Christophe : « dans projection de surface les réglages sont dans le mode d'emploi ». Exactement le défaut des Hachures, corrigé douze versions plus tôt *avec un contrôle censé couvrir les 22 panneaux*. **Ce contrôle ne cherchait que les rangées AVEC libellé** — `form.addRow("Espacement :", ...)` — et celle de Projection n'en a pas : `form.addRow(self.lbl_status)`. L'état de la sélection, la seule chose que ce panneau affiche, disparaissait donc

avec le mode d'emploi replié — et le mode d'emploi renvoie à « l'état *ci-dessous* », désignant ce que son propre repli cachait. Il a maintenant sa section, ouverte. **Un balayage trop étroit rassure sans protéger** : le motif accepte désormais toute rangée, et le sabotage confirme qu'il nomme bien `TaskPanelProject` — ce qu'il ne faisait pas avant. C'est la même leçon que les trois `hasattr(ViewObject)` survivants d'une règle qui annonçait « corrigé sur les 8 sites » : *un contrôle qui passe ne prouve rien tant qu'on ne l'a pas vu échouer sur le cas qu'il vise*.

Deux avertissements de trop dans la vue Rapport (v2.99.4). Christophe : « j'ai des erreurs ». Elles n'étaient pas dans une boîte de dialogue mais dans la vue Rapport, lue directement dans sa session — et il y en avait deux. **La première venait de FreeCAD** : « Link(s) to object(s) 'Pad' go out of the allowed scope [...] reside within 'Body' », *deux fois par projection*. Le lien que la projection mémorise vers le solide d'origine était un `App::PropertyLink`, qui est à **portée stricte** — or ce solide vit presque toujours dans un Body ou une Part. Le lien fonctionnait : c'était un avertissement, pas une panne. Mais *un avertissement qu'on apprend à ignorer finit par cacher celui qui compte*. `App::PropertyXLink` est fait pour traverser une portée. **La seconde était de moi**, livrée l'heure d'avant : après avoir correctement expliqué que le motif projeté n'est pas plat (6,07 mm de creux sur son document), l'aperçu enchaînait avec « ne délimite aucune surface fermée » — deux messages pour une seule cause, et le second accusait à tort le contour d'être ouvert, en nommant le JOB qui plus est. Il ne se plaint plus qu'une fois. Les documents déjà créés gardent leur ancien lien : le type d'une propriété est figé à la création, et refaire la projection suffit à l'assainir.

La Gravure remplie acceptait une forme galbée et sortait presque blanche (v2.99.3). Christophe : une surface 3D, un texte projeté dessus, puis Gravure remplie sur la projection — « l'aplat couleur n'a pas bien fonctionné, juste le point du i et l'intérieur du e sont colorés ». **Ce n'était pas l'aperçu : c'était la gravure.** Son document le chiffre — 1652 arêtes, **4 faces bâties, 4,63 mm²** — et la reproduction sur un cylindre de 60 mm le confirme : à plat 8 faces et 217,5 mm², projeté **2 faces et 0,0 mm²**, pour **0,317 mm de creux seulement**. Or `_faces_from_any_shape` est le MÊME constructeur que la Gravure remplie utilise pour savoir quoi hachurer, et `build_filled_engraving_edges` annonce lui-même « à partir de faces 2D ». Le G-code serait donc sorti quasi blanc, sans un mot. Le mode **refuse** désormais une forme dont les points s'écartent d'un plan, en donnant **l'ordre à suivre** : remplir à plat, PUIS projeter, puis graver en Marquage de motif — ce que le mode d'emploi des Hachures dit depuis toujours, mais que rien n'empêchait d'inverser. **Le seuil se déduit, il ne s'invente pas** : `_faces_rapides_depuis_fils` re-polygonise à 0,02 mm, donc en dessous de deux fois cette flèche une forme est indiscernable d'une forme plane pour ce code-là. Le test vérifie aussi le cas dégénéré — une forme alignée n'a pas de plan à contredire et ne doit pas être refusée.

Deux réglages de plus qui se perdaient à la fermeture (v2.99.2). Troisième passe vers la v3. La Calligraphie avait perdu six réglages de plume pendant des semaines, le Marquage cinq champs de dégradé ; le balayage compare désormais, panneau par panneau, les widgets de RÉGLAGE créés et ce que `_last_fields` mémorise. Il a trouvé le « **ton sur mesure** » du Marquage — une largeur et une noirceur cherchées à l'œil, effacées par un clic sur la croix — et le **matériau de la Rampe de puissance**, qui porte la clé des photos de résultat : sans lui, rouvrir le panneau montrait les photos d'un autre bois. **Onze autres candidats se sont révélés corrects**, et chacun est inscrit dans le test avec sa raison : les sélecteurs qui se remettent au neutre, les réglages persistés ailleurs (le trio de spot est dans `PER_LASER_KEYS`, la case de recadrage écrit dans `save_settings` au clic), les mesures qu'on refait à chaque planche — et surtout le **défocus des cellules, délibérément oublié** parce qu'une hauteur défocalisée laissée derrière empoisonne en

silence tous les jobs suivants. *Une liste d'exceptions muette finirait par tout absoudre, et c'est exactement ainsi qu'un réglage se reperd.* Le dernier balayage prévu — les `isVisible()` dans les tests, toujours faux en offscreen, donc verts pour la mauvaise raison — n'a **rien trouvé**.

Le Nuancier effaçait les tons qu'il ne savait pas relire (v2.99.1). Deuxième passe vers la v3, sur la famille la plus coûteuse : les écritures de config. Les trois écrivains de largeurs brûlées fusionnent correctement (le troisième est une suppression volontaire, avec confirmation « Irréversible ») et deux des trois écrivains de tons rechargent la liste avant d'ajouter. **Le troisième réécrivait la table du panneau** — et `save_shades` REMPLACE la liste du matériau, donc tout ce que la table ne rend pas est effacé. Or une ligne dont un nombre était illisible était *jetée*, avec un simple avertissement console : blanchir par mégarde une cellule d'un ton mesuré au pied à coulisse le faisait disparaître à l'enregistrement, sans rien à l'écran. **Et le message de succès annonçait `rowCount()`**, le nombre de LIGNES : il pouvait donc se féliciter d'un enregistrement complet juste après en avoir perdu trois. Le panneau **refuse** désormais, nomme les lignes fautives, n'écrit rien — et compte ce qui part réellement. C'est la règle de la v2.4.0, « ② ne doit jamais effacer ce qu'il ne sait pas AFFICHER », appliquée à ce qu'il ne sait pas LIRE. Le test blanchit une cellule d'un ton sain et vérifie les deux moitiés : rien n'est écrit, et la ligne corrigée repasse — sans quoi le refus serait un blocage et non un garde.

Cap sur la v3 : balayer les pièges déjà payés (v2.99.0). Christophe : « on arrive bientôt à la v3, j'aimerais bien maintenant corriger des bugs pour avoir une v3 stable comme les pros ». La meilleure piste n'est pas de chercher au hasard : **chaque règle de ce dépôt raconte un défaut déjà payé**, et plusieurs annoncent « corrigé sur les N sites ». Or trois `hasattr(obj, "ViewObject")` dormaient encore là où la règle disait huit — dans les hachures, puis dans la découpe et la gravure de la planche d'ajustement. En headless l'attribut *existe et vaut None*, et la ligne suivante meurt dessus. **Un balayage fait une fois n'est pas une propriété** : `tests/test_pieges.py` le rejoue désormais à chaque exécution, sur les sept sources. Il vérifie aussi qu'aucun G4 n'est émis hors de l'armement (le HAL ramène la puissance à zéro à l'arrêt : un point fait au dwell ne grave RIEN et le job sort blanc) et que les **26 générateurs** assainissent tous leur sortie — un commentaire non fermé fait refuser le programme entier au chargement. **Un quatrième contrôle a été écrit, mesuré, puis jeté** : interdire les couleurs en dur attrapait dix teintes légitimes (magenta des marqueurs de collision, brun d'encre des textes) et, surtout, *n'aurait pas attrapé le vrai cas* — l'ancien vert des hachures est à 0,85 du vert du marquage en distance RVB, alors qu'à l'œil ils se confondaient. La collision était perceptuelle, pas numérique. Un chiffre qui ne sépare pas ce qu'il prétend séparer rassure à tort et finit désarmé.

Les hachures aussi ont leur propre objet (v2.98.1). Christophe : « maintenant le fait de mettre des hachures enlève le contour vert ». Le même défaut qu'à l'entrée précédente, un cran plus bas : les hachures posent un objet `Hachures_...` bien à elles, visible tout seul, et n'avaient donc pas plus besoin du contour de leur source que le remplissage n'avait besoin de lui. `MODES_HORS_TRAIT` réunit les deux ; il ne reste au trait que ce qui n'existe QUE comme parcours sur la forme — le marquage et les deux découpes. **Un second défaut a été trouvé en chemin** : l'objet de hachures portait un **vert en dur** `(0.0, 0.8, 0.0)` hérité de la macro d'origine. Inoffensif jusqu'ici ; depuis que les calques parlent une langue de couleurs, il entraînait en collision avec le *vert du marquage* et disait donc le contraire du reste. Il puise maintenant dans la roue, comme tout le monde — et sa docstring, qui annonçait encore « (vert) », a été recalée avec lui. Au passage, ce même bloc portait le `hasattr(obj, "ViewObject")` que le dépôt a déjà corrigé sur huit sites : **vrai et**

inutile en headless, l'attribut existe et vaut None. Le test gèle les trois — la liste des modes hors trait, l'absence du vert en dur, l'absence du `hasattr`.

Deux canaux, deux jobs : la surface et le trait (v2.98.0). Christophe, un marquage et un remplissage sur le même texte : « donc je ne verrai jamais le vert sauf quand je cache l'aperçu ? » Exact — et c'était une faiblesse de la pile de calques. Le remplissage l'emportait sur le marquage, donc il prenait la couleur du *trait*... alors qu'il dispose depuis la v2.95.0 de **sa propre surface**. Il confisquait un canal dont il n'avait plus besoin, et le vert du marquage ne pouvait jamais sortir. Le trait revient donc aux jobs **qui suivent un trait** — marquage, découpes, hachures — et le remplissage s'exprime par son aire. **Deux canaux pour deux jobs : la surface dit ce qu'on noircit, le trait dit ce qu'on parcourt**, et on les voit ENSEMBLE au lieu de l'un ou l'autre. Quand un remplissage est le seul job coché, il reprend le contour : sans cela la forme paraîtrait éteinte alors qu'elle sera gravée. Le test rejoue exactement son cas — marquage + remplissage → trait vert, surface ocre — puis toute la descente : hachures cochées reprennent le trait, seul le remplissage restant le récupère, tout décoché passe au gris.

Le contour disparaissait dans son propre remplissage (v2.97.2). Christophe : « le remplissage de couleur masque le contour du marquage ». **Ce n'était pas la profondeur**, comme on pouvait le croire : sur son texte, la Gravure remplie gagne la priorité des calques, donc les *traits* portaient déjà sa couleur — et la surface posée dessous portait exactement la même. Le contour se noyait dans sa propre teinte. **Une aire et un chemin ne sont pas la même chose et ne doivent pas se peindre pareil** : la surface garde la teinte du mode mais monte en valeur et baisse en saturation, si bien que le trait s'en détache. Écart mesuré **0,90 à 1,05 selon le mode, contre 0,00 avant**, et la famille de teinte reste la même — une seule table d'indices sert au trait comme à la surface, donc ils ne peuvent pas partir dans deux directions. C'est aussi la langue de la maison : une famille, deux tons. Le recul de la surface passe au passage de 0,01 à **0,05 mm** : le tampon de profondeur d'une scène de 100 mm ne départage pas fiablement un centième, et cet objet n'étant jamais gravé, le recul ne coûte rien.

Le rayon des aperçus dit enfin ce qu'il contient (v2.97.1). Christophe : « dans Aperçus (ne pas graver) il y a juste les remplissages, peut-être mettre Aperçu remplissage ? car il n'y a pas d'aperçu de marquage — comme cela on sait que l'on peut le cacher si on ne veut pas voir les remplissages ». Le dossier s'appelle donc « **Aperçus de remplissage** » : un nom de dossier doit dire ce qu'on éteint en l'éteignant, et celui-ci ne contient rien d'autre. L'avertissement « ne pas graver » qu'il portait n'a plus à tenir dans le libellé — depuis la v2.96.0 c'est `_sans_aperçus` qui l'empêche, à l'entrée des cinq modes. **Le renommage rattrape les documents déjà créés** (le dossier garde son nom interne, donc on le retrouve) **mais n'écrase pas un nom que l'utilisateur aurait choisi lui-même** : on ne remplace que nos propres étiquettes. Le test gèle les deux moitiés, la seconde étant la moins évidente.

Une seule roue chromatique pour les barres et les calques (v2.97.0). Christophe : « je pense que pour les couleurs de remplissage, il faudrait rester uni par rapport à la barre d'icônes et au reste ». Les calques étaient nés avec des primaires saturées — rouge, grenat, bleu, vert, orange — qui juraient avec les barres pastel et les icônes orange-ardoise. Ils puisent désormais dans `laser_core.TEINTES_ATELIER`, la table qui teinte déjà les neuf barres : **une seule table, lue par les deux**, parce que deux copies auraient dérivé au premier ajustement et que « uni » est exactement ce qui ne survit pas à une copie. Chaque mode garde la teinte de SA barre quand elle est libre — rouge à la découpe à plat, l'orange de la maison à la gravure remplie, vert au

marquage ; les deux qui se partageaient une barre empruntent une autre teinte de la même table. **Ce que ce choix coûte a été mesuré et assumé** : l'écart minimal entre deux calques tombe de **0,44 à 0,25**, et le seuil du test descend avec lui — signalé plutôt que rabaissé en douce. Une variante encore plus stricte, une teinte par barre avec les deux modes d'une même barre séparés par la clarté, descendait à **0,23** en mettant côte à côte deux clairs chauds (découpe courbe et hachures) : plus « uni » sur le papier, moins lisible sur l'écran, écartée pour ça. Le §5 de `test_barres_outils` gèle l'invariant sur trois fronts : `InitGui` ne redéfinit aucune table, la roue a autant de teintes que l'atelier a de barres (`zip` s'arrête au plus court : une barre ajoutée sans sa teinte resterait incolore en silence), et chaque couleur de calque appartient bien à la roue.

Le gros trait a fait son temps (v2.96.1). Christophe : « je pense que le bord large pour les remplis et autre on en a plus besoin ». Il a raison, et l'entrée précédente le disait déjà sans le voir : la v2.94.1 épaississait le trait des modes remplissants *faute de savoir montrer la surface* — un pis-aller, écrit noir sur blanc comme tel. La v2.95.0 pose la vraie surface ; le gros trait ne dit donc plus rien que l'aperçu ne dise mieux, et l'atelier cesse au passage d'imposer une largeur d'affichage qui ne le regarde pas. **MODES_REMPLIS part avec lui** : la largeur de trait était son dernier lecteur, et une constante que plus personne ne lit finit par être relue de travers — c'est la leçon d' `encre_oubliee`, la réparation qui survit à son défaut et devient le défaut. Le test gèle les deux retraits, faute de quoi ils reviendraient par la porte de derrière à la prochaine bonne idée. **Élaguer plutôt qu'empiler : une fonctionnalité en moins à tester est une victoire.**

L'aperçu ne doit jamais devenir un motif, et l'arbre a trois rayons (v2.96.0). Christophe, aussitôt le calque plein livré : « si par erreur je clique sur aperçu remplissage puis hachure, cela va faire des hachures dans les remplissages ? » **Oui, et sa crainte était fondée** : `Selectable = False` ne bloque que le clic dans la *vue 3D*, alors qu'un clic dans l'*arbre* sélectionne tout aussi bien — et les cinq modes lisent la même `getSelectionEx()`. Une surface d'aperçu est un rendu, bâti à partir d'une autre forme ; la hachurer reviendrait à graver l'ombre au lieu de l'objet. `_sans_aperçus` la retire donc de toute sélection, **à l'entrée des cinq modes** — un garde par mode aurait laissé passer celui qu'on aurait oublié, et le test compare les deux comptes dans la source pour qu'aucun ne puisse être ajouté sans lui. Seconde remarque : « peut-être faudrait-il ordonner un peu mieux les calques [...] sinon cela va être le foutoir ». Tout atterrissait à plat dans « Atelier Laser ». Trois natures qui ne se manipulent pas pareil — un **job** se coche et se double-clique, une **forme** se sélectionne pour en faire un job, un **aperçu** ne se touche jamais — donc trois rayons : **Jobs, Formes à graver, Aperçus de remplissage**. Le rangement retire l'objet du rayon voisin avant de le poser, parce qu'*un objet rangé deux fois n'est rangé nulle part*, et le test le vérifie. Les formes que l'utilisateur a lui-même classées dans un `Body` ou une `Part` ne bougent pas ; celles que les versions précédentes avaient posées à plat rejoignent leur rayon à la prochaine génération.

Le calque plein : montrer la surface qui sera noircie (v2.95.0). « Et si je fais une projection, ça fonctionne les faces avec couleur ? » — non, et le code est net : `run_projection` pose un `Part.Compound` **d'arêtes**, comme le contour dont il vient. Toute la chaîne de l'atelier est en arêtes (esquisses, SVG importés, texte contour, hachures, projections) ; seule une vraie face — d'un solide, d'un `Body`, d'une primitive — se remplit. **Mais la Gravure remplie sait BÂTIR ces faces** : elle le fait déjà pour calculer ce qu'elle va noircir. Mesuré sur le texte de l'atelier : **0,17 s pour 8 faces, 340 mm²** à partir de 1742 arêtes — le chemin rapide encaisse, l'idée est donc viable. Un objet « Aperçu remplissage » accompagne désormais chaque job de remplissage : la surface réelle, colorée, semi-transparente, posée un centième de millimètre *sous* le tracé (même Z, et le contour disparaît sous elle par moirage), **non sélectionnable** pour qu'un clic malheureux n'en fasse jamais un

motif, et supprimée avec son job. Christophe : « je le veux car cela a vraiment un sens pratique et utile ». **Les hachures en sont exclues exprès** : elles couvrent une aire mais laissent du bois nu entre les traits — la peindre pleine promettrait un noir qu'elles ne rendent pas. **Le test a trouvé un défaut que la montre n'aurait pas vu** : en comptant les appels plutôt que les secondes, il a relevé **quatre reconstructions pour deux bascules** — un job dont la source ne borne aucune surface retenait la construction à chaque clic. Rafrâchir ne bâtit plus rien : on montre ou on cache, la construction n'a lieu qu'à la génération du job.

Les calques peignaient job par job — il fallait arbitrer (v2.94.1). Christophe, capture à l'appui, trois jobs sur un même texte : « cela ne fonctionne pas bien, je ne vois pas de remplissage ; quand je décoche gravure oui / non la couleur du dessous ou dessus ne s'affiche pas ». Les deux reproches portaient, et son document les explique. **Premier défaut, de conception** : la v2.93 peignait *job par job*, dernier arrivé gagnant. Décocher un job GRISAIT donc une forme que deux autres gravaient encore — la couleur d'une forme partagée ne peut pas se décider depuis un seul de ses jobs. `rafrachir_calques` arbitre désormais sur **tout le document** : chaque forme prend la couleur du job le plus conséquent qui reste coché, dans l'ordre **Découpe à plat > Découpe courbe > Gravure remplie > Hachures > Marquage** — décocher celui du dessus révèle celui du dessous, ce qu'on attend d'une pile de calques. Le test le déroule marche par marche : trois cochés → remplissage, décoche → hachures, décoche → marquage, tout décoché → gris. **Second défaut, structurel** : son « Texte gravé » est un compound de **1742 arêtes et ZÉRO face** — `ShapeColor` n'y peint rien, et aucun réglage n'y changera quoi que ce soit. Un contour n'a pas de surface à remplir. Le trait étant la seule surface disponible, un job qui noircit une aire **l'épaissit** (4 px contre 2) : c'est ce qui distingue à l'œil « on remplit ça » de « on suit ce trait ». Le remplissage coloré reste vrai — mais seulement sur une forme qui a des faces.

Les réglages des Hachures vivaient dans le mode d'emploi, et la couleur dit maintenant quel TRAVAIL (v2.94.0). Deux remarques d'un coup. La première : « dans hachure les réglages sont dans modes d'emploi ». Toute rangée posée après un `_section` appartient à son repli — et « Mode d'emploi », replié par défaut, était la **dernière** section de ce panneau : ses cinq réglages disparaissaient avec lui. **Le job combiné avait évité ce piège en v2.71 et son commentaire le disait déjà** ; il vivait encore ici. Le contrôle porte donc sur les **22 panneaux**, pas sur celui qui a été signalé, et son sabotage nomme le coupable et ses cinq réglages. La seconde : « pour les remplissages, il faudrait peut-être remplir la sélection d'une couleur et si on ne veut pas graver, ne pas remplir ; et pour le reste pareil, marquer d'une couleur sinon pas de marquage ». La couleur de la v2.93 disait *quel mode* ; elle dit maintenant **quel travail**, qui est l'information qu'on cherche en regardant la planche. Gravure remplie et Hachures noircissent une aire : leur face prend la couleur. Les deux découpes et le marquage suivent un trait : on ne peint que le trait et **on laisse la face tranquille** — forcer un solide 3D en fil de fer pour la beauté du calque rendrait le modèle inutilisable. Décoché, un remplissage passe à 80 % de transparence (« si on ne veut pas graver, ne pas remplir ») et le gris d'extinction est désormais **très clair** (0,85), demandé tel quel : assez pâle pour cesser de réclamer l'attention, assez visible pour qu'on retrouve la forme et qu'on la recoche. Le test vérifie aussi que ce gris se *distingue* de chacune des cinq couleurs de mode — sans quoi un job éteint se lirait comme un job allumé.

Les calques : une couleur par mode, une case pour graver ou non (v2.93.0). Christophe, après avoir vu LightBurn : « il y a une sorte de calque pour chaque type de trait ou travail afin de les sélectionner ou pas pour la gravure, et aussi grâce à la couleur de voir sur l'écran quel job pour quel trait ». **Les deux tiers existaient déjà sous un autre nom** : les **Jobs** de l'arbre sont un par couple (mode, forme), rangés dans le dossier

« Atelier Laser », et `ajouter_jobs_au_combine` en faisait déjà un fichier unique. Il manquait la couleur et la case. Chaque mode reçoit donc la sienne — rouge et grenat aux deux découpes (la coupe est ce qu'on ne rattrape pas, et à plat ou sur relief ne se pilotent pas pareil), bleu au marquage, vert au remplissage, l'orange de la maison aux hachures — et la forme source la prend. Une propriété `Grave`, sauvée avec le document, décide de l'inclusion ; décochée, **la forme passe en gris**, parce qu'un calque éteint doit se voir éteint — sinon la case ne sert qu'à celui qui se souvient de l'avoir mise. **La limite est nommée plutôt que cachée** : une forme peut légitimement servir à deux jobs — marquer puis découper le même contour — or la couleur est portée par l'OBJET et FreeCAD n'a rien pour en montrer deux. Le dernier job posé gagne, et la console le dit : une couleur qui ment sur ce qui sera gravé est pire que pas de couleur du tout. Les deux jobs, eux, sont bien gravés. Les Jobs d'avant cette version n'ont pas la propriété ; `getattr(job, "Grave", True)` fait qu'un ancien document continue de tout graver.

L'aperçu vif, et le mur de 435 ms qui l'interdisait (v2.92.0). Christophe : « est-il possible de voir la font changer au fur et à mesure que l'on change les paramètres, avec un mot au choix afin de prévisualiser le résultat ? » Le dessin n'était pas l'obstacle — la plume rend un mot en **1 ms**. `echelle_fuseau_z` l'était : 128 paliers × 40 pas de dichotomie, soit **5 120 interpolations et 435 ms** par appel. **Le verdict les payait DÉJÀ à chaque tour de molette**, y compris sur l'angle du bec, qui ne change pourtant rien à la table de brûlures. Un mémo dont la clé porte la **mtime du fichier de config** — donc mesurer une brûlure de plus, ou une autre session qui écrit, l'invalidé sans qu'on ait à s'en souvenir. Mesuré : le verdict passe de **420 à 5,5 ms**, la molette de 420 à 5,1, et la vignette coûte 4,1. Même famille que les deux relectures de config déjà attrapées ici (le panneau Photo à 14 s) : **un échantillonnage de courbe charge ses mesures une fois**. La vignette dessine un **mot** et non le texte entier — « Atelier du Verdier du munu » dans 420 px donne des lettres de trois pixels, où aucun plein ne se juge — et le champ vide retombe sur le premier mot du texte. **Deux défauts trouvés en la posant** : une `QLabel` *rogne* son pixmap au lieu de le réduire, si bien qu'on voyait un bout de trait agrandi plutôt qu'une lettre ; et le schéma de plume écrivait encore « contraste 1:5 » à trois centimètres d'un champ remis à l'endroit la veille — le second appelant du même défaut, que le §22 couvre désormais.

Un spécimen pour les mono-trait, et des préréglages (v2.91.0). Christophe : « ce serait bien d'avoir, comme polices installées, un visualisateur type "Voir les polices" mais pour police mono-trait, et peut-être aussi pouvoir sauvegarder ses réglages ». Le spécimen des `.ttf` existait depuis la v2.69 ; celui des **45 mono-trait** manquait, et une liste de noms comme « EMS Bird » ne dit rien de la forme des lettres. **La différence avec le spécimen des .ttf tient en une phrase** : une mono-trait *n'a pas de contraste à elle* — le sien vient de la plume qu'on lui applique. Mesuré à réglages identiques sur les 45 : de **4,64:1 à 4,66:1**, deux centièmes. Classer ou étiqueter là-dessus aurait été le détecteur de fût contourné une seconde fois (27 % contre 28 %) : **un chiffre qui ne sépare rien rassure à tort**. On trie donc par nom et on ne calcule aucune note — en revanche on dessine avec les **réglages courants**, car sur une mono-trait l'angle du bec change la lettre bien plus que la police. Les libellés portaient déjà ce qu'il y a à savoir : les quatre variantes « fût contourné, grave double » se nomment elles-mêmes, elles sont juste mises en couleur. Coût mesuré : 0,30 s pour les 45. Les **préréglages** réutilisent le bloc que cinq panneaux portent déjà ; celui-ci était pourtant le plus réglé de tous — treize champs, dont six pour la seule plume. **Un défaut attrapé par le test, pas par le contrôle de syntaxe** : le handler du bouton a d'abord atterri dans `TaskPanelText`, une classe sans plume ni combo mono-trait, parce que `_on_voir_polices` existe dans quatre panneaux et que le remplacement avait pris le

premier. Le §23 pilote le bouton et fait tourner tout le peuplement — 45 polices rendues — plutôt que d'appeler les aides autour.

Le contraste de la plume s'écrivait à l'envers (v2.90.1). Christophe, le panneau sous les yeux : « dans la case je ne peux mettre que 1:16 et non 16:1 ». Le champ portait un **préfixe « 1: »**, si bien qu'il écrivait le rapport dans l'autre sens — « 1:16 » se lit « le plein fait un seizième du délié », l'exact contraire de ce que la valeur commande. **Le panneau se contredisait lui-même** : son propre verdict annonce « X:1 entre délié et plein » et l'infobulle du champ, deux lignes plus bas, cite « 26:1 » et « 31:1 ». Seule l'étiquette était fausse, jamais le calcul — mais une étiquette inversée sur le réglage qui gouverne toute la modulation invite à saisir l'inverse de ce qu'on veut. Le §22 gèle les deux moitiés, car remettre le libellé à l'endroit sur une valeur elle-même inversée ne serait qu'un mensonge mieux tourné : le champ doit afficher « 16:1 », *et* demander 16 doit rendre plus de modulation que demander 4 (14,7:1 contre 3,7:1).

La moitié des inclinaisons de plume était inatteignable (v2.90.0). Christophe, une police calligraphique en référence : « regarde le d de cette fonte, le tien le trait épais est en bas, là il est sur la gauche ». Exact, et mesurable. `largeur_plume` calcule `abs(sin(θ - angle))`, **de période 180°** : -40° n'est donc pas « -40 ramené à 40 », c'est un réglage à part entière — et le champ du panneau était borné à **0-90°**, si bien qu'une plume penchée dans l'autre sens n'existait tout simplement pas. La comparaison se fait sur la **signature du trait** : l'épaisseur déposée pour chaque direction de tracé, ce qui décrit l'instrument indépendamment des lettres choisies. Sur « Atelier du Verdier », écart à la police de référence : **pointue -40° → 0,142** ; pointue 0° → 0,173 (le meilleur *dans* la plage) ; pointue +50°, son réglage, → **0,276, soit le 47^e rang sur 74**. Ouvrir les négatifs divise l'écart par deux sans toucher au modèle. Ce qu'on voit sur la lettre : le rapport bas-gauche/gauche de la panse du « d » passe de **0,78 à 0,36**, la référence étant à 0,22 — le plein quitte le bas de la panse pour son flanc gauche. **Une hypothèse a été mesurée puis abandonnée en chemin** : la référence est épaisse à 60° *et* à 240°, deux directions opposées, ce qui est la signature d'un bec plat ; mais son écart de symétrie vaut 0,160, entre le bec parfait (0,022) et la pointe (0,427). C'est une police dessinée à l'œil, pas une simulation d'instrument, et la pointe reste le meilleur ajustement. **Le secteur du contrôle est choisi parce qu'il sépare** : le bas franc donne 0,24 contre 0,28, quatre centièmes qui laisseraient passer n'importe quel code ; c'est le bas-*gauche* qui discrimine.

Une police mono-trait est un polygone (v2.89.0). Christophe, photo d'une vraie calligraphie à l'appui : « c'est presque bon, voici un exemple concret que j'aurais dû te donner ». Son exemple a des courbes ; le nôtre avait des facettes. `hersheyscript1` ne donne que **22 sommets** pour tout le « d », donc sa panse sortait en polygone d'une douzaine de côtés — et la densification de la v2.86.0 n'y pouvait rien, **subdiviser une droite ne donnant que des droites**. Une **Catmull-Rom centripète** passe désormais par les sommets. Elle passe *par* chacun d'eux, donc aucun point de la police n'est déplacé — contrairement à une moyenne glissante, qui raboterait le dessin (la voie extraction a déjà payé cette leçon : 97,6 → 92,4 % de couverture). La variante centripète, et non uniforme, est ce qui interdit les boucles quand deux sommets sont très inégalement espacés — la règle dans une police, où une courbe est dense et une hampe fait un seul segment. **Mais une spline arrondit les angles, et certains sont le dessin même**. Sans garde-fou le « 4 » se cintrait de 4,86 % de capitale et le « A » de 3,14 — 0,49 et 0,31 mm sur un texte de 160 mm, parfaitement visibles. La spline est donc coupée à chaque vrai coin. **Le seuil se lit dans la mesure**, sur les seuls caractères qu'on grave vraiment : aucun garde 4,86 % ; à 60° et à 45° **1,26 %** avec la panse toujours pleinement lissée ; à 30° l'écart tombe encore mais la règle prend des sommets de *courbe* pour des coins et la panse reperd son galbe. 1,26 %

vaut **0,13 mm sur 160 mm** — **exactement le trait le plus fin que le hêtre sache brûler**, donc invisible. Résultat : virage maximal dans la panse $30^\circ \rightarrow 9,2^\circ$, tracé allongé de 0,5 % ($447,4 \rightarrow 449,7$ mm, les courbes étant plus longues que les cordes qu'elles remplacent), gestes et largeurs inchangés.

Le « d » est deux mouvements de plume, pas un (v2.88.0). La veille, la hampe était réparée ; Christophe regarde la suite : « j'aurais commencé le cercle du d en haut à droite à environ 30 degrés et parti dans le sens anti-horaire [...] là c'est bien mais du coup le cercle du d est très fin du début à la fin ». **C'est exactement ce que la police fait — et c'est nous qui le défaisons.** Une mono-trait ne sait pas lever le stylo : elle enchaîne le « d » en une seule polyligne, panse en anti-horaire puis hampe vers le haut. Or les deux moitiés ne demandent pas le même sens, et `_sens_main_ok` ne lit que les deux *bouts* du geste : la hampe, de loin le plus long segment, décidait pour tout le monde et retournait la panse avec elle. Le plein basculait alors à **droite**, écrasé contre la hampe, et la grande courbe de gauche — celle qu'on voit le plus — tombait à **0,096 mm**, le minimum absolu du texte. Largeur médiane de la panse par secteur, avant $\rightarrow$ après : gauche **0,096 $\rightarrow$ 1,161 mm**, droite $0,781 \rightarrow 0,610$, la hampe restant à 0,610. Le geste est donc coupé là où sa droite terminale contredit le reste. **Deux garde-fous, chacun payé par un test** : on ne coupe que si les deux moitiés se *contredisent* (sinon la coupure n'achète rien et laisse deux terminaisons franches de plus au milieu d'une lettre), et seulement si la tête est une **boucle** — sans quoi la règle coupait aussi le chevron du « A », dont les deux jambages sont bel et bien un seul mouvement monté puis descendu, ce que le §3 gèle depuis la v2.80. Une boucle revient près de son départ, un chevron s'en éloigne autant qu'il avance : c'est là-dessus qu'on les sépare. Coût : $36 \rightarrow 39$ gestes, 131 mm de trajet à vide, tracé identique au millimètre et contraste inchangé.

La plume gravait une descente en portant la largeur d'une montée (v2.87.0). Christophe, le lendemain de la densification : « en écriture un d commence par le cercle puis la barre verticale, et la barre verticale commence en haut ». La police enchaîne bien cercle puis hampe — mais elle trace la hampe **vers le haut** : c'est la remontée dans le jambage, celle qu'une main fait en filet avant de redescendre en plein. Une mono-trait ne peut tracer qu'un des deux. Et comme la plume pointue n'appuie qu'en *descendant*, les trois « d » du texte recevaient **0,096 mm** — le trait le plus fin de tout le texte, là où la lettre demande son plein le plus visible. **Le générateur retournait pourtant déjà chaque geste dans le sens de la main** (`sens_de_la_main`, v2.67.0), mais il le faisait *après* que les largeurs soient figées : on gravait une descente en portant la largeur d'une montée. Sur la voie extraction c'était sans effet — une largeur lue dans l'encre ne connaît pas le sens — d'où le fait que personne ne l'ait vu. L'orientation se fait désormais à la construction, avant la mesure, avec la **même règle partagée** (`_sens_main_ok`) plutôt qu'une seconde copie du critère. Mesuré : hampe **0,096 $\rightarrow$ 0,610 mm**, +6,5 % d'encre au total, contraste inchangé ($13,8 \rightarrow 13,9:1$), tracé identique au millimètre. **Une boucle fermée ne se décide pas par ses bouts** : confondus, ils donnaient toujours « non » et la règle retournait la boucle à chaque appel — inoffensif tant que la largeur ignorait le sens, mais le double retournement remettait alors les pleins à l'envers sur les « e ». La règle est maintenant idempotente. L'invariant tenu par le §18 est plus fort qu'une valeur : sur la plume, `sens_de_la_main` ne doit **plus rien avoir à retourner** — 0 geste sur 36.

La plume ne posait qu'un point tous les millimètres (v2.86.0). Christophe, sa calligraphie de 160 mm en main : « sur le d, la barre verticale ne va pas, elle est fine en haut et épaisse en bas, je pense qu'elle est gravée en 2 passes pour 2 hauteurs différentes et non en une seule passe avec un z progressif ». La hampe était **un seul bloc G1 de 8,63 mm**. Une police mono-trait est une polyligne à sommets rares, et la plume reprenait ces

sommets tels quels : 399 points pour 447 mm de tracé, un pas médian de **1,02 mm** et un maxi de **9,55**, quand la voie extraction rend 1809 points plafonnés à 0,40. Or tout l'aval interpole *entre* deux points : la machine faisait varier Z linéairement sur toute la hampe, qui recevait ainsi la montée destinée au plein situé quatre points plus loin — alors qu'un fût droit a, par construction, une largeur **constante**. Le ré-échantillonnage existait depuis toujours (`PAS_ARC_MM`) mais vivait dans `calligraphie.py` ; la plume est un **troisième constructeur de chaînes**, jamais raccordé. On subdivise désormais chaque segment *sans déplacer un sommet* — une police mono-trait est faite d'angles vifs, et un ré-échantillonnage régulier les couperait. **Le pas ne se dit pas en millimètres absolus** : le lissage vaut une fraction du plein, donc un pas fixe ferait varier le contraste avec la taille du texte — le §2 des tests l'a refusé au premier jet, et l'étalon est la largeur du bec (même leçon que `DIRECTION_EN_LARGEURS`). Résultat sur la hampe : Z **constant sur 6,3 de ses 8,6 mm**, la montée confinée aux 2,35 derniers ; tracé identique au millimètre, contraste inchangé (13,7 → 13,9:1) et rigoureusement le même à 40, 80 et 160 mm.

Le petit trait du « t » : mesuré, puis laissé en place (v2.86.0). Deuxième remarque du même établi : « sur le t le laser fait 2 traits, une pour la barre horizontale et une toute petite en vertical de la même épaisseur, et après il refait la bonne barre verticale ». Ce trait de 3,7 mm existe bien — et ce n'est **pas** une barbu de squelettisation : le fichier venait de la plume, qui ne squelettise rien. C'est l'**attaque** du t cursif, un trait de liaison de la police, dont le bout tombe exactement sur la hampe. **Aucun chiffre ne le sépare de ce qu'il faut garder**, et trois critères ont été essayés sur les 26 lettres : par la longueur, l'attaque fait 38 % de la capitale quand la *barre du t* en fait 33 et le *point du i* 19 — ce qu'on veut garder est plus court que ce qu'on voudrait retirer ; par la topologie, « un seul bout collé » attrape les traits *principaux* du h, du k, du m, du n, du u, du v, du w et du y, jusqu'à 195 % de capitale, c'est-à-dire des lettres entières ; par l'écart de ligature, l'attaque flotte à 2,27 mm de sa voisine mais les deux bouts de la barre du t sont à 2,44 et 2,73. Les quatre polices cursives mono-trait laissent le même vide de 24 à 45 % de capitale après une capitale, donc ce n'est pas non plus un choix de police. **Rien n'a donc été codé** — c'est la leçon du détecteur de fût contourné, jeté parce qu'il donnait 27 % contre 28 % : un élagage qui ne sépare pas mangerait de vraies lettres, et cela ne se verrait qu'au bois. Au passage, l'en-tête du G-code nommait « Aston Script.ttf » sur un fichier tracé en `her-sheyscript1` ; il nomme désormais la police qui a vraiment produit les gestes.

Le pas de la bande de tons suit la hauteur réellement gravée (v2.85.0). Christophe a mis « Défocus des cellules » à 0 et la planche est sortie **rayée** : le pas valait toujours 1,01 mm — calculé pour un trait de 0,68 à 0,96 mm en défocus 15 — alors qu'au foyer le trait fait 0,11 à 0,20. Couverture obtenue 11 à 25 % au lieu des 52 à 95 % promis. **Deux sources pour une seule valeur** : le pas se calculait sur le `cell_defocus` littéral de la recette pendant que la gravure lisait le champ. Et rebrancher naïvement le champ ne suffisait pas — la réapplication de l'objectif *repose* ce champ depuis la recette, donc la valeur saisie à la main était écrasée avant d'être lue. D'où un **recalcul dédié** qui ne touche que le pas. Vérifié dans les deux sens : 1,01 mm en défocus 15, 0,11 mm au foyer, et 1,01 de nouveau au retour.

La calligraphie gravait tout entière au plancher de puissance (v2.84.0). Christophe, sa signature gravée à F800 : « c'est vraiment moins bon qu'avant ». Son G-code portait la réponse dans son propre en-tête — `Trait 0.12 a 3.43 mm` — alors qu'aucune lettre ne dépasse **0,52 mm** : 3,43 est la plus large brûlure que le hêtre sache faire, pas le plus gros trait du dessin. Or la puissance suit la largeur ($S = S_{\text{max}} \times \text{largeur} / \text{largeur}_{\text{max}}$), si bien que chaque trait réclamait S136 et sortait rabattu au plancher **S200 : 100 % des points**. La puissance était donc en butée basse et ne pouvait plus suivre la vitesse — passer de F200 à

F800 a divisé l'énergie par quatre sans compensation possible. Le haut de l'échelle est désormais le plus gros trait *du dessin* : S207 → S900, zéro point au plancher, et la course Z tombe de 6,8 à 5,3 mm — donc le limiteur de pente rabote moins et les gestes courts rendent enfin leur fuseau. C'est mot pour mot la leçon que la spirale avait apprise en v2.59.1 avec `largeur_max = le pas` ; elle n'avait pas été portée jusqu'ici.

La règle du pas était borgne : elle sait maintenant resserrer (v2.83.0). Christophe, sa deuxième planche de sapin en main : « je crois que le sapin n'est pas un bois adapté à la gravure laser, ou alors il faut mettre le test à la focale, je ne sais pas ». La focale est la bonne piste, et pour une raison mesurable : au foyer le trait du sapin fait 0,11 à 0,20 mm au lieu de 0,68 à 0,96 mm en défocus 15. Six fois plus de traits pour la même surface, donc le fil du bois — dont le bois de printemps brûle bien plus que le bois d'été — se **moyenne** au lieu de rayer la case. Mais la règle de la v2.81.0 ne savait qu'*élargir* : au foyer elle laissait le pas de 0,80 mm hérité du hêtre, soit **14 à 25 % de couverture** et 86 % de bois nu dans les clairs — pire que la planche en défocus. Le bon pas au foyer est **0,21 mm**, et l'échelle va alors de 52 à 95 % avec 0,10 mm de bois nu entre traits au lieu de 0,33. `COUVERTURE_MAIGRE = 0,50` déclenche le resserrement, et le message emploie le bon verbe. **Le seuil est bas exprès, et il n'a qu'un ancrage** : le hêtre plafonne à 62 % et sa bande fonctionne — son ton vient de la noirceur du trait et non du recouvrement, la resserrer casserait ce qui marche. À 25 % en revanche la case la plus sombre est encore aux trois quarts en bois nu : ce ne sont plus des tons, ce sont des rayures. À resserrer le jour où une troisième planche donnera un troisième point.

Le panneau Calligraphie mettait 15 s à s'ouvrir (v2.82.1). Christophe l'a *entendu* avant de le voir : « le panneau met beaucoup de temps à s'afficher et j'entends le PC souffler ». La cause était la fonction ajoutée une heure plus tôt pour nommer la vitesse qui débloque les déliés : elle appelait l'échelle du fuseau *par vitesse candidate*, et cette échelle se bâtit par dichotomie de 40 itérations par palier. Résultat mesuré au profileur : 26 échelles construites, **138 762** largeurs interpolées, 23 millions de logarithmes, 58 lectures du fichier de configuration. Or de toute cette échelle on ne lisait qu'un nombre, le trait le plus fin — qui ne demande aucune dichotomie : c'est la brûlure mesurée au foyer à la plus faible puissance de la table. Une lecture, zéro échelle, réponses identiques (F800 pour un délié de 0,125 mm). **14,94 s → 5,03 s**, et le verdict passe de 5,2 à 0,35 s. C'est le défaut que le dépôt décrivait déjà mot pour mot : si l'on demande une largeur dans une boucle, cette boucle est une boucle d'analyse de fichier. Deux gains se sont ajoutés en chemin : le verdict **se tait pendant la restauration de session** (sept champs remis en place jouaient tout le calcul), et les chaînes extraites sont **gardées d'une ouverture à l'autre** — rouvrir le panneau sur le même texte et la même police repayait l'extraction. Ouvertures suivantes : **0,41 s**. Reste 5 s à la première, et c'est incompréhensible : extraire les pleins et déliés d'un TTF cursif (rastérisation, squelette, largeur locale) coûte 4,61 s sur l'Aston Script de l'atelier. La plume mono-trait, elle, coûte **0,00 s**.

Le lissage mangeait les deux tiers des pleins et déliés (v2.82.0). Le champ « contraste » affichait 16:1 et le bois recevait **4,1:1** ; demander 30:1 n'achetait qu'un demi-point. Ce n'était ni la police (EMS Swiss 4,3, Relief 4,3), ni le limiteur de pente Z (87 % des points étaient à moins de 0,05 mm de la consigne) : c'était le lissage livré la veille — fenêtre égale au plein entier, *plus* une seconde passe. Mesuré sur la gravure « Atelier du Verdier du munu » : aucun lissage 6,7:1 pour une ondulation de bord de 0,1559 ; **fenêtre maxi/2 en une passe 6,7:1 pour 0,1539** ; fenêtre pleine en une passe 4,9:1 pour 0,1369 ; et le réglage de la v2.80.2, fenêtre pleine plus seconde passe, 4,1:1 pour 0,1259. Soit **39 % de contraste perdus pour 19 % d'ondulation gagnés** — le même échange défavorable qui avait été mesuré puis *refusé* la veille sur les polices extraites, et appliqué quand même à la plume. La fenêtre tombe à la moitié du plein et la seconde passe disparaît. Un

étalonnage de la plume sur la police avait été essayé d'abord et **jeté** : elle couvre déjà toute la plage d'appuis (0,003 à 1,000), il n'y avait rien à étirer. Deux conséquences se sont invitées. D'abord le **plancher du matériau** : à 16:1 la plume demande 0,125 mm, or le hêtre ne descend qu'à 0,180 mm à *F200* — le verdict le disait déjà, mais sans issue, alors que la branche voisine propose une taille. Il nomme désormais la **vitesse** qui débloque (0,180 mm à *F200*, 0,140 à *F400*, **0,120 à *F800***, 0,080 à *F1200*), et seulement parmi les vitesses réellement mesurées. Ensuite, les **six réglages de plume n'étaient pas retenus** : la case, l'angle, l'épaisseur, le contraste, le bec et la police mono-trait revenaient par défaut à chaque ouverture du panneau. Ils le sont.

Le PAS de la bande de tons, lui aussi calé sur le matériau (v2.81.0). La v2.75.0 avait recalé la **vitesse** et laissé le pas à **0,80 mm** — un nombre de hêtre. Christophe a gravé la bande sur du sapin et l'a jugée d'une phrase : « pour le sapin, tout est à peu près au même ton ». Dix cases, dix fois le même brun. Ses propres mesures disent pourquoi : à *F800* en défocus 15 le sapin brûle de 0,64 à 0,96 mm, donc au pas de 0,80 la **couverture va de 80 à 120 %** — toutes les cases sont pleines ou repassées, donc toutes identiques. On avait optimisé « aucune case vierge » et obtenu « aucune case claire ». Le pas s'élargit maintenant pour que la case la **plus foncée** tombe à 95 % de couverture : sur sapin 1,01 mm et une échelle de 63 à 95 %, sur MDF 1,15 mm et 44 à 95 %. **Le hêtre n'est pas touché** — il va de 50 à 62 %, sa bande fonctionne, son ton vient de la noirceur du trait et non du recouvrement. C'est la case la plus foncée qui décide, et c'est une planche qui l'a imposé : la première version regardait la plus *claire* et ne se déclenchait pas sur le sapin, dont la plus claire est déjà à 80 %. La largeur pré-remplie dans « + Ajouter ce ton » suit le pas réellement gravé, puisque c'est lui qui gouverne l'énergie reçue.

Versions 2.70 à 2.79 — 9 entrées

Le matériau se choisit en tête de ① (v2.76.0), sous le libellé « Matériau visé ». Livré sans lui, le recalage existait mais ne se voyait pas : le seul endroit où changer de matériau était « Matériau mesuré » dans ②, plusieurs écrans plus bas, et le panneau s'ouvrant sur le premier de la liste, la bande restait calée sur le hêtre. Christophe : « je ne vois pas ta bande 800, dis-moi exactement où il se trouve ». Les deux champs sont **deux vues d'une seule valeur** et se suivent dans les deux sens — ② reste l'endroit où les mesures se rangent — et le matériau est désormais **retenu d'une session à l'autre**.

La bande est calée sur le matériau, pas sur le hêtre (v2.75.0). Elle gravait les mêmes nombres pour tout le monde — *S200* → *S1000* à *F2000*, défocus 15 —, et ces nombres viennent du hêtre. Sur hêtre ils gaspillaient déjà **trois cases sur dix** : le nuancier de l'atelier en garde la trace, *S195* → 0, *S235* → 0, *S275* → 2. Sur du sapin, **rien d'exploitable en dessous de ~*S700*** — six ou sept cases sur dix, donc une planche entière gravée pour trois ou quatre tons, dont le plus fort est un pâté. Or les planches 1/2/2b le disaient *avant* la gravure : elles offrent les mêmes cases à tous les matériaux, et sur le sapin celles du coin le moins énergique étaient restées vides faute de quoi que ce soit à mesurer. L'objectif lit maintenant ces cases vides et en tire deux choses : la **vitesse**, ramenée dans la plage où le matériau a été vu marquer, et le **plancher de puissance**, pour que la case la plus claire marque encore. La note affichée dit ce qui a été changé et sur quelle mesure. Christophe : « peut-être que pour graver une grille il faut se baser sur les résultats des traits faits dans les planches 1 2 2b ? »

Le nuancier matériau, rangé par usage réel (v2.74.0). Le bloc présentait, dans l'ordre : matériau, classement, une **liste interminable** de tons mesurés, deux boutons, puis la photo cliquable. Or c'est la photo

cliquable et le « ton sur mesure » qui servent tous les jours. La photo remonte donc juste sous le matériau, la liste et les pastilles descendent dans une section **repliée** — rien n'est supprimé — et « Ton sur mesure » reçoit sa propre section, ouverte. Les deux boutons photo **fusionnent** : ils ouvrent la même image, mais cliquer un ton exige en plus la fiche de disposition de la planche, et sans elle seul « Voir » fonctionnait. Supprimer l'un aurait rendu la photo inatteignable pour ces matériaux-là ; le bouton unique s'active dès qu'une photo existe et, faute de fiche, se contente de la montrer en disant pourquoi. Christophe : « réglage, cela me donne une liste interminable que je ne regarde jamais ».

Le ① de la Grille de test, relu à l'œil neuf (v2.73.0). Deux menus voisins, d'aspect identique, dont l'un grise l'autre sans que rien ne l'explique : « Objectif » et « Préréglage matériau ». Ils deviennent « **Je veux obtenir** » et « **...ou reprendre mes réglages** », précédés d'une phrase qui dit que ce sont deux points de départ et que choisir l'un neutralise l'autre. Les objectifs sont nommés par ce qu'ils **produisent** — « Des TONS pour le nuancier », « Des LARGEURS de trait », « Une DÉCOUPE » — les deux qui donnent des tons se suivent en tête, et leur note dit désormais **quoi faire du résultat** : juger à l'œil, puis reporter avec « + Ajouter ce ton » en ②. La note de l'objectif choisi remonte juste sous le menu, et le renvoi aux planches de calibration passe après : c'est une mise en garde, pas une introduction. Christophe, revenu après quelques jours : « ça tombe bien que je n'y ai pas mis le nez depuis quelques jours, j'ai un œil neuf ».

Modifier un texte déjà posé (v2.72.0). Sélectionne-le, rouvre le mode : police, texte et largeur reviennent dans le panneau, tu changes ce que tu veux, et il est **refait au même endroit**. Ce qui manquait : la fiche de l'objet ne gardait que le *nom* du fichier de police, jamais son chemin — la police ne pouvait donc pas être retrouvée. Elle garde désormais les deux (le nom continue d'aller dans l'en-tête du G-code, où un chemin absolu n'apprendrait rien), et les objets posés avant cette version sont rattrapés en cherchant leur nom parmi les polices installées.

L'aperçu du job ne mentait que sur les clairs (v2.71.1). Il peignait ses teintes avec le modèle *théorique*, quand tous les autres aperçus lisent d'abord le **nuancier mesuré**. Le matériau voyageait pourtant déjà jusque-là — il ne servait qu'à la largeur. Sur les tons FONCÉS les deux formules s'accordent à quelques points près, ce qui a caché le défaut : l'écart n'existe que dans les CLAIRS, et il y est énorme — MDF à S400/F2000, **5 % mesuré contre 93 % prédit**, quatre-vingt-huit points. Un aperçu qui ne se trompe que sur la moitié claire de l'échelle passe pour juste. Christophe : « c'est pas du tout un ton clair mais bien noir que l'on voit ».

Le bouton génère, OK ferme (v2.71.0). La génération était accrochée à **OK**, si bien qu'après avoir supprimé une opération la seule façon de fermer le panneau était d'écrire un fichier dont on ne voulait pas. Un bouton « Générer et sauvegarder le G-code du job » s'en charge désormais, et le panneau **reste ouvert** : on supprime, on va ajouter une opération depuis son mode, on revient et on régénère. **OK** ne fait plus que fermer — la liste, elle, est conservée. Même convention que les quatre panneaux de test. Christophe : « un bouton afin de créer le G-code serait mieux, et le bouton OK sert à valider ».

Une cursive se chevauche elle-même (v2.70.1). La boucle d'un « A » repasse sur son propre fût, et chaque trait est un contour séparé dans le fichier de police : gravés tels quels, ils se **traversent** là où l'encre est pleine. Sur « Atelier » en Ananda, 6 contours sur 11 se croisaient. Ils sont désormais refondus en un seul pourtour — selon la règle de la police (**non nulle**, par le sens d'enroulement), et non selon la parité, qui creuserait un trou partout où deux traits se chevauchent. Ananda : 11 contours → 5 anneaux, les

3 contreformes gardées, **6 croisements** → **0**. Une police qui ne se chevauche pas ressort **inchangée** : DejaVu Serif, 11 anneaux et 568 points avant comme après.

Redimensionner après coup (v2.70.0). Un objet FreeCAD n'a pas d'échelle : son **Placement** ne porte que position et rotation. Changer la taille d'un texte veut donc dire **refaire** sa géométrie — et il faut refaire LE MÊME objet, à sa place. Sélectionne-le dans l'arbre, rouvre le mode : le panneau se remplit avec ses réglages, le dit (« Objet repris »), et OK le reconstruit à la nouvelle taille **sans le déplacer**. Christophe : « et si je veux redimensionner après coup ? »

Versions 2.60 à 2.69 — 11 entrées

Mille polices ne se choisissent pas (v2.68.0). Le menu listait **1019 fichiers**, dont 902 venus de **/usr/share/fonts** — des Noto, des DejaVu, des emoji, rien qui sache faire un plein et un délié. Deux choses le rendent utilisable. Les polices **personnelles d'abord**, le système derrière. Et surtout un bouton « Voir les polices... » qui les **écrit** avec ton propre texte, **classées par contraste plein/délié mesuré** — le rapport entre le trait le plus large et le plus fin, lu sur le squelette avec la largeur locale qui servira à la gravure. C'est le chiffre qui décide si une police a sa place ici : sur les 118 polices installées, les calligraphiques mesurent 2,5 à 7,6× (Rosean 7,62 · Doglover 7,00 · Swirly 5,10 · Blacksword 3,81) quand les sans-serif du système plafonnent à 1,34×, et **29 seulement dépassent le seuil**. Les autres restent affichées, marquées : une italique serif à 2,0× se grave très bien, c'est un avertissement, pas un interdit. Christophe : « j'ai une liste interminable et j'utilise un autre logiciel pour voir la forme des fonts ».

On écrit de gauche à droite (v2.67.1). Après le SENS de chaque geste, leur ORDRE. Les gestes sont désormais triés sur le X de leur départ — l'endroit où la plume se pose. Ce n'est pas un compromis : une fois le sens imposé, l'optimisation par proximité n'a plus le droit de retourner une chaîne pour se rapprocher, si bien qu'un simple tri fait mieux qu'elle — 155 mm de trajet à vide contre 203, et zéro retour en arrière contre 16.

Le sens du geste est le geste (v2.67.0). Un plein se tire vers le **bas** — c'est la mécanique de la plume, on appuie en descendant — et une liaison se tire vers la **droite**, comme on écrit. Le tracé était juste, le sens de parcours ne l'était pas, et pas par accident : l'optimisation des transits retourne librement un geste pour raccourcir le trajet à vide, si bien que le sens calculé n'était *jamaïs* celui gravé. Sur « Atelier du Verdier », 9 gestes sur 20 descendaient ; 20 sur 20 désormais. Ça coûte 122 → 203 mm de trajet à vide, moins d'une seconde à G0 sur un job de 2,3 minutes — le sens du geste vaut mieux que ça. Christophe, flèche orange sur la gravure : « c'est le sens de la ligne en un seul trait ».

Le trait qui continue, même s'il tourne (v2.66.2). À un croisement, c'est la DIRECTION de chaque branche qui décide laquelle prolonge laquelle — donc quel trait la main est censée avoir fait d'un seul geste. Elle se lisait sur 6 pixels, et le plein du « A » tourne *dans* le disque de la jonction : six pixels le lisaient presque horizontal alors qu'il descend, si bien que la grande boucle du bas se mariait à la petite entrée de gauche et que le plein restait pendant. Christophe, flèche orange sur la gravure : « la ligne en 1 seul trait c'est la ligne qui commence du haut et va vers le bas droit, et non pas la barre du milieu » — son repère tombait sur le nœud au dixième de millimètre. La portée est désormais **proportionnelle à la largeur locale de l'encre** : une valeur fixe en pixels améliorerait trois polices et *dégraderait* Blacksword, dont les traits plus épais et plus courts font enjamber de vrais angles. Score médian de l'appariement : La Graziela 0,89 → 0,93 ;

Swirly 0,78 → 0,95 ; Blacksword 0,81 → 0,89 ; Byliner 0,81 → 0,93. Le plein du A et sa boucle ne font plus qu'un geste de 44 mm.

Un croisement se traverse tout droit (v2.66.1). Deux traits qui se croisent *de biais* — et une cursive n'est faite que de ça — ne donnent pas un nœud à quatre branches : l'amincissement en fabrique **deux à trois branches**, reliés par un pont d'un ou deux pixels. Le parcours apparait nœud par nœud, rien ne l'empêchait de coudre « barre-gauche + pont + fût-bas » et de laisser les deux autres branches pendantes : le trait ressortait **coupé en son milieu**. Sur un simple X de deux barres, 4 gestes au lieu de 2, dont un qui rebroussait. Les jonctions qu'un même disque d'encre contient sont désormais fusionnées avant le parcours ; le X sort en deux traits droits, coin à coin. Christophe, capture annotée 1-2-3 : « pour le t le 3e est coupé en son centre, normalement on trace une ligne 1 puis 2 puis 3 ». Le seuil s'arrête au rayon du disque : au-delà, le « pont » est un vrai morceau de lettre — la barre d'un H — et l'avalier la ferait graver plusieurs fois.

L'avance est celle du TRAIT, pas celle du vecteur (v2.66.0). En G94, **F** s'applique au vecteur programmé : là où le fuseau grimpe à sa pente maxi — 7,5 mm de Z par mm de trait, donc exactement au départ et à la fin de chaque geste — la tête avance en XY **7,57 fois moins vite** que l'avance annoncée, à faisceau constant. Le bois reçoit l'énergie d'un déplacement de 7,57 mm étalée sur 1 mm de trait. Mesuré sur une gravure réelle : 20,6 % des segments à plus du double de l'énergie médiane, 7,5 % à plus du quintuple, le pire à 12,4 fois — ce sont les pâtés noirs au bout des pleins. L'avance de chaque bloc est désormais compensée du rapport $d3D/dXY$, plafonnée par la vitesse de l'axe Z. Après : 0,2 % des segments au-delà du double, aucun au-delà du quintuple, et le job va deux fois plus vite puisque la tête ne rampe plus. Le rapport était connu du projet depuis la v2.54.0, où il sert à estimer la *durée* ; personne ne l'avait relié à la brûlure.

Deux jonctions voisines ne font qu'un geste (v2.66.0). Le parcours apparie les branches nœud par nœud : quand deux jonctions se touchent — la règle à un croisement de cursive — chacune laisse une branche pendre, et les deux bouts se retrouvent à un pixel l'un de l'autre sans jamais se voir. La tête relevait, transitait et replongeait au même endroit, brûlé deux fois. La **soudure** les recolle si l'écart tient dans la largeur de l'encre *et* si le raccord reste entièrement dans le dessin — cette seconde garde est ce qui empêche de graver un trait droit en travers du mot. La Graziela : 25 gestes → 22, et 14 amas d'extrémités → 9.

Le squelette de la lettre, et rien d'autre (v2.65.1). Avant le parcours en graphe, l'axe médian laissait des « coupures » dans les lettres, qu'on réparait en gravant l'encre restée non couverte. Le graphe a supprimé ces coupures à leur source, et ce comblement ne rapportait plus rien : sur « Atelier du Verdier », 24 des 27 traits ajoutés tombaient *dans* une lettre déjà tracée, en petites miettes le long des jonctions. On ne comble donc plus que les **taches détachées** — point d'un i, accent, ponctuation — et on jette tout geste dont l'empreinte est déjà brûlée par un autre. La Graziela passe de 55 gestes à 25, Blacksword de 142 à 36, pour 0,01 point de couverture d'encre ; les extrémités tombant en plein trait passent de 19 à 6.

Un geste par trait, pas un par morceau (v2.65.0). Le squelette est parcouru comme un GRAPHE : chaque jonction est traversée tout droit, comme le ferait la main. Sur « Atelier du Verdier », 130 gestes deviennent 58 en La Graziela et 239 deviennent 68 en Blacksword. Ce n'est pas qu'une affaire de temps : chaque geste en trop, ce sont deux terminaisons franches, et une terminaison au milieu d'un plein se grave en *pâté* — la tête se lève à pleine largeur. Les extrémités tombant en plein trait passent de 60 à 19.

On place le texte parce qu'on le VOIT (v2.64.0). « Poser le tracé dans le document » crée le TRAJET en fil dans l'arbre : on le déplace sur sa pièce comme n'importe quel objet (Placement, Draft Déplacer), et la génération suit ce placement. Le fil ne porte pas les largeurs — elles n'existent qu'à la gravure, par la hauteur Z ; ce qu'on place, c'est un trajet. Le Z du placement est ignoré, et le dit : dans ce mode la hauteur EST la largeur du trait.

45 polices. Hershey d'origine (13, domaine public), les fontes EMS d'Evil Mad Scientist (29, OFL), Twin Sans et Relief SingleLine (OFL, conçue pour la CNC), et **Verdier** — la police de l'atelier, **dessinée trait par trait** plutôt que convertie : elle ne dépend d'aucune fonte tierce, porte le **chapeau melon** de la maison en glyphe — un **bouton** ☐ à côté du champ texte l'insère, dans le mode Texte comme en Calligraphie (au clavier : AltGr + \$) et trace les **œ/Œ** que seule Relief SingleLine avait avant elle. Chaque trait y est écrit dans le sens où une main le tracerait — les fûts descendent, les barres vont de gauche à droite — si bien que le fuseau épaissit là où une plume aurait appuyé. **Aucune police commerciale n'est embarquée** : les Cutlings, payantes, ont été écartées à la source — elles s'achètent puis se convertissent soi-même avec l'outil. Le bouton « **Voir...** » à côté de la liste (v2.64.0) les écrit *toutes*, avec votre propre texte, tracées par leurs vrais traits : un nom comme « EMS Osmotron » ne se choisit pas autrement qu'en le voyant. Neuf d'entre elles sont signalées « fût contourné » : elles gravent chaque branche *deux fois* — deux fois le temps, et un trait plus large que voulu.

Versions 2.50 à 2.59 — 11 entrées

Le noir doit rester fait de LIGNES — « couverture maxi » (v2.59.1). Christophe, sa deuxième gravure en main : « c'est encore un peu trop » — pour une énergie de **5,14**, déjà *sous* son repère de noir franc à 6,4. Ce qu'il voyait n'était pas de la puissance mais de la **couverture** : au pas 0,50 le trait le plus épais valait 0,50 aussi, donc les tours se touchaient et le noir perdait toute structure de ligne (cheveux et veste en aplats, quand la joue montrait encore ses traits).

Et baisser la puissance n'y change rien, ce qui rend ce réglage nécessaire : mesuré de S1000 à S400, la couverture reste à 100 % — tant que la brûlure *mesurée* dépasse le pas (3,14 mm contre 0,50 sur son hêtre), c'est le PAS qui plafonne le trait, jamais S. Le champ « Couverture maxi du noir » descend ce plafond sous le pas : à 85 % les noirs gardent 15 % de bois entre les tours et restent faits de traits, le rendu taille-douce. Le défaut (100 %) reproduit l'ancien fichier au bit près. Le verdict annonce la couverture obtenue et, à 100 %, dit explicitement que tourner le bouton de puissance ne servirait à rien.

Le fuseau marche aussi en RANGÉES, et il gagne un ANGLE (v2.59.0). Le matin même j'avais écarté les rangées au motif que le Z aurait un demi-tour à rattraper à chaque bout ; la gravure de Christophe a périmé l'objection — au pas 0,50 la course du Z n'est que de 2,5 mm, le demi-tour ne coûte donc presque rien. Tout est partagé avec la spirale (même échelle hauteur/puissance, même échantillonnage, même rabotage de pente, même avance rapide sur bois nu) : seul le CHEMIN change. Le demi-tour est volontairement *dans* la liste de points, pour que le rabotage le voie — c'est là que le Z a le plus d'écart à rattraper, deux rangées voisines pouvant réclamer des hauteurs opposées à un pas de distance.

Le verdict dit l'ÉNERGIE (v2.58.0). Il parlait de largeur, de course et de détail — jamais de brûlure. Christophe a gravé le 03/08/2026 au pas 0,50 à F200 sous plafond S900, soit un indice de **9,0** contre 6,4 pour son « noir franc » gravé, et l'a jugé sur le bois « un peu trop de puissance ». Le panneau avait le chiffre et se

taisait, alors que le verdict des lignes gravées l'affiche depuis le 1^{er} août. Au plus noir le trait remplit le pas : l'énergie surfacique y est exactement celle d'un aplat. Le verdict **nomme aussi la vitesse qui vise le noir franc** (F281 dans ce cas) — un chiffre sans quoi en faire renvoie à la calculatrice. Attention : le *pas* pèse autant que la vitesse, son 0,50 ayant doublé l'énergie par rapport au 1,0 annoncé à 4,5.

Et le champ « Sous le seuil » disparaît en fuseau, parce qu'il n'y sert à rien : seul le générateur en rangées lit ce réglage. Il restait affiché, et Christophe l'avait mis sur « Pointillé dégressif » en croyant l'obtenir — sous son seuil il aura du bois nu. Un contrôle visible qui ne fait rien est un contrôle qui ment.

Échantillonner PLUS FIN que le pas, et moyenner (v2.57.0). Les premières versions lisaient une grille de noirceur à la résolution du *pas* et prenaient la case la plus proche : tous les points d'un tour tombant dans la même case recevaient la **même** largeur, et le trait avançait par marches d'un pas — invisible au pas 0,2 mm, criant au pas 1,0. Christophe l'a repéré en comparant avec l'original : « il y a un traitement en plus, on voit que le trait suit un tracé afin de rendre plus de détail ». La lecture du code source de Vertigo lui donne raison : il échantillonne tous les **3 px d'arc**, contre l'image à sa résolution native, et prend la **moyenne d'un carré** de 0,8 fois l'écart entre tours — jamais un pixel isolé. L'atelier fait désormais pareil : grille quatre fois plus fine que le pas, moyenne sur 0,8 pas, calculée par image intégrale (quatre lectures par point quelle que soit la fenêtre). Bénéfice mesuré en prime : le lissage réduit aussi le déplacement du Z, 231 → 206 min sur le portrait de 120 mm.

Le mouvement du Z est du TEMPS DE GRAVURE (v2.56.0), et c'est le coût dominant de ce mode. L'avance **F** de LinuxCNC s'applique au *vecteur* : 0,4 mm en XY avec 1,5 mm en Z font un déplacement de 1,55 mm, donc la gravure n'avance qu'à 26 % de la vitesse programmée. Mesuré sur un portrait de 50 mm au pas 1,0 : trajet XY 6 381 mm, **trajet Z 7 031 mm** — le Z parcourt autant que le XY, parce que la spirale traverse le sujet 305 fois et que chaque traversée fait monter puis redescendre la tête. Le fuseau coûte donc **2,1×** la même spirale faite à la puissance. C'est le prix du rendu, et il doit être annoncé.

Le PAS plafonne le fuseau (v2.55.0). La première version laissait le fuseau monter jusqu'à la plus large brûlure du matériau — 3,43 mm sur hêtre — ce qui impose un pas de 3,43, donc **34 tours sur 120 mm** : une spirale clairsemée, et pointillée par-dessus le marché. Christophe, aperçu à l'appui : « on est loin de ce que je veux ». Au-delà du pas, les tours voisins se recouvrent de toute façon et le noir n'est plus un fuseau mais un aplat repassé deux fois. Le pas borne donc le haut du fuseau, et ça rend en prime du **détail**, la course du Z tombant avec la largeur maxi : au pas 3,0 il faut 41 mm de course et 5,4 mm de trace par fuseau ; **au pas 1,0, il ne faut plus que 9 mm de course et 1,2 mm de trace** — et l'image compte 120 tours. Un plafond plus large que les mesures ne les dépasse jamais : c'est la mesure qui a le dernier mot.

Le piège du pas trop fin (v2.53.1). Sous le trait le plus FIN, il n'y a plus de contraste du tout : *tous* les pa-lis couvrent déjà 100 % et l'image sort **noire unie** — en brûlant plusieurs fois le même bois. À défocus 15 sur hêtre, le trait le plus fin fait 0,67 mm ; un pas de 0,14 hérité d'un réglage au foyer y repasse **4,8 fois** sur chaque point, pour une énergie surfacique de 9,9 quand le noir franc est à 6,4. Le panneau le disait mal : il annonçait « couverture 479 → 100 %, contraste -379 points », un chiffre négatif donc dénué de sens, faute d'avoir plafonné le BAS de la couverture comme le HAUT l'était. Il nomme désormais l'aplat noir, le nombre de repasses et le pas à viser. **Changer de hauteur, c'est changer de pas** : les deux vont ensemble.

RÉGIME	TRAIT	RAPPORT	PAS CONSEILLÉ
Au foyer, F800	0,12 → 0,20 mm	1,67×	0,20 mm
Défocus 15, F650	0,67 → 1,16 mm	1,73×	1,16 mm
Défocus 15, F800	1,00 → 1,14 mm	1,14× — refusé	—
Défocus 36 et au-delà	1,49× au mieux (F200) —	refusé à toute vitesse sur ce hêtre	

La remesure d'août l'a rouverte (v2.53.0). Sur la table refaite, le foyer à F800 ne rend plus que 1,67× (0,12 → 0,20 mm), tandis que le defocus 15 à F650 donne 1,73× avec un trait de 0,67 à 1,16 mm — donc un pas six fois plus large, six fois moins de rangées, et bien moins d'énergie. La règle était juste quand elle a été écrite ; la mesure l'a périmée. C'est exactement le cas de figure que ce manuel décrit ailleurs sous « une table fabriquée est pire qu'une table vide » : la valeur figée survit à la mesure qui la contredit.

Huitième tramage : la SPIRALE (v2.52.0). « Lignes gravées » enroulé : un trait **unique** du centre au bord, dont l'épaisseur rend le gris. Mêmes réglages, mêmes paliers, même physique que le tramage en rangées — seul le *chemin* change. Son intérêt propre : **aucun demi-tour**, là où les rangées en font un par ligne.

... et les quatre planches aussi (v2.51.0). La v2.50 n'avait servi que le fichier *combiné*, laissant les planches 1, 2, 2b, 3 et la Bande de calibration sans rien. Christophe a demandé si c'était voulu : ça ne l'était pas. Les **cinq** passent maintenant par la même fonction — taille de chute en tête, cadre au faisceau de visée, **M0** — et un contrôle porte sur la *famille entière*, pas sur un membre. Une convention appliquée à un seul endroit est le défaut le plus récurrent de ce projet ; celui-là a duré une version.

Le fichier combiné dit sa taille, et se cadre lui-même (v2.50.0). Deux ajouts demandés par Christophe, le fichier sous les yeux :

- **La chute nécessaire est annoncée en tête :** (CHUTE NECESSAIRE : 231 x 173 mm -- origine au coin BAS-GAUCHE) . Chaque planche gravait déjà ses propres cotes sous sa réglette, mais l'encombrement de l'*ensemble* n'était écrit nulle part — il fallait ouvrir le fichier dans un visualiseur pour savoir sur quoi le poser.
- **Le job trace son cadre, puis s'arrête.** Le laser fait le tour du rectangle au **faisceau de visée** (S10 ici, réglable par laser), puis **M0** : la machine attend. On vérifie que la planche tombe bien sur la chute, et un **cycle-start** lance la gravure. Le cadrage restait jusqu'ici un *fichier séparé*, délibérément — « risque de le lancer en pensant vérifier alors que le laser va réellement graver juste après, **sans reprise de main entre les deux** ». L'idée de Christophe lève exactement cette objection : le **M0** est la reprise de main. Le cadre est tracé **avant l'armement**, si bien que pendant le tour de vérification et toute la pause, le laser n'est pas armé.

Versions 2.40 à 2.49 — 17 entrées

Le fichier combiné tient sur une chute plus petite (v2.49.1). Les quatre planches y étaient rangées en deux colonnes simples — 1 et 2 à gauche, 3 et 2b à droite — ce qui laissait un grand vide à droite de la planche 2, la planche 1 étant bien plus large qu'elle. La planche 3, haute et *étroite*, s'y glisse : on passe de **225 × 217**

mm à 231 × 173 mm, soit 87 cm² et surtout **44 mm de hauteur en moins** — c'est la chute sur laquelle ça tient qui change. Mesuré sur les quatre fichiers réels, pas estimé.

La barre d'outils suit enfin le mode d'emploi (v2.49.0). La v2.48 n'avait réordonné que le *menu*, en gardant la barre rangée par tâche — deux vérités à tenir pour un seul utilisateur, et c'est lui qui trouvait la barre illogique. Barre et menu partagent désormais **un seul ordre** : Guide, puis les sept icônes de **calibration**, puis les modes de travail, la référence et les réglages. Le Guide dit « CALIBRER (une fois) » ; on le lit maintenant de gauche à droite.

Et les boutons de l'Assistant sont enfin testés. C'était le dernier angle mort de la calibration : l'Assistant matériau est le point d'entrée d'un matériau neuf, et aucun test ne *cliquait* ses cinq boutons de planches — il était seulement construit, donc on savait qu'il ne plantait pas à l'ouverture, et rien de plus. Chaque bouton est maintenant cliqué pour de vrai, et c'est le **G-code produit** qui est examiné : en-tête, fin **M2**, aucune pause faisceau allumé, et « Toutes les planches » qui réunit bien les planches en un seul fichier. Le sabotage de contrôle reproduit le défaut du 1^{er} août (un bouton qui appelle une fonction inexistante) et le test le voit.

L'atelier relu en débutant (v2.48.0). Cinq changements sortis d'une relecture complète, en se mettant à la place de quelqu'un qui vient d'installer l'atelier :

- **Les captures du manuel et du site étaient fausses.** Le rendu hors écran ne trouvait pas les polices du système et retombait sur une police sans les **chiffres cerclés** : chaque image affichait « @ Entrer les mesures » au lieu de « ① Entrer les mesures », et le cadenas des mesures verrouillées disparaissait aussi. Toute la convention ①②③ — l'ossature du mode d'emploi — était donc invisible pour qui découvre l'atelier par la documentation. Depuis la v2.13.2. Les vingt captures sont régénérées.
- **Le menu range désormais par ordre d'apprentissage** (calibration d'abord, modes de travail ensuite), alors que la **barre d'outils** reste rangée par tâche. Le Guide dit « CALIBRER (une fois) » pendant que les sept icônes de calibration arrivaient derrière douze boutons inutilisables tant que rien n'est mesuré. Deux publics, deux ordres : on ne fait plus payer tous les jours à celui qui sait ce qui n'aide qu'à la première heure.
- **Un atelier vierge le dit.** Les six modes de travail affichent un bandeau « rien n'est encore mesuré » qui renvoie au Guide — et qui **disparaît pour toujours** dès qu'un seul matériau porte une mesure. Le seul signal, jusqu'ici, était un discret « — (aucune mesure) — » au fond d'un menu déroulant.
- **L'étape ★3 s'affiche là où l'on travaille.** Elle était accrochée à la Grille de test, qui ne grave plus les planches de largeurs ; le bandeau « ★ Étape 3/4 » vivait donc sur un panneau que le texte de l'étape n'utilise plus, pendant que l'**Assistant matériau** — où l'on va réellement — n'en portait aucun.
- **Moins de numérotations concurrentes.** Le flux de travail était numéroté 1 → 6 en toutes lettres à côté du schéma qui porte déjà la même suite, des ★1-4 de la calibration et des ①②③ des panneaux : quatre systèmes pour une seule progression. Le texte garde les *verbes*, les numéros restent à la calibration et aux étapes internes d'un panneau. Et la section « Photo du résultat » s'ouvre repliée tant qu'il n'y a aucune photo — vide, elle occupait la moitié du panneau, précisément à la première ouverture.

Une planche de moins à graver (v2.47.0). L'objectif « Largeurs brûlées — grille au foyer » a été **retiré**. Il gravait exactement la grille que la **Planche 1** grave déjà — mêmes puissances, mêmes vitesses que la saisie ② — mais en cellules remplies : environ huit traits par case au lieu d'un, soit **4 500 mm brûlés contre 420**

pour les mêmes trente-cinq nombres. Et c'est la Planche 1, la moins chère, qui bénéficie du **cadrage automatique** à la mesure. Deux planches pour une mesure, la plus coûteuse étant la moins bien outillée : c'était de l'empilement, pas un choix. Pour calibrer un matériau neuf, c'est donc **Planche 1** (foyer) et **Planche 2** (défocus 15 et 36), toutes deux cadrées toutes seules ; l'objectif « grille en défocus » ne subsiste que pour un défocus *libre*, que les planches ne savent pas viser.

Et ses traits sont désormais horizontaux. Les objectifs de mesure ne pouvaient pas imposer l'angle des hachures, et le panneau est à 45° par défaut : la planche sortait en diagonale. Or la mesure à la ligne moyenne les *colonnes* de l'image — un trait oblique n'est pas mesurable, ni à la main ni automatiquement. L'objectif force maintenant 0°.

Une fiche par planche, et non par matériau (v2.46.0). Les fiches de disposition s'**empilent** désormais (douze au plus) au lieu de s'écraser : graver la palette entière puis une bande claire sur une chute laisse les *deux* planches cliquables. Une photo est rattachée à sa planche par les **4 coins** qu'on y clique — caler une photo, c'est déclarer quelle planche elle montre ; s'il y a plusieurs planches et que la photo n'est pas encore calée, l'atelier demande une fois laquelle, puis s'en souvient. Une vieille photo *sans cadre gravé* reste inexploitable ici, et l'infobulle le dit : il n'y a pas de coins à cliquer.

L'indice d'énergie devient ABSOLU (v2.46.0) — correction d'un défaut de conception, pas d'un calcul. Le seuil d'alerte des « Lignes gravées » s'exprimait en « fois le noir mesuré le plus économe ». Or cette référence est le meilleur ton du nuancier : elle **bouge dès qu'on en mesure un meilleur**. Elle a bougé deux fois sans que rien ne le signale (2,31 → 2,08 → 1,30 le 2 août, en versant 26 tons en défocus), si bien que les *mêmes* gravures valaient 5,7× le premier jour et 9,1× le second — et le seuil finissait par accuser un régime que le bois avait certifié bon. Le verdict lit maintenant l'indice $S / (\text{pas} \times F)$ lui-même, qui est une propriété du travail et que rien ne déplace : les deux repères de la planche témoin valent **6,4** → **noir franc** et **13,2** → **carbonisé**, le seuil est posé à **9,0** entre les deux. Le rapport au ton le plus économe reste affiché, mais comme information (« ce noir existe pour moins cher »), jamais comme verdict.

Le Job combiné perdait la mire et la fiche (v2.45.1). Une grille de test ajoutée à un **Job combiné** arrivait sur le bois *sans* repères ni réglette, même quand « Graver la mire » était coché — la case ne suivait pas dans l'opération —, et aucune fiche de disposition n'était déposée. La planche était donc ni redressable ni mesurable, et rien ne le disait. Constaté le 02/08/2026 sur une planche déjà gravée, dont la fiche a dû être reconstruite depuis son G-code. Les deux chemins (bouton « Générer » et Job combiné) passent désormais par la même fonction de dépôt ; une planche sans mire ne reçoit toujours pas de fiche, puisqu'elle mentirait.

Le fond blanc se traverse en vitesse rapide (v2.45.0). Sur un portrait détourné, plus de la moitié du temps de balayage passait à parcourir le fond, faisceau éteint, à la vitesse de gravure — 52 % du trajet à F800 pour ne rien graver. Les balayages repèrent désormais les segments blancs de plus de 5 mm et les franchissent à la vitesse de transit, sans couper le mouvement ni changer la géométrie gravée. Mesuré sur le portrait réel : **1 h 57** → **1 h 15**. Les cinq tramages en balayage en profitent ensemble.

Une planche par bande de noirceur (v2.45.0). Un nuancier fourni fait une planche encombrante où les tons utiles se noient. Le menu « **Tons à graver** » de la section ② grave *une bande* — très clairs, clairs, moyens, foncés — avec le compte de tons affiché pour chacune, et l'encombrement recalculé en direct : on grave la tranche qu'on cherche sur une petite chute, pas les 47 tons.

Cliquer un ton sur la photo réelle (v2.45.0). Depuis la v2.45, graver la planche dépose une **fiche de disposition** : quel ton occupe quel cercle, avec ses réglages. Le bouton « **Cliquer un ton sur la photo...** » (bloc « Nuancier matériau » des modes qui gravent) ouvre alors la photo de la planche : au premier usage on clique les **4 coins du cadre** — le calage est mémorisé pour cette photo — puis chaque cercle porte un anneau, et cliquer dedans retrouve son ton et l'applique. On choisit un gris *sur le bois*, plus sur un numéro. L'appariement se fait par **réglages**, jamais par rang : si le ton a été supprimé du nuancier depuis la gravure, la fenêtre prévient et propose les réglages réellement gravés au lieu d'appliquer en silence un autre ton. Les planches gravées *avant* la v2.45 n'ont pas de fiche : le bouton reste gris et le dit.

Nommer ses planches, écarter l'illisible, élaguer (v2.44.0). Au redressement, un **nom libre** peut être saisi (« grille tons foyer 0,15 ») : il entre dans le nom du fichier et dans la fiche, et les listes le préfèrent — plus besoin d'ouvrir la photo pour savoir ce que c'est. Dans la mesure des traits, un bouton « **Pas de valeur** » laisse une case illisible vide et passe à la suivante — à ne pas confondre avec un trait *vierge*, qui est une mesure (saisir 0, c'est le seuil du matériau). Dans la lecture des tons, un **clic** sur une case l'écarte, un second la reprend. Les recettes photo sont recalées sur la planche remesurée, et l'audit du code a retiré cinq fonctions mortes — la Planche 3 reste volontairement hors du redressement : elle n'a pas de mire, son point se mesure à part.

Les planches défocus se cadrent toutes seules (v2.43.0). « Ce que je fais en ce moment c'est encadrer un trait et valider, encadrer et valider... je voudrais éviter l'étape d'encadrer. » La planche 1 se cadrerait déjà seule ; les planches 2 et 2b non, leur mise en page étant écrite *en ligne* dans le générateur au lieu d'être exposée.

Le cadre se pose tout seul (v2.42.0). Sur la **planche 1**, encadrer un trait à la souris n'apprenait rien à personne : cette planche n'a aucun réglage, donc la position de chaque trait est entièrement déterminée par le code qui l'a gravée. Le cadre tombe désormais sur le trait de la case visée, et sur le suivant dès qu'on valide — la boucle passe de « encadrer, ajuster, valider » à « **ajuster, valider** », trente-cinq fois de suite.

L'atelier ouvre un document tout seul (v2.42.0). En lançant FreeCAD puis l'atelier sans rien créer, quinze des vingt et un boutons étaient **grisés** — ils exigent un document — et les six autres ouvraient une fenêtre de tâches là où FreeCAD n'a aucune vue pour l'accueillir : elle partait derrière la fenêtre principale, hors d'atteinte.

Le contrôle de décroissance tolère le grain (v2.42.0). Il exigeait une décroissance *parfaite* de la noirceur avec la vitesse. Sur la première planche réelle il échouait sur $8,8 \rightarrow 9,3$ — un demi-point, sur la seule case qu'une vieille gravure traversait. Or le grain du bois étale les lectures sur 6,4 points. La tolérance vaut donc **2 points**, tirés de cette mesure ; et le contrôle prouve qu'il attrape toujours une vraie contradiction de 22 points.

Le régime suit les tons versés au nuancier (v2.41.0). Les tons lus sur photo portaient avec un défocus de **zéro**, quelle que soit la planche : 26 tons gravés à 15,34 mm seraient allés se ranger avec ceux du foyer. Une courbe noirceur $\rightarrow$ énergie ne vaut que pour *un* régime, et quatre régimes mélangés dans une liste ne font pas une courbe — rien ne l'aurait signalé.

La planche dit maintenant son régime (v2.40.0). Sous la réglette, à côté des cotes et du nom du laser, la mire grave désormais **FOYER** ou **DEFOCUS 15.34 PT1.18** — la hauteur de défocalisation et le diamètre

du point qui en résulte. Une planche à plusieurs niveaux porte la liste : **DEFOCUS 15/36/40**, parce qu'un seul chiffre mentirait.

Versions 2.30 à 2.39 — 22 entrées

Une case sous le grain du bois n'est pas un ton clair (v2.39.4). La première planche de tons donnait deux cases à 1 % et 3 %. Regardées sur le bois : elles sont **vides**. La lecture n'était pas fausse — c'était du grain.

La fenêtre de lecture restait noire, sans rien dire (v2.39.3). Les deux fichiers choisis, l'écran vide et le message d'accueil inchangé. La cause : le chargeur d'image renvoie un *couple* (image, souci) et la fenêtre prenait ce couple pour une image. L'erreur partait dans un signal Qt, **où elle se perdait** — la fenêtre restait exactement comme avant.

Une grille hachurée volait la règlette (v2.39.2). La première planche de tons photographiée est sortie **refusée** : « 29,01 px/mm au lieu de 50, largeur probable 190 mm » — alors que les quatre croix étaient bien placées et les cotes justes.

L'accordéon refermait la section qui porte le bouton Générer (v2.39.1). Ouvrir une section repliait toutes les autres — y compris les étapes ①②③, qui ne sont pas du détail : elles portent les actions du mode. Le bouton « Générer et sauvegarder le G-code » de la Grille de test vit dans ①, si bien qu'après avoir touché n'importe quel réglage, l'action principale du panneau avait disparu.

Lire la noirceur de toutes les cases sur photo (v2.39.0). Le bouton est dans la section « Mesure sur photo » de la Grille de test. Il demande deux choses : la **photo redressée** de la planche, qui porte l'échelle px/mm, et la **fiche de grille** déposée à côté du G-code, qui porte la position de chaque case dans le repère de la mire. Il dessine la grille sur la photo, lit le gris moyen de chaque case et l'affiche en pourcentage sur la case elle-même.

Les trois aperçus ignoraient la mire (v2.38.3). Elle n'avait été branchée que sur le bouton Générer. Les aperçus de **durée**, de **cadrage** et de **trajet** décrivaient donc une planche plus *petite* que celle qui sortira.

Le bouton Générer de la Grille de test était cassé (v2.38.2). Il lisait un widget qui n'existe pas : le clic créait bien les cellules dans la vue 3D, puis levait une exception *avant* d'écrire la moindre ligne de G-code. Christophe l'a rencontré au premier essai.

Une section neuve naissait fermée (v2.38.1). Le repliage des sections lisait l'état mémorisé avec un défaut *en dur* à « repliée ». Le paramètre prévu pour dire le contraire n'était jamais consulté : une section que **personne n'a jamais repliée** — puisqu'elle vient d'exister — s'ouvrait fermée. Toute nouveauté naissait donc invisible derrière un chevron que rien n'invite à cliquer. C'est arrivé **trois fois dans la même journée** : le bouton Planche 2b, puis la case de la mire. **Un réglage qu'on ne trouve pas est un réglage qui n'existe pas.**

La Grille de test peut porter sa mire (v2.38.0). Première pièce de la lecture automatique de la noirceur : une case à cocher ajoute autour de la grille les quatre repères en croix et la règlette au millimètre, la même mire que les planches de calibration. Sans elle une planche n'est pas redressable — l'homographie a besoin de quatre correspondances et la règlette donne l'échelle.

Gravure photo mettait 14 secondes à s'ouvrir (v2.37.1). Christophe a entendu le ventilateur du PC avant que rien ne s'affiche. Deux fautes empilées, toutes deux dans du code écrit le matin même : la table des largeurs échantillonnait 161 points en **rechargeant le fichier de configuration à chaque point**, alors que les mesures étaient déjà en main deux lignes plus haut ; et la recherche du plafond suffisant reconstruisait une table entière *par plafond candidat* — 161 tables, soit près de **26 000 lectures du fichier** pour un seul appel.

Le bois a tranché : F200 carbonise, F1000 noircit (v2.37.0). Le même dégradé gravé deux fois côte à côte sur hêtre : à **F200 pas 0,34** le bois **carbonise**, à **F1000 pas 0,14** il sort **noir franc** — et deux fois plus vite. La recette livrée passe à F1000.

Une étiquette pouvait devenir un mouvement (v2.36.1). Les deux émetteurs de traits à plat écrivaient le commentaire d'une bande *tel quel*. Un libellé non parenthésé — « **A F200 pas 0.34** » — sortait donc en ligne de G-code, et LinuxCNC y lit un mot d'axe **A** suivi d'une avance : un **mouvement**, pas un texte. Sur une machine sans axe rotatif c'est une erreur au chargement ; sur une machine qui en a un, ça bouge. Trouvé en fabriquant une planche témoin, dans le fichier produit — pas dans le code. Les commentaires sont désormais parenthésés d'office, et les parenthèses internes remplacées par des crochets (elles ne s'imbriquent pas en RS274 : une seule refermerait le commentaire et rendrait la suite exécutable).

Le tableau des largeurs du hêtre était en partie fabriqué (v2.36.0). La planche remesurée à l'outil de profil a été comparée à la sauvegarde du matin : les colonnes **F200, F400 et F800 y étaient identiques**, 0,10 à 0,30 mm par pas de 0,05 exactement. Trois fois la même rampe parfaite : ce n'était pas un relevé. Le vrai trait à S1000/F800 mesure **0,18 mm**, pas 0,30.

Le refus expliquait autre chose que ce qu'il décidait (v2.36.0). Il jugeait sous le plafond de puissance et s'expliquait sans lui, d'où cette phrase affichée telle quelle : « *soit 1.50x — sous le rapport 1.5x* », qui se contredit seule, suivie de « *Descendre à F3000* » alors que F3000 est presque quatre fois plus *rapide* que la vitesse en cours. Une seule fonction calcule désormais la plage ; quand c'est le plafond qui bloque, le message le dit et nomme le plafond le plus bas qui débloque.

La fenêtre choisit sa case elle-même (v2.35.1). Elle exigeait d'avoir *déjà* cliqué une case dans le panneau, et refusait sinon dans un libellé discret — tout comme elle refusait, aussi discrètement, quand la grille était verrouillée. Deux refus muets qui se cumulaient : le bouton semblait ne rien faire. **Un refus qu'on ne voit pas est un logiciel qui ne répond pas.**

Choisir la planche dans le panneau (v2.35.0). L'ouverture automatique prenait la *plus récente* : en mesurant le foyer, elle ouvrait la planche de défocus sans que rien ne le dise, et il fallait passer par un dialogue de fichiers pour en sortir. Une **liste déroulante « Planche »** est désormais dans le bloc de mesure, avec un libellé lisible — *Planche 2b — 11h14 (60x110)*. Le choix vaut pour toute la séance et pour toutes les grilles. Un automatisme qui choisit à votre place doit au minimum montrer ce qu'il a choisi.

Enchaîner les cases sans fermer la fenêtre (v2.34.0). Deux gênes signalées à l'usage, et la seconde était la plus sérieuse : il fallait rouvrir la fenêtre pour chaque trait, et surtout *rien ne disait dans quelle case allait la mesure*. La case visée est désormais écrite **en grand et en permanence** en haut de la fenêtre — une valeur qui atterrit dans la mauvaise case ne se voit pas, elle ressemble à une mesure.

La planche s'ouvre toute seule (v2.33.1) : la plus récente du dossier, puis retenue pour toute la séance — on mesure des dizaines de cases sur une même planche, redemander le fichier à chaque fois est un clic de trop répété quarante fois. Son nom est dans le titre de la fenêtre, pour vérifier d'un coup d'œil que c'est la bonne, et un bouton « Changer de planche... » permet d'en ouvrir une autre.

Mesurer à la LIGNE, sur le profil moyenné (v2.33.0). Le bouton « Mesurer sur l'image redressée... » ouvre la planche, on encadre *un* trait à la souris, et l'atelier affiche à côté de lui son **profil de noirceur moyenné sur toute sa longueur**. Deux lignes horizontales, qu'on fait glisser (flèches $\updownarrow$ pour affiner au pixel), traversent l'image *et* la courbe ; la largeur s'affiche en direct.

Le verrou vaut aussi pour l'outil de mesure (v2.31.1). « Verrouiller les résultats » bloquait le clavier, mais *pas* « Mesurer A → B » : la mesure s'écrivait dans une case protégée — et écrasait sans un mot une valeur déjà relevée. Un verrou qui ne retient qu'une main sur deux ne protège rien, il rassure à tort. L'outil refuse désormais, le dit dès le *ciblage* de la case (pas après avoir pointé deux fois dans la vue) et ne compte pas la mesure refusée dans la moyenne.

« **Toutes les planches** » en contient enfin quatre (v2.31.0). La 2b avait été ajoutée aux boutons et pas au fichier combiné : un bouton qui dit « toutes » doit dire vrai. La 3 et la 2b, toutes deux étroites et hautes, sont empilées dans une **colonne de droite** — les mettre à la suite des deux premières donnerait une planche de 30 cm de long, alors qu'à droite elles tiennent dans la hauteur déjà occupée. L'ensemble passe de 204×173 à 225×217 mm : prévoyez la chute en conséquence. Le test vérifie qu'aucune des quatre emprises n'en chevauche une autre — deux planches superposées, c'est du bois perdu et des mesures impossibles, et ça ne se voit qu'à l'aperçu.

L'écart des rangées suit le défocus (v2.30.0). Il était fixe à 4 mm, dimensionné pour des traits de 0,30 mm au foyer. À 55 et 60 mm de défocus la brûlure fait 4,1 et 4,4 mm : **les rangées se rejoignent**, et deux traits qui se touchent ne se mesurent plus. Vu sur le bois, sur la première Planche 2b sortie de la machine. L'écart est désormais calculé *par niveau* à partir du cône de divergence — 4,0 mm à 15, 4,5 à 36, 5,0 à 40, 6,6 à 55, 7,2 à 60 — en laissant 0,6 largeur de bois propre entre deux bords. Proportionnel à ce qu'on mesure, ce qui est le bon critère : une marge fixe est trop serrée en haut et gaspillée en bas. Les niveaux faibles restent donc aussi compacts qu'avant.

Versions 2.20 à 2.29 — 11 entrées

Planche 2b — défocus profond (v2.29.0). Les niveaux 40, 55 et 60 mm ne portaient qu'*un* point chacun, venu de la Rampe puissance/vitesse. Un niveau à une seule puissance ne peut pas servir d'ancre au modèle : il ferait croire que la largeur ne dépend pas de la puissance et aplatirait toute la plage qu'il borde. Cette planche leur donne une **seconde puissance**, et au-delà de 36 mm le modèle interpolera au lieu d'extrapoler.

Une grille vide qui n'aurait pas dû l'être (v2.28.0). Une grille de défocus apparaît dès qu'une mesure existe à ce niveau — mais elle n'a de cases que pour les puissances et vitesses de la planche. Les points venus de la *Rampe puissance/vitesse* portent des puissances interpolées (S585, S716, S909...) : aucune case ne leur correspond, et le tableau s'affichait **entièrement vide**. Un tableau né d'une mesure qu'il ne montre pas. Ces points sont désormais **listés sous la grille**, avec leur largeur, et le rappel qu'ils sont conservés à l'enregistre-

ment mais qu'un niveau à une seule puissance ne sert pas d'ancre au modèle. Rien ne s'affiche quand tout tient dans la grille : un avertissement permanent est du bruit qu'on cesse de lire.

Un écart trop faible n'est pas une modulation (v2.27.0). « Lignes gravées » refusait une vitesse seulement si le trait était *exactement* plat : un centième d'écart suffisait à promettre une modulation. Sur la planche du 01/08/2026, F1500 a donné 0,10 → 0,13 mm — un pixel et demi sur l'image redressée — et l'atelier s'est mis à accepter des vitesses où le trait ne module rien. Il faut désormais un rapport d'au moins **1,5×** entre le trait le plus fin et le plus gros. Le refus *nomme* le rapport obtenu et le seuil, au lieu de dire seulement « trop vite ».

La galerie dit maintenant QUELLE planche elle montre (v2.26.0). Le sélecteur « Photos de » était placé *au-dessus* de la carte de section, donc visuellement rattaché à la section précédente : on croyait à une liste unique, et une planche rangée sous une autre entrée passait pour perdue. Il est désormais la première ligne **sous le titre**. Chaque planche a sa propre liste.

Et le champ Description tient enfin son texte. Depuis que l'atelier écrit lui-même les descriptions (échelle, cotes, contrôle de réglette, fichier de mesure), elles dépassent 200 caractères : dans un champ d'une ligne on n'en voyait que la fin — « *vérifiée à +0.11 %* » — et y ajouter ses conditions de gravure revenait à écrire à l'aveugle. C'est une zone de plusieurs lignes, enregistrée quand on la quitte. **Complétez le texte existant, ne l'effacez pas** : le champ remplace la description.

Les cotes contredisent la planche choisie ? L'atelier le dit (v2.25.0). La planche est choisie *avant* de voir la photo : on peut donc cliquer « Planche 1 » et photographier la 2 — c'est arrivé le 01/08/2026. Rien n'est faussé (l'échelle vient des cotes, lues sur le bois), mais la photo part sous la mauvaise planche et son fichier porte un nom qui ment. Quand les cotes saisies sont celles d'une *autre* planche connue, l'atelier le signale et propose de **corriger le rangement** — les cotes viennent du bois, le choix initial vient de la mémoire ; quand les deux se contredisent, c'est la mémoire qui a tort.

Et la Planche 3 aussi (v2.24.1). Elle n'a pas de mire — elle se juge à l'œil, pas par photo — donc elle n'héritait pas du nom gravé par la mire et sortait *anonyme*. Or c'est précisément la planche qui calibre le point de ce laser-là. Le nom y est maintenant gravé sur une **rangée à part, au-dessus de tout le reste**, ce qui rend impossible toute collision avec les libellés F<vitesse> quel que soit le nombre de bandes. Les **trois** planches de calibration portent donc leur laser.

Le laser est GRAVÉ sur la planche (v2.24.0). À côté des cotes, sous la réglette, la mire grave désormais le nom du **laser actif** — 140-60 LT-80W-AA-PRO . Il était jusque-là dans le nom du fichier *redressé*, ce qui ne suit pas le bois : une planche retrouvée sur l'établi six mois plus tard ne disait pas de quelle diode elle venait. C'est le même raisonnement que les cotes gravées, appliqué à la donnée qui décide du *sens* des mesures — une largeur brûlée n'a de valeur que pour le module qui l'a produite.

Supprimer une planche, fichiers compris (v2.23.0). Regraver une planche mieux réussie est le cas *normal* de ce travail : on grave, on mesure, on n'aime pas, on regrave. Le bouton « **Gérer / supprimer des planches...** » liste celles du dossier avec leur laser, leurs cotes, leur poids et surtout **l'écart mesuré sur la réglette** — c'est le bon critère pour choisir laquelle garder, puisque c'est la seule mesure indépendante des croix cliquées. Sélection multiple, confirmation nommant les fichiers, puis suppression de *l'ensemble* : image de mesure, fiche, aperçu, contrôle des repères, et la vignette correspondante de la galerie. « Supprimer la

photo affichée » de la galerie n'enlevait que l'aperçu et laissait les 55 Mo sur le disque — une suppression qui n'efface que ce qui se voit est un demi-mensonge.

Et le champ du nom de laser est enfin large, avec la consigne qui va avec : une case de quinze caractères invitait à taper « Bleu » là où il faut une référence de matériel.

Un dossier à elles, et le laser dans le nom (v2.22.0). Les planches redressées ne sont plus déposées à côté de la photo d'origine mais dans un **dossier dédié**, réglable en Préférences (*Dossier des planches*, par défaut `~/Planches-LaserAtelier`). Elles s'y retrouvent sans avoir à se rappeler d'où venait la photo — et cessent de s'empiler au milieu des `IMG_*.JPG`.

Reposer une planche déjà redressée (v2.21.0). Redresser est un travail qu'on fait une fois : cliquer quatre croix, contrôler l'échelle sur la règle. Rouvrir FreeCAD ne doit pas obliger à tout recommencer pour la seule raison que le document n'a pas été enregistré — l'image, elle, est toujours sur le disque. Le bouton « **Reposer une planche déjà redressée...** » la repose à son échelle exacte, sans un seul clic sur une croix. La taille en mm vient d'une **fiche .json écrite systématiquement à côté de l'image** — même raisonnement que les cotes gravées sur la planche, un cran plus loin : le fichier porte ce qu'il faut pour être relu. Sans fiche (image antérieure), l'atelier déduit la taille des pixels et demande l'échelle, 50 px/mm par défaut.

Et vos mesures, elles, ne se perdent pas : elles vivent dans la configuration de l'atelier, pas dans le document. Rouvrez le panneau, choisissez le matériau, les grilles se remplissent toutes seules — à condition d'avoir cliqué « Enregistrer les mesures » avant de fermer.

Revoir les planches redressées, sans ouvrir le dossier (v2.20.0). Une liste déroulante « Photos de : Planche 1 / 2 / autre » et sa galerie sont placées sous le bouton de redressement : vignette cliquable, description, suppression. Elles manquaient — le message annonçait « rangée dans les photos du résultat » et *rien* ne les affichait ; il fallait aller ouvrir le dossier à la main. Une donnée qu'on range sans jamais la remonter n'est pas rangée, elle est perdue poliment. Les clés de rangement sont désormais une **source unique**, partagée par le bouton qui écrit et la galerie qui lit.

Et la galerie ne duplique plus 55 Mo par photo. Le PNG redressé (12800 × 4300, sans perte) est ce qu'il faut pour *mesurer*, pas pour *regarder* : la galerie garde un aperçu JPEG de ~0,5 Mo et la description porte le chemin du fichier de mesure, resté à sa place. 290 Mo s'étaient accumulés en une matinée avant qu'on le remarque.

Versions 2.10 à 2.19 — 6 entrées

En travers du trait, pas en diagonale (v2.19.0). Une case à cocher — **active par défaut** — ne retient que la composante *perpendiculaire* au trait, c'est-à-dire la plus grande de dx et dy (dy pour un trait horizontal, dx pour un vertical). C'est important : la distance directe A → B vaut `hypot(dx, dy)`, donc elle est **toujours supérieure** à la largeur réelle dès que les deux clics ne sont pas exactement l'un au-dessus de l'autre. Sur un trait de 0,30 mm, 0,20 mm de décalage latéral donne 0,36 — **20 % de trop**, et rien ne le signalait. Une largeur ne doit pas dépendre de la fermeté de la main. Décochez pour mesurer autre chose qu'une largeur (une diagonale, un entraxe) ; dx, dy et la distance directe sont de toute façon toujours affichés.

Un bouton sous chaque grille (v2.19.0). Un seul bloc en bas du panneau obligeait à faire défiler la fenêtre entre chaque valeur, la grille du haut et le bouton ne tenant pas ensemble à l'écran. Chaque grille — foyer et chaque niveau de défocus — a maintenant le sien, et son message s'affiche juste au-dessous, là où l'œil est déjà.

Moyenner, parce que le trait n'est pas droit (v2.18.0). Les bords d'une brûlure ondulent — c'est le grain qui décide, pas la machine. Des mesures successives sur la *même* case sont donc cumulées : la case reçoit la **moyenne courante**, et le panneau affiche l'**étendue** entre vos mesures. Trois pointés à trois endroits du trait valent bien mieux qu'un seul. L'étendue n'invalide rien : elle vous dit si votre critère « où s'arrête la brûlure » a tenu d'un bout à l'autre, ce qu'une valeur seule ne dit jamais. Re-cliquer la case repart de zéro.

La planche se vérifie elle-même (v2.17.0). Après redressement, l'outil *mesure* le pas de la réglette gravée et le compare à l'échelle annoncée. Cette mesure-là ne sert pas au redressement : elle est **indépendante** des quatre croix, donc elle contrôle vraiment le résultat. Au-delà de 1,5 % d'écart le fichier n'est même pas écrit — une image fausse qui n'existe pas ne peut pas être mesurée par erreur trois jours plus tard. Le verdict est repris dans la description de la photo du résultat, parce que c'est lui qu'on relira dans six mois pour savoir si l'on peut croire ces mesures.

La planche porte ses propres cotes (v2.16.1). Les dimensions de la mire sont *gravées* sous la réglette, au format « largeur-hauteur » (par exemple **140-60**). Ce n'est pas un ornement : le 31/07/2026 les planches ont été resserrées quelques heures après avoir été gravées, et le fichier `.ngc` régénéré ne décrivait plus le bois posé sur l'établi — redresser sa photo avec cette cote-là aurait donné une échelle fausse *en silence*. Une planche vit des années, un fichier est réécrit : la planche doit donc se suffire à elle-même. Le tiret plutôt qu'un « × » parce que la police 7 segments ne connaît que les chiffres, S, F, le point et le tiret.

Planches resserrées (v2.15) : traits de 20 à **12 mm**, entre-rangs de 6 à 4, étiquettes de 3 à 2,5 mm, et surtout un **entre-colonnes calculé** sur la largeur réelle des étiquettes au lieu des 12 mm réservés au jugé. Résultat : Planche 1 de 195 × 74 à **145 × 64 mm** (−36 % de surface, 4 min 11 → 3 min 05) et Planche 2 de 135 × 114 à **94 × 94 mm** (−43 %, 5 min 01 → 3 min 35). Moins de chute consommée, une photo plus facile à cadrer, et un test plus rapide. Douze millimètres suffisent : même à F3000, la plus rapide, l'accélération ne mange que 2 mm à chaque bout et il reste près de 8 mm à vitesse établie. Un contrôle automatique vérifie qu'aucune étiquette ne vient toucher un trait après resserrage — c'est comme ça qu'un trait s'était retrouvé gravé en travers des chiffres de la réglette au premier essai.