

"A look inside a mind without peer."

— Edward Snowden

The Hardware Hacker

ADVENTURES IN MAKING
& BREAKING HARDWARE

MAIN LOGIC BOARD SCHEMATIC

Andrew "bunnie" Huang

Louange pour *Le pirate informatique*

« Le matériel, dit Bunnie, est un monde sans secrets : si vous allez suffisamment en profondeur, même la clé la plus importante est exprimée en silicium ou en fusibles. Bunnie's est un monde sans mystères, seulement des espaces inexplorés. C'est un regard sur un esprit sans égal.

-Evers le basSmaintenantdFr

"Un tour de force qui combine les nombreux parcours géniaux de l'un des plus grands hackers-communicateurs du monde : pratique, théorique, philosophique et souvent époustouflant."

-CorydoCtorow,auteur de *LçaBfrèreet la technologie activiste*

« Bunnie vit dans le monde du matériel où la soudure rencontre le PCB. Il a plus d'expérience pratique et est un meilleur enseignant du fonctionnement de l'écosystème matériel que toute autre personne que j'ai jamais rencontrée, et je connais beaucoup de gens dans ce domaine. Il a transformé cette expérience et cette expertise dans un livre étonnant, une bible du point de vue du hacker pour quiconque essaie de travailler ou de comprendre et de travailler dans le monde émergent et en évolution du matériel.

-J.ohjeà, dirECteur, Avec Médiajeun B

"Bunnie est le guide touristique ultime du piratage matériel tel qu'il se présente aujourd'hui, avec un regard tourné vers l'art sublime de la façon dont les choses fonctionnent. *vraiment fait*. *Le pirate informatique* vous fera voyager à travers les usines du monde, couvrant à la fois les implications techniques et éthiques des « choses » que nous fabriquons et achetons.

— jeiMor "ladyada" FRiEd, FoundEr&Eingénieur, UNdafruit
jeINDUSTRIES

« Vous êtes curieux de savoir comment naissent les appareils qui font partie de notre vie quotidienne ? Envie de fabriquer votre propre projet ? Dans ce livre bien écrit, Bunnie décrit les tenants et les aboutissants du processus de fabrication en Chine. Une lecture très divertissante et instructive.

-MdémangerUNl'Homme,inventeur detv-bgun®

"*Le pirate informatique*est, à la base, une introduction à la compréhension de la culture de la création de quelque chose en Chine, de la façon de construire des milliers de choses et du fonctionnement de l'Open Hardware.

-hun jour

Le Matériel Pirate

Aventures en devenir
et briser le matériel

Andrew « lapin » Huang



Le pirate informatique.Copyright © 2017 par Andrew « bunny » Huang.

Tous droits réservés. Aucune partie de cette œuvre ne peut être reproduite ou transmise sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, l'enregistrement ou par tout système de stockage ou de récupération d'informations, sans l'autorisation écrite préalable du propriétaire des droits d'auteur et de l'éditeur.

20 19 18 17 1 2 3 4 5 6 7 8 9

ISBN-10 : 1-59327-758-X

ISBN-13 : 978-1-59327-758-1

Editeur : William Pollock Editeur

de production : Alison Law

Conception de la couverture et de la jaquette : Hotiron Creative

Interior Design : Beth Middleworth Rédactrice en chef du

développement : Jennifer Griffith-Delgado

Rédacteur : Rachel Monaghan

Compositeur : Alison Law

Selecteur : Emelie Burnette

Indexeur : BIM Creatives, LLC.

Les images des pages suivantes sont reproduites avec autorisation : pages 58-59 © David Cranor ; page 124 © pièces manquantes ; pages 216, 227-228 © Scott Torborg ; page 248 © Joachim Strömergsson ; pages 253 (en bas) et 254-255 © Jie Qi ; page 256 (en haut) © Chibitronics ; page 310 © Nadya Peek ; page 326 (en haut) de Eva Yus et al., « Impact de la réduction du génome sur le métabolisme bactérien et sa régulation », *Science*326, non. 5957 (2009), réimprimé avec la permission de l'AAAS ; page 349 © Sakurambo, utilisé sous CC BY-SA 3.0.

Les interviews des pages suivantes ont été initialement publiées en ligne et sont reproduites avec autorisation : pages 190 à 204, initialement publiées sous le titre « MAKE's Exclusive Interview with Andrew (bunny) Huang – The End of Chumby, New » par Phillip Torrone dans *Faire*(30 avril 2012),<http://makezine.com/2012/04/30/makes-exclusive-interview-with-andrew-bunny-huang-the-end-of-chumby-new-adventures/>; pages 357 à 372, initialement publiées en chinois sous le titre « Andrew « bunny » Huang：开源硬件、创客与硬件黑客” dans *Réseau de développeurs de logiciels en Chine*(3 juillet 2013),<http://www.csdn.net/article/2013-07-03/2816095>; pages 372 à 382, initialement publié sous le titre « The Blueprint Talks to Andrew Huang » dans *Le plan*(15 mai 2014),<https://theblueprint.com/stories/andrew-huang/>.

Pour plus d'informations sur la distribution, les traductions ou les ventes en gros, veuillez contacter directement No Starch Press, Inc. :

Pas d'amidon Press, Inc.

245 ème rue, San Francisco, Californie 94103

téléphone : 1.415.863.9900; info@nostarch.com ; www.nostarch.com

Données de catalogage avant publication de la Bibliothèque du Congrès

Noms : Huang, Andrew, auteur.

Titre : Le hacker matériel : aventures dans la fabrication et le démantèlement du matériel / Andrew « Bunny » Huang.

Description : 1ère éd. | San Francisco : No Starch Press, Inc., [2017] Identifiants : LCCN 2016038846 (imprimé) | LCCN 2016049285 (livre électronique) | ISBN 9781593277581 (pbt.) | ISBN 159327758X (pbk.) | ISBN 9781593278137 (epub) | ISBN 1593278136 (epub) | ISBN 9781593278144 (mobile) | ISBN 1593278144 (mobile)

Sujets : LCSH : Appareils et appareils électroniques - Conception et construction.

| Appareils et appareils électroniques--Innovations technologiques. |

Matériel d'entrée-sortie informatique--Conception et construction. |

Ingénierie inverse. | Industries électroniques. | Huang, André.

Classification : LCC TK7836 .H83 2017 (imprimé) | LCC TK7836 (livre électronique) | DDC 621.381092--dc23

Dossier LC disponible sur <https://lccn.loc.gov/2016038846>

No Starch Press et le logo No Starch Press sont des marques déposées de No Starch Press, Inc. Les autres noms de produits et de sociétés mentionnés ici peuvent être les marques de leurs propriétaires respectifs. Plutôt que d'utiliser un symbole de marque à chaque occurrence d'un nom de marque, nous utilisons les noms uniquement de manière éditoriale et au profit du propriétaire de la marque, sans intention de porter atteinte à la marque.

Les informations contenues dans ce livre sont distribuées « telles quelles », sans garantie. Bien que toutes les précautions aient été prises lors de la préparation de cet ouvrage, ni l'auteur ni No Starch Press, Inc. ne pourront être tenus responsables envers toute personne ou entité en ce qui concerne toute perte ou tout dommage causé ou prétendument causé directement ou indirectement par le informations qu'il contient.

À toutes les personnes merveilleuses, patientes et tolérantes
qui ont soutenu ce hacker excentrique

REMERCIEMENTS

Merci à tout le personnel travaillant dur de No Starch Press pour avoir réalisé ce livre. En particulier, merci à Bill Pollock pour avoir conçu et parrainé cet effort, et merci à Jennifer Griffith-Delgado pour avoir compilé, édité et organisé mes écrits sous la forme de ce livre.

résumé

préface.....	xvii
partie 1	
aventures dans le secteur manufacturier.....	1
chapitre 1. fabriqué en Chine.....	7
chapitre 2. au sein de trois usines très différentes.....	43
chapitre 3. l'atelier de l'usine.....	73
partie 2	
penser différemment :	
la propriété intellectuelle en Chine	115
chapitre 4. innovation gongkai	119
chapitre 5. contrefaçons.....	143
partie 3	
ce que le matériel ouvert signifie pour moi	
175	
chapitre 6. l'histoire de Chumby.....	181
chapitre 7. neuvaine : construire mon propre ordinateur portable.....	215
chapitre 8. chibitronique : création d'autocollants de circuit.....	251

partie 4

le point de vue d'un hacker.....	275
chapitre 9. piratage matériel.....	279
chapitre 10. biologie et bioinformatique	325
chapitre 11. entretiens sélectionnés.....	357
épilogue.....	383
indice.....	384

contenu en détail

préface

XVII

partie 1	
aventures dans la fabrication	1
1. fabriqué en Chine	7
Le marché aux puces ultime des composants électroniques	8
La prochaine révolution technologique	14
Visite d'usines avec Chumby.....	16
Balance à Shenzhen	17
Alimenter l'usine	18
Dévouement à la qualité	20
Construire une technologie sans l'utiliser.....	23
Travailleurs qualifiés	24
Le besoin d'artisans	26
Automatisation pour l'assemblage électronique	29
Précision, moulage par injection et patience	31
Le défi de la qualité	34
Pensées finales.....	42
2. au sein de trois usines très différentes	43
Où sont nés les Arduinos.....	44
Commencer avec une feuille de cuivre	46
Application du motif PCB au cuivre.....	49
Gravure des PCB	51
Application du Soldermask et de la sérigraphie.....	53
Tests et finition des cartes.....	54

Où sont nées les clés USB.....	57
Les débuts d'une clé USB.....	57
Placement manuel des puces sur un PCB.....	59
Liaison des puces au PCB.....	61
Un examen attentif des cartes de clé USB	61
L'histoire de deux fermetures éclair	64
Un processus entièrement automatisé	67
Un processus semi-automatisé.....	68
L'ironie de la rareté et de la demande.....	70
3. l'usine	73
Comment faire une nomenclature	74
Une nomenclature simple pour un éclairage de sécurité pour vélo	74
Fabricants agréés	76
Tolérance, composition et spécification de tension	76
Facteur de forme des composants électroniques.....	77
Numéros de pièces étendus	78
La nomenclature des feux de sécurité pour vélo revisitée.....	79
Planifier et gérer le changement.....	82
Optimisation des processus : conception pour la fabrication.....	84
Pourquoi DFM?.....	85
Tolérances à considérer	86
Suivre DFM améliore vos résultats.....	88
Le produit derrière votre produit	91
Tests ou validation.....	97
Trouver un équilibre dans le design industriel	100
Les garnitures et finitions du chumby One.....	101
L'art de la sérigraphie de l'Arduino Uno	104
Mon processus de conception	105
Choisir (et entretenir) un partenaire.....	107
Conseils pour nouer une relation avec une usine.....	107
Conseils sur les devis	108
Conseils divers	111
Pensées finales.....	113

partie 2	
penser différemment :	
propriété intellectuelle en Chine	115
4. innovation gongkai	119
J'ai cassé l'écran de mon téléphone et c'était génial	120
Shanzhai en tant qu'entrepreneurs.....	121
Qui sont les Shanzhai ?	122
Plus que des copieurs	123
Règles de propriété intellectuelle appliquées par la communauté	124
Le téléphone à 12 \$	126
À l'intérieur du téléphone à 12 \$	128
Présentation du Gongkai	131
Du Gongkai à l'Open Source	134
Les ingénieurs ont aussi des droits	135
Pensées finales.....	141
5. produits contrefaits	143
Des puces contrefaites bien exécutées	143
Puces contrefaites dans le matériel militaire américain.....	149
Types de pièces contrefaites.....	150
Contrefaçons et conceptions militaires américaines	153
Mesures anti-contrefaçon	154
Fausses cartes MicroSD.....	156
Différences visibles.....	157
Enquêter sur les cartes	158
Les cartes MicroSD étaient-elles authentiques ?.....	159
Enquête médico-légale plus approfondie.....	160
Rassembler des données.....	162
Résumer mes découvertes.....	166
Faux FPGA	168
Le problème de l'écran blanc	168
Codes d'identification incorrects	170
La solution.....	172
Pensées finales.....	174

partie 3	
ce que le matériel ouvert signifie pour moi	175
6. l'histoire de potelé	181
Une plateforme conviviale pour les hackers	182
Chubby en évolution	184
Un appareil plus piratable	186
Du matériel sans secrets.....	187
La fin de Chumby, nouvelles aventures	189
Pourquoi les meilleurs jours du matériel ouvert sont encore à venir	205
D'où nous venons : ouvert à fermé	206
Où nous en sommes : « S'asseoir et attendre » contre « Innover »	208
Où nous allons : les ordinateurs portables anciens	210
Une opportunité pour le matériel ouvert	211
Pensées finales.....	214
7. neuvaine : construire mon propre ordinateur portable	215
Pas un ordinateur portable pour les âmes sensibles	217
Concevoir la première neuvaine.....	219
Sous la capuche.....	219
L'enceinte.....	224
Le composite de bois personnalisé de l'ordinateur portable Heirloom	227
Neuvaines en croissance	228
Les détails de l'ingénierie mécanique	229
Modifications apportées au produit fini	232
Problèmes de construction du boîtier et de moulage par injection	233
Modifications apportées au panneau avant	237
Haut-parleurs DIY.....	238
La carte mère PVT2	238
Un tableau de discussion pour les débutants	241
La carte Power Pass-Through du Desktop Novena.....	242
Problèmes liés aux blocs-batteries personnalisés.....	243
Choisir un disque dur	244
Finalisation du micrologiciel.....	246
Bâtir une communauté.....	247
Pensées finales.....	249

8. chibitronique : création d'autocollants de circuit 251

Fabriquer avec des circuits	257
Développer un nouveau processus	259
Visite de l'usine.....	260
Exécution d'un test de capacité de processus.....	261
Tenir une promesse.....	264
Pourquoi une livraison à temps est importante	266
Leçons apprises	266
Toutes les demandes simples ne sont pas simples pour tout le monde.....	267
Ne sautez jamais un tracé de contrôle	268
Si un composant peut être mal placé, il le sera.....	268
Certains concepts ne se traduisent pas bien en chinois	270
Éliminer les points de défaillance uniques.....	271
Certains changements de dernière minute en valent la peine.....	271
Le Nouvel An chinois impacte la chaîne d'approvisionnement.....	272
L'expédition est coûteuse et difficile	273
Vous n'êtes pas sorti d'affaire tant que vous n'avez pas expédié.....	274
Pensées finales.....	274

partie 4 le point de vue d'un hacker 275

9. piratage matériel 279

Piratage du PIC18F1320.....	281
Décapsulage du CI	282
En y regardant de plus près	283
Effacement de la mémoire Flash	284
Effacement des bits de sécurité	285
Protection des autres données	287
Piratage de cartes SD	289
Comment fonctionnent les cartes SD.....	290
Ingénierie inverse du microcontrôleur de la carte	293
Problèmes de sécurité potentiels	298
Une ressource pour les amateurs	298
Piratage des liens sécurisés HDCP pour autoriser les superpositions personnalisées	298
Contexte et contexte	300
Comment fonctionne NeTV	302

Pirater un téléphone Shanzhai	306
L'architecture du système	306
Ingénierie inverse de la structure de démarrage.....	311
Construire une tête de pont	315
Attacher un débogueur	317
Démarrage d'un système d'exploitation.....	321
Construire une nouvelle chaîne d'outils.....	321
Résultats de Fernvale.....	323
Pensées finales.....	324
10. biologie et bioinformatique	325
Comparaison du H1N1 à un virus informatique	327
ADN et ARN sous forme de bits.....	328
Les organismes ont des ports d'accès uniques	330
Lutte contre la grippe porcine.....	331
Grippe adaptable	333
Une lueur d'espoir	335
Superbactéries d'ingénierie inverse	335
La séquence d'ADN O104:H4	336
Outils d'inversion pour la biologie.....	338
Répondre aux questions biologiques avec les scripts Shell UNIX.....	340
Plus de questions que de réponses	342
Briser les mythes sur la génomique personnalisée	344
Mythe : lire votre génome, c'est comme faire du dumping hexadécimal la ROM de votre ordinateur	344
Mythe : Nous savons quelles mutations prédisent la maladie.....	345
Mythe : Le génome de référence est une référence précise....	345
Corriger un génome	346
CRISPR dans les bactéries	347
Déterminer où couper un gène.....	350
Implications pour les ingénieurs humains.....	351
Pirater Evolution avec Gene Drive.....	352
Pensées finales.....	354

11. entretiens sélectionnés	357
Andrew « bunnie » Huang : Hacker matériel (CSDN)	357
À propos de l'Open Hardware et du mouvement Maker	358
À propos des pirates informatiques	367
Le Plan s'entretient avec Andrew Huang	372
épilogue	383
indice	384

préface

Lorsque Bill Pollock, fondateur de No Starch Press, m'a contacté pour la première fois avec l'idée de publier une compilation de mes écrits, j'étais sceptique. Je ne pensais pas qu'il y aurait suffisamment de matériel pour remplir une centaine de pages. Il semble que j'avais tort.

Ma mère disait souvent : « Peu importe ce que vous avez en tête si vous ne pouvez pas dire aux gens ce qu'il y a dedans », et quand j'étais en septième année, elle m'a inscrit à un cours de rédaction de dissertations après l'école. Je détestais le cours à l'époque, mais rétrospectivement, je suis reconnaissant. Depuis mes dissertations de candidature à l'université et jusqu'à ce jour, j'ai trouvé la capacité d'organiser mes pensées en prose inestimable.

La plupart du contenu de ce livre a été initialement publié sur mon blog, mais comme vous le verrez bientôt, ces articles n'étaient pas des articles rédigés pour générer des revenus publicitaires. L'une des raisons pour lesquelles j'écris est de consolider ma propre compréhension de sujets complexes. Il est facile de croire que vous comprenez un sujet jusqu'à ce que vous essayiez de l'expliquer à quelqu'un d'autre de manière rigoureuse. L'écriture est la façon dont je distille mon intuition en connaissances structurées ; J'écris uniquement lorsque je trouve quelque chose d'intéressant sur lequel écrire, puis je le publie avec une licence CC BY-SA pour encourager les autres à le partager.

Ce livre comprend une sélection de mes écrits sur la fabrication, la propriété intellectuelle (en mettant l'accent sur la comparaison des perspectives occidentales et chinoises), le matériel ouvert, l'ingénierie inverse, ainsi que la biologie et la bioinformatique. Les bons rédacteurs de No Starch Press ont également organisé quelques interviews que j'ai réalisées dans le passé et qui étaient particulièrement informatives ou perspicaces. Le fil conducteur de ces divers sujets est le matériel : comment il est fabriqué, les cadres juridiques qui l'entourent et comment il est défait. Et oui, les systèmes biologiques sont du matériel.

J'ai toujours été attiré par le matériel car même si je ne suis pas particulièrement doué en matière de pensée abstraite (d'où la nécessité d'écrire pour organiser mes pensées), je suis plutôt doué avec mes mains. J'ai de bien meilleures chances de comprendre les choses que je peux voir de mes propres yeux.

Toute ma compréhension du monde s'est toujours construite sur une série d'expériences physiques simples, à partir du moment où j'ai empilé des blocs et les ai renversés quand j'étais enfant. Ce livre partage certaines de mes expériences les plus récentes. J'espère qu'en les lisant, vous acquerrez une compréhension plus approfondie du monde du matériel, sans avoir à passer des décennies à empiler des blocs et à les renverser.

Bon piratage,
—b.

Partie 1

aventures dans fabrication

J'ai mis les pieds en Chine pour la première fois en novembre 2006. Je n'avais aucune idée de ce dans quoi je m'embarquais. Quand j'ai dit à ma mère que j'allais visiter Shenzhen, elle s'est exclamée : « Pourquoi vas-tu là-bas ? C'est juste un village de pêcheurs ! Elle n'avait pas tort : Shenzhen n'était qu'une ville de 300 000 habitants en 1980, mais elle est devenue une mégapole de 10 millions d'habitants en moins de 30 ans. Entre ma première visite et le moment où j'ai écrit ce livre, Shenzhen a gagné environ 4 millions d'habitants, soit plus que la population de Los Angeles.

D'une certaine manière, ma compréhension du secteur manufacturier au fil des années a reflété la croissance de Shenzhen. Avant d'aller en Chine, je n'avais jamais rien produit en série. Je ne connaissais rien aux chaînes d'approvisionnement. Je n'avais aucune idée de ce que signifiait « opérations et logistique ». Pour moi, cela ressemblait à quelque chose sorti d'un manuel de mathématiques ou de programmation.

Pourtant, Steve Tomlin, mon patron de l'époque, m'a chargé de trouver comment construire une chaîne d'approvisionnement adaptée à notre startup de matériel, Chumby. Envoyer un novice en Chine était un gros risque, mais mon absence d'idées préconçues était plus un atout qu'un handicap. À l'époque, les investisseurs en capital-risque évitaient

matériel, et la Chine était réservée aux entreprises établies cherchant à construire des centaines de milliers d'unités d'un produit donné. Ma première série de tournées en Chine a certainement soutenu cette idée, puisque j'ai principalement visité des méga-usines desservant l'industrie.*Fortune500*.

Chumby a eu la chance d'être pris sous l'aile de PCH International en tant que premier client startup. Chez PCH, j'ai été encadré par certains des meilleurs ingénieurs et spécialistes de la chaîne d'approvisionnement. J'ai également eu la chance de pouvoir partager mes expériences sur mon blog, puisque Chumby a été l'une des premières startups de matériel informatique ouverte au monde.

Bien que respecter les volumes de commande minimum de nos partenaires de fabrication conventionnels ait été un combat constant, je n'ai cessé de remarquer de petites choses qui ne correspondaient pas aux idées reçues. D'une manière ou d'une autre, les entreprises chinoises locales ont réussi à remixer la technologie dans des produits de boutique. Les soi-disant Shanzhai intégraient les téléphones portables dans toutes sortes de formes fantaisistes, des briquets aux statuettes ornementales de Bouddha en or (plus de détails à ce sujet au chapitre 4). La nature de niche de ces produits signifiait qu'ils devaient être économiques pour être produits en plus petits volumes. J'ai également remarqué que les usines étaient capables de produire rapidement des circuits adaptateurs sur mesure et des appareils de test d'une qualité étonnamment élevée dans des volumes unitaires. J'avais l'impression qu'il y avait plus dans l'écosystème – une histoire qui était racontée encore et encore – mais peu de gens avaient le temps d'écouter, et ceux qui l'ont fait n'ont entendu que les parties qu'ils voulaient entendre.

La crise financière de 2008 a tout changé. Le marché de l'électronique grand public a été écrasé et les usines, autrefois trop occupées à imprimer de l'argent, nageaient désormais dans une capacité excédentaire. Je me suis fait des amis dans plusieurs usines de taille moyenne de la région. J'ai commencé à me demander comment, exactement, ces usines étaient capables de produire avec autant d'agilité leurs équipements de test internes, et comment Shanzhai était capable de prototyper et de construire de tels téléphones sur mesure.

Les patrons et les ingénieurs se sont d'abord montrés réticents, non pas parce qu'ils voulaient me cacher d'éventuels avantages concurrentiels, mais parce qu'ils avaient honte de leurs pratiques. Les clients étrangers regorgeaient de processus d'entreprise, de documentation et de procédures qualité, mais ils payaient également cher ces frais généraux. Les entreprises locales étaient beaucoup plus informelles et pragmatiques. Et si une poubelle était étiquetée « ferraille » ? Si les embouts à l'intérieur conviennent à un travail, alors utilisez-les !

Je voulais y participer. En tant qu'ingénieur, bricoleur et hacker, je me souciais beaucoup du coût de production de quelques unités, et quelques défauts d'assemblage mineurs n'étaient rien comparés aux problèmes de conception que j'ai dû déboguer. J'ai finalement réussi à convaincre une usine de me laisser construire une pièce en utilisant son processus d'assemblage de mauvaise qualité mais ultra bon marché.

L'astuce consistait à garantir que je paierais tout le produit, y compris les unités défectueuses. La plupart des clients refusent de payer pour des produits imparfaits, obligeant l'usine à supporter le coût de toute pièce qui ne correspond pas exactement aux spécifications. Ainsi, les usines dissuadent fortement les clients d'utiliser des procédés moins chers mais de mauvaise qualité.

Bien entendu, ma promesse de payer pour un produit défectueux signifiait que l'usine n'était pas incitée à faire du bon travail. En théorie, il aurait pu simplement me remettre une boîte de pièces détachées et j'aurais quand même dû payer pour cela. Mais en réalité, personne n'avait d'aussi mauvaises intentions ; tant que tout le monde faisait de son mieux, ils réussissaient environ 80 % du temps. Étant donné que les coûts de production en petits volumes sont dominés par la configuration et l'assemblage, mes résultats financiers étaient encore meilleurs malgré le fait que 20 % de mes pièces étaient jetées, et j'ai obtenu les pièces en seulement quelques jours au lieu de quelques semaines.

Avoir la possibilité d'échanger les coûts, les délais et la qualité les uns contre les autres change tout. Je me suis fait un devoir de découvrir des méthodes de production plus alternatives et de continuer à raccourcir

le chemin entre les idées et les produits, avec toujours plus d'options sur le spectre des coûts, des délais et de la qualité.

Après Chumby, j'ai décidé de rester au chômage, en partie pour me donner du temps de découverte. Par exemple, chaque mois de janvier, au lieu d'aller au frénétique Consumer Electronics Show (CES) à Las Vegas, je louais un appartement bon marché à Shenzhen et me livrais à « l'étude monastique de l'industrie manufacturière » ; pour le prix d'une nuit à Las Vegas, j'ai vécu un mois à Shenzhen. J'ai délibérément choisi des quartiers sans anglophones et je me suis forcé à apprendre la langue et les coutumes pour survivre. (Bien que je sois d'origine chinoise, mes parents ont donné la priorité à la maîtrise de l'anglais sans accent plutôt qu'à l'apprentissage du chinois.) J'ai erré dans les rues la nuit et observé les ruelles, essayant de donner un sens à toutes les choses étranges et merveilleuses que j'ai vues se passer pendant cette période. le jour. Les affaires se poursuivent à Shenzhen jusqu'aux petites heures du matin, mais à un rythme beaucoup plus lent. La nuit, je pouvais distinguer des agents solitaires agissant selon leurs intérêts et leurs intentions.

S'il y a une chose que ces études m'ont apprise, c'est que j'ai encore beaucoup à apprendre. L'écosystème du delta de la rivière des Perles est d'une étendue incompréhensible. Comme pour le Grand Canyon, le simple fait de parcourir un sentier du bord à la base ne signifie pas que vous avez tout vu. J'ai cependant acquis suffisamment de connaissances pour construire un ordinateur portable personnalisé et développer un nouveau procédé pour les circuits électroniques à décoller et à coller.

Dans cette partie du livre, vous suivrez mon parcours au fur et à mesure que j'apprends l'écosystème de Shenzhen au fil des années, via un remix d'articles de blog que j'ai écrits en cours de route. Certains essais sont des réflexions sur des aspects particuliers de la culture chinoise ; d'autres sont des études de cas de pratiques de fabrication spécifiques. Je conclus par un chapitre intitulé « The Factory Floor », un ensemble de recommandations récapitulatives pour quiconque envisage de sous-traiter la fabrication. Si vous êtes pressé, vous pouvez ignorer tout l'arrière-plan et y accéder directement.

Cependant, le recul est de 20/20. Une fois que vous avez parcouru un chemin, il est facile de signaler les raccourcis et les dangers en cours de route ; il est encore plus facile d'oublier tous les mauvais virages et toutes les mauvaises hypothèses. Il n'existe pas de méthode universelle pour aborder la Chine, et j'espère qu'en lisant ces histoires, vous pourrez tirer vos propres conclusions (peut-être différentes) qui répondront mieux à vos besoins uniques.

1. fabriqué en Chine

Avant ma première visite en Chine, j'étais convaincu qu'Akihabara à Tokyo était le lieu incontournable pour les derniers appareils électroniques, bibelots et composants. Cela a changé en janvier 2007, lorsque j'ai découvert pour la première fois le marché électronique SEG à Shenzhen. SEG, c'est huit étages de tous les composants qu'un accro du matériel informatique pourrait souhaiter, et ce n'est que plus tard que j'ai appris que ce n'était que la pointe de l'iceberg du district électronique de Hua Qiang.

En tant qu'ingénieur matériel principal chez Chumby à l'époque, j'étais en Chine avec Steve Tomlin, alors PDG, pour découvrir comment fabriquer des Chumbys (un appareil de diffusion de contenu open source compatible Wi-Fi) à moindre coût et dans les délais. Avec des prix comme ceux de SEG, nous étions définitivement dans le bon pays pour réussir au moins la première partie de cette mission.



Le marché électronique SEG de Shenzhen, la nouvelle Mecque de l'électronique.

Akihabara, mange ton cœur !

LE MARCHÉ AUX PUCES ULTIME DE COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES

Lorsque je suis entré pour la première fois dans le bâtiment SEG, j'ai été assailli par un tourbillon de composants électroniques : bandes et bobines de résistances et de condensateurs, circuits intégrés de tous types, inductances, relais, points de test de broches pogo, voltmètres et plateaux de puces mémoire. En tant que nouveau venu dans la fabrication en volume, j'ai été époustouflé par tout ce que j'ai vu chez SEG.

Toutes ces pièces étaient entassées dans de minuscules cabines de six pieds sur trois, chacune avec un commerçant fouillant son ordinateur portable. Certains commerçants ont joué *Aller*, et certaines pièces comptées. Certains stands étaient de véritables boutiques familiales, où les mères s'occupaient de leurs bébés et de leurs enfants qui jouaient dans les allées.



Quelques magasins de composants familiaux

D'autres stands étaient des installations professionnelles avec un personnel en uniforme, et fonctionnaient comme un bar, équipé de tabourets, pour les composants électroniques.



Un vendeur de pièces professionnel chic

Personne chez SEG ne dit : « Oh, vous pouvez obtenir 10 de ces LED ou quelques-uns de ces relais », comme vous pourriez l'entendre à Akihabara. Non non. Ces stands sont spécialisés, et si vous voyez un composant que vous aimez, vous pouvez généralement en acheter plusieurs tubes, plateaux ou bobines ; vous pouvez en obtenir suffisamment pour passer en production le lendemain.

En regardant autour du marché, j'ai vu une femme trier des piles de cartes mini-SD de 1 Go comme des jetons de poker. Un homme mettait des bâtons de mémoire Kingston de 1 Go dans des emballages de vente au détail, et à côté de lui, une fille comptait les résistances.



Le coin inférieur gauche de cet écran était rempli de toutes sortes de cartes SD.

Un autre stand présentait des piles d'alimentations, des varistances, des batteries et des programmeurs ROM, et un autre encore des puces de toutes sortes : Atmel, Intel, Broadcom, Samsung, Yamaha, Sony, AMD, Fujitsu, et plus encore. Certaines puces ont été clairement arrachées d'équipements usagés et remarquées, certaines dans un tout nouvel emballage OEM marqué au laser.



La quantité de chips à vendre sur un seul stand au SEG était incroyable.

J'ai vu des puces que je ne pourrais jamais acheter aux États-Unis, des bobines de condensateurs céramiques rares dont je ne pouvais rêver que la nuit. Mes sens picotaient ; ma tête tournait. Je n'ai pas pu réprimer un sourire d'anticipation alors que je marchais au coin suivant pour voir des magasins empilés du sol au plafond avec probablement 100 millions de résistances et de condensateurs.



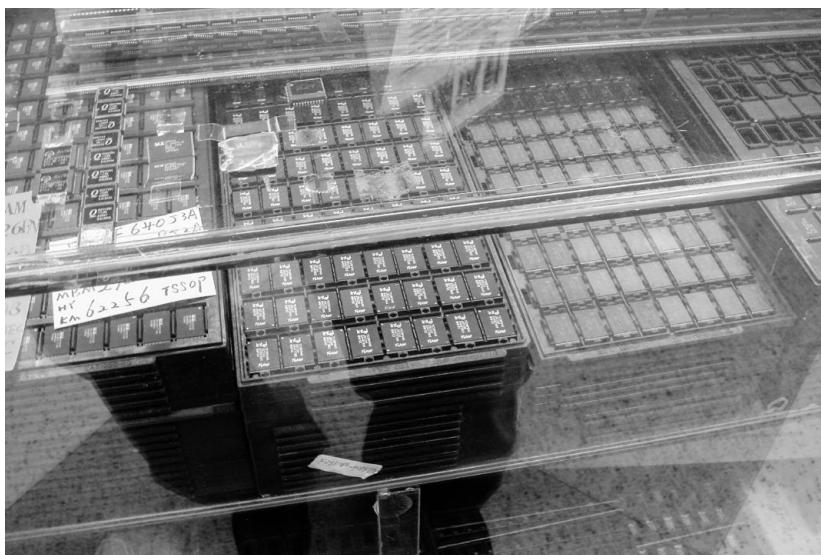
Bobines et bobines de composants, dans chaque vitrine

Éléments de caméra Sony CCD et CMOS ! Je ne pourrais pas les acheter aux États-Unis si j'arrachais les dents des commerciaux. (Certains vendeurs ont même les fiches techniques derrière le comptoir ; demandez toujours.) Ensuite, j'ai repéré une pile de puces de régulateur Micrel, suivie d'une puce Blackfin DSP à vendre. À proximité, une dame a compté 256 Mo de puces DRAM, soit des plateaux de 108 composants, empilés sur 20 hauteurs, sur peut-être 10 rangées.



L'équivalent de tout le stock de puces DRAM de Digi-Key se trouvait juste devant moi !

Et en face d'elle se trouvaient une demi-douzaine de petits magasins remplis de chips comme la sienne. Dans un magasin, un homme se tenait fièrement devant un plateau rempli de puces flash NAND de 4 Go. Tout cela était disponible contre un petit marchandage, un peu d'argent et un au revoir précipité.



Un examen attentif d'un plateau de puces flash de 4 Go

Et ce ne sont que les deux premiers étages de SEG. Il y a six autres étages de composants informatiques, de systèmes, d'ordinateurs portables, de cartes mères, d'appareils photo numériques, de caméras de sécurité, de clés USB, de souris, de caméras vidéo, de cartes graphiques haut de gamme, d'écrans plats, de destructeurs, de lampes, de projecteurs, etc. Le week-end, des « filles du stand » vêtues de bodys pailletés scandaleux de la marque Acer flânen, essayant de vous attirer pour acheter leurs produits. Ce marché a toute l'énergie d'un CES qui rencontre le Computex toute l'année, sauf qu'au lieu de simplement montrer les dernières technologies, le but est de vous amener dans ces stands pour acheter ce matériel. Les salons professionnels ressemblent toujours à un strip-tease, votre souffle faisant des anneaux fantomatiques sur le verre lorsque vous survolez les marchandises introuvables en dessous.

Mais SEG n'est pas un strip-tease. C'est l'orgie des achats électroniques grand public et industriels, où vous pouvez mettre vos pattes sales sur chaque pièce d'équipement pour suffisamment de temps.*Kua**de votre portefeuille. Entre l'odeur, l'agitation et l'agitation, SEG est le marché aux puces de composants électroniques par excellence. C'est comme si Digi-Key devenait fou et laissait des singes entrer dans son entrepôt du Minnesota, et que le chaos qui en résultait se répercutait sur un marché aux puces en Chine.

Bien sûr, bon nombre des pièces qui m'ont émerveillé en 2007 sont désormais des antiquités. Par exemple, les puces flash de 4 Go sont des déchets et les disques flash de 1 Go sont une vieille nouvelle. À l'époque, cependant, ces choses étaient très importantes et SEG reste le meilleur endroit pour obtenir les dernières technologies en gros.

LA PROCHAINE RÉVOLUTION TECHNOLOGIQUE

À trois pâtés de maisons de SEG se trouve la librairie de Shenzhen.† Le premier et le plus visible présentoir était une section de livres étrangers, remplie de classiques comme celui du professeur Thomas Lee de l'Université de Stanford. *La conception de la radiofréquence CMOS intégrée*

* Mot familier pour *yuan*, l'unité de comptage de base pour le *renminbi* (*RMB*), la monnaie chinoise. † Cette librairie a fermé ses portes depuis la visite que je décris ici.

Circuitset plusieurs titres du professeur Behzad Razavi de l'UCLA. J'ai récupéré le livre de Lee et il coûtait 68 kuai, soit 8,50 \$ US. Sainte vache ! Le livre de Jin Au Kong sur les équations de Maxwell ? 5 \$. Jin Au Kong enseignémoi les équations de Maxwell au MIT.

J'ai fait une virée, remplissant mon sac de six ou sept titres, probablement pour une valeur d'environ 700 \$ de livres si je les avais achetés aux États-Unis. À la caisse, je les ai achetés pour moins de 35 \$, avec les CD supplémentaires, soit une économie d'environ 665 \$. Cela équivaut à acheter un billet en classe économique pour Hong Kong !

En Chine, la connaissance coûte bon marché. Les composants sont bon marché. Les connaissances contenues dans les livres de la librairie de Shenzhen étaient la vraie affaire, les pièces permettant d'utiliser ces connaissances se trouvent au bout de la rue chez SEG, et à moins d'une heure de route au nord se trouvent probablement 200 usines qui peuvent prendre n'importe quelle idée électronique et la mettre en pratique au sens littéral. chargement de bateau. Ce ne sont pas non plus des usines arriérées. De mes propres yeux, j'ai vu des émetteurs-récepteurs à fibre optique de marque, de 1 550 nanomètres, monomodes, longue distance, y être construits et testés. Shenzhen est un terrain fertile et il faut le voir pour le comprendre.

Shenzhen a l'ambiance des swapfests de la Silicon Valley dans les années 80, lorsque toutes les grandes entreprises venaient tout juste d'être fondées et démarrées, sauf qu'elles ont été amplifiées par 25 ans de progrès dans la loi de Moore et la vitesse du flux d'informations via Internet. Dans cette ville de 12 millions d'habitants, la plupart sont impliqués dans la technologie ou l'industrie manufacturière, beaucoup apprennent l'anglais et tous sont prêts à travailler dur.

Il doit bien y avoir un Jobs et un Wozniak quelque part, construisant tranquillement la prochaine révolution. Mais je fais aussi partie de Shenzhen, et je tremble encore dans mes bottes de terreur et d'excitation à l'idée de faire partie de cette révolution. C'est mon histoire, qui commence avec ce voyage révélateur à Shenzhen pour Chumby.

VISITE DES USINES AVEC CHUMBY

En septembre 2006, Chumby n'était qu'une équipe d'environ une demi-douzaine de personnes, et nous venions de distribuer environ 200 premiers prototypes d'appareils Chumby au FOO Camp, une conférence organisée par Tim O'Reilly. Les appareils ont été bien accueillis par les participants au FOO Camp, j'ai donc eu le feu vert pour construire la chaîne d'approvisionnement asiatique.

Steve et moi sommes allés en Chine pour visiter des usines potentielles en novembre, mais avant notre départ, un fournisseur de confiance aux États-Unis nous a proposé son meilleur prix pour le travail, comme base de référence pour les négociations avec les fabricants chinois. Ensuite, nous avons appelé de nombreux amis ayant une expérience en Chine et organisé environ six visites d'usines. Nous avons touché des endroits très divers, depuis des usines spécialisées comptant seulement 500 personnes jusqu'aux méga-usines comptant plus de 40 000 personnes.

Rien ne remplace un voyage en Chine pour visiter une usine. Les images ne peuvent raconter que l'histoire encadrée par le photographe, et vous ne pouvez pas avoir une idée de l'ampleur et de la qualité d'une installation sans la voir de vos propres yeux. En général, les usines vous invitent à faire une visite, et je ne travaillerais pas avec une usine qui ne me permet pas de la visiter. Cependant, la plupart des usines apprécient un préavis d'une semaine, même si à mesure que votre relation avec elles progresse, les choses devraient devenir plus ouvertes et transparentes.

En parlant d'ouverture, la nature open source de Chumby a beaucoup aidé le processus de sélection des usines. Premièrement, nous n'avions aucune crainte que des personnes volent notre conception (nous la donnions déjà), nous avions donc éliminé les frictions liées aux NDA (accords de non-divulgation) lors du partage d'informations critiques telles que la nomenclature. Je pense que cela nous a donné un meilleur accueil auprès des usines en Chine ; ils semblaient plus disposés à s'ouvrir à nous parce que nous étions disposés à nous ouvrir à eux. Deuxièmement, il ne faisait aucun doute dans l'esprit d'une usine qu'il s'agissait d'une situation de concurrence. N'importe qui pourrait et voudrait proposer et soumissionner pour notre travail

(en fait, nous avons reçu quelques devis non sollicités qui étaient assez compétitifs), ce qui nous a évité une série de souffles et de souffles.

Après avoir examiné plusieurs options de fabrication, Steve et moi avons finalement décidé de travailler avec une société appelée PCH China Solutions. PCH elle-même ne possède que quelques installations, mais elle dispose d'un réseau complet de fournisseurs fiables et validés, principalement en Chine, mais également en Europe et aux États-Unis. Il n'est pas surprenant que les usines avec lesquelles PCH sous-traite comptent parmi les meilleures installations que nous avons visitées en Chine. PCH a en fait son siège en Irlande (la plupart de ses ingénieurs sont donc irlandais), il n'y avait donc aucune barrière linguistique pour nous. (Les ingénieurs de PCH sont également travailleurs, ingénieux et bien formés – et, en prime, ils semblent toujours connaître le meilleur endroit pour trouver une pinte, peu importe où ils se trouvent. Je ne savais pas que la Chine possédait autant de robinets Guinness !)

Il y a beaucoup de choses à découvrir lorsque vous visitez ne serait-ce qu'une seule usine, sans parler d'une demi-douzaine, et il est facile de se laisser submerger et de se perdre dans les aléas de la fabrication électronique. Mais il y a certains détails clés que j'ai trouvés les plus fascinants lors de mes visites d'usine pour Chumby et en travaillant avec PCH pour donner vie au Chumby.

échelle à Shenzhen

Ce qui est étonnant dans le fait de travailler en Chine, c'est l'ampleur du lieu. Je ne suis pas allé dans une usine automobile du Michigan ni dans celle de Boeing à Seattle, mais j'ai l'impression que Shenzhen en donne pour son argent en termes d'échelle. En 2007, Shenzhen comptait 9 millions d'habitants.

Pour vous donner une idée de la taille d'une usine de Shenzhen, l'usine New Balance employait 40 000 personnes et avait la capacité de produire plus d'un million de chaussures par mois. J'estime que du tissu brut à la chaussure finie, le processus a pris environ 50 minutes, et chaque paquet de plastique et de plastique parfaitement cousu

le cuir a été cousu à la main sur une machine à coudre industrielle. Les stations sont conçues de manière à ce que chaque étape du processus prenne environ 30 secondes à un travailleur.

Bien sûr, l'usine New Balance est éclipsée par Foxconn, l'usine où sont fabriqués les iPod et les iPhone.



Vous savez que vous êtes grand quand vous avez votre propre sortie d'autoroute.

Foxconn est une immense usine, qui compte apparemment plus de 250 000 employés, et qui bénéficie de son propre statut de libre-échange. L'ensemble de l'installation est muré et j'ai entendu dire que vous deviez montrer votre passeport et passer la douane pour entrer dans l'établissement. C'est juste en deçà des chiens robotiques à propulsion nucléaire des franchises de la société nationale de Neal Stephenson.*Accident de neige.*

alimenter l'usine

Il y a un vieux dicton chinois :*min yi shi wei tian*. Une traduction littérale serait « les gens considèrent la nourriture comme divine » ou « pour les gens, la nourriture est à côté du paradis ». Vous pouvez également le considérer comme un conseil de gouvernement : « le mandat du gouvernement [synonyme

avec le ciel] est aussi robuste que la nourriture dans les assiettes des gens. Ou bien, vous pouvez l'interpréter comme une excuse pour tergiverser : « mangeons d'abord [puisque c'est aussi important que le paradis] ».

Quelle que soit la façon dont on le présente, je pense que le dicton est toujours valable en Chine. Un indicateur important pour évaluer dans quelle mesure une usine traite ses employés est la qualité de la nourriture, car il est courant que les ouvriers d'une usine soient hébergés, nourris et soignés sur place.

La nourriture est en fait assez bonne dans certaines usines. Par exemple, lorsque je mangeais avec les ouvriers de l'usine qui fabriquait des circuits imprimés potelés, on m'a servi un mélange de poisson cuit à la vapeur, de porc grillé, de nems, de légumes frits propres et un mélange de légumes et de viande marinés. Du riz, de la soupe et des pommes ont également été fournis en quantités « servez-vous ».



Un repas de l'usine qui fabriquait les gros circuits imprimés

Chaque établissement que j'ai visité avait également des ustensiles et des assiettes séparés pour les invités. Dans une usine, ma nourriture était servie sur une assiette en polystyrène avec des baguettes jetables, tandis qu'un ouvrier avec qui je mangeais se voyait servir de la nourriture sur une assiette en acier avec des baguettes en acier. Je n'avais pas réussi l'examen physique de l'usine, alors ils m'ont donné

moi des outils alimentaires jetables pour m'empêcher de contaminer l'usine avec d'éventuelles maladies étrangères.

Pour en revenir à l'échelle, certaines opérations alimentaires industrielles sont d'une taille impressionnante. J'ai entendu dire que les ouvriers de Foxconn consomment 3 000 porcs par jour. Des cochons aux iPhones, tout se passe ici même à Shenzhen !



Un camion de porcs sortant de l'autoroute en direction de Foxconn

dévouement à la qualité

Après avoir commencé à travailler avec PCH sur la fabrication du chumby, je me suis retrouvé dans une situation vers juin 2007 qui m'a montré à quel point les ouvriers de l'usine de Shenzhen étaient dévoués à bien faire leur travail.

J'avais mis à jour la grosse carte mère pour inclure un microphone à électret, avec un transistor à effet de champ (FET) de préampli intégré. Le microphone devait être inséré dans la bonne orientation par rapport au circuit afin que le FET reçoive un courant de polarisation approprié.

Les premiers échantillons que j'ai récupérés de l'usine PCH avaient le microphone à l'envers, et j'ai appelé l'usine pour leur dire d'inverser sa polarité. J'allais visiter l'usine la semaine prochaine et je voulais voir des échantillons corrigés. Quand je suis arrivé et que j'ai testé le microphone, j'ai constaté à ma grande consternation que les microphones étaient *toujours* Ca ne fonctionne pas.

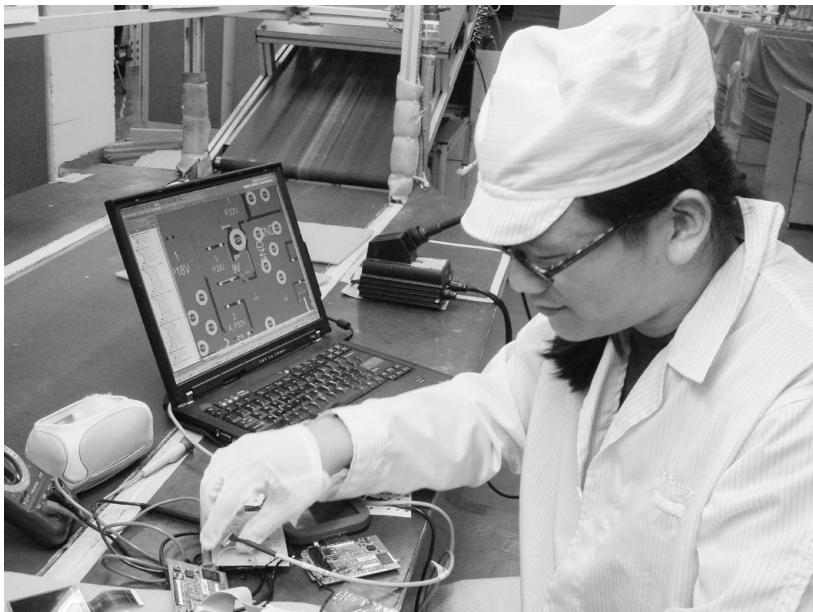
Comment cela pourrait-il être? Il n'existe que deux façons de connecter un microphone.

Il s'avère qu'il y avait deux opérateurs sur la ligne qui assemblaient le microphone. On a soudé les fils rouge et noir au microphone. Le suivant a soudé ces fils rouges et noirs au circuit imprimé. On a demandé aux opérateurs d'inverser l'ordre, et tous deux ont obéi consciencieusement, me donnant un microphone toujours soudé à l'envers, mais avec la couleur des fils inversée. (C'est en fait une histoire assez typique des problèmes en Chine.)

L'usine devait fabriquer une première série pilote de 450 circuits imprimés le lendemain. Tout devait se dérouler parfaitement pour que le calendrier de production de Chumby respecte le calendrier. Nous avons reconstruit les pochoirs à souder (nous étions également en train de déboguer un problème de rendement avec le CODEC audio packagé QFN) et ils étaient prêts vers midi et vers 18 heures.après-midi, j'ai eu les premières planches entre les mains pour tester. J'ai effectué le test final en usine et l'appareil est à nouveau tombé en panne, au niveau du microphone. Ce n'était un moment heureux pour personne dans l'usine, car l'usine était responsable de tout défaut de fabrication.

J'ai enfilé ma blouse et j'ai marché sur la ligne pour commencer à déboguer le problème.

Pour le reste de la nuit, je suis resté dans l'usine, tout comme tous les responsables et techniciens impliqués dans la fabrication du chumby. La pression était énorme : juste à côté de nous se trouvait une ligne produisant 450 circuits imprimés potentiellement défectueux, et je n'étais pas disposé à débrancher la prise car je ne savais toujours pas quelle en était la cause profonde, et nous devions respecter le calendrier.



Je débogais des circuits à 3 heures suis le jour du test final en usine pour le chumby.

J'avais littéralement un groupe d'ouvriers d'usine debout toute la nuit pour m'apporter tout ce dont j'avais besoin : des fers à souder, du matériel de test, d'autres cartes, des appareils à rayons X, des microscopes. Remarquablement, personne n'a hésité ; pas une seule personne ne s'est plainte ; pas une seule personne n'a perdu son attention sur le problème. Les gens ont annulé leurs projets de dîner avec des amis sans sourciller. Tous ceux dont on n'avait pas besoin à un moment donné étaient occupés à superviser d'autres aspects du projet. Je n'avais pas vu un tel dévouement aveugle depuis que je travaillais avec l'équipe de robotique sous-marine autonome du MIT.

Et cela a duré jusqu'à 3 heures suis.

Malheureusement, le problème n'était finalement pas la faute de PCH. Le problème était la nouvelle version du firmware que j'avais reçue plus tôt dans la journée de la part de l'équipe aux États-Unis. Il y avait un bug qui désactivait le microphone en raison d'un hack qui avait été accidentellement enregistré dans l'arborescence de construction.

Ce qui est encore plus impressionnant, c'est que lorsque PCH l'a découvert, personne n'était en colère et personne ne s'est plaint. (Eh bien, la vendeuse m'a donné du fil à retordre, mais je l'ai mérité ; elle a eu la gentillesse de m'accompagner toute la nuit sur la chaîne de production et de me servir de traductrice, car mon mandarin n'était pas à la hauteur.) Ils étaient tout simplement soulagé que ce n'était pas de leur faute.

Nous nous sommes tous séparés et je suis revenu à l'usine le lendemain à 11 heures.^{suis}, après une bonne nuit de sommeil. J'ai vu Christy, la chef de projet de l'usine pour la fabrication des chumby boards. Je lui ai demandé quand elle arrivait au travail et elle m'a dit qu'elle devait toujours se présenter avant 8 heures.^{suis}. J'ai commencé à me sentir vraiment mal ; Christy est restée éveillée tard à cause de notre bug, et elle est arrivée tôt pendant que je dormais. Je lui ai demandé pourquoi elle restait éveillée si tard même si elle savait qu'elle devait se présenter au travail à 8 heures.^{suis}. Elle aurait pu rentrer chez elle et nous aurions pu continuer le lendemain.

Elle a juste souri et a dit : « C'est mon travail de m'assurer que cela soit fait, et je veux faire du bon travail. »

construire une technologie sans l'utiliser

Voici une autre histoire intéressante. Un jour, en sortant de l'usine, Xiao Li (le responsable de l'assurance qualité de l'usine où nous fabriquions le chumby) m'a demandé : « Que fait un chumby ? Je ne parlais pas très bien chinois, et elle ne parlait pas très bien anglais non plus, alors j'ai décidé de commencer par quelques questions de base.

Je lui ai demandé si elle savait ce qu'était le World Wide Web. Elle a dit non.

Je lui ai demandé si elle savait ce qu'était Internet. Elle a dit non.

J'étais abasourdi et je ne savais pas quoi dire. Comment décrivez-vous la couleur bleue aux aveugles ?

Xiao Li était un expert dans la construction et le test d'ordinateurs. Sur certains projets, elle a probablement construit des PC et démarré Windows XP cent mille fois, encore et encore. (Dieu seul sait

J'ai entendu ce foutu bruit de démarrage des millions de fois lors de l'incident du microphone, car il y avait une banque de stations de test final pour les cartes mères ASUS juste à côté de moi.) Mais elle ne savait pas ce qu'était Internet.

J'avais supposé que si vous touchiez un ordinateur, vous étiez également bénis par les bienfaits d'Internet. Tout à coup, je me suis senti comme un snob gâté et un cochon pour avoir oublié que Xiao Li ne pouvait probablement pas se permettre un ordinateur, et encore moins un accès Internet haut débit. Si on lui en a donné l'opportunité, elle était certainement assez intelligente pour tout apprendre, mais elle était trop occupée à gagner de l'argent qu'elle enverrait probablement à sa famille.

En fin de compte, le mieux que je pouvais faire était de dire à Xiao Li que le potelé était un appareil permettant de jouer à des jeux.

travailleurs qualifiés

Les travailleurs de Shenzhen ne savent peut-être pas grand-chose sur tout ce qu'ils fabriquent, mais en plus de leur dévouement, ils sont hautement qualifiés. Une fois, j'ai vu un gars travailler dans la même usine qui cousait les sacs potelés, et je jure qu'il pouvait coudre des trousses à cosmétiques ensemble à raison de 5 secondes par sac. Et il n'était même pas concentré à 100 pour cent sur sa tâche ; il écoutait son iPod pendant qu'il cousait.

Et apparemment, il n'était pas leur employé le plus rapide ! Ils avaient quelqu'un environ deux fois plus rapide, et il travaillait dans l'entreprise depuis environ sept ans. Je suis allé voir le travailleur le plus rapide, mais il était déjà allé déjeuner parce qu'il avait tout fini ; il y avait deux énormes bacs remplis de trousses de maquillage finies à côté de son poste de travail.

Dans le même ordre d'idées, j'ai été étonné d'apprendre comment les étiquettes en caoutchouc (celles que l'on voit partout sur les vêtements) sont fabriquées en Chine. J'ai toujours pensé qu'ils étaient pressés par une machine, mais j'avais tort. Tous ces mots, couleurs et lettres sont dessinés à la main. Quelqu'un place simplement un pochoir de logo sur l'étiquette vierge, peint sur le pochoir avec une précision incroyable et passe à l'étiquette suivante dans sa file d'attente. Lorsqu'il y a plusieurs couleurs, il y a une personne pour chaque couleur, afin que le processus reste rapide.

J'ai demandé à PCH s'ils avaient des usines mécanisées pour des choses comme ça. Ils m'ont dit que les installations existaient, mais que la quantité minimale de commande était énorme (des centaines de milliers, parfois des millions) en raison du coût extraordinairement bas du produit et du coût relativement élevé de l'outillage pour le processus automatisé. Cela correspond à ce que j'ai entendu à propos des jouets Happy Meal de McDonald's. Ils sont généralement maintenus ensemble avec des vis, car il est moins coûteux de payer quelqu'un pour visser un jouet pendant toute la production que de fabriquer un outil de moulage par injection en acier avec les tolérances nécessaires pour assembler les jouets.*

Il y avait un compromis similaire à l'intérieur du gros matériel. Il y avait quatre connecteurs sur l'électronique interne. En utilisant les fournisseurs basés aux États-Unis que j'ai pu trouver, un connecteur avait un meilleur prix d'environ 1 \$ US, et les trois autres avaient un meilleur prix d'environ 0,40 \$ chacun. L'experte en approvisionnement très talentueuse de PCH (sa réputation était crainte et respectée par tous les fournisseurs) a réussi à me trouver des connecteurs qui coûtaient respectivement 0,10 \$ et 0,06 \$, économisant ainsi près de 2 \$ de coût. Il y a un problème : les connecteurs ne disposaient pas du tampon sacrificiel de sélection et de placement en plastique qui leur permettrait d'être assemblés en machine.

La solution? Une personne, bien sûr.

* En raison de la forte inflation des salaires depuis cette visite, cela n'est probablement plus vrai.



Cet homme a placé à la main les connecteurs les moins chers sur chaque potelé, pour environ un nickel l'unité. Grâce à lui, les chumbys coûtaient 2 \$ moins cher, ce qui a permis à nous, consommateurs, de dépenser plus d'argent chez Starbucks.

Le besoin d'artisans

J'aimerais vous présenter un homme que je connais simplement sous le nom de Maître Chao. Je l'ai rencontré au cours du processus de fabrication, et je suis presque sûr qu'au cours de votre vie, vous avez utilisé ou vu quelque chose qu'il a créé.

Lorsque je suis allé dans la salle d'échantillons de l'usine où travaillait Maître Chao, j'ai été choqué par le nombre d'articles sur leur étagère que j'avais moi-même achetés, utilisés ou vus dans un magasin aux États-Unis. Les grandes marques grand public fabriquent leurs produits dans cette usine et, à ma connaissance, l'usine ne comptait à l'époque qu'un seul maître modéliste : Maître Chao. Il a contribué à la création de trousse à cosmétiques pour Braun, d'étuis à accessoires pour Microsoft et d'appareils médicaux pour de grandes marques vendues en pharmacie, entre autres produits.



Maître Chao est la personne au premier plan ; en arrière-plan se trouve Joe Perrott, L'excellent ingénieur de projet Chumby de PCH China Solutions.

Maître Chao est un artisan au sens traditionnel du terme. Autrefois, les meubles les plus raffinés étaient conçus et fabriqués uniquement avec l'intuition et le savoir-faire d'un maître artisan. Maintenant, nous allons tous chez IKEA et obtenons des kits de meubles à assembler selon un livre d'images, conçus par CAO et gérés par la chaîne d'approvisionnement - et malgré tout cela, cela n'a pas l'air trop minable. En conséquence, le mot *artisanata* a été relégué pour décrire un album de scrapbooking ou un kit de broderie que vous achetez chez Michaels et que vous assemblez lors d'un week-end lent. Nous avons oublié qu'à une époque antérieure aux machines, « l'artisanat » était le seul moyen de construire quelque chose de quelque qualité que ce soit.

Il s'avère cependant que l'artisanat traditionnel a toujours son importance, car les outils de CAO n'ont pas permis de simuler nos erreurs avant que nous les commettions.

La création d'un *modèle plat* pour les produits textiles est un bon exemple de processus qui nécessite un artisan. Un patron plat est l'ensemble des formes 2D utilisées pour guider la découpe des tissus. Ces formes sont découpées, pliées et cousues dans un modèle 3D complexe.

forme. Cartographier la projection d'une forme 3D arbitraire sur une surface 2D avec une zone de perte minimale entre les pièces est déjà assez difficile. Le fait que le matériau s'étire et se déforme, parfois dans des directions différentes, et que la couture nécessite de grandes tolérances pour de bons rendements, fait de la création de motifs un problème difficile à automatiser.

Les étuis potelés ajoutaient un autre niveau de complexité, car ils impliquaient de coudre un morceau de cuir sur un cadre en plastique souple. Dans cette situation, lorsque vous cousez le cuir, le cadre se déforme légèrement et étire le cuir, créant un biais de couture dépendant de la direction et de la vitesse de couture. Cette force est captée dans les coutures et contribue à la forme finale du boîtier. Je mets quelqu'un au défi de créer un outil de simulation informatique capable de capturer avec précision ces forces et de prédire à quoi ressemblera un produit comme celui-ci une fois cousu.

Pourtant, d'une manière ou d'une autre, la maîtrise de Maître Chao dans l'art de la création de modèles lui a permis de créer et de modifier très rapidement, et en très peu d'itérations, un modèle qui compensait toutes ces forces. Ses résultats, tous obtenus avec du carton, des ciseaux et des crayons, étaient incroyablement intelligents et perspicaces. Soyez reconnaissant pour ses compétences du vieux monde ; ils ont probablement joué un rôle dans la production de quelque chose que vous avez utilisé ou dont vous avez bénéficié.



Il n'y avait pas un seul ordinateur dans le bureau de Maître Chao, pourtant les produits J'ai vu ici un large éventail d'appareils de haute technologie enroulés autour.

automatisation pour l'assemblage électronique

Avant de travailler chez Chumby, je pensais que presque tout était fabriqué à la machine. Bien sûr, les visites des usines textiles ont très vite corrigé mon impression ; Pourtant, les activités de haute technologie comme l'assemblage de composants électroniques ont encore tendance à être fortement automatisées, même en Chine. Les seules exceptions que j'ai vues lors de mes visites d'usines étaient, ironiquement, les produits les moins chers, comme les jouets. Ces ateliers étaient encore dominés par des files d'ouvriers qui remplissaient et soudaient les circuits imprimés à la main.

Une dichotomie intéressante liée à l'automatisation est la distribution bimodale de produits qui utilisent *puce à bord (CoB)* technologie. L'assemblage CoB lie directement une puce en silicium à un PCB. Les assemblages CoB finis ont l'aspect distinctif de la « boule d'époxy », par opposition à l'aspect fini de l'emballage en plastique. Les assemblages électroniques denses et haut de gamme utilisent souvent les technologies CoB. J'ai réalisé quelques conceptions CoB pour certains émetteurs-récepteurs optiques de 10 Go à mon époque, et ils n'étaient pas bon marché.

En même temps, cependant, presque tous les jouets utilisent la technologie CoB, pour éliminer le coût du boîtier IC ! C'est un témoignage de la ténacité des usines de jouets en matière de réduction des coûts qu'elles achèteraient une machine à souder automatisée et la colleraient à côté des lignes de moulage de têtes de poupées et de couture d'animaux en peluche, car avoir une machine à souder en interne permet d'économiser un nickel.

Un dispositif de liaison par fil typique lie un fil aussi fin qu'un cheveu humain à un site sur une puce de silicium pas beaucoup plus grand que le diamètre du fil, et il le fait plusieurs fois par seconde. Les soudeuses à fil sont des équipements très rapides et précis. La liaison se produit si rapidement que la carte semble pivoter en douceur, mais en fait, elle s'arrête 16 fois en tournant, et à chaque arrêt, un fil est lié entre la puce et la carte.

Cependant, immédiatement avant le collage, la puce est collée très soigneusement à la main sur la carte, et immédiatement après le collage, la puce est encapsulée par un opérateur humain qui distribue très soigneusement de l'époxy à la main. Cela signifie que le fil de liaison est le

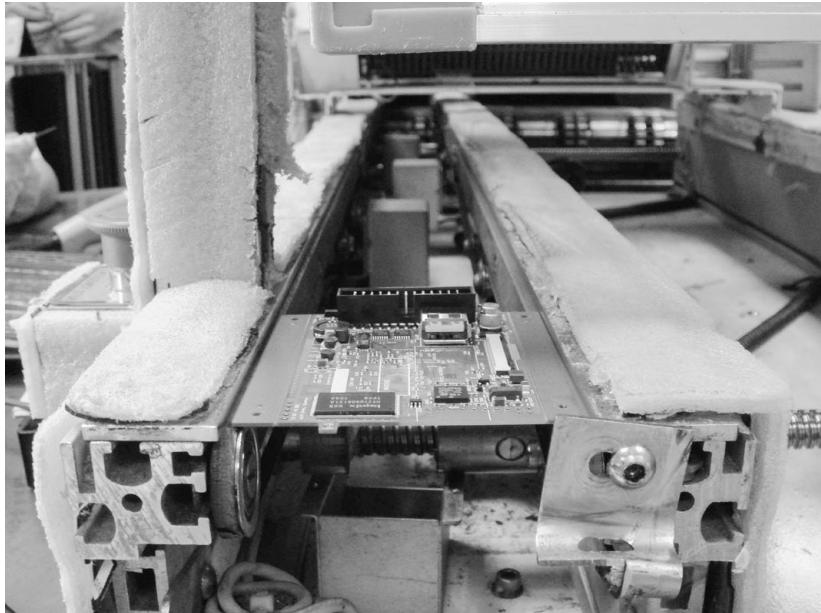
seul équipement automatisé sur les chaînes d'assemblage de jouets simples. Voir ce processus m'a donné une nouvelle appréciation de ce qui se passe dans ces poupées parlantes Barney qui se vendent 10 \$ chez Target.

Le processus de fabrication volumineux a également utilisé un peu d'automatisation, grâce à un tireur de copeaux. Les tireurs de puces (ainsi que les machines de transfert) placent des composants montés en surface sur les PCB afin que les composants puissent être soudés.



La grosse usine d'assemblage de PCB en Chine comptait des dizaines de lignes remplie de tireurs de puces Fuji éprouvés.

C'est absolument fascinant de voir un tireur de jetons en action. Les lanceurs de puces de la petite usine d'assemblage de PCB étaient capables de placer 10 000 à 20 000 composants par heure et par machine. Cela signifie que chaque machine pourrait déposer 3 à 6 composants par seconde. Les assemblages robotiques se déplacent plus vite que l'œil ne peut le voir, et tout se transforme en un flou impressionnant. Le lance-copeaux que j'ai vu à l'usine Chumby fonctionnait un peu comme une mitrailleuse Gatling : le lance-copeaux lui-même était réparé et la planche dansait sous le pistolet. Le tireur de puces a en fait « regardé » chaque composant et l'a fait pivoter dans la bonne orientation avant de le poser sur la carte.



C'est la fin de la ligne pour un assemblage de planches de base potelées !

L'usine que nous avons utilisée pour l'assemblage de circuits imprimés Chumby's produisait également des cartes mères PC de marque et ne semblait avoir aucun problème à produire plus de 10 000 assemblages complexes de ce type chaque jour. Mais même si des processus tels que le placement des composants peuvent être automatisés, il existe certaines choses qu'une machine ne peut tout simplement pas faire.

Précision, moulage par injection et patience

Au cours de l'ingénierie du chumby, j'ai également dû me renseigner sur le moulage par injection, car le circuit imprimé devait être placé dans un boîtier quelconque. Pour un spécialiste de l'électronique ayant peu d'expérience en mécanique, ce n'était pas une mince affaire à gravir. Le concept semble simple : on fait une cavité en acier, on y pousse du plastique fondu à haute pression, on le laisse refroidir, et voilà, une pièce finie sort, tout comme les moules Play-Doh de l'école primaire.

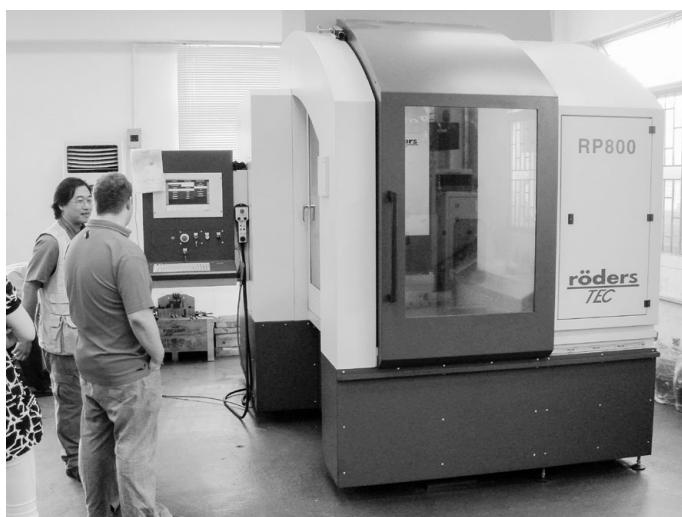
Oh, si seulement le processus était aussi simple.

Bien sûr, le plastique coule, mais il n'est pas particulièrement liquide. Il se déplace lentement et se refroidit en s'écoulant. La couleur du plastique est affectée par les changements de température, et lorsque vous utilisez un moule mal conçu, vous pouvez même voir des lignes d'écoulement et des lignes de tricot dans le produit final. Il existe également toute une série de problèmes liés à la manière dont la pièce finie est extraite du moule, à la manière dont le moule est fabriqué et fini, à l'emplacement des portes et des glissières pour amener le plastique à l'intérieur du moule, etc.

Heureusement, PCH avait des experts en Chine qui savaient tout à ce sujet, et j'ai appris principalement en regardant.

Si je devais résumer le moulage par injection avec un seul adjectif, ce serait *précision*. Lorsqu'ils sont bien faits, les moules sont précis avec des tolérances supérieures à celles d'un cheveu, mais ils sont fabriqués en acier dur. Atteindre ce niveau de précision avec un matériau aussi durable n'est pas une mince affaire, et il est impressionnant de voir une machine découper un moule dans de l'acier brut.

La machine qui découpaient les moules pour la caisse potelée avait une platine mobile qui poussait rapidement autour d'un bloc d'acier pesant probablement plusieurs centaines de livres ; il a fraisé le métal en toute hâte !



La machine de découpe de moules utilisée dans la fabrication des chumbys.

Comparez-le aux personnes qui se trouvent à côté pour connaître l'échelle.

Mais l'usinage n'est que l'étape la plus difficile de la fabrication d'un moule. Une fois la forme brute découpée, le moule est placé dans un *machine à décharge électrique (EDM)*, où une explosion d'électrons fait tomber des morceaux microscopiques de la surface de l'acier. C'est un processus terriblement fastidieux : j'ai vu de nombreux EDM faire leur travail, et c'est comme regarder de la peinture sécher. Les EDM sont cependant très précis et donnent des résultats spectaculaires et reproductibles.

Du point de vue de la gestion de projet, les délais de livraison phénoménallement longs des plastiques moulés par injection de qualité de production ont été pour moi la plus grande révélation. Au total, le gros moule s'est transformé d'un bloc d'acier brut en un premier outil en quatre à six semaines, et j'ai dû aller en Chine et voir l'atelier d'outillage faire son travail avant d'être convaincu qu'il n'y avait rien de grossier. quantité de remplissage de planification.

Ce qui était encore plus pénible du point de vue de la gestion des risques était le manque de bons outils de simulation permettant de prédire comment les plastiques s'écouleraient à travers un moule. Si nous voyions des défauts visibles comme des lignes d'écoulement et des lignes de tricot, nous devions attendre quatre à six semaines pour voir si le nouveau moule était meilleur. Aie!

Heureusement, les fabricants d'outils utilisés par Chumby en Chine ont anticipé ces problèmes et ont fait en sorte que les outils privilégièrent l'excès d'acier, car il est beaucoup plus facile d'enlever de la matière pour résoudre un problème que d'en ajouter. C'est comme le vieux dicton du menuisier : mesurez deux fois, coupez une fois, et si vous devez couper mal, coupez en longueur.

Le moule utilisé pour créer la lunette arrière du Chumby était très complexe, car il impliquait un processus appelé *surmoulage*. Si vous possédez un classique potelé, regardez à l'arrière. Un TPE caoutchouteux entoure la lunette dure en ABS. Beaucoup de gens pensaient qu'il s'agissait d'un élastique collé. En effet, le TPE est moulé en place sur la pièce arrière. Cela nécessite un moule à deux coups.



Le moule final pour la lunette arrière du Chumby, dans une machine de moulage par injection

Il y avait en fait deux moules, et un côté du moule tournait afin que les systèmes de matériaux alternés puissent être moulés aux bons moments du processus.

Beaucoup de travail acharné est consacré aux humbles pièces en plastique que vous voyez chaque jour, et tout cela fait partie de la création de produits de qualité. Mais en même temps, il existe également un besoin très réel de répondre aux attentes de prix bon marché.

Le défi de la qualité

De toute évidence, l'attente d'un faible coût des produits fabriqués en Chine pose un grand défi en matière de gestion de la qualité. Regardez la couverture médiatique sur des sujets tels que la peinture au plomb dans les jouets, les produits chimiques industriels dans les aliments et d'autres articles fabriqués en Chine, et vous pourrez voir certaines des mauvaises décisions prises pour maintenir les prix bas.

Lorsque l'on considère des cas comme celui-là, je pense qu'il est important d'appliquer le rasoir de Hanlon. Pour paraphraser : « N'attribuez jamais à la méchanceté ce qui peut être expliqué de manière adéquate par l'ignorance ».

Les Britanniques ont aussi une version agréable et concise de l'aphorisme : « Cock-up before conspiracy ».

Certains fabricants sont effectivement là pour gagner de l'argent à tout prix, mais je pense que la majorité des erreurs sont commises par ignorance. La plupart des employés de base des usines ne savent pas à quoi servent finalement leurs produits et, sous une pression intense pour réduire les coûts, ils prennent de mauvaises décisions. Les usines doivent également faire face à des produits qui sont terriblement sous-spécifiés, ainsi qu'à des clients qui les submergent de toutes sortes d'exigences frivoles – et la plupart des clients ne donnent pas suite dans les deux cas. En fin de compte, les usines jouent à « expédier et découvrir », et si le client ne remarque pas une spécification manquante, alors cette spécification ne doit pas être importante. Ce n'est pas un grand jeu, et cela signifie que les clients doivent être toujours vigilants concernant les audits et maintenir les normes de qualité.

LA DISCONNECT ENTRE L'AMÉRIQUE ET LA CHINE

L'un des problèmes fondamentaux derrière ce jeu est que de nombreux résidents chinois ne comprennent pas ou n'apprécient pas les choses fondamentales que nous tenons pour acquises en Amérique, et vice versa. De nombreux ouvriers d'usine chinois sont bien éduqués, mais ils n'ont pas grandi dans une « culture du gadget » comme celle que nous avons aux États-Unis, donc on ne peut rien présumer de leur capacité à interpréter subjectivement les spécifications d'un produit.

Par exemple, vous pouvez dire à un ingénieur américain : « Je voudrais un bouton sur ce panneau » et vous obtiendrez probablement quelque chose d'assez proche de ce que vous attendez en termes d'apparence et de convivialité, puisque vous et l'ingénieur partagez des expériences communes. Et les attentes concernant un bouton sur un panneau. Si vous faisiez la même chose en Chine, vous obtiendriez probablement quelque chose qui semble un peu gênant et maladroit, mais qui est sacrément bon marché et vraiment facile à construire et à tester. Bien que ces dernières propriétés soient souhaitables pour des raisons pratiques, les connaisseurs américains de gadgets n'achèteront tout simplement pas quelque chose qui est esthétiquement maladroit ou qui semble encombrant.

Pourtant, en fin de compte, ce sont les consommateurs qui veulent, voire exigent, des produits à bas prix, et ce besoin motive la décision de fabriquer en Chine. Le problème est qu'à part l'étiquette sur le produit qui indique « Fabriqué en Chine » ou « Fabriqué aux États-Unis », les consommateurs ne se soucient pas vraiment du processus de fabrication. Quelle majoration paieriez-vous pour un gadget portant la mention « Fabriqué aux États-Unis » ? Le surcoût pour la main-d'œuvre américaine est 10 fois supérieur à ce qu'il est en Chine. Pensez-y : l'ouvrier d'usine américain moyen peut-il être 10 fois plus productif que l'ouvrier d'usine chinois moyen ? C'est un multiplicateur difficile à affronter.

Je ne dis pas que les vendeurs nationaux n'ont aucune valeur : cela représenterait beaucoup moins d'efforts et moins de risques pour moi de faire fabriquer des produits aux États-Unis. En fait, la plupart des premiers prototypes y sont fabriqués en raison de l'énorme valeur que les fournisseurs nationaux peuvent ajouter. Cependant, le prix ne convient tout simplement pas à un produit grand public. Personne ne l'achèterait, car son prix ne justifierait pas ses fonctionnalités. On pourrait même m'accuser d'être paresseux si je m'en tenais à un fournisseur national et répercutais le coût plus élevé sur les clients.

ÊTRE IMPLIQUÉ DANS LE PROCESSUS DE FABRICATION

En fin de compte, fabriquer en Chine est le meilleur moyen de réduire les coûts et, pour maintenir la qualité, rien ne remplace le fait d'aller en Chine et de s'impliquer directement. Presque toutes les usines feront le « ménage » le jour de votre visite, mais avec un œil aiguisé et les bonnes questions, vous pourrez voir à travers les facettes rapides mises en place.

Lorsque j'évaluais les usines de Chumby, je visitais toujours la salle de contrôle qualité (CQ). Je m'attendais à voir des rangées de classeurs bien entretenus et bien usés avec une documentation de conception et des normes de contrôle qualité, ainsi que *échantillons dorés*, qui sont des échantillons de pré-production d'un produit. J'exigerais de voir le contenu d'un classeur aléatoire et l'échantillon doré qui lui est associé, et je vérifierais que les employés savaient ce qui se passait dans le classeur. (Certaines usines remplissent les classeurs de produits avec

données aléatoires.) J'ai également considéré que les investissements importants dans l'équipement étaient un bon signe : les meilleurs fabricants que j'ai visités disposaient tous de quelques salles dotées d'équipements sophistiqués pour les tests de limites thermiques, mécaniques et électriques, et bien sûr, les opérateurs étaient dans la salle en train d'utiliser des équipements sophistiqués. l'équipement. (Je pourrais certainement imaginer un fabricant chinois acheter une salle d'équipement juste pour le spectacle.)

Mais je soupçonne que les fabricants de jouets et de produits alimentaires n'envoient pas régulièrement des techniciens comme moi dans des usines en Chine pour superviser les choses. Comparez cela avec Apple, qui envoie régulièrement un groupe d'ingénieurs travailler pendant des périodes intenses de deux semaines (ou plus) dans les usines (généralement Foxconn, affectueusement surnommé « Mordor » par certains chez Apple). En conséquence, j'ai croisé de nombreux ingénieurs Apple dans les bars d'expatriés de Shenzhen.

Le fait que PCH China Solutions propose une gestion et un contrôle qualité de style occidental sur place en Chine était important pour nous chez Chumby. Si nous avions un problème avec un fournisseur, PCH envoyait immédiatement quelqu'un à l'usine pour voir ce qui se passait : pas d'étiquette téléphonique, pas d'obstruction systématique de FedEx. Et les propriétaires d'usines en Chine ont tendance à être très réactifs lorsque vous vous présentez à leur porte.

Ainsi, l'approche de Chumby face au problème de la qualité était holistique. Nous avons commencé par avoir un ingénieur (moi) à l'usine presque dès le premier jour pour étudier la situation. Il est important de savoir ce que l'usine peut et ne peut pas faire. J'ai regardé ce qui était construit sur la ligne et quelles techniques étaient utilisées. Ensuite, quand est venu le temps de concevoir le produit, j'ai essayé d'utiliser les processus et les techniques les plus confortables pour l'usine. Lorsque j'ai dû faire quelque chose de nouveau (et tout bon produit innovant devra le faire), j'ai choisi mes batailles et je me suis concentré sur elles, car tout nouveau serait un défi de plusieurs semaines pour réussir. Cette stratégie s'applique jusque dans les moindres détails : si l'usine emballé les marchandises dans du plastique et que vous

Si vous souhaitez emballer votre produit dans du papier, prévoyez alors de vous concentrer fortement sur le développement du processus d'emballage en papier, car il est fort possible qu'aucun des employés de la ligne de l'usine de votre choix n'ait jamais vu un produit emballé en papier auparavant.

Bien sûr, lors du développement d'un nouveau procédé pour le chumby, j'ai préféré être en usine, et c'est toujours le cas. Il n'y a rien de tel que d'être sur la ligne et de montrer aux travailleurs qui construiront votre appareil comment il doit être fabriqué. Par exemple, j'ai personnellement formé les ouvriers potelés de la chaîne de montage sur la façon de fixer un morceau de ruban de cuivre à l'assemblage LCD pour former un blindage EMI approprié.

Il est difficile de décrire les subtilités de la façon de plier du ruban adhésif sur une pièce de tôle complexe pour garantir un bon contact électrique avec les surfaces de mise à la terre sans risquer un court-circuit avec d'autres composants. Des subtilités telles que le fait que l'adhésif sur une face est un mauvais isolant nécessitent également une compréhension de base de la physique que les ouvriers à la ligne n'ont tout simplement pas. Pire encore, expliquer ces concepts nécessite des mots techniques que votre traducteur ne connaît peut-être même pas.

Dans mon cas, même un bon dessin 3D ou une bonne photographie de l'assemblage fini n'aurait pas pu faire comprendre l'ensemble du concept, car la rigidité du ruban nécessitait un mouvement particulier pour se plier sans se déchirer. Décrire le processus à distance, approuver les échantillons via des photographies et finalement approuver une unité livrée via FedEx aurait pu prendre quelques semaines, mais se tenir devant un groupe de travailleurs et démontrer le processus en personne n'a pris que quelques minutes. Et malgré la barrière de la langue, je pouvais dire à leurs expressions faciales et à leur langage corporel s'ils comprenaient l'importance d'une étape particulière. Compte tenu de ces indices, j'ai immédiatement passé en revue les processus ambigus ou difficiles à maîtriser.

Généralement, lorsque vous pouvez démontrer un processus à ce niveau de détail et d'intimité, les travailleurs y parviendront immédiatement.

heures, au lieu de semaines. C'est en partie la raison pour laquelle j'ai passé autant de temps en Chine pendant le développement du processus de fabrication du Chumby.



Tout le monde a été impliqué dans le processus de qualité. Cette photo montre le PDG Steve Tomlin (à l'extrême gauche) et la directrice artistique Susan Kare (au milieu) à l'usine de couture, travaillant sur les détails de la sérigraphie du logo.

TESTS À DISTANCE MAISON

Cependant, il n'était pas toujours possible pour Chumby d'envoyer quelqu'un en Chine. Pour ma part, je préférais ne pas vivre en Chine, donc chez Chumby, nous nous sommes beaucoup appuyés sur PCH pour surveiller la qualité et s'assurer que tout se passait bien, et ils ont fait un superbe travail.

Souvent, travailler à distance signifiait que la mise en place de nouveaux processus prenait des semaines si je n'étais pas là pour les peaufiner et les approuver sur place, car chaque modification impliquait l'envoi de quelque chose presque aller-retour via FedEx. Après avoir suivi ce processus à plusieurs reprises, j'ai appris à allouer deux semaines par réglage, par opposition aux quelques heures que cela prenait lorsque j'étais dans l'usine.

Ces séries de deux semaines se sont accumulées rapidement.

Compte tenu de la difficulté de superviser les opérations en Chine depuis les États-Unis, la surveillance électronique à distance des résultats des tests des produits était essentielle. Pour les potes, j'ai développé un ensemble de testeurs qui programmaient, personnalisaient, démarraient, vérifiaient et mesuraient chaque appareil en sortie de chaîne de montage. Toutes les données du processus de test ont été enregistrées dans un journal et, à la fin de la journée, le journal a été transféré vers un serveur aux États-Unis.

Ces données m'ont permis de déboguer une pléthore de problèmes sur le terrain. Je pouvais savoir si un opérateur d'un testeur particulier rencontrait des problèmes avec son lecteur de codes-barres. J'ai également su immédiatement s'il y avait un problème de rendement ce jour-là ou si le débit était plus lent que prévu. C'était très puissant de disposer de cette capacité d'audit interne, car l'usine savait que je les surveillais. En fait, disposer d'une telle capacité peut améliorer le fonctionnement des relations avec l'usine : l'usine supporte le coût des problèmes de rendement (au moins au début), elle apprécie donc que l'ingénieur de conception puisse offrir des conseils et une aide rapides avant que des problèmes ne surviennent. incontrôlable.



Une paire de stations de test potelées dans une usine en Chine. Il y a toute une histoire sur les difficultés que nous avons rencontrées pour importer ces ordinateurs portables en Chine.

AUTRES TESTS EN USINE

Une fois que vous avez terminé de configurer le processus de test, celui-ci peut s'exécuter de manière autonome en usine. Par exemple, dans l'usine de circuits imprimés de Chumby's, la première passe d'inspection finale a été effectuée manuellement : une personne a examiné chaque circuit imprimé, puis, à l'aide d'un gabarit en carton, un autre opérateur s'est assuré qu'aucun composant ne manquait. Les unités ont ensuite été soumises à des tests automatisés.

Périodiquement, PCH et l'usine ont également effectué des tests de restriction des substances dangereuses (RoHS) sur les unités volumineuses pour garantir qu'il n'y avait pas de contamination par un ensemble spécifié de produits chimiques potentiellement nocifs, y compris le plomb. RoHS est une norme de sécurité chimique dangereuse requise en Europe mais, ironiquement, pas aux États-Unis. Les usines effectuent régulièrement ce test sur tous les produits, même ceux expédiés uniquement aux États-Unis, car une contamination latente sur la ligne pourrait empêcher d'autres produits fabriqués sur la même ligne d'être expédiés vers l'Europe.

Même après tous ces tests, aux États-Unis, Chumby a continué à échantillonner des unités à des fins de contrôle qualité. À cette fin, nous avons régulièrement commandé, caractérisé et disséqué les appareils pour nous assurer que toutes les procédures opératoires étaient respectées.

MI Stakes va encore arriver

Malgré ces garanties, certaines erreurs seront commises sur tout produit. Chaque produit passe par une phase au cours de laquelle les bogues qui n'ont pas été détectés par le contrôle qualité interne sont corrigés. Vous devez vous appuyer sur un service client et une équipe d'assistance de premier ordre, et vous devez prévoir d'être très agile et innovant pendant cette phase pour résoudre les problèmes et éviter qu'ils ne se reproduisent.

Quand j'étais chez Chumby, si j'entendais parler d'une unité dans la nature avec des problèmes matériels, j'appelais le client qui le signalait. Je voulais savoir ce qui n'allait pas pour pouvoir résoudre le problème et m'assurer que cela ne se reproduise plus, à personne !

Mon plus grand espoir avec le chumby, cependant, était d'éviter ce qui est arrivé à Microsoft et à « l'anneau rouge de la mort » de Microsoft et de la Xbox 360, où les consoles connaîtraient une panne matérielle majeure, cesseraient de fonctionner et afficheraient simplement une lumière rouge autour du bouton d'alimentation, provoquant une énorme frustration pour les joueurs. Ce problème ne s'est manifesté qu'après des années de sortie de la Xbox 360, après que des millions d'unités aient été expédiées. Des situations comme l'anneau rouge de la mort sont le pire cauchemar d'un ingénieur produit.

Vous voyez donc, amener le chumby (ou n'importe quel produit) au point où il peut être expédié aux consommateurs n'est que le début. Le vrai défi commence après.

Si jamais vous vous retrouvez à ce stade du processus de fabrication, je vous souhaite bonne chance !

PENSÉES FINALES

Les histoires racontées ici partagent certaines de mes aventures (et échecs) en apprenant à créer des produits en volume. Les deux chapitres suivants sont plus réfléchis et moins narratifs. Le chapitre suivant nous fait visiter virtuellement trois usines pour voir ce que nous pouvons en apprendre, et le chapitre 3 tente de résumer toutes les leçons que j'ai apprises jusqu'à présent sur la fabrication.

2. au sein de trois usines très différentes

Il est difficile de comprendre comment fonctionne un ordinateur sans l'ouvrir et regarder à l'intérieur. De même, il est difficile de comprendre comment les produits sont fabriqués sans entrer dans une usine et visiter la chaîne de production. Même si l'on considère souvent la fabrication comme l'étape nécessaire mais ennuyeuse après l'innovation, en réalité, les deux sont étroitement liés. Un inventeur réfléchit une fois à un produit ; une usine pense au même produit jour après jour, parfois pendant des années.

L'importance des usines en tant que pôle d'innovation ne fait que croître dans l'économie mondiale connectée d'aujourd'hui. La réalité est qu'il n'existe pas d'« usine Apple » ou d'« usine Nike ». Il existe plutôt une série d'installations spécialisées dans des processus (tels que la fabrication de PCB ou de fermetures à glissière) qui sont

organisé par les marques familiaires. Ainsi, il n'est pas rare de voir les produits de deux concurrents fonctionner côté à côté sur des lignes similaires dans une même installation. Cette concentration d'expertise spécifique à un domaine signifie que le meilleur endroit pour apprendre à améliorer un aspect de votre produit est souvent le même endroit qui crée un aspect similaire dans les produits de tous les autres.

Certaines des plus grandes idées que j'ai eues sur l'amélioration d'un produit sont venues de l'observation de techniciens au travail sur une ligne et des astuces d'optimisation intelligentes qu'ils ont développées après avoir fait la même chose encore et encore pendant si longtemps.

Ce chapitre vous fait visiter trois usines qui fabriquent des objets du quotidien : des PCB (en particulier ceux utilisés dans l'Arduino), des clés USB et des fermetures éclair. En ouvrant le rideau, vous aurez un aperçu des compromis de conception derrière les produits et de la manière dont ils peuvent être améliorés. Dans l'usine de PCB, j'ai découvert le secret de la façon dont ils impriment une carte haute résolution de l'Italie au dos de chaque Arduino ; dans l'usine de clés USB, j'ai été témoin d'un étrange mariage de techniques de fabrication de haute et basse technologie ; et dans l'usine de fermetures à glissière, j'ai découvert comment même les produits les plus humbles peuvent apporter de précieuses leçons aux concepteurs de produits.

Où sont nés les ardUinos

C'était en juillet 2012 et cela faisait environ six mois que ma précédente startup, Chumby, avait cessé ses activités. J'avais décidé de prendre un an de congé pour comprendre les choses et rayer quelques éléments de la liste de choses à faire, dont un voyage en Italie. Ma petite amie a eu la brillante idée de contacter l'équipe Arduino pour voir si je pouvais visiter leur usine à Scarmagno (c'était des années avant la séparation Arduino/Genuino) dans le cadre de notre itinéraire. Les membres d'Officine Arduino (en particulier le directeur général Davide Gomba) ont aimablement pris le temps, malgré leur emploi du temps chargé, de montrer

moi autour de leur usine. Ils ont patiemment attendu que j'exprimais mon obturateur intérieur et mon amour général pour tout ce qui concerne le matériel, et je suis définitivement reparti avec beaucoup de superbes photos.

Petite ville du nord de l'Italie, Scarmagno se trouve à environ une heure et demie en voiture à l'ouest de Milan, à proximité des usines Olivetti, à la périphérie de Turin. La ville gère toute la fabrication des circuits imprimés, le remplissage des cartes et la distribution des Arduinos de marque officielle. J'étais vraiment excité de voir les usines, et le point culminant de ma visite a été de voir System Elettronica, l'usine de PCB qui fabriquait les PCB Arduino.

Un aspect charmant de System Elettronica est que le propriétaire a peint l'usine en vert, blanc et rouge pour correspondre aux couleurs du drapeau italien. Dans l'usine, j'ai vu un peu de cet esprit dans les poteaux rouges et verts qui parcouraient l'installation.



Une large vue de l'usine de System Elettronica en août 2012

Mais j'ai vite cessé de prêter beaucoup d'attention au décor, car c'est également dans cet atelier que j'ai pu suivre un nouveau lot d'Arduino Leonards tout au long du processus de fabrication. Voici comment ces planches ont été fabriquées.

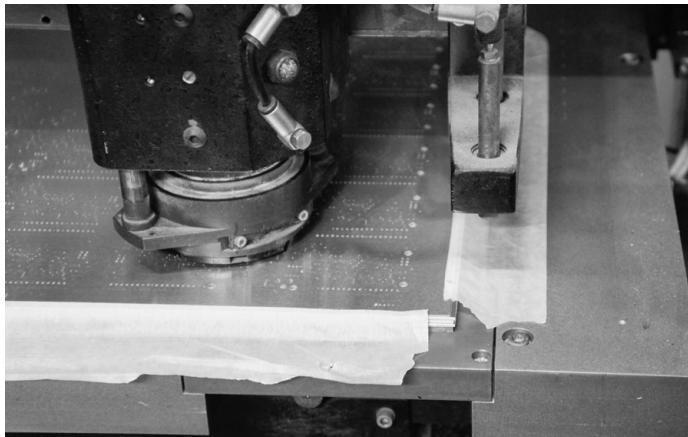
en commençant par une feuille de Cuivre

Les cartes Arduino Leonardo commencent par d'énormes feuilles de cuivre vierge FR-4, un matériau composé de fibre de verre et d'époxy que la plupart des PCB utilisent comme substrat, une couche isolante et structurelle entre les couches de cuivre. Les feuilles avaient une épaisseur de 1,6 mm (l'épaisseur la plus courante pour un PCB, qui correspond à 1/16 de pouce), probablement un mètre de largeur et environ un mètre et demi de longueur.



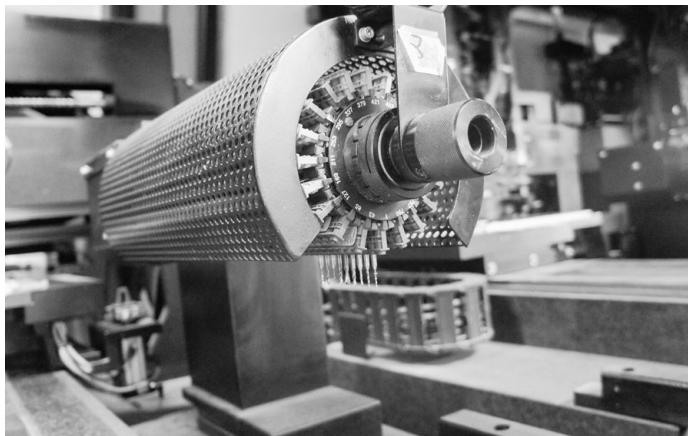
Une pile de feuilles de cuivre en attente de devenir des cartes Arduino

La première étape du traitement des PCB consiste à percer tous les trous, les vias (les petits trous qui relient les différentes couches du PCB), les trous de montage, les fentes plaquées, etc. Lorsqu'un PCB est fabriqué, les trous sont percés avant *modelage*, l'étape où un produit chimique de masquage est défini photographiquement sur la feuille partout où les cartes finales doivent contenir du cuivre, y compris les emplacements des traces, les plots de soudure, etc. Certains des trous percés sont utilisés pour aligner les masques qui dessinent les traces plus tard dans le processus. Le perçage est également un processus sale et salissant qui pourrait endommager les schémas de circuits s'ils étaient en place au préalable.



La tête de perçage CNC utilisée pour percer les cartes Arduino

Les panneaux de cuivre vierges étaient empilés sur trois hauteurs et une perceuse CNC nécessitait un seul passage pour les trois, lui permettant de percer trois substrats à la fois.



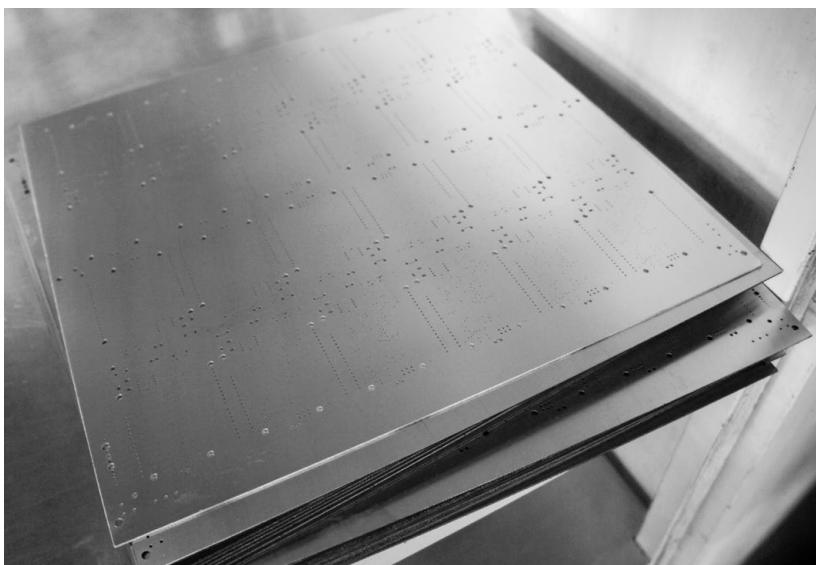
Le support de perçage utilisé par la perceuse CNC.

Si vous avez déjà eu à créer des fichiers de perçage CN, voici ce « support de perçage ».

Chaque trou de la carte Arduino a été percé mécaniquement, y compris les vias. Il en va de même pour tout PCB doté de trous traversants, c'est pourquoi le nombre de vias est un paramètre si important dans le calcul du coût d'un PCB.

Notez que la perceuse que j'ai vue chez System Elettronica était relativement petite. J'ai vu dénormes plates-formes de forage en Chine qui regroupent (attachent mécaniquement) quatre ou six têtes de forage ensemble dans une machine de la taille d'un camion, traitant des dizaines de panneaux en même temps, par opposition aux trois panneaux que cette perceuse pourrait gérer. Le raisonnement derrière cette approche est que l'ensemble de positionnement robotisé précis constitue la partie la plus coûteuse d'une perceuse. La perceuse elle-même est bon marché : juste un moteur qui tourne pour entraîner la mèche. Ainsi, une façon d'augmenter le débit consiste à regrouper plusieurs foreuses sur un seul grand ensemble et à les déplacer de concert. Chaque foreuse individuelle traverse toujours sa propre pile de panneaux, mais pour le prix d'un positionneur XY, vous obtenez un débit quatre à six fois supérieur à celui de la foreuse que j'ai vue lors de mon voyage en Italie. Ces machines plus grosses fontent si vite et si fort que le sol tremble à chaque forage, même à plusieurs mètres de distance.

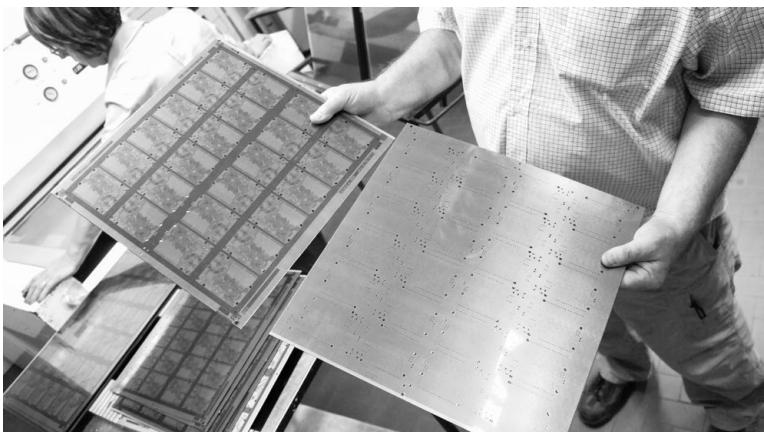
Une fois les panneaux percés, nettoyés et ébavurés, ils sont prêts pour la prochaine étape du processus de fabrication.



Une pile de panneaux finis et percés de cartes Arduino Leonardo

appliquer le modèle PCb au cuivre

La prochaine étape consiste à appliquer un *photorésist*, un produit chimique sensible à la lumière, sur le panneau et exposez un motif. Chez System Elettronica, ce procédé utilisait une boîte à lumière et un film à contraste élevé. J'ai également vu une imagerie laser directe, sous la forme d'un laser à balayage raster, utilisée pour appliquer un motif sur un PCB. Les scanners laser directs sont plus courants dans les maisons de prototypes à rotation rapide, et l'imagerie cinématographique est plus courante dans les maisons de production de masse.



Avant et après : le panneau de droite montre la résine photosensible avant l'exposition, et le panneau de gauche après.

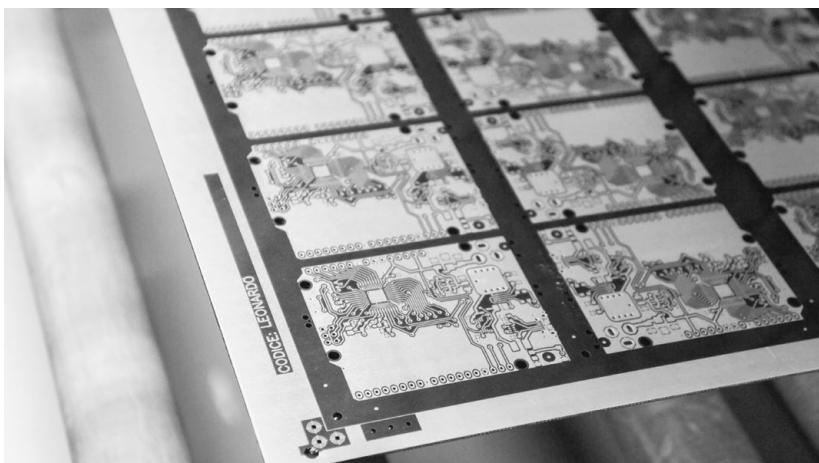


Un PCB monté dans une boîte à lumière qui exposera son film arrière non traité

Une fois le motif appliqué, chaque panneau de planches est envoyé dans une machine pour être développé. Dans ce cas, la même machine est utilisée pour développer à la fois la résine photosensible et le masque de soudure.



La machine qui développe la résine photosensible



Cette photo d'un panneau avec une résine photosensible développée est l'une de mes photos préférées de l'usine System Elettronica.

De plus, quelque chose à propos de « Codece : Leonardo » semble tout simplement cool.

graver les PCbs

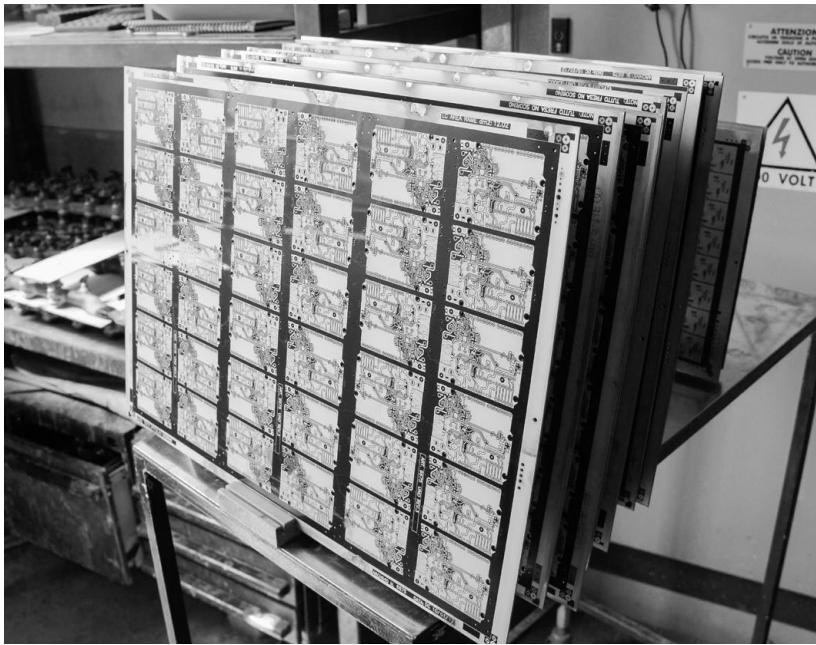
Après le traitement et le développement des photos, les panneaux passent par une série de bains chimiques qui attaquent et plaquent le cuivre.

Les panneaux sont doucement balayés d'avant en arrière dans un bain chimique pour accélérer le processus de gravure. Le mouvement fait également circuler le produit de gravure utilisé loin des panneaux, assurant ainsi un taux de gravure plus uniforme quelle que soit la quantité de cuivre à éliminer. Le déplacement des panneaux dans ces bains chimiques était entièrement automatisé chez Scarmagno. L'automatisation est nécessaire car les panneaux doivent être traités avec une série de bains chimiques caustiques avec une exposition minimale à l'oxygène. L'oxygène peut altérer un panneau en quelques secondes, le transfert entre les bains doit donc être rapide et le temps qu'un panneau passe dans un bain doit être cohérent. Les bains contiennent également des produits chimiques nocifs pour les humains, il est donc beaucoup plus sûr pour un robot d'effectuer ce travail.



Une machine qui déplace les panneaux avec un agent de gravure

Une fois les panneaux traités dans cette série de solutions, un placage blanc terne (que je suppose être du nickel ou de l'étain) se développe sur toutes les surfaces du panneau non traitées avec de la résine photosensible, y compris les vias et tampons traversants non plaqués auparavant. .

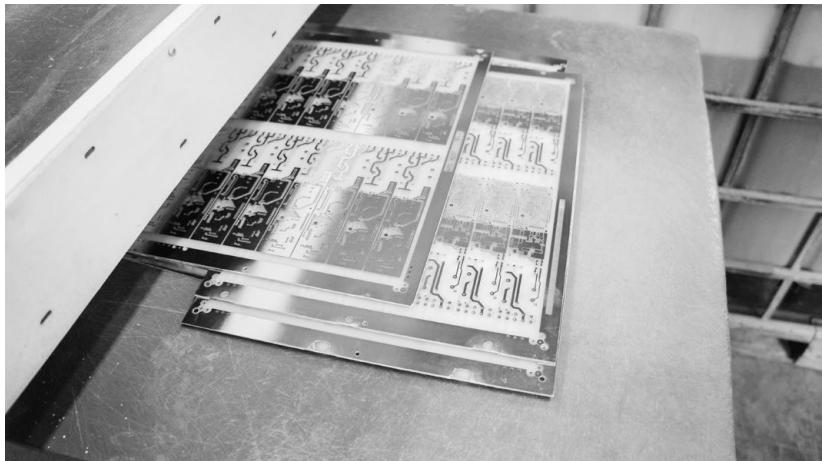


Panneaux de cartes Arduino Leonardo après avoir traversé une série de bains chimiques

À ce stade, la réserve et le cuivre non plaqué sont retirés, ne laissant que le FR-4 brut et le cuivre plaqué. La dernière étape du traitement produit une finition cuivrée brillante.



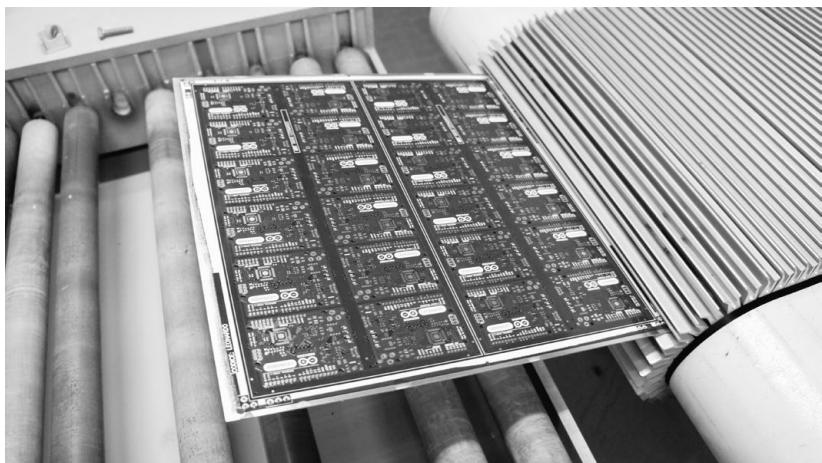
Un panneau gravé de cuivre indésirable



Panneaux PCB avec cuivre brillant et brillant. Cette photo ne montre pas de panneau Arduino, car ceux-ci ne passaient pas par la machine lorsque je l'ai photographié.

application d'un masque de soudure et d'une sérigraphie

Une fois le cuivre poli, les panneaux sont prêts pour la *masque de soudure* (une couche protectrice semblable à une laque qui isole les traces de cuivre en dessous et empêche les ponts de soudure au-dessus) et la *sérigraphie* (l'encre utilisée pour étiqueter les composants, dessiner des logos, etc.). Ceux-ci sont appliqués selon un processus très similaire à celui des motifs de traces, à l'aide d'un photomasque et d'une machine révélatrice/décapante.



Un panneau de cartes Arduino avec masque de soudure et sérigraphie développé

Dans le cas des Arduinos, la sérigraphie est en fait une deuxième couche de masque de soudure. Une formulation très spécifique de masque de soudure blanc à film sec a été achetée pour l'équipe Arduino afin de créer une couche nette et esthétique qui résout les illustrations complexes que vous voyez sur les cartes Arduino, en particulier la carte de l'Italie au dos. D'autres techniques que j'ai vues pour produire des couches de sérigraphie incluent l'impression à jet d'encre haute résolution, qui convient mieux aux maisons de panneaux à rotation rapide, et bien sûr, le processus de sérigraphie à la raclette et à la peinture du même nom.

Test et finition des planches

Après tout ce traitement chimique, les panneaux reçoivent un revêtement protecteur de soudure provenant d'une machine de niveling de soudure à air chaud.

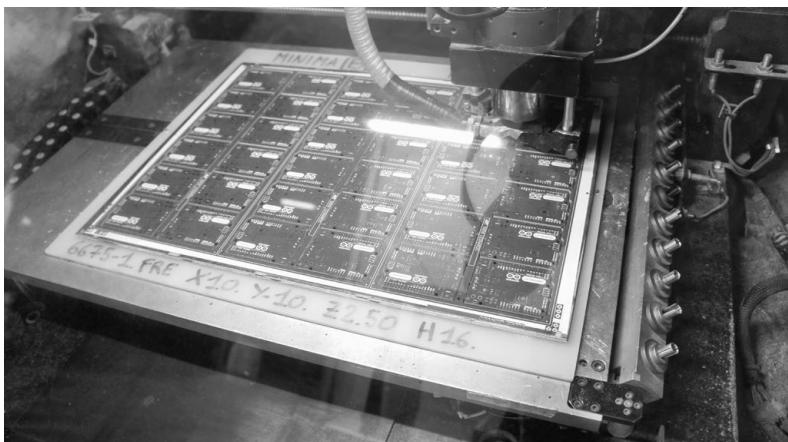
Une fois le placage de soudure en place, chaque carte est testée à 100 %. Chaque trace a sa continuité et sa résistance mesurées avec une paire de sondes volantes. Le processus que j'ai vu s'appelle *test de tête volante* (également appelé *test de sonde volante*), et dans ce type de configuration, plusieurs paires de bras dotés de sondes en forme d'aiguilles testent la continuité entre des paires de traces dans un mouvement de tapotement rapide. Considérant toutes les traces sur un Arduino Leonardo, cela fait beaucoup de sondage ! Heureusement, les bras du robot bougent comme un flou, car il peut sonder des centaines de points par minute.

note *Une alternative aux tests de têtes volantes est le test à clapet, dans lequel un ensemble de broches pogo est placé dans un dispositif capable de tester l'ensemble de la carte en une seule opération mécanique. Cependant, les montages à clapet demandent beaucoup de travail à assembler et à entretenir, et nécessitent un recâblage physique à chaque fois que les fichiers Gerber décrivant les images du PCB sont mis à jour. Ainsi, dans des volumes inférieurs, les tests par sonde volante sont plus rentables et plus flexibles que les tests à clapet.*

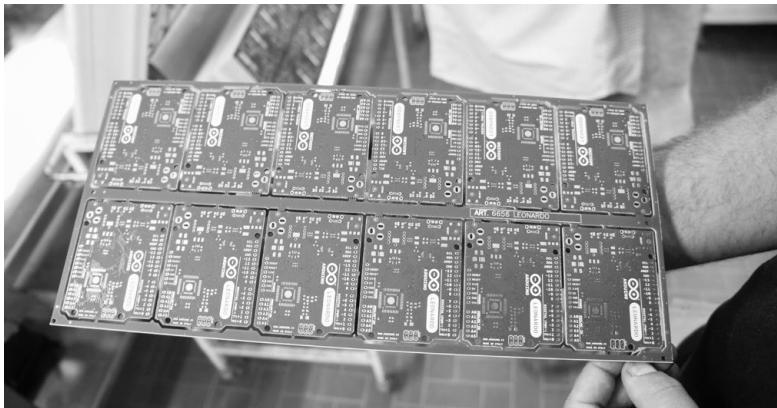


*Une pile de panneaux PCB presque finis,
prêt pour une dernière étape de routage des cartes individuelles*

Cette installation particulière a uniquement créé les panneaux ; une autre usine a en fait rempli les composants. Dans de telles situations, avant que les panneaux puissent être envoyés à l'usine suivante, les circuits imprimés individuels doivent être acheminés afin qu'ils puissent tenir à l'intérieur. *technologie de montage en surface (SMT)* machines pour placer les composants. Les panneaux sont à nouveau empilés et traités par lots via une machine qui utilise une fraise pour couper et libérer les planches. Après cela, les cartes sont enfin prêtes à être expédiées vers les installations SMT.



Plusieurs panneaux Arduino, empilés pour le routage



Des panneaux 2 × 6 plus petits rendent le traitement SMT plus efficace.



*Une véritable pile d'environ 25 000 PCB Arduino nus,
prêts à quitter l'usine de PCB. De là, ils ont été bourrés,
expédié et vendu aux fabricants du monde entier !*

Je suis content d'avoir fait le détour pour visiter l'usine de PCB Arduino. J'ai visité plusieurs usines de PCB, et chacune a un caractère différent et son propre ensemble d'astuces pour améliorer le rendement, ainsi que des limitations uniques que les concepteurs doivent compenser. C'était aussi intéressant de voir la petite astuce concernant l'utilisation d'un

couche supplémentaire de masque de soudure au lieu de la sérigraphie pour obtenir une qualité cosmétique élevée. Alors que la résolution d'une sérigraphie est limitée par le maillage de la barrière de soie qui retient la peinture, le masque de soudure est limité par la qualité de l'optique et du développement chimique, ce qui donne lieu à une amélioration d'un ordre de grandeur de la résolution et, finalement, à une qualité perçue plus élevée. Normalement, la qualité inférieure de la sérigraphie est acceptable car les utilisateurs finaux ne voient pas les circuits imprimés à l'intérieur des ordinateurs, mais pour Arduino, le produit final est le circuit imprimé.

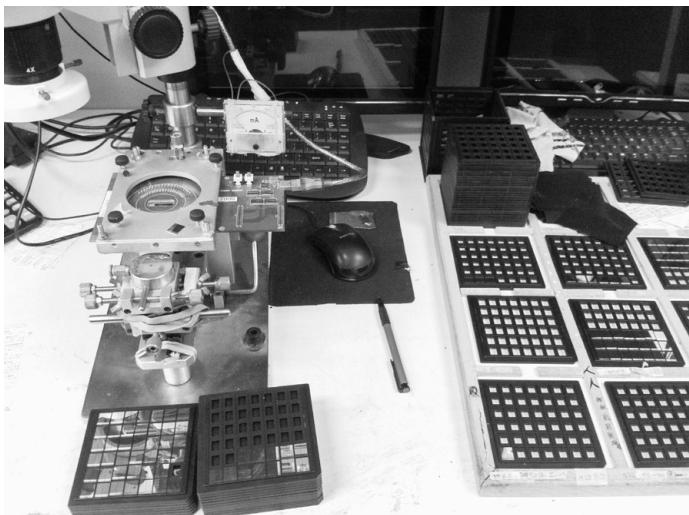
Où naissent les clés USB

Plusieurs mois après ma visite de l'usine Arduino, j'ai eu la chance d'être un conférencier principal à la Linux Conference Australia (LCA) 2013. Dans mon exposé, « Linux in the Flesh : Adventures Embedding Linux in Hardware », j'ai expliqué comment Linux se trouve dans toutes sortes d'appareils que nous voyons tous les jours. Cette histoire ne concerne pas Linux, mais elle me connecte, ainsi que, tangentiellement, LCA à une usine.

L'un des bibelots que j'ai reçus des organisateurs du LCA était une petite clé USB avec Tux le pingouin, la mascotte Linux, à l'extérieur. Quand j'ai vu l'appareil, j'ai pensé que c'était une belle coïncidence si, environ une semaine avant la conférence, je me trouvais dans une usine qui fabriquait des clés USB exactement similaires. J'ai vu le processus d'assemblage de la carte clé USB du début à la fin, et étonnamment, cela impliquait beaucoup moins d'automatisation que le processus de fabrication de l'Arduino.

Le début d'une clé USB

Les clés USB commencent leur vie sous forme de puces de mémoire flash nues. Avant d'être montées sur des PCB, ces puces sont examinées pour leur capacité de mémoire et leurs fonctionnalités.

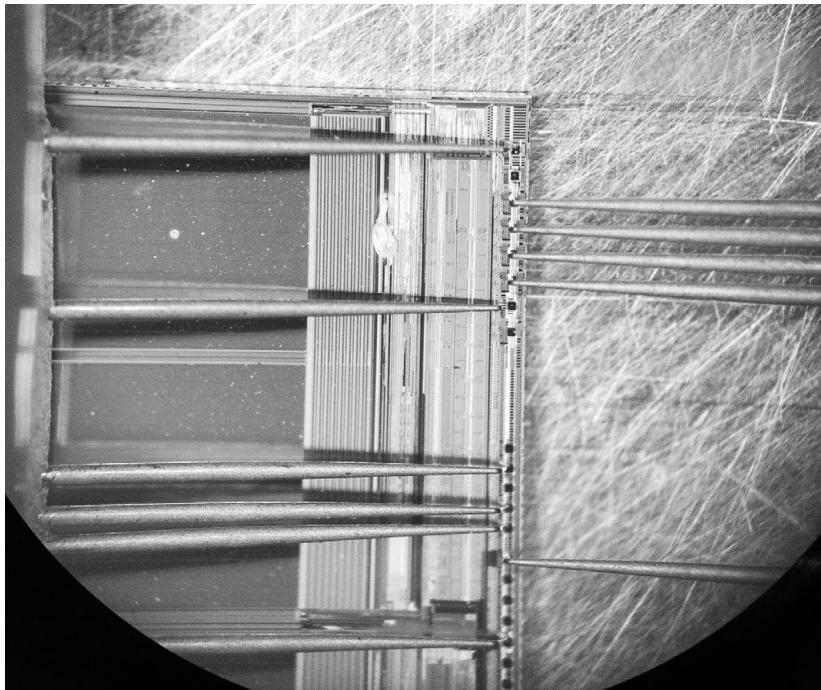


*Un poste de travail où les puces de mémoire flash sont filtrées.
Le rectangle métallique à gauche avec la découpe circulaire est la carte de sonde.*

Sur un poste de travail de cette usine, des piles de puces Flash nues attendaient d'être testées et regroupées avec une *carte de sonde*, qui comporte de minuscules broches positionnées de manière très précise et utilisées pour toucher des coussinets à peine plus larges qu'un cheveu humain sur la surface d'une plaquette de silicium. (J'adore la façon dont le travailleur de cette station particulière a utilisé des élastiques pour maintenir un courantomètre analogique sur la carte de sonde.)



La carte sonde, de près

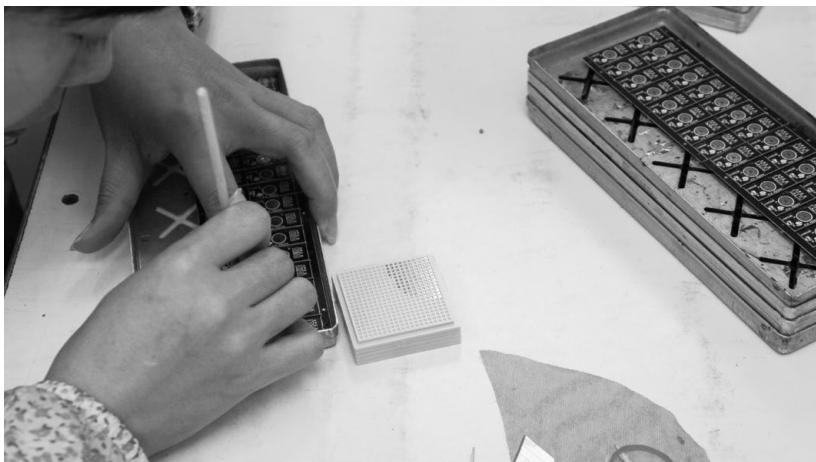


Regarder au microscope sur la station de microsonde. Remarquez les aiguilles toucher les pastilles carrées au bord de la surface de la puce flash. Chaque tampon mesure environ 100 microns de côté – un cheveu humain mesure environ 70 microns de diamètre.

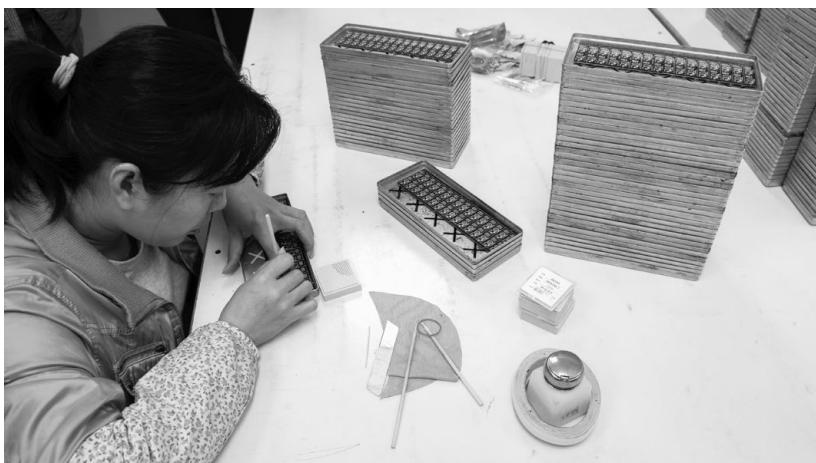
Il est intéressant de noter que les puces que j'ai vues n'ont absolument pas été testées dans un environnement de salle blanche. Les ouvriers manipulaient les copeaux avec des pinces et des étaux d'aspiration manuels et montaient manuellement les cartes de sonde dans leurs gabarits.

Placer des puces à la main sur un PCB

Une fois la fonctionnalité des puces examinée, elles ont été placées *par la main* sur les PCB de la clé USB. Ce n'est pas une pratique inhabituelle ; Chaque installation de connexion de fils axée sur la valeur que j'ai visitée repose sur le placement manuel de puces nues.



Un circuit intégré de contrôleur placé sur un panneau de PCB de clé USB. Les minuscules matrices nues se trouvent à droite, dans un paquet de gaufres.



Une vue agrandie du poste de travail de placement des matrices

La dame que j'ai vue placer le dé nu utilisait un outil semblable à une baguette en bambou coupé à la main. Je n'ai pas encore compris exactement comment fonctionne le processus, mais ma meilleure hypothèse est que les bâtons de bambou ont juste la bonne énergie de surface pour y adhérer.

la matrice en silicium, de telle sorte que le silicium adhère à la pointe de la tige de bambou. Un point de colle est pré-appliqué sur les planches nues, de sorte que lorsque l'opérateur touche la matrice sur la colle, la tension superficielle de la colle retire la matrice du bâton de bambou.

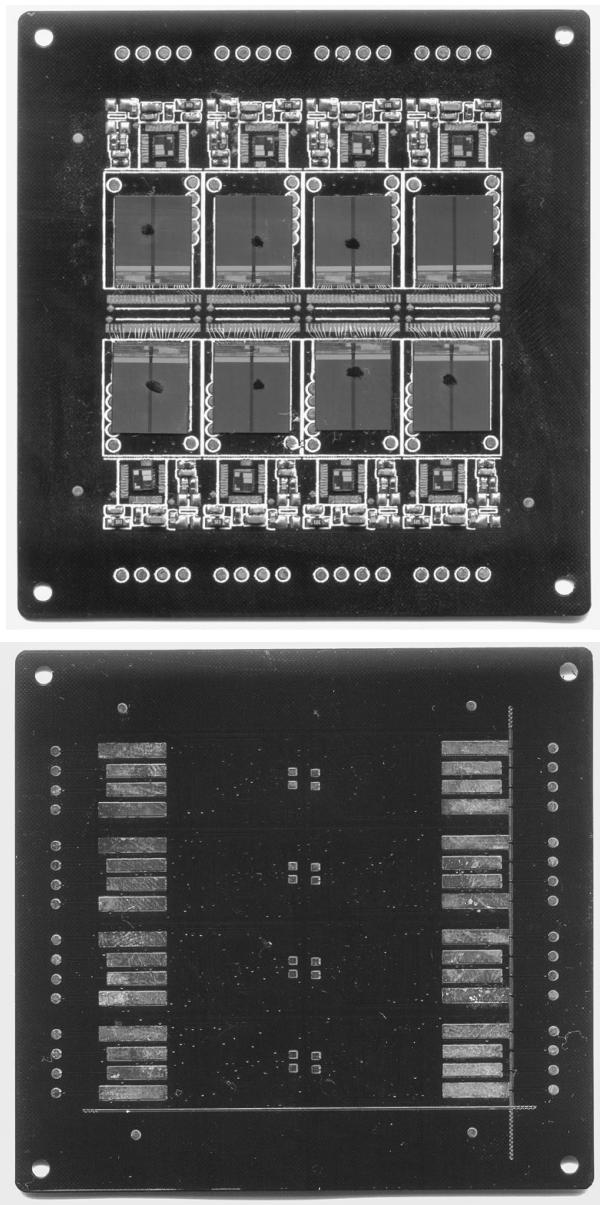
C'est effrayant de penser que les puces à l'intérieur de ma clé USB ont été manipulées à l'aide de baguettes modifiées.

relier les puces au PCB

Une fois les puces placées sur le PCB, elles étaient *fil collé* au panneau avec une machine de collage automatisée, qui utilise la reconnaissance d'image assistée par ordinateur pour trouver l'emplacement des plots de connexion (c'est en partie la raison pour laquelle les usines peuvent s'en sortir avec le placement manuel des matrices). La liaison par fil est le processus qui connecte un circuit intégré à son emballage, et la machine de liaison automatisée connecte les fils au circuit intégré à une vitesse insensée, tout en faisant tourner le circuit imprimé. Pendant que j'observais ce processus, l'opérateur devait retirer et remplacer manuellement un fil mal collé, puis réintroduire le fil dans la machine. Étant donné que ces fils sont plus fins qu'une mèche de cheveux et que les plots de connexion sur l'emballage et le circuit intégré sont microscopiques, ce n'était pas une mince affaire de dextérité manuelle.

un examen attentif des cartes de clé USB

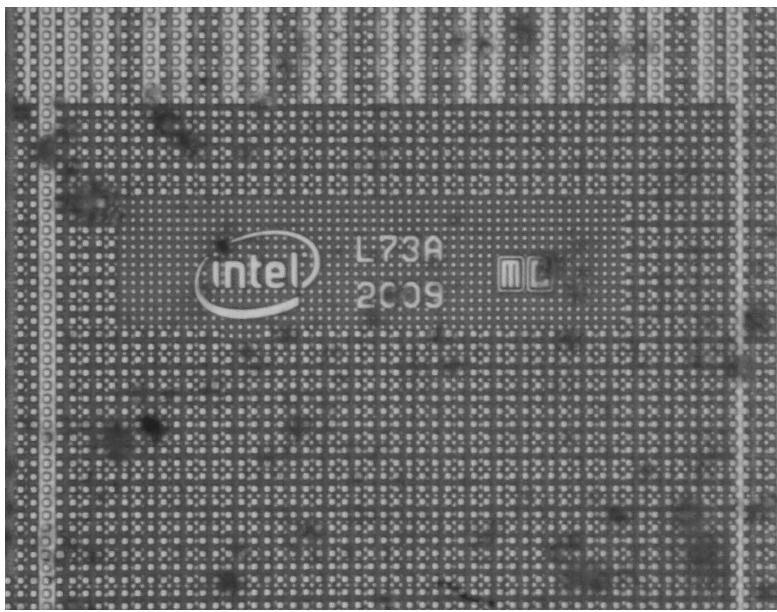
Tout comme l'usine Arduino utilisait des panneaux contenant plusieurs cartes Leonardo, l'usine de clés USB utilisait des panneaux de huit clés USB chacun. Chaque clé du panneau était constituée d'une puce de mémoire flash et d'un circuit intégré de contrôleur qui gérait le pont entre l'USB et le flash brut, une tâche non triviale qui comprend, entre autres, la gestion des cartes de blocs défectueux et la correction des erreurs. Le contrôleur était probablement un processeur de classe 8051 fonctionnant à quelques dizaines de MHz.



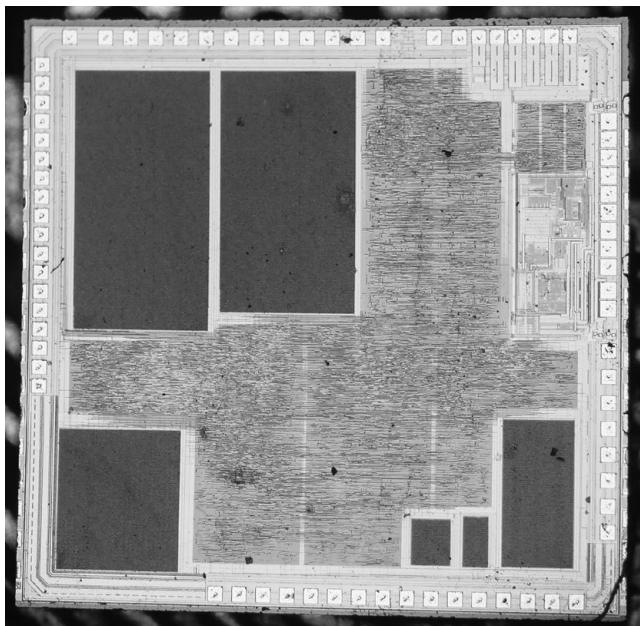
*Le PCB partiellement collé mais entièrement monté sur matrice que le
le propriétaire de l'usine m'a offert en souvenir de ma visite.
Certains fils de liaison ont été écrasés pendant le transport.*



Il est intéressant de noter que l'ensemble de la clé USB est flexible avant l'encapsulation.



Le marquage de la puce flash. Apparemment, c'est fabriqué par Intel.



Un cliché de la puce du contrôleur insérée dans les clés USB

Une fois les panneaux collés et testés, ils ont été surmoulés avec de l'époxy puis découpés en morceaux individuels, prêts à la vente.

Mais cela suffit pour parler de la fabrication électronique ;
Ensuite, je veux vous montrer un autre type d'usine.

une histoire de deux fermetures à glissière

Mon ami Chris « Akiba » Wang a un parcours similaire au mien, sauf que dans sa jeunesse, il était très branché : il était danseur pour des groupes comme LL Cool J et Run DMC dans les années 90. Après avoir travaillé pour de grandes entreprises de semi-conducteurs, il a finalement arrêté et a suivi sa passion pour concevoir et fabriquer ses propres projets de matériel. Expert en réseaux sans fil à courte portée et à faible consommation (il est co-auteur d'un livre sur le Bluetooth Low Energy et vend une variante Arduino + 802.15.4 appelée « Freakduino »), il

consulte des organisations comme les Nations Unies et l'Université Keio, dirige FreakLabs et collabore avec divers groupes de danse, tels que le Wrecking Crew, pour fournir des solutions d'éclairage uniques et convaincantes pour les spectacles sur scène.

J'ai eu la chance de présenter Akiba à la grande région de Shenzhen lors d'un voyage avec des étudiants du MIT Media Lab en 2013, le même voyage au cours duquel nous avons visité l'usine de clés USB. Depuis, il explore de plus en plus profondément la région. Comme son travail couvre les disciplines de l'art de la performance, des appareils portables et de l'électronique, son réseau d'usines est assez différent du mien, j'apprécie donc toujours l'opportunité d'en apprendre davantage sur son monde.

En janvier 2015, Akiba m'a emmené visiter l'usine de fermetures éclair de son ami. J'étais très enthousiasmé par cette visite : aussi humble que soit le produit, j'apprends toujours quelque chose de nouveau en visitant son usine. Cette usine était très différente des installations Arduino et USB. Il y avait beaucoup moins d'employés et c'était un fabricant hautement automatisé et intégré verticalement. Pour vous donner une idée de ce que cela signifie, cette installation a transformé des lingots de métal, de la sciure de bois et du riz en pièces de fermeture éclair.



*Environ 1 tonne de lingots,
composé de 93 pour cent de zinc et de 7 pour cent d'alliage d'aluminium*



Granulés de sciure de bois comprimée, utilisés pour alimenter la fonderie de lingots



Le riz, utilisé pour nourrir les ouvriers



Ensembles de tirette et de curseur de fermeture à glissière terminés

Examinons un aspect du fonctionnement réel de ce processus.

un processus entièrement automatisé

Entre les trois matériaux d'entrée et le produit de sortie se trouvait une ligne de moulage sous pression entièrement automatisée pour créer les tirettes et les curseurs de fermeture éclair, un ensemble de gobelets et de pots vibrants (ou, comme j'aime les appeler, des « vibrapots ») à démoluer et à polir. les fermetures éclair, et un ensemble de machines pour ébavurer et joindre chaque tirette à son curseur. Je pense avoir compté moins d'une douzaine d'employés dans l'établissement, et je suppose que leur capacité dépasse largement un million de fermetures éclair par mois.

J'ai été fasciné par les vibrapots* qui assemblent les fermetures éclair. Il y avait deux vibrapots : un avec extracteurs et un avec curseurs. Les curseurs et les extracteurs ont été déposés sur un rail mobile, et tandis que j'observais ces miracles à l'œuvre, il semblait que les curseurs et les extracteurs s'alignaient dans la bonne orientation par magie. Chacun tombait sur son rail et, au bout de la ligne, ils étaient pressés ensemble pour former une fermeture à glissière familière, le tout dans une seule machine entièrement automatisée.

* Honnêtement, je ne sais pas comment ils s'appellent, alors oui, je vais continuer à les appeler ainsi.

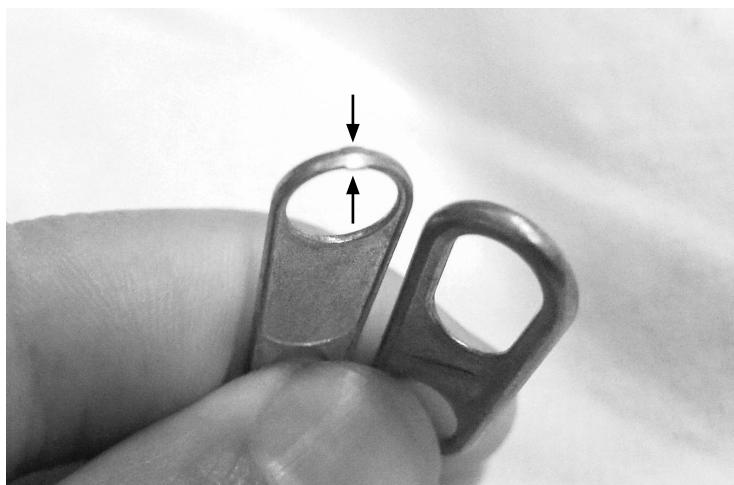
Quand j'ai mis la main dans le pot, j'ai constaté qu'il n'y avait aucun agitateur pour provoquer le mouvement ; J'ai juste ressenti une forte vibration. J'ai détendu ma main et j'ai constaté qu'elle commençait à bouger avec tous les autres objets dans le pot. Le pot entier vibrait de manière biaisée, de telle sorte que les objets à l'intérieur avaient tendance à se déplacer dans un mouvement circulaire. Cela a poussé les extracteurs et les curseurs sur l'ensemble de rails, qui ont été façonnés pour tirer parti des asymétries des objets afin de permettre uniquement aux pièces qui sautaient sur le rail dans la bonne orientation de passer à l'étape suivante.

un processus semi-automatisé

Malgré le haut niveau d'automatisation de cette usine, la plupart des ouvriers que j'ai vus effectuaient une seule opération. Ils ont introduit les tirettes pour un autre type de fermeture éclair dans un appareil connecté à un autre vibrapot contenant des curseurs, tandis que l'appareil assemblait les curseurs et les tirettes.

Bien sûr, j'ai demandé : « Pourquoi certaines fermetures éclair ont-elles des processus d'assemblage entièrement automatisés, alors que d'autres sont semi-automatiques ? »

Il s'avère que la réponse est très subtile et se résume à la forme.



Notez la différence entre ces deux extracteurs, indiquée par les flèches.

Un petit onglet, à peine visible, faisait la différence entre une automatisation complète et le besoin d'un humain pour assembler des millions de curseurs et d'extracteurs. Pour comprendre pourquoi, passons en revue une étape critique du fonctionnement du vibrapot. Un travailleur a gentiment mis en pause le vibrapot chargé de trier les extracteurs dans la bonne orientation pour le processus entièrement automatique afin que je puisse prendre une photo de l'étape clé.



Extracteurs passant par le vibrapot

Lorsque les tireurs contournaient le rail, leur orientation était aléatoire : certains étaient orientés vers la droite, d'autres vers la gauche. Mais l'opération d'assemblage doit uniquement insérer le curseur dans le plus petit des deux trous. Cette petite languette permettait à la gravité de faire pendre tous les extracteurs dans la même direction lorsqu'ils tombaient dans un rail vers la gauche.

La conception de la fermeture à glissière semi-automatique n'a pas cette languette ; en conséquence, la conception est trop symétrique pour qu'un vibrapot puisse aligner l'extracteur. J'ai demandé au propriétaire de l'usine si l'ajout de la petite languette permettrait d'économiser ce travail, et il a répondu absolument.

À ce stade, il me semblait évident que toutes les fermetures à glissière devraient avoir cette petite languette, mais le concepteur de la fermeture à glissière ne l'avait pas. Même si un tel onglet est très petit, les consommateurs peuvent ressentir de subtiles bosses, et certains le perçoivent comme un

défaut de conception. En conséquence, le concepteur a insisté sur une languette parfaitement lisse, qui ne présentait donc aucune fonctionnalité permettant une orientation automatique simple et fiable.

L'ironie de la rareté et de la demande

J'aimerais imaginer que la plupart des gens, après avoir vu une personne joindre les tirettes aux curseurs pendant quelques minutes, seraient tout à fait satisfaits de subir une petite bosse sur le bout de leur fermeture éclair pour épargner à un autre humain le sort d'aligner manuellement les tirettes dans sliders pendant huit heures par jour. Alternative, je suppose qu'un ingénieur pourrait passer d'innombrables heures à essayer de concevoir une méthode plus complexe pour aligner les extracteurs et les curseurs, mais cela pose deux problèmes :

- Le client de la fermeture éclair ne paierait probablement pas pour cet effort.
- Il est probablement moins cher de payer une main-d'œuvre non qualifiée pour effectuer manuellement le tri.

Ce propriétaire d'usine de fermetures à glissière avait déjà automatisé tout le reste dans l'installation, donc je suppose qu'ils ont également longuement réfléchi à ce problème. Je suppose que les robots coûtent cher à construire et à entretenir ; les gens se reproduisent eux-mêmes et s'auto-entretiennent en grande partie. Vous vous souvenez de ce troisième intrant de l'usine : le riz ? Les pièces de rechange de tout robot doivent être moins chères que le riz pour que le robot puisse gagner une place dans cette usine.

En réalité, cependant, expliquer ce concept aux clients finaux demande trop d'efforts ; en fait, c'est tout le contraire qui se produit sur le marché. L'assemblage des fermetures éclair lisses nécessite un travail supplémentaire, de sorte que les fermetures éclair coûtent plus cher ; par conséquent, ils ont tendance à se retrouver dans des produits haut de gamme. Cela renforce encore l'idée selon laquelle les fermetures à glissière vraiment lisses, sans petite languette, doivent être le résultat d'un contrôle de qualité et d'une attention aux détails.

Mon monde est plein de petites frustrations comme celle-ci. Par exemple, la plupart des clients perçoivent les plastiques avec une finition miroir comme étant de meilleure qualité que ceux avec une finition satinée. Il y a

aucune différence fonctionnelle entre les performances structurelles des deux plastiques, mais fabriquer quelque chose avec une finition miroir demande beaucoup plus d'efforts. Les outils de moulage par injection doivent être minutieusement et méticuleusement polis, et à chaque étape de l'usine, les ouvriers doivent porter des gants blancs. Des montagnes de plastique sont mises au rebut en raison de défauts minimes, et des films de plastique supplémentaires sont placés sur les surfaces des miroirs pour les protéger pendant le transport.

Malgré tous ces efforts, malgré tout ce gaspillage, quelle est la première chose que font les utilisateurs ? Ils ont laissé leurs empreintes digitales sales partout sur la finition du miroir. Moins d'une minute après la sortie d'un produit de la boîte, tous ces efforts sont annulés. Ou pire encore, l'utilisateur laisse le film protecteur en place, ce qui entraîne un effet cosmétique nettement pire qu'un fini satiné.

Comparez cela au plastique satiné. Les finitions satinées ne nécessitent pas de film protecteur, sont plus faciles à manipuler pour les travailleurs et les utilisateurs, durent plus longtemps et ont des rendements bien meilleurs. Dans les mains de l'utilisateur, ils cachent de petites rayures, des empreintes digitales et des morceaux de poussière. On peut soutenir que la finition satinée offre une meilleure expérience client à long terme que la finition miroir.

Mais cette finition miroir est certainement jolie sur les photographies et les expositions dans les salles d'exposition !

3. l'usine

Les deux chapitres précédents étaient remplis d'histoires de mes expériences personnelles d'apprentissage, de commission d'erreurs et de croissance avec l'écosystème manufacturier de la grande région de Shenzhen. En janvier 2013, après avoir appris les ficelles du métier, le MIT Media Lab m'a demandé de commencer à encadrer des étudiants diplômés sur la chaîne d'approvisionnement et la fabrication, et je les ai emmenés visiter Shenzhen (la même tournée où j'ai rencontré Akiba et visité l'USB usine de clés USB). Ce chapitre est une tentative de distiller tout ce que j'ai enseigné au cours de plusieurs semaines en quelques dizaines de pages.

Les défis et les compromis dans la fabrication à faible volume sont différents de ceux des entreprises bien financées qui réalisent des prototypes à l'échelle de milliers d'unités. J'ai appris cela au fil du temps, mais tout le monde n'a pas six ans pour surmonter toutes les erreurs des débutants. Si vous travaillez déjà dans une startup technologique en évolution rapide, vous n'avez probablement pas le luxe de faire de l'exploration du tout. Les leçons de ce chapitre s'appliquent à toute personne cherchant à démarrer un produit matériel à partir d'un prototype initial jusqu'à des volumes modérés (peut-être des centaines de milliers d'unités). Considérez ce résumé comme une ligne directrice générale et non comme une feuille de route détaillée. Le diable est toujours dans les détails, et l'un des aspects amusants de la création de nouveaux produits matériels innovants est qu'il n'y a pas de fin aux défis nouveaux et intéressants à résoudre.

COMMENT FAIRE UNE FACTURE DE MATERIAUX

La plupart des fabricants qui tentent d'augmenter leur production réalisent rapidement que la seule voie pratique consiste à externaliser la production. Si seulement l'externalisation était aussi simple qu'un schéma + cash = produit !

Que vous travailliez avec l'atelier d'assemblage du coin de la rue ou que vous envoyiez votre travail en Chine, un aperçu clair et complet *nomenclature (BOM)* est la première étape vers l'externalisation de la production. Chaque hypothèse que vous faites concernant votre circuit imprimé, jusqu'à la couleur du masque de soudure, doit être énoncée sans ambiguïté pour qu'un tiers puisse reproduire fidèlement votre conception. Une documentation manquante ou incomplète est la principale cause de retards de production, de défauts et de dépassements de coûts.

une bombe simple pour un éclairage de sécurité à vélo

Pour une étude de cas, supposons que vous ayez mené avec succès une campagne Kickstarter pour un éclairage de sécurité pour vélo. Il contient un circuit qui utilise une minuterie 555 pour faire clignoter un petit réseau de LED. Après une belle campagne marketing, plusieurs centaines de commandes doivent être exécutées en quelques mois.

Au début, une nomenclature pour l'éclairage de vélo, telle que générée automatiquement par un outil de conception tel qu'Altium, pourrait ressembler à ceci :

Quantité	Commentaire	Désignateur
1	0,1µF	C1
1	dixµF	C2
3	LED blanche	D1, D2, D3
1	2N3904	T1
1	100	R1
2	20k	R2, R4
1	1k	R3
1	555 minuterie	U1

Un éclairage de sécurité pour vélo très basique

Cette nomenclature, accompagnée d'un schéma, est probablement suffisante pour que tout diplômé d'un programme américain d'ingénierie électrique puisse reproduire le prototype, mais elle est loin d'être suffisante pour une estimation des coûts de fabrication. Cette version de la nomenclature concerne uniquement l'électronique. Une nomenclature complète pour un clignotant LED doit également inclure le PCB, la batterie, les pièces du boîtier en plastique, la lentille, les vis, tout étiquetage (comme un numéro de série), un manuel et l'emballage (un sac en plastique et une boîte en carton, par exemple). Il peut également nécessiter un carton principal pour expédier plusieurs clignotants LED ensemble, car un seul clignotant LED en boîte est trop petit pour être expédié seul. Bien que les boîtes en carton soient bon marché, elles ne sont pas gratuites et si elles ne sont pas commandées à temps, les stocks resteront sur le quai jusqu'à ce qu'un carton principal soit livré pour l'emballage final avant expédition.

Les informations clés suivantes sont également manquantes :

- Fabricant agréé pour chaque composant
- Tolérance, composition des matériaux et spécifications de tension pour les composants passifs
- Informations sur le type de colis pour toutes les pièces
- Références étendues spécifiques à chaque fabricant

Examinons chacun des éléments manquants plus en détail.

fabricants agréés

Une usine appropriée vous demandera de fournir un *liste des fournisseurs approuvés (AVL)* spécifiant le(s) fabricant(s) autorisé(s) pour chaque pièce d'un PCB. Un fabricant n'est pas un distributeur mais plutôt l'entreprise qui fabrique réellement une pièce. Un condensateur, par exemple, pourrait être fabriqué par TDK, Murata, Taiyo Yuden, AVX, Panasonic, Samsung, etc. Je suis toujours surpris du nombre de nomenclatures que j'ai examinées et qui répertorient DigiKey, Mouser, Avnet ou un autre distributeur comme fabricant d'une pièce.

Il peut sembler idiot de se demander qui fabrique un condensateur, mais il existe certainement des situations où le fabricant d'un composant compte, même pour le modeste condensateur. Par exemple, remplacer aveuglément les condensateurs de filtre sur un régulateur à découpage, même si le substitut a la même capacité et la même tension nominale, peut conduire à un fonctionnement instable et même à un incendie des cartes.

Bien sûr, certaines pièces d'une conception peuvent être vraiment insensibles au fabricant, auquel cas je marquerais « tout/ouvert » sur la nomenclature de l'AVL. (Cela est particulièrement vrai pour les pièces telles que les résistances de rappel.) Cela invite l'usine à suggérer son fournisseur préféré en votre nom.

Tolérance, composition et spécification de tension

Pour les composants passifs marqués « any/open », vous devez toujours spécifier les paramètres clés suivants pour garantir que la bonne pièce est achetée :

- Pour les résistances, précisez au minimum la tolérance et la puissance. Une résistance en carbone de 1 kΩ, 1 pour cent de tolérance, 1/4 W est une bête très différente d'une résistance bobinée de 1 kΩ, 5 pour cent de tolérance, 1 W !
- Pour les condensateurs, spécifiez au minimum la tolérance, la tension nominale et le type diélectrique. Pour les applications spéciales, précisez également certains paramètres tels que l'ESR ou le courant d'ondulation

tolérance. Un condensateur électrolytique de 10 µF avec une tolérance de 10 % évalué à 50 V a des performances très différentes à hautes fréquences par rapport à un condensateur céramique de 10 µF avec une tolérance de 20 % évalué à 16 V.

Les inducteurs sont suffisamment spécialisés pour que je ne recommande pas de les étiqueter comme « tout/ouvert » dans votre nomenclature. Pour les inductances de puissance, les paramètres de base à spécifier sont la composition du noyau, la résistance CC, la saturation, l'échauffement et le courant, mais contrairement aux résistances et aux condensateurs, les inductances n'ont pas de norme pour le boîtier. De plus, des paramètres importants tels que le blindage et l'enrobage, qui peuvent avoir un impact important sur les performances d'un circuit, sont souvent implicites dans un numéro de pièce ; par conséquent, il est préférable de spécifier entièrement l'inducteur. Il en va de même pour les inductances RF.

Facteur de forme du composant électronique

Précisez toujours entièrement le *facteur de forme*, ou type de package, d'un composant. Des paramètres de package mal spécifiés ou sous-spécifiés peuvent entraîner des erreurs d'assemblage. Au-delà des paramètres de base tels que le code du package Electronic Industries Alliance (EIA) ou JEDEC Solid State Technology Association (c'est-à-dire 0402, 0805, TSSOP, etc.), tenez compte des informations suivantes sur le package lorsque vous créez votre nomenclature :

packages de montage en surface La hauteur d'un composant peut varier, notamment pour les boîtiers supérieurs à 1206 ou pour les inductances. Faites attention à ce que la carte s'insère dans un boîtier étanche.

Forfaits traversants Spécifiez toujours le pas des broches et la hauteur des composants.

Pour les circuits intégrés en général, essayez également de spécifier le nom commun qui correspond au boîtier, pas seulement celui du fabricant.

code interne. Par exemple, un code de package de type « DW » Texas Instruments correspond à un package SOIC. Ce contrôle de cohérence permet de se prémunir contre les erreurs.

Numéros de référence étendus

Les concepteurs pensent souvent aux composants sous forme de numéros de pièce abrégés. Le 7404 en est un bon exemple. Le vénérable 7404 est un onduleur hexagonal et est en service depuis des décennies. En raison de son omniprésence, 7404 peut être utilisé comme terme générique pour un onduleur parmi les ingénieurs de conception.

Cependant, lors du passage en production, vous devez spécifier des informations telles que le type de package, le fabricant et la famille logique. Un numéro de pièce complet pour un onduleur hexagonal particulier peut être **74VHCT04AMTC**, qui spécifie un onduleur fabriqué par Fairchild Semiconductor, de la série VHCT, dans un boîtier TSSOP, expédié en tubes. Les caractères supplémentaires sont très importants, car de petites variations peuvent causer de gros problèmes, comme proposer et commander le mauvais appareil emballé et se retrouver coincé avec une bobine de pièces inutilisables ou de subtils problèmes de fiabilité.

Par exemple, sur un contrôleur robotique que j'ai conçu (nom de code *Kovan*), j'ai rencontré un problème dû à une substitution erronée de *VHC* dans le numéro de pièce d'un composant dans la *VHCT* famille logique. L'utilisation de la partie VHC a fait passer les seuils d'entrée de l'onduleur de TTL à compatible logique CMOS, et certaines unités avaient en conséquence une réponse asymétrique aux signaux d'entrée. Heureusement, j'ai détecté ce problème avant que la production n'accélère. La bonne pièce a été utilisée sur toutes les autres unités et j'ai évité de nombreuses retouches potentielles ou, pire encore, des retours de clients mécontents. Heureusement, le seul coût de cette erreur a été de retravailler les quelques prototypes que je validais avant la production.

Voici un autre exemple de la façon dont l'omission de quelques caractères dans un numéro de pièce peut coûter des milliers de dollars. Un entièrement spécifié

Le numéro de pièce du régulateur à découpage LM3670 peut être LM3670MFX-3.3/NOPB. Si *NOPB* est omis, le numéro de pièce est toujours valide et peut être commandé, mais cette version utilise de la soudure au plomb. Cela pourrait être désastreux pour les produits exportés vers une région qui exige la conformité RoHS (c'est-à-dire sans plomb, entre autres), comme l'Union européenne.

Le *X* dans le numéro de pièce est un autre problème plus subtil. Numéros de pièces avec un *X* viennent en bobines de 3 000 pièces, et celles qui manquent *X* sont livrés en bobines de 1 000 pièces. Alors que de nombreuses usines remettent en question un *//NOPB* par omission, puisqu'ils rassemblent généralement la documentation RoHS au fur et à mesure qu'ils achètent des pièces, ils signalent rarement la quantité de bobine comme un problème.

Ma *sto* devrait se soucier de la quantité de bobine. Si vous envisagez de créer seulement 1 000 produits, y compris le *X* dans le numéro de pièce signifie que vous aurez 2 000 LM3670 supplémentaires. Et oui, vous devez payer l'excédent, puisque votre nomenclature précise ce numéro de pièce. Il existe de nombreuses raisons valables de commander des pièces excédentaires, de sorte que les usines remettent rarement en question une telle décision.

En revanche, les pièces commandées par lot de 1 000 unités sont un peu plus chères à l'unité que celles commandées par lot de 3 000. Donc, si vous omettez le *X* à mesure que votre volume augmente, vous finirez par payer plus pour la pièce que nécessaire. Quoi qu'il en soit, l'usine indiquera votre nomenclature exactement comme spécifié, et si vos spécificateurs de quantité sont incorrects, vous pourriez laisser de l'argent sur la table ou, pire encore, perdre de l'argent.

L'essentiel ? Chaque chiffre et chaque caractère compte, et le manque d'attention aux détails peut coûter de l'argent réel !

La sécurité vélo Light bom revisitée

En gardant ces quatre points à l'esprit, réfléchissez à ce à quoi pourrait ressembler une nomenclature appropriée et entièrement spécifiée pour l'exemple d'éclairage de sécurité pour vélo.

Quantité	Valeur	Emballier	Désignateur	AVL1	AVL1 Réf.	Piomb de commanage temp	Quantité minimale de commande temp
1	0,1µF, céramique, 25V, 10%, X5R	0402	C1	Taiyo Yuden	TMK105BJ104KV-F...	10000	8 semaines
1	dixµF, céramique, 16V, 10%, X5R	1206	C2	TDK	C3216X5RC106K(085AB)	2000	12 semaines
3	LED blanche, lentille transparente	T-1 ¾	D1, D2, D3	Lumix	SSI-LX5093UWC/G	3000	12 semaines
1	2N3904	SOT-223	T1	SUR	PZT3904T1GOS	1000	6 semaines
1	100 ohms, 1/2W, 5 %	2010	R1	Panasonic	ERj-T2SF100U	5000	8 semaines
2	20k, 1/16W, 1%	0402	R2, R4	rimagez le qu'il ouvert		10000	8 semaines
1	1k, 1/16W, 5%	0402	R3	rimagez le qu'il ouvert		10000	8 semaines
1	NE555D	SOIC-8	U1	TI	NE555D	1000	4 semaines
1	PCB FR4, 1,6 mm +/- 10 %, masque de soudure vert, HASL, séraphigie blanche, 5 cm x 8 cm		PCB	A déterminer	FLASHYLIGHT_GERBERS_V1.ZIP	1000	4 semaines
1	Plastique ABS, boîtier inférieur, finition satinée, sans plomb, noir			A déterminer	FLASHYLIGHT_BOT_V1.STEP	1000	16 semaines / 4 semaines
1	Plastique ABS, top case, finition satinée, sans plomb, noir			A déterminer	FLASHYLIGHT_TOP_V1.STEP	1000	16 semaines / 4 semaines
1	Plastique polycarbonate, lentille, finition miroir, sans plomb, transparent			A déterminer	FLASHYLIGHT_LENS_V1.STEP	1000	16 semaines / 4 semaines
4	Vis, M2x4, tête cylindrique cruciforme, autotaraudeuse 5 mm			rimagez le qu'il ouvert		4000	action
1	Piles Snap, 9V, 15 cm, fils rouges et noirs 26 AWG (câbles 5 mm)			Kaweei	CBS-150	5000	1 semaine
1	Manuel d'instructions, feuille A4, noir et blanc, imprimé recto-verso			rimagez le qu'il ouvert	flashylite_manual_y2.ai	1000	3 semaines
1	Sac en plastique PE 10 cm x 12 cm, transparent			rimagez le qu'il ouvert		1000	1 semaine
1	Étiquette code-barres, numéro de série et code date, CODE39 5 mm x 15 mm			rimagez le qu'il ouvert	code-barres_échantillon_v1.pdf	1000	1 semaine
1	Boîte en carton, 6 cm x 6 cm x 10 cm, couleur naturelle, stock de 50 lb			rimagez le qu'il ouvert	voir l'échantillon de boîte inclus	1000	1 semaine
0,02	Carton principal, 60 cm x 40 cm x 20 cm			rimagez le qu'il ouvert		100	1 semaine

Il y a une grande différence entre une nomenclature que n'importe quel ingénieur pourrait utiliser pour produire un prototype, comme le premier que j'ai montré pour l'éclairage de sécurité du vélo, et une nomenclature comme celle-ci, que n'importe quelle usine pourrait utiliser pour produire en série un produit. Notez en particulier les colonnes MOQ (quantité minimum de commande) et Lead Time. Ces colonnes ne sont pas pertinentes lorsque vous construisez des prototypes en faible volume, car vous achetez généralement des pièces auprès de distributeurs qui ont peu de restrictions de quantité minimale de commande et maintenez un stock pour les livraisons le lendemain. Cependant, lors du passage à la production, vous économisez beaucoup d'argent en réduisant les frais généraux du distributeur et en achetant via les canaux de vente en gros. Dans les canaux de vente en gros, les MOQ et les délais de livraison sont importants.

La bonne nouvelle est que l'usine indiquera le MOQ et le délai de livraison dans le cadre du processus de devis. Mais il vous sera utile de suivre ces paramètres depuis le début. Si le MOQ d'un composant particulier est très élevé, l'usine devra peut-être acheter un nombre massif de pièces excédentaires, ce qui augmentera le prix effectif du projet. Si le délai de livraison d'une pièce est très long, vous pouvez envisager de reconcevoir une pièce avec un délai de livraison plus court. L'utilisation de pièces avec des délais de livraison plus courts permet non seulement de gagner du temps, mais améliore également les flux de trésorerie : personne ne veut immobiliser des liquidités sur des composants à long délai de livraison quatre mois avant le chiffre d'affaires.

Cette nomenclature comprend également plusieurs éléments non électroniques, comme la boîte, une étiquette de code à barres, etc., qui ne figureraient pas sur la nomenclature du prototype technique. Ces divers éléments sont faciles à oublier, mais un manuel d'utilisation manquant dans une nomenclature initiale n'est souvent découvert qu'après l'ouverture de l'échantillon final pour approbation, ce qui entraîne une ruée de dernière minute pour intégrer le manuel dans le produit final. De nombreux produits ont été retardés simplement parce qu'un manuel d'utilisation ou une illustration de la boîte n'a pas été terminé et approuvé à temps, et c'est dommage d'avoir un inventaire d'une valeur de cent mille dollars qui tourne au ralenti dans un entrepôt faute d'un bout de papier.

Au-delà d'une nomenclature appropriée, fournir à l'usine des échantillons en or de votre produit ainsi que vos fichiers CAO est une autre bonne pratique. Ces prototypes fonctionnels permettent à l'usine de prendre des décisions plus judicieuses concernant toute ambiguïté dans la nomenclature soumise. Souder à la main une unité supplémentaire juste pour l'usine peut sembler ennuyeux, mais à mon avis, quelques heures de soudure valent mieux qu'une semaine d'échange d'e-mails avec l'usine.

note *Lorsque vous élaborez un modèle commercial, les pièces et l'emballage ne sont pas les seuls coûts à prendre en compte. Même cette nomenclature détaillée ne répertorie pas la marge d'usine, la main-d'œuvre pour l'assemblage, l'emballage, l'expédition, les droits, etc. Je discute de ces « coûts accessoires » dans « Choisir (et maintenir) un partenaire » à la page 107.*

Planifier et faire face au changement

Bien sûr, même si votre conception est parfaite et votre nomenclature idéale, votre conception devra peut-être encore changer si les fournisseurs *fin de vie (EOL)*, ou arrêter de fabriquer les composants que vous avez sélectionnés. Et avouons-le : il y a toujours une chance que vos hypothèses de conception ne survivent pas non plus au contact avec de vrais consommateurs.

Avant de franchir le seuil de la production, formalisez le processus de modification d'une conception avec l'usine. Il est préférable d'utiliser des informations écrites et formelles *ordres de modification technique (ECO)* pour informer l'usine de tout changement après le devis initial. Au minimum, voici ce qu'un modèle ECO devrait inclure :

- Les détails de chaque pièce modifiée et une brève explication de la raison pour laquelle le changement est nécessaire
- Un numéro de révision unique pour référencer facilement le changement ultérieur
- Une méthode pour enregistrer la réception par l'usine des documents ECO

Soyez minutieux avec les ECO, plutôt que de vous fier à des e-mails informels, sinon les acheteurs de votre usine pourraient acheter la mauvaise pièce. Pire encore, l'usine pourrait *installer* la mauvaise pièce et des lots entiers de votre produit devront être mis au rebut ou retravaillés. Même après avoir résolu un problème avec les ingénieurs de l'usine, je rédige toujours un ECO formel et le soumets au personnel de production pour formaliser les résultats. Je déteste la paperasse autant que le prochain ingénieur, mais en production, une petite erreur peut coûter des dizaines de milliers de dollars, et cette pensée me permet de rester discipliné en matière d'ECO.

Sur la page suivante se trouve un véritable ECO que j'ai émis et qui m'a permis d'économiser du temps et de l'argent.

Notez la date sur cet ECO : le 27 février 2014. Cet ECO a été émis juste avant le Nouvel An chinois, lorsque les usines partent en vacances pendant quelques semaines. Il y a un roulement important de main-d'œuvre non qualifiée dans les usines après les vacances, et il y a donc de nombreuses chances que les bons de travail soient perdus et oubliés. Craignant que l'ECO ne soit manqué, j'ai consulté les dirigeants après la reprise de la production de l'usine pour m'assurer que l'ECO ne soit pas oublié. Ils m'ont assuré que c'était appliqué, mais je ressentais toujours une vague paranoïa, j'ai donc demandé des photos du circuit imprimé pour confirmer. Effectivement, le premier lot de production ne comportait pas le changement dans mon ECO.

Grâce à l'ECO détaillé, l'usine a facilement reconnu son erreur, réparé l'intégralité du cycle de production et payé pour la retouche. Mais si j'avais envoyé l'ordre de modification dans un e-mail rapide sans faire référence à des lots ou des ordres de travail spécifiques, il aurait pu y avoir suffisamment d'ambiguïté pour que l'usine se libère des frais de retouche. L'usine aurait pu faire valoir qu'elle pensait que j'avais l'intention d'appliquer le changement à une future production, ou elle aurait pu simplement refuser de recevoir une commande confirmée, car les e-mails sont une forme de communication assez informelle. Quoi qu'il en soit, quelques minutes de documentation ont permis d'économiser des jours de négociation et des centaines de dollars en frais de retouche.

ENGINEERING CHANGE ORDER

Mr. Sutajio Ko
Sutajio Ko-Usagi Pte LTD
bunnie@████████.com

Date: 27 February 2014

Sutajio Ko-Usagi Pte LTD
bunnie@████████.com

ECO number: 0001 version: 2
 Project: ██████████
 Subassembly: ████████ sensor and microcontroller █████
 Reference PO: PO-0018 and PO-0016

Background

Per request by engineer █████, pull-ups on inputs to the microcontroller and trigger sticker are to be modified to enhance flexibility and better target user use-cases.

On the microcontroller, R2, R3, and R4 (all 22M, 5%) shall be omitted, to allow the inputs to be used in applications that bar the presence of a pull-up.

On the trigger, R16 shall be changed from 10k, 1% to 22M, 5%, to allow for resistive-touch style sensing of the input pin.

CHANGE ORDER DETAILS

ORIGINAL		NEW		Comments
Designator	Value	Designator	Value	
R2	22M, 5% 0603	R2	DNP	BOM change only
R3	22M, 5% 0603	R3	DNP	BOM change only
R4	22M, 5% 0603	R4	DNP	BOM change only
R16	10k, 1% 0603	R16	22M, 5% 0603	BOM change only

MATERIAL DISPOSITION

No extra material needs to be ordered to execute this change.

Excess material resulting from this change shall be held by █████ and applied to future builds. No expected change to PO or cost for assembly.

Version history

version 2 – changed 0805 to 0603 for part footprints, was a typo.

Exemple d'un ECO réel utilisé en production. Grâce au processus de documentation formelle, une production la confusion liée à cet ECO a été résolue en ma faveur.

Optimisation du processus: CONCEPTION POUR LA FABRICATION

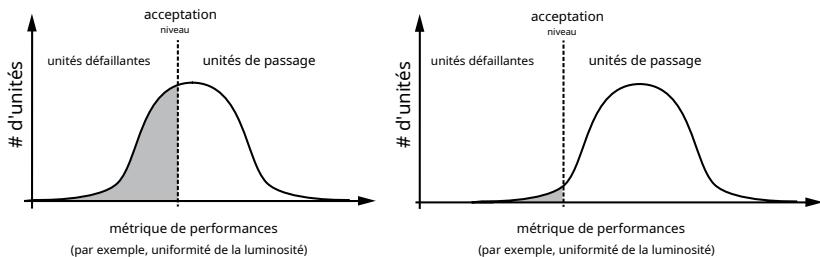
Pendant que vous concevez votre produit final et élaborez une nomenclature, prenez en compte *rendement*, le nombre de bonnes unités issues du processus de fabrication, est également important. Le rendement est un sujet ennuyeux pour de nombreux ingénieurs, mais pour les entrepreneurs,

le succès ou l'échec sera déterminé en partie par le fait qu'ils obtiennent un rendement raisonnable. Heureusement, vous pouvez améliorer votre rendement en concevant en tenant compte de cela.

pourquoi DFM ?

Contrairement aux logiciels, chaque copie d'un bien physique présente de légères imperfections. Parfois les imperfections s'annulent ; parfois, ils se regroupent et dégradent les performances. À mesure que le volume de production augmente, une fraction du produit finit toujours par devenir invendable. Dans une conception robuste, le taux de défaillance peut être si faible que les tests fonctionnels peuvent être simplifiés, entraînant ainsi de nouvelles réductions de coûts. En revanche, les conceptions sensibles aux tolérances des composants nécessitent des tests approfondis et subiront de lourdes pertes de rendement. La retouche des unités défectueuses entraîne des frais supplémentaires de main-d'œuvre et de pièces, ce qui finit par éroder les bénéfices.

Ainsi, la refonte pour améliorer la robustesse face aux tolérances normales de fabrication constitue un défi majeur pour passer du banc d'ingénierie à la production de masse. Ce processus est appelé *conception pour la fabrication (DFM)*.



À gauche, avant le DFM, près de la moitié des unités n'atteignent pas le niveau d'acceptation et échouent donc. C'est vrai, après DFM, le niveau d'acceptation est le même, mais les performances moyennes sont améliorées, ce qui conduit à la réussite de la plupart des unités.

Pour comprendre l'importance du DFM, considérez ces graphiques. Chacun représente une *courbe en cloche*, qui est une distribution statistique supposée d'un paramètre particulier. L'axe des x est un paramètre d'intérêt et l'axe des y est le nombre d'articles produits qui correspondent au paramètre donné. Par exemple, dans un complot

de la luminosité de milliers de LED, l'axe des x serait la luminosité et l'axe des y serait le nombre de LED qui atteignent une luminosité donnée. La position de la courbe en cloche par rapport aux critères de réussite/échec détermine le rendement net de production.

Sur la courbe de droite, la plupart des LED sont suffisamment lumineuses et la majeure partie du stock de production est livrable. Sur la courbe de gauche, peut-être 40 pour cent des LED passent. Étant donné que la plupart des entreprises de quincaillerie fonctionnent avec une marge brute d'environ 30 à 50 pour cent, la mise au rebut de 40 pour cent du matériel signifierait la fin de l'activité. Dans une telle situation, les seules options viables sont de consacrer du temps et des efforts à retravailler les LED jusqu'à ce qu'elles soient conformes ou de réduire les exigences de performance. Le produit ne serait pas d'une qualité aussi élevée qu'espérée, mais au moins l'entreprise pourrait continuer à fonctionner.

Tolérances à considérer

L'objectif de DFM est de garantir que votre produit satisfait toujours aux attentes et que vous ne soyez jamais confronté au choix peu recommandable de réduire les marges, d'abaisser les normes de qualité ou de faire faillite. Mais il y a certains aspects à prendre en compte lors de l'application du DFM.

TOLÉRANCES DES CI ÉLECTRONIQUES

Les tolérances des composants passifs sont les tolérances les plus évidentes à prendre en compte. Si la valeur réelle d'une résistance peut être de +/- 5 pour cent de sa valeur indiquée, assurez-vous que le reste de votre circuit peut faire face aux cas extrêmes.

Paramètres de la fiche technique des composants actifs, comme le gain de courant (hFE) pour les transistors bipolaires, la tension de seuil (V_t) pour les transistors à effet de champ (FET) et la tension de polarisation directe (V_F) pour les LED – peut également varier considérablement. Lisez toujours la fiche technique et surveillez les paramètres présentant une grande disparité entre leurs valeurs minimales et maximales, une différence souvent appelée *écart min-max*. Par exemple, le min-max sur hFE

pour le 2N3904 de Fairchild varie de 40 à 300, et le V_Fsur une LED ultra lumineuse de Kingbright est comprise entre 2 et 2,5 V.

Mis à part la tension de fonctionnement nominale, la tension nominale maximale d'un composant est particulièrement importante pour les condensateurs et les réseaux d'entrée. J'essaie d'utiliser des condensateurs évalués à deux fois la tension nominale ; par exemple, lorsque cela est possible, j'utilise des condensateurs 10 V pour les rails 5 V et des condensateurs 6,3 V pour les rails 3,3 V. Pour comprendre pourquoi, considérons les diélectriques de condensateurs céramiques, dont la capacité diminue lorsque la tension augmente. Dans les conceptions fonctionnant à proximité de la tension maximale d'un condensateur céramique, la capacité de fonctionnement de ce composant se situera à l'extrême négative de sa plage de tolérance. Aussi, *réseaux d'entrée* (toute partie du circuit sur laquelle un utilisateur peut brancher quelque chose) sont soumises à des décharges électrostatiques et à d'autres abus transitoires, alors portez une attention particulière aux valeurs nominales des condensateurs pour obtenir la fiabilité souhaitée.

Enfin, une fois que vous aurez une bonne idée des composants que vous utiliserez, portez une attention particulière aux largeurs de trace et aux variations de l'empilement de couches lors de la conception de votre PCB. Ceux-ci auront un impact sur les systèmes qui nécessitent une impédance adaptée ou qui gèrent des courants élevés.

TOLÉRANCES MÉCANIQUES

Les tolérances électroniques ne sont cependant pas la fin de vos soucis ; les tolérances mécaniques sont également importantes. Ni les PCB ni les boîtiers n'auront exactement la bonne taille, alors concevez votre boîtier avec une certaine marge de manœuvre. Si la conception de votre boîtier a une tolérance zéro pour les dimensions du PCB, la moitié du temps, l'usine forcera les PCB dans les boîtiers, lorsque le PCB est coupé un peu grand ou que le boîtier sort un peu petit. Cela peut provoquer des dommages mécaniques involontaires aux circuits ou au boîtier.

Et n'oubliez pas les imperfections cosmétiques ! Tout produit fabriqué est sujet à de petites imperfections, telles que de la poussière emprisonnée dans les plastiques, de petites rayures, des marques d'évier et des abrasions. Il est important d'élaborer les critères d'acceptation pour

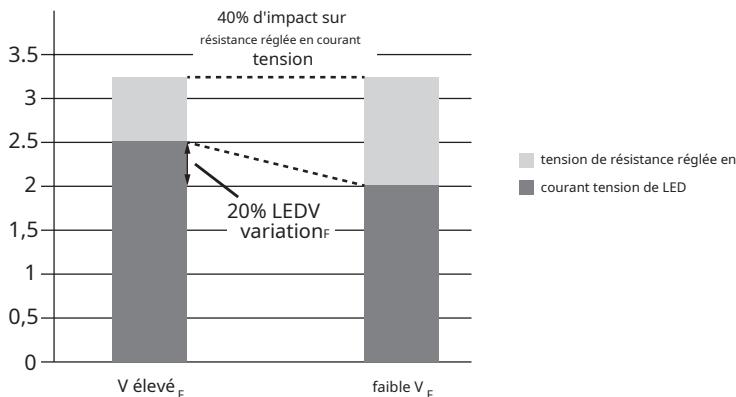
ces défauts avec l'usine à l'avance. Par exemple, vous pouvez indiquer à l'usine qu'une unité peut être considérée comme « bonne » si elle ne présente pas plus de deux imperfections de points de plus de 0,2 mm, aucune rayure de plus de 0,3 mm, et ainsi de suite. La plupart des usines ont adopté un système particulier pour décrire et appliquer ces normes. Si vous discutez de ces paramètres à l'avance, l'usine peut concevoir le processus de fabrication pour éviter de tels défauts, par opposition à l'alternative plus coûteuse consistant à construire des unités supplémentaires et à jeter celles qui ne répondent pas aux critères imposés tardivement.

Bien entendu, éviter les défauts n'est pas gratuit. Pour garder votre produit moins cher, évitez les finitions très brillantes et envisagez d'utiliser des finitions mates ou texturées qui cachent naturellement les imperfections.

suivre dfm vous aide à améliorer vos résultats

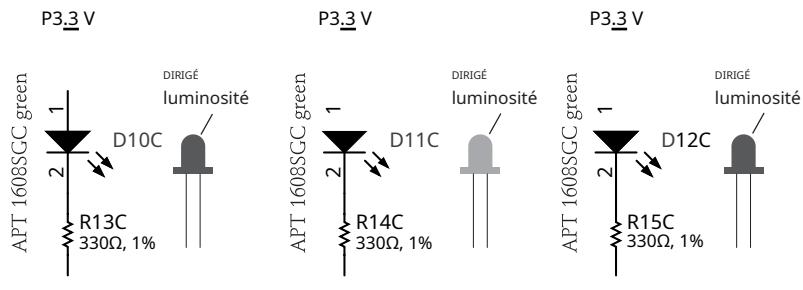
Pour imaginer DFM dans un scénario réel, revenez à l'étude de cas sur les clignotants de sécurité pour vélo dans « Comment établir une nomenclature » à la page 74. Supposons que la conception du prototype nécessite un réseau de trois LED en parallèle, chacune avec son propre résistance pour régler le courant. La *tension de polarisation directe*, ou V_F , d'une LED à une luminosité donnée peut varier d'environ 20 % entre les appareils ; dans ce cas, cette oscillation est de 2,0 à 2,5 V.

Une conception qui limite le courant vers les LED avec des résistances, appelée *limitation de courant résistif*, amplifiera cette variation. Cela se produit parce qu'un circuit efficace ferait chuter une minorité de la tension aux bornes de la résistance de limitation de courant, laissant le paramètre qui définit le courant (la chute de tension aux bornes de la résistance) plus sensible à la variation de V_F . Étant donné que la luminosité d'une LED n'est pas proportionnelle à la tension mais plutôt au courant qui la traverse, le réglage de la luminosité de la LED avec une limitation de courant résistif peut provoquer des incohérences choquantes dans la luminosité de la LED.



Comparaison de V_F élevé et faible V_F coins

Dans cet exemple, une LED V de 20 pour cent La variation (de 2,0 V à 2,5 V, selon les spécifications du fabricant de LED) entraîne une modification de 40 % de la tension aux bornes d'une résistance réglée en courant pour une alimentation fixe de 3,3 V. Cela entraînera une modification de 40 pour cent du courant circulant à travers la LED. Comme la luminosité est directement proportionnelle au courant, le changement se manifeste par une variation allant jusqu'à 40 % de la luminosité perçue entre les LED individuelles. Une conception comme celle-là peut bien fonctionner la plupart du temps ; le problème ne serait prononcé que lorsqu'un V_F élevé l'unité est observée à côté d'un faible V_F unité.



Courant de réglage pour les LED individuelles à l'aide de résistances peut entraîner des variations spectaculaires de luminosité.

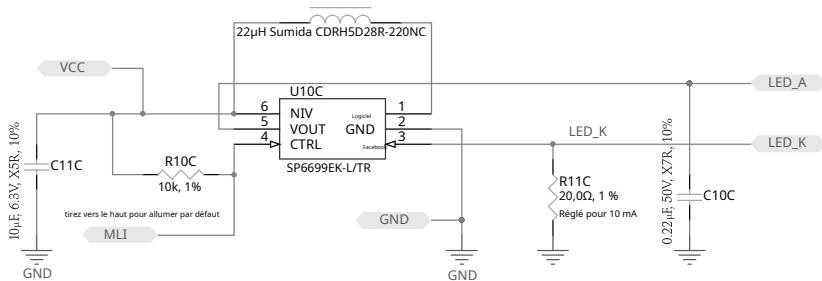
Les une ou deux unités préparées sur la paillasse du laboratoire pendant le développement ont peut-être fière allure, mais en production, une fraction significative peut présenter des problèmes d'uniformité de luminosité si graves que les unités doivent être rejetées. Comme la plupart des grandes entreprises de matériel informatique doivent survivre avec de maigres marges, perdre ne serait-ce que 10 % de leurs produits finis à cause de défauts est un résultat terrible.

Une solution provisoire consiste à retravailler les unités défaillantes. Une usine peut identifier une LED trop faible ou trop brillante dans un réseau et la remplacer par une LED qui correspond mieux à ses cohortes. Mais cette refonte augmenterait les coûts et entraînerait une facture inattendue et désagréable à la 11e heure d'un programme de fabrication. Les concepteurs naïfs peuvent être enclins à blâmer l'usine pour la mauvaise qualité et à se disputer pour savoir qui devrait en supporter le coût, mais il est préférable d'éviter de manière proactive ce genre de problèmes en soumettant chaque conception à un contrôle DFM et en utilisant un petit essai pilote pour vérifier le rendement, avant de découper tout un tas d'unités.

Le coût des pertes de rendement quantifie le montant à dépenser en circuits supplémentaires pour compenser la variabilité normale des composants. Par exemple, un produit avec un prix de 10 \$ *coût des marchandises vendues (COGS)* qui produit 80 % de bonnes unités a un coût effectif par unité vendable de 12,50 \$, calculé avec cette formule :

$$\text{Coût effectif} = \text{COGS} \times \text{nombre total d'unités construites} / \text{unités produites}$$

Augmenter le COGS de 2,50 \$ pour améliorer le rendement à 100 % vous permettrait d'atteindre le seuil de rentabilité. Mais en utilisant la même formule, dépenser 1 dollar supplémentaire en COGS pour améliorer le rendement à 99 % amélioreraient en réalité le résultat net de 1,38 \$.



Un circuit pour régler le courant sur trois LED, créé en appliquant DFM

Dans le cas de l'éclairage de sécurité pour vélo, cet dollar pourrait être dépensé pour un circuit intégré de régulateur élévateur à retour de courant comme le SP6699EK-L/TR, permettant aux LED d'être empilées en série plutôt qu'en parallèle. La conception serait beaucoup plus compliquée et coûteuse que l'utilisation de résistances individuelles, mais elle garantirait que chaque LED soit traversée par un courant constant et identique en pilotant les trois LED dans un circuit en série avec une boucle de rétroaction à courant fixe. Cela éliminerait pratiquement la variation de luminosité. Bien que le coût du régulateur élévateur soit bien supérieur au centime dépensé pour trois LED limitant le courant, l'amélioration du rendement de fabrication fait plus que compenser les coûts supplémentaires des composants. En fait, cette astuce est une pratique courante pour les applications qui nécessitent une bonne uniformité de luminosité des LED, comme dans le rétroéclairage des panneaux LCD. Un rétroéclairage de téléphone portable typique utilise environ une douzaine de LED, mais, grâce à des circuits comme celui-ci, vous ne voyez jamais de taches claires ou sombres malgré les grandes variations de V_f entre les LED constitutives.

Le produit derrière votre produit

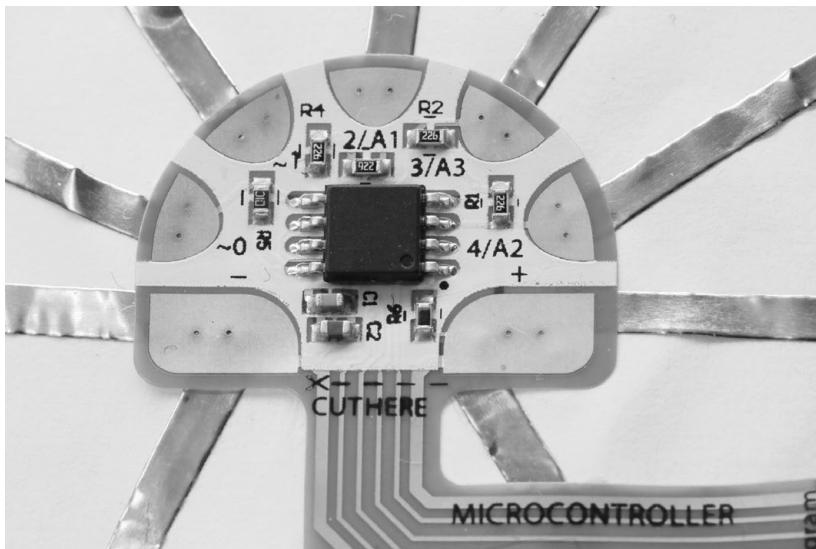
Outre la gestion des tolérances, une autre responsabilité de conception souvent négligée est le programme de test. Une usine ne peut détecter que les problèmes qu'elle est chargée de rechercher. Par conséquent, chaque

La fonctionnalité d'un produit doit être testée, aussi triviale soit-elle. Par exemple, sur un appareil volumineux, chaque fonctionnalité destinée à l'utilisateur faisait l'objet d'un test explicite en usine, y compris l'écran LCD, l'écran tactile, l'audio, le microphone, tous les ports d'extension (USB, audio), la batterie, les boutons, les boutons, etc. Je me suis assuré que même les boutons les plus simples étaient testés. Bien qu'il soit tentant de ne pas tester des composants aussi simples, je garantis que tout ce qui n'est pas testé entraînera des retours.

J'aime appeler le testeur d'usine « le produit derrière votre produit ». En effet, dans certains cas, le testeur d'usine est plus compliqué et plus difficile à concevoir que le produit que vous essayez de vendre. Cela est particulièrement vrai pour les produits simples.

UN PROGRAMME DE TEST RÉEL-MONDE

À titre d'étude de cas, considérons cet autocollant de microcontrôleur de Chibitronics, un projet dont je parle en détail au chapitre 8.



Un circuit de microcontrôleur - sur un autocollant

Ce circuit est très simple : il se compose uniquement d'un microcontrôleur AVR 8 bits et d'une poignée de résistances et de condensateurs.

(Il s'agit également du même produit mentionné dans l'exemple ECO de la page 84.) Mon collaborateur et moi avons dessiné dans Adobe Illustrator pendant environ deux jours avant de dériver la forme finale de ce produit. Ensuite, nous avons passé environ une journée chez Altium à concevoir le circuit et environ une semaine à coder dans l'IDE Arduino pour créer son firmware. Au total, le processus de développement a duré environ deux semaines. Pour la production, le microcontrôleur est associé à un ensemble de capteurs capables de traiter le son, la lumière et le toucher et, par conséquent, le programme de test s'exécute sur les quatre en même temps.



La machine de test pour l'autocollant du microcontrôleur Chibitronics

Le banc de test illustré se compose d'un ordinateur ARM 32 bits exécutant Linux avec une interface utilisateur graphique rendue sur un moniteur HDMI. Derrière cela se trouve un FPGA, des adaptateurs électroniques pour créer des formes d'onde analogiques à des fins de test et une broche pogo mécanique.

montage pour poser l'autocollant. En décomposant le processus de conception de cette plate-forme en ses composants, nous avons consacré :

- Plusieurs jours de conception chez Altium
- Une semaine de programmation dans l'ISE Xilinx pour le FPGA
- Quelques semaines de piratage des pilotes Linux
- Quelques mois de hacking en C++, pour créer le framework d'intégration Qt
- Quelques jours dans SolidWorks, pour créer l'appareil mécanique qui maintiendra le tout ensemble

Au total, la création du testeur pour l'autocollant du microcontrôleur a pris plus de deux mois, contre deux semaines pour créer le produit lui-même.

Pourquoi faire tous ces efforts ? Parce que le temps, c'est de l'argent, et que les défauts et les retours sont coûteux à traiter. Le testeur peut traiter une carte en moins de 30 secondes ; et pendant ces 30 secondes, le testeur doit programmer deux microcontrôleurs ; tester les capteurs de lumière, de son et de toucher ; et confirmez le fonctionnement à 5 V et 3 V. Un test manuel pour toutes ces opérations pourrait nécessiter plusieurs minutes de travail qualifié et ne serait pas aussi fiable. Grâce à ce testeur, nous n'avons traité aucun retour pour cause de matériel défectueux. De plus, l'interface utilisateur graphique du testeur permet à l'usine de déterminer très facilement quel point du circuit est défaillant, facilitant ainsi la reprise rapide de tout matériau imparfait.

GUIDELINES POUR CRÉER UN PROGRAMME DE TEST

En règle générale, pour chaque produit que vous fabriquez, vous fabriquez en réalité deux produits liés : un pour l'utilisateur final et un test pour l'usine. À bien des égards, le test destiné à l'usine doit être aussi convivial et infaillible que le produit lui-même ; après tout, les tests ne sont pas effectués par des ingénieurs électriens. Mais les tests associés

le produit sera de plus en plus rapide à construire si des fonctionnalités de test adéquates sont conçues dans le produit grand public.

Et non, ne sous-traitez pas le programme de test à l'usine, même si l'usine propose ce service. Souvent, l'usine ne comprend pas votre intention de conception, de sorte que ses programmes de test seront soit inefficaces, soit testeront un mauvais comportement. Les usines sont également incitées à faire passer autant de matériaux que possible, le plus rapidement possible, de sorte que leurs programmes de tests ont tendance à être primitifs et inadéquats.

Voici quelques lignes directrices à suivre lors de la conception de votre propre programme :

efforcez-vous d'obtenir une couverture de fonctionnalités à 100 %.

Ne négligez pas les fonctionnalités simples ou secondaires telles que les LED d'état ou un capteur de tension interne. Lors de la création de la liste de tests, j'adopte une approche « extérieur/intérieur ». Tout d'abord, regardez le produit de l'extérieur : énumérez toutes les façons dont un consommateur peut interagir avec lui. Votre programme de test aborde-t-il toutes les surfaces d'interaction, même si ce n'est que superficiellement ? Est-ce que chaque LED est allumée, chaque bouton enfoncé, chaque capteur stimulé et chaque périphérique de mémoire touché ? Chaque point de votre matériel marketing a-t-il été confirmé ? Promettre une sensibilité RF « de classe mondiale » est différent de la simple publicité de la présence d'une radio. Ensuite, pensez à l'intérieur : à partir du schéma, examinez chaque port et considérez les noeuds internes clés à surveiller. Si le produit dispose d'un microcontrôleur, vérifiez quels pilotes sont chargés pour vérifier la liste de tests et assurez-vous qu'aucun composant n'est oublié.

minimiser les efforts de configuration incrémentiels.

Optimisez le temps nécessaire à la configuration du test pour chaque unité. Cela se fait souvent au moyen de gabarits utilisant des broches pogo ou des réseaux de connecteurs pré-alignés. Un test qui nécessite qu'un opérateur sonde manuellement une douzaine de points de test avec un

multimètre ou insérer une douzaine de connecteurs prend du temps et est sujet aux erreurs. La plupart des usines en Chine peuvent aider à concevoir le gabarit pour un coût nominal, mais la conception du gabarit est plus facile et plus efficace si la conception elle-même comprend déjà des points de test adéquats.

automatiser la procédure de test en un flux linéaire.

Un test idéal s'exécute en appuyant sur un seul bouton et produit un résultat de réussite ou d'échec. Dans la pratique, il y a toujours des points d'arrêt qui nécessitent l'intervention de l'opérateur, mais essayez de ne pas en exiger trop. Par exemple, n'exigez pas qu'un opérateur saisisse ou sélectionne un SSID dans une liste lors de chaque test de connectivité Wi-Fi. Au lieu de cela, corrigez le SSID de la cible de test et codez en dur cette valeur dans un script de test afin que le cycle de connexion soit automatique.

Utilisez des icônes et des couleurs, et non du texte, pour communiquer avec les opérateurs.

Il n'est pas garanti que tous les opérateurs soient alphabétisés dans une langue donnée.

utiliser des journaux d'audit.

Enregistrez les résultats des tests corrélés aux numéros de série des appareils en incorporant un lecteur de codes-barres dans le banc de test. Vous pouvez également demander à l'appareil d'imprimer un coupon avec un code unique horodaté ou un journal d'audit stocké localement pour prouver quelles unités ont réussi un test. Les journaux vous aideront à comprendre ce qui n'a pas fonctionné lorsqu'un consommateur renvoie un produit défectueux et vous permettront de vérifier rapidement que tous les produits ont été testés. Après une période de huit heures de tests, un opérateur peut commettre des erreurs, comme par exemple mettre accidentellement une unité défectueuse dans la poubelle « bonne ». Être capable de vérifier que chaque produit expédié a été soumis et a réussi le test complet peut vous aider à identifier et à isoler de tels problèmes.

Fournissez un mécanisme de mise à jour simple.

Comme tout programme, les programmes de test comportent des bugs. Les tests doivent également évoluer à mesure que votre produit est corrigé et mis à niveau. Disposez d'un mécanisme pour mettre à jour et corriger les programmes de test sans visiter l'usine en personne. Beaucoup de mes appareils de test peuvent « téléphoner à la maison » via un VPN, et je peux me connecter en SSH au gabarit lui-même pour corriger les bugs. Même mon gabarit le plus simple utilise un ordinateur portable Linux (ou équivalent) en son cœur. Cela est dû en partie au fait que Linux est plus facile à mettre à jour et à entretenir qu'un microcontrôleur sur mesure qui nécessite un adaptateur spécial pour les mises à jour du micrologiciel.

Ces directives sont faciles à mettre en œuvre si votre produit est conçu dans un souci de testabilité. La plupart des produits que je conçois fonctionnent sous Linux et j'exploite le processeur intégré au produit lui-même pour exécuter la plupart des tests et aider à gérer l'interface utilisateur des tests. Pour les produits dépourvus de surfaces d'interaction utilisateur, un téléphone Android ou un ordinateur portable connecté via Wi-Fi ou série peut être utilisé pour restituer l'interface utilisateur de test.

Tests ou validation

Les tests de production visent à vérifier les erreurs d'assemblage, et non les variations paramétriques ou les problèmes de conception. Si un test élimine des appareils en raison de variations paramétriques normales des composants, achetez de meilleurs composants ou refaites votre conception.

Pour les produits grand public, vous n'avez pas besoin d'exécuter un test RAM complet de cinq minutes sur chaque unité. En théorie, votre produit doit être suffisamment bien conçu pour que, s'il est correctement soudé, la RAM fasse son travail. Un test rapide pour vérifier qu'il n'y a pas de broches d'adresse bloquées ou ouvertes suffit souvent. Les fournisseurs de puces de marque ont généralement un taux de défectuosité très faible, vous ne validez donc pas le silicium ; au lieu de cela, vous validez les joints de soudure et les connecteurs et vérifiez les composants manquants ou échangés. (Mais si vous achetez un clone

puces ou appareils hors marque, remarqués ou partiellement testés pour réduire les coûts, je recommande de créer un mini programme de validation pour ces composants.)

VALI DAT ER UN COMMUTATEUR

Pour illustrer la différence entre les tests de production et la validation, voyons comment les deux peuvent fonctionner pour un commutateur.

Un test de production pour un interrupteur peut simplement demander à l'opérateur d'appuyer plusieurs fois sur l'interrupteur et de vérifier que la sensation est bonne et que le contact électrique est établi via un simple indicateur numérique. Un test de validation, en revanche, peut impliquer de sélectionner quelques appareils au hasard, de mesurer la résistance de contact du commutateur avec un multimètre précis à cinq chiffres significatifs (également appelé *multimètre à cinq chiffres*), en soumettant les appareils à une humidité et une température élevées pendant quelques jours, puis en plaçant les appareils dans un gabarit automatisé qui fait fonctionner les commutateurs 10 000 fois. Enfin, vous pouvez mesurer à nouveau la résistance de contact du commutateur avec un multimètre à cinq chiffres et noter toute dégradation de la résistance de contact à l'état fermé.

De toute évidence, ce niveau de validation ne peut pas être effectué sur tous les appareils fabriqués. Le programme de validation évalue plutôt les performances du commutateur sur la durée de vie prévue du produit. Le test de production, en revanche, garantit simplement que le commutateur est correctement assemblé.

note *Il est recommandé de réexécuter les tests de validation sur quelques unités échantillonées au hasard sur plusieurs milliers d'unités produites. Il existe des formules et des tableaux que vous pouvez utiliser pour calculer la quantité d'échantillonnage dont vous avez besoin pour atteindre un certain niveau de qualité ; recherchez simplement en ligne « tableau de test de validation de fabrication ».*

Mais quelle quantité de tests est suffisante ? Vous pouvez dériver un seuil de test grâce à un argument de coût. Chaque essai supplémentaire entraîne des coûts d'équipement, des coûts d'ingénierie et le

coût variable du temps de test. En conséquence, les tests sont soumis à des rendements décroissants : à un moment donné, il revient moins cher de simplement accepter un retour de produit que de tester davantage.

Naturellement, la barre des tests est beaucoup plus élevée pour les équipements médicaux ou industriels, car la responsabilité associée à un équipement défectueux est également beaucoup plus élevée. De même, un produit nouveau destiné à être offert peut nécessiter beaucoup moins de tests.

CONCEPTION DE VOTRE GABARIT D'ESSAI

Une dernière réflexion : appliquez toujours une ingénierie solide à la conception de votre gabarit de test. Lorsque je travaillais sur le Chumby 8, il y avait un problème où un adaptateur de câble plat flexible à 50 broches présentait des défaillances aléatoires des joints de soudure à froid. J'ai demandé à l'usine de réaliser un test pour valider les adaptateurs. Leur solution consistait à accrocher des LED à chaque broche de l'adaptateur, à appliquer une tension de test d'un côté du câble et à rechercher les LED qui ne s'allumaient pas de l'autre côté. Les joints de soudure à froid n'étaient pas simplement ouverts ou fermés ; certains avaient juste une grande résistance. Suffisamment de courant circuleraient pour allumer une LED, mais il y avait également suffisamment de résistance pour provoquer un défaut de conception.

L'usine a proposé d'acheter 50 multimètres et de les fixer sur chaque broche pour vérifier la résistance manuellement, ce qui aurait été coûteux et sujet aux erreurs. Il n'est pas raisonnable de s'attendre à ce qu'un opérateur regarde 50 écrans des centaines de fois par jour et soit capable de trouver de manière fiable les numéros non conformes aux spécifications. Au lieu de cela, j'ai choisi de connecter en série les connexions à travers l'adaptateur et d'utiliser un seul multimètre pour vérifier la résistance nette de la connexion en série. En mettant les connexions en série, j'ai pu vérifier les 50 connexions avec une seule mesure numérique, par opposition à l'observation subjective de la luminosité d'une LED.

Comme l'illustre ce cas, il existe de bonnes et de mauvaises façons de mettre en œuvre même un test aussi simple que la vérification des joints de soudure à froid sur un adaptateur de câble. Des composants toujours plus compliqués

nécessitent des tests de plus en plus subtils, et il est réellement utile d'utiliser des compétences en ingénierie pour élaborer des tests efficaces mais infaillibles.

TROUVER UN ÉQUILIBRE DANS LA CONCEPTION INDUSTRIELLE

Même si votre produit réussit tous les tests de validation avec brio, il risque de ne pas réussir si les consommateurs ne le veulent pas.

N'oubliez pas : le sexe fait vendre. À un facteur deux environ, les performances d'un processeur ou la quantité de RAM dans un boîtier sont moins importantes pour un consommateur type que l'apparence de l'appareil. Les appareils Apple coûtent cher, en partie à cause de leur design industriel astucieux, et de nombreux concepteurs de produits visent à imiter le succès de Sir Jonathan Ive, directeur du design d'Apple, dans leurs propres produits.

Il existe de nombreuses écoles de pensée dans *design industriel*, le processus de conception de l'apparence d'un produit avant de le fabriquer. Une école invoque le designer monastique, qui crée un concept beau et pur, et les ingénieurs de production, qui gâchent la pureté du design lorsqu'ils le peaufinent pour en améliorer la fonctionnalité. Une autre école fait appel au concepteur pragmatique, qui travaille en étroite collaboration avec les ingénieurs de production pour trouver des compromis concrets afin de produire un design peu coûteux et à haut rendement.

D'après mon expérience, aucun des deux extrêmes n'est convaincant. L'approche monastique aboutit souvent à un produit non fabriqué, soit tardif à commercialiser, soit coûteux à produire. L'approche pragmatique aboutit souvent à un produit qui semble si bon marché que les consommateurs ont du mal à lui attribuer une valeur significative. Le vrai truc, c'est de comprendre comment trouver un équilibre entre les deux, et cela commence par entrer dans l'usine et comprendre comment les choses sont faites. Voici quelques exemples de ce que j'ai appris sur la manière dont différents processus d'usine affectent cet équilibre, grâce à Chumby et Arduino.

Le potelé Couper et finir

Les garnitures et les finitions sont difficiles, ce qui en fait des points de distinction dans l'apparence d'un produit. Lorsque je travaillais chez Chumby, nous voulions que le produit final ait une finition minimaliste et honnête. (*Des finitions honnêtes* présentent les propriétés naturelles des systèmes de matériaux en jeu et évitent l'utilisation de peintures et de décalcomanies.) Les designs minimalistes sont très difficiles à fabriquer car avec moins de fonctionnalités, même les plus petites imperfections ressortent. Les finitions honnêtes peuvent également être difficiles, car toutes les fraises, portes, éviers, tricots, incisions et lignes d'écoulement qui sont des réalités de la vie dans la fabrication sont mises à nu devant le consommateur. De ce fait, cette école de design nécessite des outils de fabrication de qualité, constamment vérifiés et entretenus tout au long de la production.

Si vous n'avez pas les moyens financiers suffisants pour investir dans de nouveaux équipements et capacités au nom de votre usine (c'est-à-dire si vous n'êtes pas un *Fortune500*), la première étape consiste à apprendre le vocabulaire disponible. UN *vocabulaire du design* est défini par les capacités de l'usine ou des usines produisant les marchandises, comme les matériaux que vous pouvez obtenir, la finition possible, les tolérances réalisables et la technologie de fixation existante. Tout cela dépend fortement des processus disponibles dans votre usine.

Par conséquent, je trouve que visiter une usine en personne au début du processus de conception permet d'obtenir une meilleure conception. Après une visite d'usine, vous éliminerez une partie du vocabulaire du design, mais vous découvrirez également un nouveau vocabulaire. Les ingénieurs qui travaillent quotidiennement dans l'usine développent des innovations de processus qui peuvent ouvrir de nouvelles possibilités de conception que vous ne découvrirez que si vous visitez l'usine.

Le Chumby One est un exemple concret de l'impact que les processus de fabrication peuvent avoir sur les résultats de la conception. Dans le concept art original, un surlignage bleu a été ajouté autour du bord avant pour ressembler à une bulle, comme celles utilisées dans

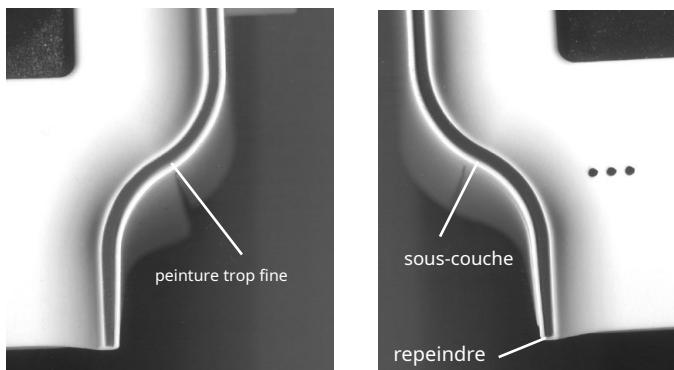
bandes dessinées. L'idée était que le potelé légende votre monde avec des extraits d'Internet.



Une unité finie et potelée

Mais appliquer une bordure bleue sur une surface surélevée était très difficile. La première usine a utilisé de la peinture, car le bord avant n'était pas suffisamment plat pour permettre la sérigraphie. *Tampographie*(aussi connu sous le nom *tampographie*, un processus dans lequel l'encre est transférée d'un tampon en silicone à un objet) peut gérer des surfaces courbes, mais l'alignement de la crête sur le Chumby One n'était pas assez bon, et le moindre saignement d'encre sur le bord semblait terrible de côté. De même, les décalcomanies et les autocollants ne parvenaient pas à obtenir l'alignement souhaité. Finalement, un petit canal a été creusé pour contenir la peinture, et l'usine a créé le point culminant avec un pochoir et de la peinture en aérosol.

Le rendement était terrible. Dans certains lots, plus de 40 pour cent des caisses Chumby One ont été jetées à cause d'erreurs de peinture. Heureusement, le plastique est bon marché, donc jeter une caisse sur deux après la peinture a un coût net d'environ 0,35 \$.



Deux unités One potelées avec de mauvais travaux de peinture

À mi-chemin de la production, nous avons commencé à produire des unités Chumby One dans une usine de deuxième source. La deuxième usine disposait d'équipements de moulage de plastique différents et, contrairement à la première usine, cette installation pouvait faire *moules double-shot*. Un moule à double injection nécessite deux fois plus d'outils qu'un moule à injection à une seule injection, mais il peut mouler par injection deux couleurs différentes, voire deux matériaux différents, dans le même moule. Dans la nouvelle usine, nous avons essayé un procédé à double injection au lieu de peindre la fine bande bleue.

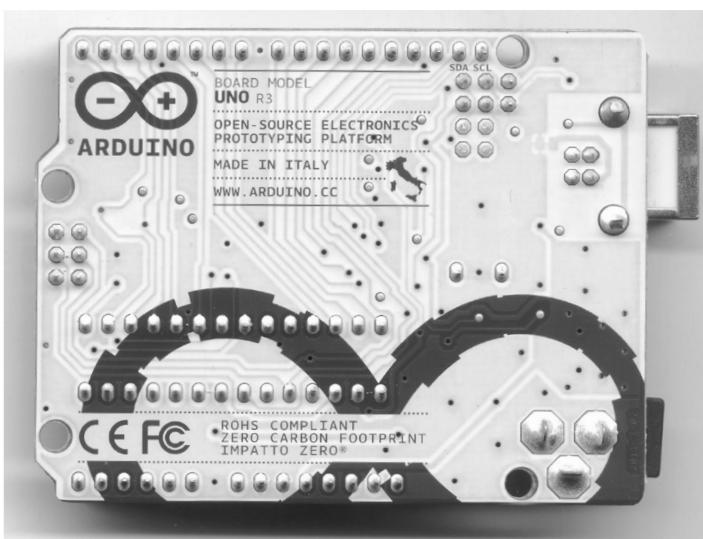


Une crête Chumby One parfaite, issue du processus de moulage par double injection

Les résultats ont été époustouflants. Chaque unité sortait de la ligne avec une ligne bleue nette, et aucune peinture ne signifiait une finition plus propre et plus honnête. Mais le coût par caisse est passé à 0,94 \$ pièce avec le processus le plus coûteux, malgré un rendement de 100 %. Il aurait été moins coûteux de jeter plus de la moitié des boîtiers peints, mais même les boîtiers les mieux peints ne pouvaient se comparer à la qualité de la finition fournie par l'outil à double coup.

L'art de la sérigraphie de l'arduino Uno

La carte mère Arduino est un autre excellent exemple de la façon dont la modification d'un processus d'usine peut améliorer l'apparence d'un produit. L'illustration merveilleusement détaillée au verso, arborant un contour de l'Italie et des lettrages très fins, n'est pas sérigraphiée. L'usine qui fabrique ces cartes applique en fait deux couches de masque de soudure : une bleue et une blanche.



Le dessous d'un Arduino Uno R3

Lorsque les cartes Arduino sont fabriquées, le masque de soudure est appliqué via le processus photolithographique que j'ai décrit dans « Là où naissent les Arduinos » à la page 44. Ce processus donne lieu à des illustrations avec une résolution, une cohérence et une bien meilleure qualité.

et d'alignement qu'une sérigraphie. Et comme l'apparence d'un Arduino est le circuit imprimé, cet art donne au produit une apparence distinctive et de haute qualité difficile à copier à l'aide de méthodes de traitement conventionnelles.

Ainsi, la capacité de processus d'une usine (qu'il s'agisse de peinture ou de moulage à double injection, ou de double masquage par soudure ou de sérigraphie) peut avoir un effet réel sur la qualité perçue d'un produit, sans avoir un impact énorme sur le coût. Cependant, l'usine peut ne pas apprécier tout le potentiel de ses processus, et jusqu'à ce qu'un concepteur interagisse directement avec l'installation, votre produit ne peut pas non plus exploiter ce potentiel.

Malheureusement, de nombreux designers ne visitent une usine que lorsque quelque chose ne va pas. À ce stade, les outils sont supprimés, et même si vous découvrez un processus sympa qui pourrait résoudre tous vos problèmes, il est souvent trop tard.

mon processus de conception

Le design est une activité intensément personnelle et, par conséquent, chaque designer développera son propre processus. Si vous avez besoin d'un cadre pour développer le vôtre, voici le processus général que je pourrais utiliser pour développer un produit avec un budget de démarrage serré :

1. Commencez avec un carnet de croquis. Décidez de l'âme et de l'identité du design, puis choisissez un système de matériaux et un vocabulaire adaptés à votre concept. Mais n'en tombez pas amoureux, car cela devra peut-être changer.
2. Décomposez la conception par système matériel et identifiez une usine capable de produire chaque système matériel.
3. Visitez l'installation et notez ce qui se passe réellement dans les lignes de production. Ne supposez rien en vous basant sur les unités uniques de la salle d'échantillonnage. La pratique rend parfait, et des opérateurs aux ingénieurs, les ouvriers d'usine exécutent les procédures qu'ils exécutent quotidiennement bien mieux qu'ils ne le feraient avec une capacité obscure qu'ils n'utilisent pas souvent.

4. Réévaluez votre conception sur la base d'une nouvelle compréhension de ce qui est possible en usine, et répétez. Revenez à l'étape 1 si de petits ajustements ne suffisent pas. C'est à ce stade qu'il est le plus facile de faire des compromis sans sacrifier la pureté de votre design.
5. Ébauchez les détails de votre conception. Choisissez les surfaces de glissement, les lignes de séparation où les pièces du boîtier s'emboîtent, les finitions, les systèmes de fixation, etc. en fonction de ce que l'usine sait faire de mieux.
6. Transmettez un dessin révisé à l'usine et travaillez avec eux pour finaliser les détails tels que les angles de dépouille, les surfaces de fixation, les nervures internes, etc.
7. Validez la conception à l'aide d'une impression 3D et de vérifications approfondies du modèle 3D.
8. Identifiez les caractéristiques sujettes aux erreurs de tolérance et ajustez l'outil de fabrication initial de manière à ce que la tolérance favorise les modifications qui vous aideront à minimiser les modifications coûteuses de l'outil. Par exemple, considérons le moulage par injection, où un outil en acier est le négatif du plastique qu'il moule. Il est plus facile de retirer l'acier d'un outil (ajouter du plastique) que d'ajouter de l'acier (retirer le plastique). Ciblez donc le tir d'essai initial pour utiliser plus d'acier sur les dimensions critiques, plutôt que trop peu. Un bouton est un mécanisme qui bénéficie d'un réglage comme celui-ci : il est difficile de prédire exactement la sensation qu'un bouton ressentira à partir d'impressions CAO ou 3D, et perfectionner la sensation tactile nécessite généralement un petit ajustement de l'outil.

Bien entendu, ce processus n'est pas un ensemble de règles strictes à suivre. Vous devrez peut-être ajouter ou répéter des étapes en fonction de votre expérience avec votre usine, mais si vous choisissez une bonne usine, cela devrait être un bon point de départ.

choisir (et maintenir) un partenaire

Tout comme les baguettes de *Harry Potter*, une bonne usine vous choisit autant que vous la choisissez, alors oubliez le terme *fournisseur* et remplacez-le par *partenaire*. Si vous le faites correctement, vous ne vous contentez pas de donner des instructions à l'usine ; il devrait y avoir un dialogue franc sur les compromis impliqués et sur la manière dont le processus de fabrication peut être amélioré. C'est la seule façon d'obtenir le meilleur produit possible.

Une relation saine avec une usine peut également conduire à de meilleures conditions de paiement, ce qui améliore votre trésorerie. Dans certains cas, le crédit d'usine peut remplacer directement la levée de capital-risque, l'obtention de prêts ou l'obtention d'un financement Kickstarter. En conséquence, je traite les bonnes usines avec le même respect que les investisseurs et les partenaires d'une entreprise. Pour avoir une idée de ce que cela signifie, voici quelques conseils sur la façon de choisir et de travailler avec votre usine.

Conseils pour nouer une relation avec une usine

Tout d'abord, choisissez l'usine de la bonne taille pour votre produit. Si vous travaillez avec une usine trop grande, vous risquez de vous perdre dans la bureaucratie et d'être exclu de la chaîne de production par de plus gros clients à des moments critiques. Travaillez avec une usine trop petite et elle ne sera pas en mesure de fournir les services dont vous avez besoin. En règle générale, je choisis l'installation la plus grande où je peux avoir un accès direct au *interdiction laotienne*(patron d'usine), car si vous ne pouvez pas parler au patron, vous n'êtes personne. C'est bon signe si le lao ban est présent lors de la première réunion pour vous faire visiter et poser des questions astucieuses sur votre entreprise pendant le déjeuner.

Deuxièmement, suivez l'adage « La lumière du soleil est le meilleur désinfectant ». Si une usine ne propose pas une nomenclature ouverte, dans laquelle le coût de chaque composant, processus et marge est explicitement divulgué, je ne travaillerai pas avec elle. Les discussions sur la réduction des coûts ne peuvent pas

fonctionner sans transparence, car il y aurait trop d'endroits où enterrer les coûts autrement. De même, si les discussions sur les coûts se transforment en un jeu de taupe, où des réductions de coûts sur un élément de campagne apparaissent inexplicablement sur un autre, fuyez.

Ce dernier conseil s'applique principalement aux startups. À vos débuts, tout le monde sait que vos réserves de liquidités sont limitées. Même si vous venez de clôturer une grosse ronde de financement, entrer dans une usine avec des sacs d'argent n'est pas une approche durable. Les usines intelligentes savent que vos réserves de liquidités sont limitées, et si la plus grande valeur que vous proposez d'apporter à l'usine est constituée de tonnes d'argent, votre valeur est limitée ; dans le meilleur des cas, cela ne sera vraiment rentable que des années plus tard, lorsque le produit sera expédié en volumes élevés. En conséquence, il est utile d'essayer de fournir de la valeur à l'usine de manière non monétaire.

Aussi idiot que cela puisse paraître, être une personne agréable et constructive contribue grandement à gagner les faveurs de votre établissement. La fabrication est une activité très stressante et à faible marge, et tout le monde dans l'usine doit faire face à des problèmes difficiles toute la journée. Je constate que j'obtiens un meilleur service, même meilleur que celui des clients aux poches plus profondes, si je traite mes usines comme je traiterais une connaissance amicale, et non comme un esclave ou un simple sous-traitant. Des erreurs se produisent, et être capable de transformer une mauvaise situation en une expérience d'apprentissage vous sera bénéfique le jour où vous ferez une erreur stupide (et peut-être coûteuse).

Conseils sur les devis

L'ouverture mise à part, sachez que si une citation semble trop belle pour être vraie, c'est souvent le cas. Lorsque vous négociez les prix avec une usine, prenez du recul et vérifiez si le devis a du sens. Les usines qui perdent de l'argent dans le cadre d'un accord ne reculeront devant rien pour récupérer cet argent, et de nombreuses histoires d'horreur dans le secteur manufacturier trouvent leur origine dans des structures de coûts malsaines. La première prérogative d'une usine est de survivre, même si cela implique de mélanger en lots les unités défectueuses pour les booster.

marge, ou affecter des ingénieurs novices à un projet en difficulté afin de mieux monétiser leurs ingénieurs chevronnés sur des clients plus rentables.

Lorsque vous évaluez un devis, assurez-vous qu'il comprend les éléments suivants :

- Le prix de chaque pièce
- L'excédent de matériau pour le travail dû à *quantités minimales de commande (MOQ)*
- Les coûts de main-d'œuvre
- Les frais généraux de l'usine
- *Ingénierie non récurrente (NRE)frais*

Examinons quelques-uns de ces éléments en détail.

GARDER UN ŒIL SUR LES EXCÈS

Excès est le résultat de ce que j'appelle le problème des « hot-dogs et petits pains ». Les hot-dogs sont vendus en paquets de 10, mais les petits pains sont livrés en paquets de 8. À moins que vous n'achetiez 40 portions, vous aurez des restes de petits pains ou de hot-dogs.

De même, de nombreux composants ne sont disponibles qu'en bobines de 3 000 pièces. Une construction de 10 000 pièces nécessite 4 rouleaux pour un total de 12 000 pièces, laissant 2 000 pièces en excédent. Les usines peuvent acheter des pièces en ruban coupé ou en bobines partielles, mais le coût par pièce de ruban coupé est beaucoup plus élevé, car le risque d'excédent de matériau est transféré au distributeur.

Cependant, les excès ne sont pas que mauvais : ils peuvent être intégrés aux futures séries d'un produit. Tant que votre produit maintient un taux de production décent, les stocks excédentaires de composants devraient se transformer régulièrement en liquidités. Cependant, à un moment donné, la production s'arrêtera ou s'arrêtera, et la facture de l'excédent arrivera, mettant à mal les flux de trésorerie. Si un devis ne comporte pas de colonne excédentaire, l'usine peut vous facturer la bobine complète mais conserver l'excédent pour ses propres besoins ; c'est là que de nombreux acteurs du marché gris

les marchandises à Shenzhen viennent. Ils peuvent également simplement envoyer une facture inattendue plus tard, qui arrive souvent au pire moment possible : les revenus du produit ont déjà cessé, mais les factures continuent d'arriver. Quoi qu'il en soit, il est préférable de connaître d'avance l'intégralité du berceau. modèle économique jusqu'au tombeau.

COMPRENDRE LES COÛTS DE MAIN-D'ŒUVRE

Les coûts de main d'œuvre sont diablement difficiles à estimer, mais la bonne nouvelle est que pour les assemblages de haute technologie, la main d'œuvre ne représente généralement qu'une petite fraction du coût total. Le coût de la main-d'œuvre pour l'assemblage de petits volumes d'une carte simple comportant 200 pièces peut être d'environ 2 ou 3 dollars en Chine, tandis que le coût de l'assemblage aux États-Unis est plus proche de 20 ou 30 dollars. Même si les prix du travail doublent du jour au lendemain en Chine et diminuent de moitié aux États-Unis, la Chine pourrait rester compétitive.

Cela contraste avec les biens de moindre valeur qui quittent la Chine (comme les textiles), où la valeur de base de la matière première est déjà faible, de sorte que les coûts de main-d'œuvre représentent une part importante du coût du produit final. En général, je ne discute pas beaucoup des coûts de main-d'œuvre, car le résultat final d'une main-d'œuvre lésinée est souvent une baisse de qualité, et une pression trop forte sur les coûts de main-d'œuvre peut forcer l'usine à réduire la qualité de vie des travailleurs en réduisant les avantages sociaux.

LES SURCHARGES DE L'USINE

Négocier la marge d'une usine est également un art, et il n'existe pas de règles strictes. Je vais vous donner des conseils ici, mais il y a toujours des exceptions à la règle, et chaque usine peut vous proposer une offre spéciale en fonction des circonstances. En fin de compte, il est important d'avoir une vue d'ensemble lors de l'examen du devis d'une usine et de faire preuve de bon sens.

Ce qui constitue une marge équitable pour une usine dépend de la valeur qu'elle ajoute à votre produit et du volume de production. La définition de « marge » varie également selon l'établissement. Certaines installations incluent la ferraille, la manutention des frais généraux,

et même les dépenses de recherche et développement dans la marge, tandis que d'autres peuvent les ventiler sur des lignes distinctes.

En général, la marge varie entre des pourcentages à un chiffre et à deux chiffres, en fonction du volume, de la valeur ajoutée et de la complexité du projet. Pour les lots de production en très faible quantité (moins de 1 000 pièces), vous pourrez également être facturé par lot. *frais de ligne*. Ces frais couvrent en partie le coût de mise en place d'une chaîne de montage pour la démonter après quelques heures. Le débit d'une ligne peut être très rapide, produisant des centaines, voire des milliers d'unités par jour, mais sa mise en place prend également des jours.

FRAIS D'INGÉNIERIE NON RÉCURRENTS

Les coûts NRE sont des frais ponctuels requis pour mettre en place une série de production, tels que les pochoirs, la programmation SMT, les gabarits et l'équipement de test. Notez que la réutilisation des équipements de test entre clients est considérée comme une mauvaise pratique ; si un multimètre est requis dans le cadre d'un test de production, ne soyez pas surpris si une facture pour un multimètre est collée sur le NRE. Les clients ont des normes très différentes en matière de maintenance et d'utilisation des équipements de test, de sorte que les bonnes usines ne prennent aucun risque.

conseils divers

À qui parler et dans quelle mesure l'usine est ouverte en matière de coûts sont certainement des préoccupations majeures, mais avec l'expérience, vous en apprendrez beaucoup plus sur la façon de traiter avec des usines qui n'entrent dans aucune catégorie particulière. Pour terminer, voici quelques autres points importants à garder à l'esprit lors de la sélection d'une usine.

SCR AP ET RENDEMENT

Idéalement, vous ne paieriez une usine que pour les bons articles livrés, et l'usine supporterait le fardeau des unités défectueuses. Cela incite l'usine à maintenir une qualité de production élevée, car chaque pour cent de défectuosité ronge sa marge. Mais si votre conception présente un défaut ou est trop difficile à construire et que le taux de défectuosité est élevé, l'usine peut commencer à expédier.

des unités de moindre qualité comme mesure désespérée pour atteindre les objectifs de production et de marge. Elle pourrait également commencer à vendre des produits défectueux sur le marché gris pour récupérer ses coûts, ce qui entraînerait des problèmes de réputation de marque à terme.

Pour éviter de telles situations, convenez à l'avance avec l'usine de la manière de gérer les déchets ou les pertes de rendement exceptionnelles. Cela peut inclure, par exemple, un élément de ligne dédié « rebut » à l'intérieur du devis pour traiter explicitement les défauts.

COMMANDER PLUS D'UNITS QUE LA DEMANDE PROUVÉE

Malgré tous les efforts de chacun, des erreurs se produiront, les clients recevront des appareils défectueux et vous aurez besoin d'unités de travail supplémentaires pour les retours et les échanges. Commander 1 000 pièces pour réaliser une campagne Kickstarter de 1 000 pièces signifie que si les clients souhaitent retourner ou échanger des unités cassées lors de l'expédition, tout ce que vous pouvez faire est d'effectuer un remboursement. Il n'est tout simplement pas pratique d'allumer l'usine pour fabriquer une douzaine d'unités de remplacement.

En règle générale, je commande quelques pour cent en plus du nombre d'unités que je dois livrer aux clients, afin d'avoir du stock disponible pour gérer les retours et les échanges. Les unités qui ne sont pas utilisées par le processus de retour peuvent être transformées en prêts de démonstration ou en cadeaux de développement commercial pour générer la prochaine série de commandes !

FRAIS D'EXPÉDITION

Gardez un œil sur les frais d'expédition. Ces frais ne sont généralement pas intégrés dans le devis d'une usine, mais ils ont un impact sur vos résultats, encore plus pour les produits à faible volume. L'expédition FedEx est un excellent moyen de gagner du temps, mais c'est aussi très coûteux. Les frais de messagerie peuvent facilement effacer les bénéfices d'un petit projet, alors gérez ces coûts.

note *Les coursiers offrent des réductions aux expéditeurs fréquents, mais vous devez appeler pour négocier les tarifs spéciaux.*

FACTEUR DE DROITS D'IMPORTATION

Les composants importés en Chine sans licence d'importation sont soumis à un droit obligatoire d'environ 20 % sur leur valeur. La règle générale pour la Chine est que les importations sont taxées et les exportations exemptées. Si un objet est accidentellement expédié de l'autre côté de la frontière vers Hong Kong, attendez-vous également à payer des droits pour le renvoyer en Chine.

Demandez à un courtier en douane de trouver des solutions pour économiser de l'argent ; par exemple, certains courtiers peuvent faire taxer les marchandises en fonction de leur poids et non de leur valeur, ce qui est généralement une bonne affaire pour la microélectronique. Je n'ai pas compris toutes les règles douanières, car elles semblent être une cible mouvante. Chaque mois, il semble y avoir une nouvelle règle, une amende, des frais exceptionnels ou un tarif à gérer. Il existe également de nombreuses façons louche d'acheminer des marchandises en Chine, mais je dors mieux la nuit en sachant que je fais de mon mieux pour respecter toutes les règles.

Les devis n'incluent pas les droits de douane, car les usines supposent par défaut que vous disposerez d'une licence d'importation. Les licences d'importation permettent l'importation de marchandises en franchise de droits. Mais les licences d'importation coûtent quelques milliers de dollars, prennent des semaines à traiter et ne laissent aucune place à la flexibilité, car elles sont liées à une nomenclature exacte du produit. De petites commandes de modifications techniques peuvent invalider une licence d'importation. J'ai connu des agents des douanes qui comptent le nombre de capuchons de découplage sur un PCB, et si cela ne correspond pas au nombre indiqué sur la licence, une amende est imposée et la licence est invalidée. Même des écarts dans le matériau utilisé pour recouvrir une boîte décorative peuvent invalider une licence. En bref, ce système de licences d'importation favorise les produits à volume élevé et punit les producteurs à faible volume, alors soyez prudent.

PENSÉES FINALES

Aller en Chine pour fabriquer des produits n'est clairement pas pour tout le monde. Surtout si vous êtes basé aux États-Unis, les frais généraux liés aux frais de messagerie, aux déplacements, aux tâches et aux conférences téléphoniques de fin de soirée s'accumulent rapidement. En règle générale, une petite entreprise basée aux États-Unis

Il est souvent préférable d'assembler des PCB aux États-Unis pour des volumes inférieurs à 1 000 unités, et vous ne commencerez à voir des avantages évidents qu'à partir de volumes de 5 000 à 10 000 unités peut-être.

Ces calculs évoluent en faveur de la Chine à mesure que des processus tels que le moulage par injection et l'assemblage de châssis entrent en jeu, en raison de l'expertise des usines chinoises dans ces processus à forte intensité de main-d'œuvre. Le seuil de rentabilité peut également être beaucoup plus bas si vous vivez en Chine ou à proximité, car les frais de messagerie, les déplacements et l'impact du fuseau horaire ne représentent qu'une petite fraction de ce qu'ils seraient aux États-Unis. À cela s'ajoute le fait que les locaux sont plus efficaces pour exploiter l'écosystème de composants en Chine, ce qui entraîne des réductions supplémentaires des coûts par rapport à une conception produite à partir de pièces uniquement américaines.

D'un autre côté, des assemblages ou des systèmes physiquement volumineux construits à l'aide de nombreux composants passibles de taxes peuvent être moins chers à construire au niveau national, car ils permettent d'économiser sur les frais d'expédition et les tarifs. En fin de compte, gardez l'esprit ouvert et essayez de considérer tous les coûts et avantages secondaires possibles de la fabrication nationale par rapport à la fabrication étrangère avant de décider où garer la production.