



# ESD

## Le destroyer fantôme

### Foudroiemnt spontané des composants

Figure 1. Le tragique accident à l'arrivée du Hindenburg à Lakehurst (image : Sam Shere).

**Peter Beil** (Allemagne)

La taille de gravure des puces se réduit sans cesse, et elles sont de plus en plus vulnérables aux dommages causés par les décharges électrostatiques. Intéressons-nous à la nature de cette menace bien réelle et aux moyens de l'écartier.

Le voyage transatlantique du dirigeable *Hindenburg* en 1937 s'est achevé par une catastrophe. Au cours de l'approche du pylône d'amarrage de *Lakehurst*, en Amérique, les 200 000 m<sup>3</sup> d'hydrogène, qui sustentaient le Hindenburg, ont pris feu (**fig. 1**). La source d'inflammation n'a jamais été officiellement attribuée, mais de nombreux experts soupçonnent qu'il s'agit d'une décharge d'électricité statique entre la structure du dirigeable et le pylône d'acier. Ce type de phénomène est appelé *ESD* (*ElectroStatic Discharge*), en français décharge électrostatique, mais *DES* n'est pas usité.

#### Qu'est-ce que l'ESD ?

Il s'agit d'une décharge électrique soudaine entre deux objets ou corps qui, portant des charges électriques différentes, sont portés à des potentiels différents. Cette différence de potentiel (*ddp* en abrégé) ou tension est neutralisée lorsque les deux corps se rapprochent assez pour qu'une décharge se produise, souvent avec une étincelle et un craquement. Une méthode courante pour donner une charge électrique à un objet est de le frotter sur un matériau isolant, c'est l'effet *triboélectrique*. Tout un chacun a remarqué ce

phénomène en se peignant ou brossant les cheveux par temps sec. Marcher sur un tapis en matière synthétique ou quitter le siège d'une voiture communique aussi une charge au corps. Après, en touchant de la main un autre objet conducteur par ex. une poignée de porte (**fig. 2.**) de charge différente, on peut ressentir une décharge au bout du doigt, car les deux charges se neutralisent. Il est probable qu'à l'amarrage du Hindenburg, une étincelle jaillit et enflamma l'hydrogène. La surface de friction sur l'air du zeppelin est énorme. La ddp entre l'enveloppe et le pylône a pu facilement atteindre quelques centaines de milliers de volts et le pic de courant pendant la décharge a pu être assez élevé.

À plus petite échelle, ce phénomène se remarque déjà souvent, par ex. en enlevant un pull en coton porté sur un maillot de corps en fibres synthétiques, on entend distinctement un craquement. Les ddp produites par ce geste atteignent facilement quelques kV. La nuit, avec les yeux habitués à l'obscurité, on perçoit ces minuscules éclairs dès 5 kV. Les chaussures de sport sont presque toujours faites de matériaux synthétiques ; marcher peut entraîner une charge de 15 kV sur sol en plastique dur et atteindre 25 kV sur tapis.

Dans nos activités quotidiennes, nos mouvements produisent des charges électrostatiques. Ce phénomène est particulièrement gênant par faible humidité, par ex. dans les pièces et espaces climatisés ou chauffés. On s'en rend rarement compte, mais le simple fait de se lever d'une chaise et de s'y rasseoir peut produire une différence de potentiel de 15 kV. Pour ressentir une décharge provenant d'un seul point isolé sur le corps, il faut que la ddp dépasse 2 à 3000 V. À plus faible ddp, la décharge passe le plus souvent inaperçue.

En introduisant certains de ces chiffres dans le modèle standard HBM (*Human Body Model*) [1] (voir en français <https://cutt.ly/lbKjtUw>), on conclut que le modèle électrique équivalent d'un corps humain a une capacité variant de 100 à 300 pF. Dans l'hypothèse où la peau a une résistance moyenne de contact d'1,5 kΩ env., on doit s'attendre à ce qu'une décharge sous une ddp de 15 kV produise une pointe de courant atteignant 10 A durant quelques dizaines de ns.

## L'impact sur l'électronique

Tout électronicien amateur ou professionnel qui travaille avec des composants de faible puissance doit prendre garde à ces décharges indésirables. Même si nous n'en sommes pas conscients, les décharges proches du seuil de perception humaine peuvent avoir un effet catastrophique sur les microstructures électroniques. Les manipulations sans précaution ont déjà détruit d'innombrables puces. Toucher de la main un circuit intégré moderne peut entraîner une décharge statique destructrice dans ce composant. À notre échelle macroscopique, elle équivaut à un coup de foudre sur un arbre (**fig. 3.**).

Bien sûr, la ddp n'est pas le seul élément à prendre en compte ; il faut aussi considérer l'énergie dissipée pendant le processus d'annulation de la ddp. L'ESD est un phénomène transitoire qui ne dure que quelques nanosecondes, mais les structures autour d'une zone d'entrée de CI dans la puce ne mesurent que quelques microns. À 15 kV et 150 pF, selon la formule  $E = \frac{1}{2} C \times V^2$ , l'énergie stockée par le condensateur humain est de 17 mJ env. Bien que ce chiffre soit assez faible, la brièveté de la décharge se traduit par une puissance instantanée très élevée, de l'ordre du kW, et une densité de puissance très élevée parcourt les microstructures.



Figure 2. Une décharge électrostatique peut être douloureuse. Méfiez-vous de cette poignée ! (Cette photo et suivantes : Beil & Kaiser)

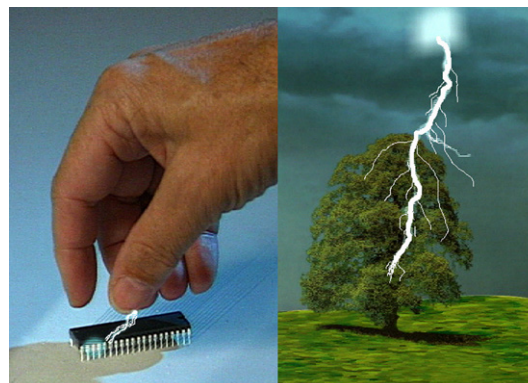


Figure 3. Un doigt chargé peut avoir le même effet sur un CI qu'un nuage d'orage sur un arbre.

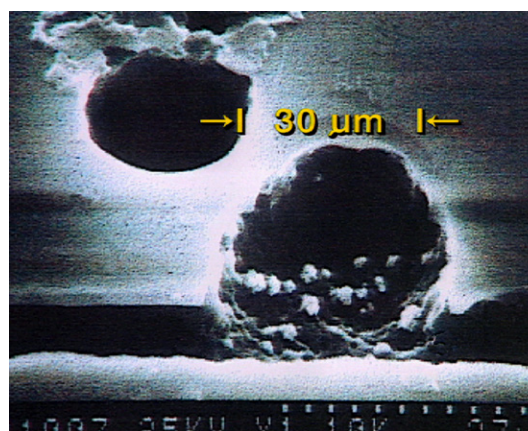


Figure 4. Image au microscope électronique des dommages causés par une ESD.

L'observation au microscope électronique des dommages dus à ces décharges révèle des connexions calcinées, des cratères et restes carbonisés de la micro-explosion produite sur le silicium (**fig. 4.**), rappelant un coup de foudre, à microéchelle. Il faut noter que les CI hautement intégrés où nous gravons désormais des nanostructures, ne sont pas les seuls concernés : les diodes, LED, MOSFET et même les semi-conducteurs de puissance le sont aussi.

Les décharges de « faible » ddp autour de 1 kV que nous ne pouvons pas percevoir nous-mêmes peuvent détruire beaucoup de composants actifs. Un tel dommage passe donc souvent inaperçu. Il est visible si un composant entier tombe en panne, mais si une petite partie d'un CI ou une fonction est affectée, il peut rester longtemps caché.





Figure 5. Lieu de travail équipé de toutes les mesures anti-ESD.



Figure 6. Logo officiel de l'ESD.

Les conséquences peuvent être graves, voire mortelles, si le composant endommagé est par ex. utilisé dans une application cruciale de sécurité : équipement de surveillance laser utilisé pour de délicates procédures cardiaques ou commande de déploiement d'airbags exécuté lors d'une collision automobile.

### Protection contre les ESD

Pour réduire les dommages qu'une ESD peut infliger à un appareil électronique, il est important que le personnel manipulant des composants soit conscient du risque et applique des mesures efficaces pour le réduire. Chez les fondeurs, de la fabrication des galettes au test des composants en passant par le back-end, chaque étape est conçue de manière à éliminer tout risque d'endommager des composants par accumulation de charges. Un CI peut être implanté dans un système de contrôle de sécurité crucial dont la fiabilité est d'une importance vitale. Même chez les électroniciens amateurs, une bonne assimilation de l'ESD peut éviter bien des défaillances soudaines de CI et des déconvenues.

Les fondeurs et concepteurs de CI estiment ce problème assez important pour imaginer et intégrer des protections dès le stade de la conception des puces. Ces circuits de protection sont intégrés à la gravure des CI. Cela s'appelle le *durcissement ESD*. Toutefois, les CI ne sont pas protégés contre tous les phénomènes ESD. À mesure que la finesse de gravure et le nombre de composants des puces de générations successives augmentent, les distances entre les éléments se réduisent et la vulnérabilité aux décharges électrostatiques s'accroît. Pour les microcontrôleurs, des circuits de suppression externes sont aussi utilisés pour écrêter les pointes de tension. Semblables aux diodes Zener, ils entrent en conduction lorsqu'un signal d'entrée approche d'un niveau haut ou bas spécifié. Leur temps de réponse est très court et ils absorbent des charges relativement élevées. Malheureusement, même ces dispositifs ne garantissent pas une protection absolue. Un article détaillé [2] a déjà été publié à ce sujet dans Elektor.

Une exigence de base pour manipuler des CI à haute densité est une zone protégée contre les ESD. Dans cet environnement, des mesures

sont mises en œuvre pour combattre l'apparition des charges statiques et faire qu'elles soient déchargées au potentiel de la terre de manière contrôlée (**fig. 5.**). Seul un personnel spécialisé, dûment formé et équipé, peut accéder aux zones marquées du logo illustré à la **figure 6**. Les espaces anti-ESD sont généralement équipés d'un revêtement de sol conducteur mis à la terre. Les étagères et surfaces de travail ont toutes des résistances de fuite  $< 100 \text{ k}\Omega$  afin d'amortir toute apparition soudaine de charges et garantir que les charges puissent se dissiper lentement. Les matériaux présentant une faible résistance ohmique surfacique réduisent l'accumulation d'électricité statique et la mise à la terre laisse les charges s'écouler vers le potentiel de la terre.

Les étagères mobiles, les chariots et les chaises ont des surfaces et des roulettes conductrices. Idem pour les outils et autres fers à souder. Les poignées isolées en plastique de l'outillage à main sont susceptibles de porter des charges statiques élevées. Il est donc recommandé d'utiliser uniquement des matériaux conducteurs d'électricité statique assurant l'égalisation en douceur des charges entre la main, l'outil et le composant.

Mieux vaut savoir que ces outils conducteurs ne sont pas adaptés à une utilisation avec des tensions  $> 25 \text{ V}$ , ce qui signifie qu'ils ne sont pas conformes à la norme VDE d'Allemagne !

Les brucelles et autres outils pointus méritent une attention particulière à cet égard ; les formes vives (pointes et angles) ont la faculté de concentrer les porteurs de charge électrique ce qui peut entraîner des décharges et étincelles, même à relativement faible ddp. Si vous travaillez avec des composants sensibles, il est essentiel de porter un bracelet (**fig. 7.**) relié à un point de mise à la terre spécifique.

Dans certains environnements, tels que les salles blanches, l'emploi de matériaux susceptibles de garder une charge statique est inévitable en raison de l'ingénierie des processus. Un flux d'air ionisé combat l'accumulation de charges sur une surface isolante, on place donc des ioniseurs en sortie de climatiseur ; c'est la méthode de choix si la mise à la terre classique ne peut être mise en œuvre (**fig. 8.**). L'ionisation de l'air n'est qu'un complément et ne doit jamais être considérée comme un substitut des mesures de protection ESD classiques.

## ESD et assemblage des cartes imprimées

Les robots de placement de composants éviteront tout mouvement ou glissement inutile du composant susceptible de faire naître une charge sur le composant. Aujourd'hui, on utilise principalement des robots appliquant la méthode *pick-and-place* : un bras de préhension saisit le composant et le place sur la carte. Les capteurs de la pince mesurent les propriétés du composant à placer et le rejettent s'il n'est pas conforme aux spécifications.

Toute personne entrant dans une zone de sécurité ESD est obligée de porter chaussures et vêtements spéciaux. Une barrière d'entrée se charge de vérifier que tout visiteur respecte la règle ; l'accès n'est accordé que si la mesure de sa conductivité est conforme. Cette mesure, effectuée à l'aide d'une plaque au sol pour les pieds et une autre pour les mains (**fig. 9.**), commande l'ouverture ou le blocage de la barrière. Le cas échéant, les visiteurs sont munis d'une bande de décharge des chaussures et d'une blouse de travail en coton. Celle-ci doit d'ailleurs être complètement fermée pour littéralement confiner les charges statiques : toute charge sera piégée côté intérieur de la combinaison. En salle blanche, des restrictions particulières s'appliquent dans les zones de production de semi-conducteurs. Il faut porter des

combinaisons couvrant tout le corps, à l'exception des yeux et des mains. Des fibres de carbone conductrices sont introduites dans le tissu dont ces combinaisons sont faites (**fig. 10**). Il peut être nécessaire de porter des doigts ou des gants dissipateurs.

Dans d'autres situations les phénomènes ESD indésirables peuvent être visibles ou même audibles : les boîtes de film 35 mm contiennent une bobine de film plastique recouvert d'une émulsion photosensible. Si l'air est sec, de minuscules décharges peuvent se produire là où les surfaces du film se séparent lors du tournage. La trace de ces éclairs apparaîtra sur le tirage lorsque le film sera développé. Un phénomène analogue peut arriver lors des prises de son sur bande magnétique, surtout si elle est large et qu'elle avance à vitesse élevée. L'enregistrement peut souffrir d'un léger crépitement que l'on peut supprimer avec un filtre adéquat dans le circuit audio. Retour à l'électronique...

Les phénomènes ESD sont par nature transitoires et la possibilité d'enregistrer leurs profils de courant et de tension n'est que très récente, grâce aux oscilloscopes à mémoire rapides avec échantillonnage  $> 1$  GHz. Des intervalles d'échantillonnage  $< 1$  ns sont requis avec ces phénomènes très brefs. L'intensité du champ peut être mesurée, à l'aide d'un électromètre. Toutes ces mesures sont décrites dans la spécification [3].

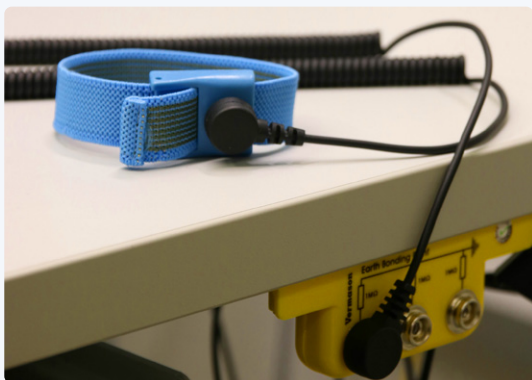


Figure 7. Bracelet mis à la terre.

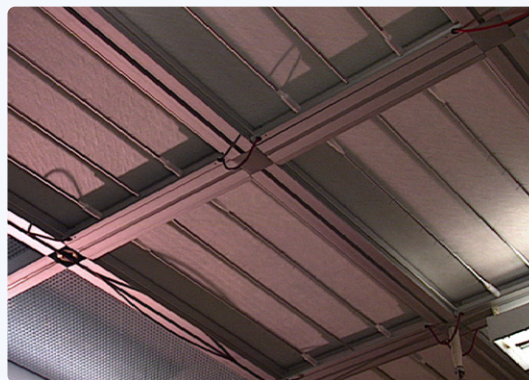


Figure 8. Ventilation ionisante dans le plafond d'une salle de production de puces.



Figure 9. Barrière de contrôle de la conductivité.



Figure 10. Équipement de salle blanche.

## L'ESD et le petit laboratoire

Les électroniciens amateurs et les exploitants de petits labos se demanderont s'il faut prendre ce sujet autant au sérieux. Soyons clairs : les mêmes lois physiques s'appliquent à la maison ainsi que dans les halls de production industriels. Ne lésinez pas sur les mesures de protection anti-ESD. Soyez conscient des risques. Il n'est sans doute pas indispensable d'investir dans autant de matériel onéreux que l'industrie, mais au moins, vous réduirez les risques de dommages en suivant ces règles d'or :

- Même dans un petit laboratoire d'électronique, on peut « désamorcer » le sol en y plaçant un tapis conducteur relié à la terre.
- Idem pour le plan de travail : il est assez bon marché d'y installer un tapis conducteur.
- Un bracelet relié à un point de masse commun est une assurance-vie pour les composants fragiles.
- Tout fer à souder digne de ce nom, même semi-professionnel, doit être doté d'une connexion à la terre et les outils sont disponibles avec des poignées qui dissipent les charges statiques.
- Faites très attention en utilisant des brucelles à pointe acérée.
- Les roulettes de tous les tabourets, chaises, armoires et étagères doivent être de type « conductrice des ESD ».
- Les composants fragiles sont fournis dans un emballage conducteur. Ils doivent y rester jusqu'à leur montage.
- Vérifiez l'absence de trous et déchirures dans les sacs de protection ESD et les boîtes de rangement.

S'assurer qu'un composant sorti de son emballage de protection est déplacé le moins possible, et ça va de soi, qu'aucune de ses bornes de connexion ne peut établir de contact, est une stratégie ESD sûre. Le simple fait de renverser des composants sur une surface isolante peut – par malchance – produire des ddp potentiellement dommageables. Des brucelles et pinces appropriées sont disponibles pour la manipulation et le montage des composants. L'investissement que représentent ces outils sera amplement remboursé à long terme. Même s'ils sont confortables, il vaut mieux éviter de porter des vêtements de sport ; ils sont invariablement en matière synthétique. Choisissez des combinaisons ou blouses antistatiques par nature et veillez à ce qu'elles soient boutonnées et ne bâillent pas lorsque vous vous déplacez. Veillez à la propreté de l'espace de travail ; nettoyez-en les surfaces ; ôtez les projections de soudure et copeaux de métal ; nettoyez régulièrement les roulettes de chaise et le sol (ne le cirez pas). L'utilisation de microcomposants complexes dans les petits labos d'électronique peut être source de déconvenues et de regrets si on n'utilise pas les outils adéquats pour manipuler les composants

## Mots clés

ESD	Décharge électrostatique
ESA	<i>Electrostatic Area</i> (zone protégée contre l'ESD)
ESDS	Sensible aux ESD
Salle blanche	Environnement contrôlé à faibles polluants aériens tels que poussières et microbes en suspension. Utilisé pour la fabrication de puces électroniques.
Wafer	Galette de silicium, le substrat où les puces sont gravées.
Front End	Étape de gravure des puces ; dopage de la galette pour produire des zones conductrices.
Back End	Étape de gravure des puces ; contrôle des galettes, découpage en dés et test final des puces.
HBM	Modèle électrique du corps humain ( <i>Human Body Model</i> ).

et monter les cartes électroniques. Il y a de fortes chances que les informations fournies ici contribuent à prolonger la durée de vie de quelques CI coûteux et à réduire les recherches de défauts longues et exaspérantes. ❏

(200607-04)

## Des questions, des commentaires ?

Envoyez un courriel à la rédaction d'Elektor ([redaction@elektor.fr](mailto:redaction@elektor.fr)).

## Contributions

Texte : **Peter Beil**  
Rédaction : **Thomas Scherer**

Mise en page : **Harmen Heida**  
Traduction : **Yves Georges**



## PRODUITS

- **Jeu de tournevis ESD Bernstein 4-620 (6 pièces)**  
<https://www.elektor.fr/bernstein-4-620-esd-screwdriver-set-6-pieces>
- **Porte-outils Vario Bernstein 2100 avec 6 outils ESD**  
<https://www.elektor.fr/bernstein-2100-esd-tool-holder-vario-6-tools>

## LIENS

- [1] **HBM** : [https://en.wikipedia.org/wiki/Human-body\\_model](https://en.wikipedia.org/wiki/Human-body_model)
- [2] **P. Krüger, « protection active anti décharges électrostatiques », Elektor 01-02/2014** : [www.elektormagazine.fr/130221](http://www.elektormagazine.fr/130221)
- [3] **Association ESD (États-Unis)** : [www.esda.org/about-esd/esd-fundamentals/part-6-esd-standards/](http://www.esda.org/about-esd/esd-fundamentals/part-6-esd-standards/)