

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche scientifique
Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Nabeul
Département de Génie Electrique

SUPPORT DU COURS

**Option : Fabrication Maintenance des Systèmes automatisés de Fabrication
des Cartes Electroniques (MSAFCE)**

***Règles de protection des
produits sensibles au DES***

Enseigné par :

Ben Salem Jamel

Année Universitaire : 2013-2014

INTRODUCTION

Le cours Règles de protection des produits sensibles au DES c'est une matière d'une unité d'enseignement de grande importance c'est l'Hygiène et la Sécurité, elle fait partie du programme de licence appliqué co-construite pour les étudiants du 3ème niveau en génie électrique (MSAFCE)

Les objectifs de ce module est de:

- Comprendre l'origine de l'ESD et les problèmes qu'elle génère.
- Savoir comment s'en protéger.
- Connaître les équipements de protection et savoir les utiliser correctement.
- Donner une approche globale des phénomènes électrostatiques et de leurs conséquences dans l'industrie électronique.
- Définir les explications suivant les normes en vigueur (CEI/EN/NFEN 61340-5-1&2 – ANSI/ESD S20.20) et applications pratiques

L'ELECTRICITE STATIQUE

I. Définition

Les atomes qui composent l'univers sont faits d'électrons chargés négativement qui se déplacent autour d'un noyau composé de nucléons. Il existe deux types de nucléons : les protons, chargés positivement, et les neutrons électriquement neutres. Le nombre d'électrons étant égal au nombre de protons.

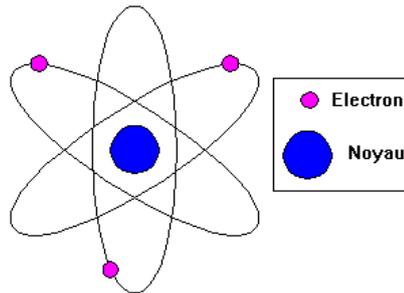


figure.1 composition de l'atome

On parle d'électricité « statique » car les charges électriques ne peuvent pas circuler : elles sont piégées dans des matériaux isolants (plastique, verre...) qui résistent à la circulation des charges.

II. Electricité : historique

500 avant JC : Thalès découvre l'électricité statique en frottant un morceau d'ambre avec de la laine.

1752 : Franklin, un scientifique américain, découvre la nature électrique des éclairs et invente le paratonnerre.

1785 : Charles Coulomb, un physicien français, définit la quantité électrique, et les forces électrostatiques.

1799 : Alessandro Volta, physicien italien, fabrique la première pile.

1820 : André-Marie Ampère, physicien français, énonce la théorie de l'électricité produite par le magnétisme.

1831 : Joseph Henry, physicien américain, et Mikaël Faraday, physicien anglais, découvrent chacun de leur côté les bobines d'induction : premiers générateurs d'électricité.

1881 : En Grande-Bretagne, construction de la première centrale électrique.

1951 : Aux Etats-Unis, production de la première électricité d'origine nucléaire.

III. LA Foudre

Titus Lucretius Carus ou **Lucrèce** est un poète et philosophe et physicien latin épicurien qui vécut au premier siècle avant l'ère chrétienne.

Les dates exactes de sa naissance et de sa mort ne nous sont pas connues, on les situe généralement entre 98 et 54 av. J-C.

Lucrèce a cherché à étudier la foudre, Il a remarqué que la foudre avait un lien évident avec la pluie et les nuages. Il se demande, ironiquement, la raison pour laquelle apparaît toujours derrière des nuages et jamais quand il y a du soleil



figure.2 Lucrèce



Figure.3 la foudre



Figure.4 Benjamin Franklin



Figure .5 L'expérience du cerf-volant

Benjamin Franklin (17 janvier 1706 à Boston) fut entre autre, un écrivain et physicien Américain. Benjamin Franklin est aussi célèbre pour ses travaux dans le domaine de l'électricité, et plus précisément sur ses expériences sur la foudre.

C'est en **1752** que Benjamin Franklin réalise sa fameuse expérience du cerf-volant. Franklin voulait déterminer si les éclairs étaient un phénomène électrique. Franklin et son fils de 21 ans, William, construisent le cerf-volant, formé de deux bandes légères de cèdre,

L'expérience montra avec succès que les éclairs étaient en fait de l'électricité statique.

Introduction à l'électricité statique

I. Introduction

Nous allons expliquer le phénomène de l'électricité statique, car il est méconnu et pourtant très intéressant. Nous allons donc commencer de façon théorique pour en venir à la pratique avec notre matériel antistatique ou de mesures. L'électricité statique est partout: dans les voitures, les maisons, les usines, la nature. Cette énergie se trouve dans toutes les proportions (de la simple étincelle, en passant par les décharges dans les machines industrielles, jusqu'à la foudre et ses dangers d'électrocutions et d'incendies). Toutefois, même en petite quantité l'électricité statique peut s'avérer dangereuse, surtout en présence de produits inflammables ou explosifs.

II. La théorie atomique

La théorie atomique de la matière est un des principes de bases liés aux phénomènes d'électricité statique. La nature d'un atome dépend des particules qui composent celui-ci. En effet, il y a trois différents types de particules : les neutrons et les protons qui forment le noyau de l'atome et les électrons comme un nuage autour du noyau.

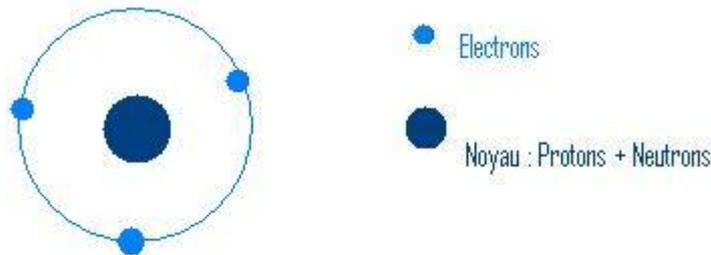


Figure .6 orbite de l'atome

III. Electricité statique:

III.1. les charges électriques

L'ensemble des phénomènes de l'électricité statique s'explique notamment grâce aux charges électriques de ces particules. Il faut, donc, savoir que les protons portent une charge positive ($+ 1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb) et les neutrons une charge négative ($- 1,6 \cdot 10^{-19}C$), tandis que les neutrons n'ont pas de charges. Les charges + et - sont normalement en quantités égales et la matière est, donc, électriquement neutre. Mais, de part leur position en orbite de l'atome, les électrons sont les plus susceptibles de se transférer d'un atome à un autre, ce qui modifie la charge de la matière qui devient positive si elle a perdu des électrons ou négative si elle en a reçus..

III.2. L'électrisation

Si l'on touche un corps conducteur isolé non chargé électriquement avec un autre corps chargé, une partie des charges se déplace du corps chargé vers le corps neutre. C'est l'*électrisation par contact*. L'électrisation peut se produire également sans contact, en rapprochant simplement les deux corps : on parle alors d'*électrisation par influence*.

III.2.1.L'électrisation par influence

Lorsqu'on approche d'un corps A électriquement neutre un corps B électrisé il se produit sur le corps A une électrisation telle que des charges de signes opposés s'accablent en regard du corps B. Comme le corps A ne reçoit ni ne cède aucune charge, des charges de signes opposés se répartissent à la surface du corps A avec une prédilection pour les surfaces courbes ou pointues des extrémités..

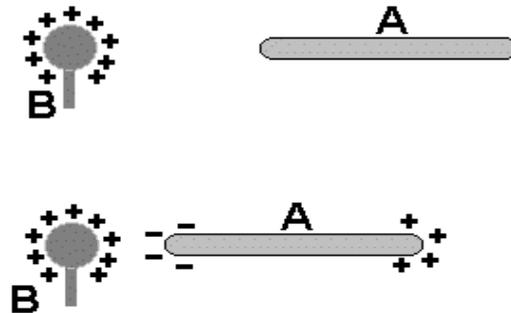


Figure .7 électrisation par influence

III.2.2. Electrisation par contact

L'électrisation peut être transmise d'un corps à un autre par contact. Une expérience simple peut être effectuée à l'aide de deux boules métalliques suspendues par des fils de nylon. Si au départ, l'une est électrisée et pas l'autre, la mise en contact des deux boules les rend électrisées toutes deux.

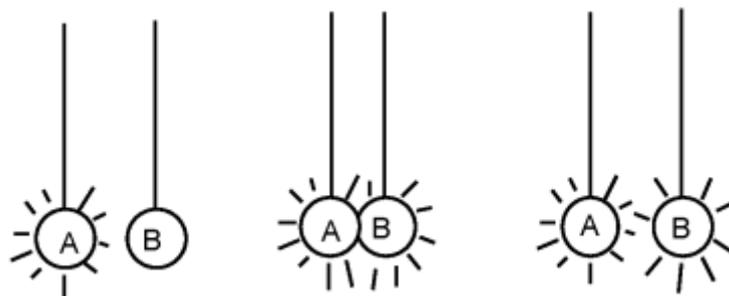


Figure 8 Électrisation d'une boule métallique à une autre par contact

III.3.Attraction et répulsion

Figure:9 deux corps neutres ne s'attirent ni de se repoussent

Figure:10 deux corps de charges contraires s'attirent

Figure:11 deux corps de charges positives se repoussent

Figure:12 deux corps de charges négatives se repoussent

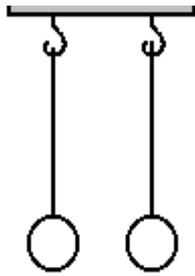


Figure9:deux corps non chargé

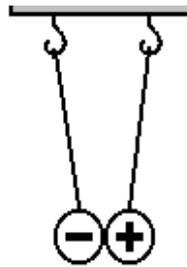


Figure10:deux corps de signes contraires

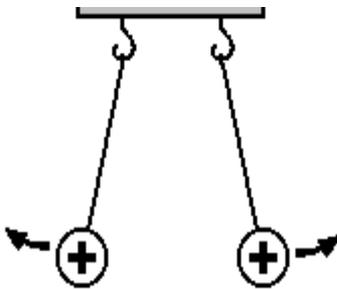


Figure11:deux corps de mêmes signe (+)

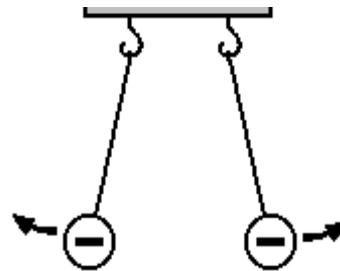


Figure12:deux corps de mêmes signe(-)

Test et mesure de la charge

I. introduction

Avec l'utilisation de l'électricité et la manipulation de plusieurs matières le test de charges permet d'éviter les accidents techniques et minimise les défaillances des composants utilisés.

il existe plusieurs moyens pour tester la présence des charges électrique sur la surface des corps, les exemple suivants expliquent le principe de fonctionnement de dispositifs de test

II.L'électroscope

C'est un petit détecteur de charge électrique inventé à la fin du 18ème siècle. On l'utilise pour mettre en évidence la présence de charges électriques accumulées. Il est basé sur le principe de la répulsion des charges identiques. Deux rubans conducteurs extrêmement légers, par exemple deux feuilles d'or très fines, sont reliés ensemble à une extrémité. Lorsque ces feuilles sont approchées d'un objet chargé électriquement les charges électriques qu'elles captent se répartissent régulièrement le long des deux rubans. Les extrémités libres des deux rubans, chargés de manières identiques, se repoussent proportionnellement à leurs charges. Suivant l'angle formé par les deux feuilles on peut en déduire l'amplitude de la charge électrique. Le dispositif est très sensible. Si la charge à mesurer est suffisamment forte le contact n'est pas nécessaire. Le phénomène qui régit le fonctionnement de l'électroscope est celui des "cheveux électriques" que tout un chacun a déjà observé en se coiffant par temps sec.

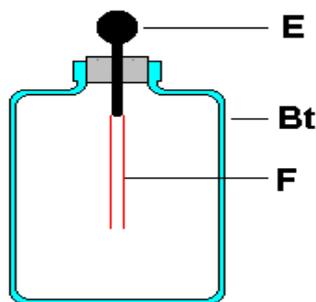


Figure 13 électroscope au repos

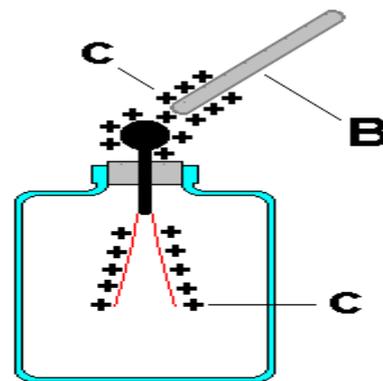


Figure14 électroscope en test

A l'électrode **E** sont reliés deux rubans **F** découpés dans une feuille d'or, bons conducteurs et très légers. Le tout est enfermé dans une bouteille **Bt** qui protège les feuilles d'or.

Lorsqu'on approche un bâtonnet **B** électrisé, les charges **c** se répartissent le long des feuilles d'or et celles-ci se repoussent

III. Le Versorium.

Il est facile de vérifier si un matériau est chargé ou non. On peut pour cela utiliser le versorium.

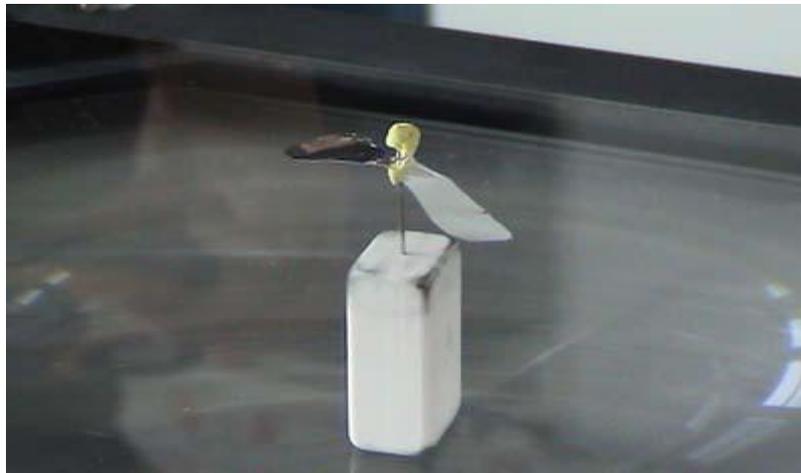


Figure 15 Versorium

La construction du versorium se fait facilement. Il vous faut une gomme rectangulaire, une épingle, du papier aluminium et de la pâte à fixe. Il faut découper une petite hélice dans le papier aluminium que l'on place sur l'épingle entre deux bouts de pâte. L'hélice doit tourner librement, on peut utiliser du talc pour assurer la rotation libre.

Que se passe-t-il lorsque l'on approche un matériau chargé du versorium ? Le schéma qui suit montre le déplacement des électrons lorsque un matériau chargé.

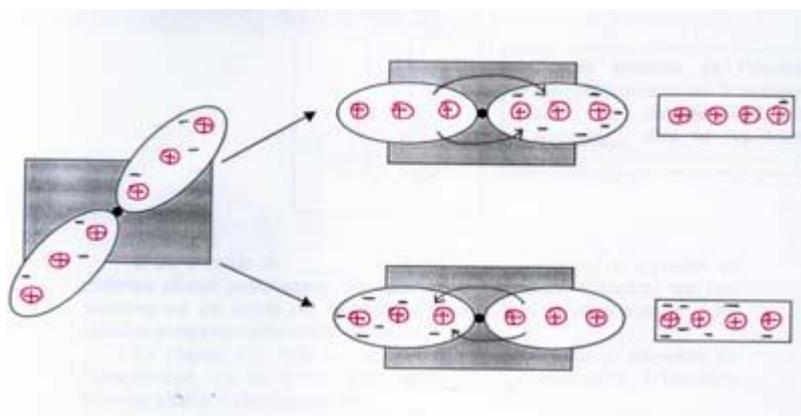


Figure 16 déplacement de charge

Le versorium est une hélice de papier aluminium conducteur posée sur un support isolant. Les électrons de l'hélice peuvent se déplacer facilement ; ils sont attirés par un matériau chargé positivement et repoussés par un matériau chargé négativement.

Champ électrique

I. Introduction

Dans l'espace situé autour d'un objet chargé électriquement se trouve un champ électrique. Une autre charge placée dans ce champ subira une force (d'attraction ou de répulsion) proportionnelle à l'intensité du champ électrique et à la valeur q de cette charge. L'intensité d'un champ électrique se mesure en volt/mètre (ou $\mu\text{V}/\text{m}\dots$). Le potentiel électrique d'un objet chargé est d'autant plus grand que le nombre de charges (électrons ou déficit d'électrons) qu'il supporte est grand. Entre deux objets chargés électriquement, on peut mesurer une différence de potentiel.

II. Loi fondamentale de l'électrostatique

Elle a été en partie énoncée par Coulomb à la fin du 18^{ème} siècle et s'énonce sous la forme :

$$\mathbf{F} = k \cdot \frac{q \cdot q'}{d^2} \text{ avec } k = \frac{1}{2\pi\epsilon_0}$$

La force F (en N) s'exerçant entre deux charges q et q' (en coulomb) est inversement proportionnelle à la distance d (en m) séparant les deux corps.

ϵ_0 est appelée constante diélectrique ou permittivité du vide déterminée par :

$$\text{où } \epsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi \cdot c^2} = 8,85 \cdot 10^{-12}$$

dans laquelle c est la vitesse de la lumière. Une des applications de cette loi en électronique est l'étude de la trajectoire de l'électron dans un tube cathodique d'oscilloscope. On retrouve aussi la constante diélectrique dans le calcul de la capacité d'un condensateur. La charge électrique d'un électron est de $1,6 \cdot 10^{-19}$ coulombs.

III. Champ électrostatique

III.1. Définition du vecteur champ

Une charge témoin $q > 0$ est placée en un point M où règne un champ électrique. Elle subit une force électrique F qui dépend de la valeur de la charge q . En fait, comme le suggère la loi de Coulomb, cette force est proportionnelle à la charge q

On définit le vecteur champ électrique en M par : $E = \frac{\vec{F}}{q}$

Caractéristiques du vecteur \vec{E} :

$$\text{Intensité : } E = \frac{F}{|q|}$$

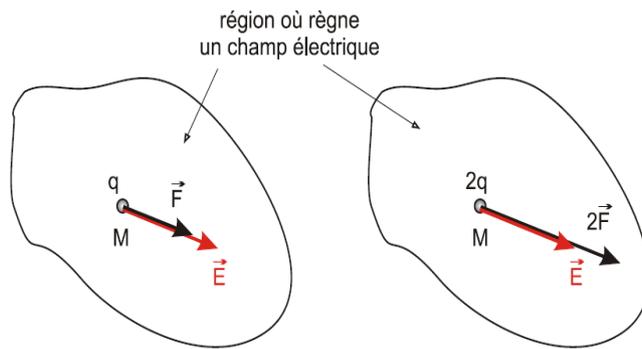


Figure17 Vecteur du champ

Direction : la meme que celle de la force
electrique F

Sens : si $q > 0$: celui de la force electrique \vec{F}

si $q < 0$: oppose a celui de la force electrique \vec{F}

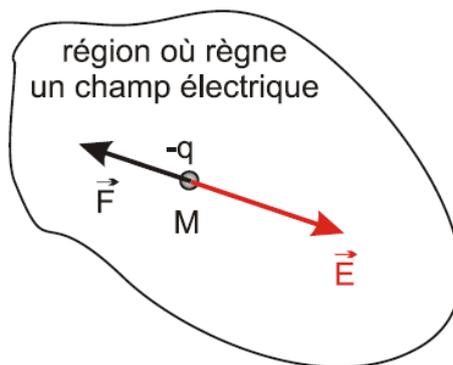


Figure 18 La force électrostatique

II.2. Spectres électriques. Lignes de champ

Dans l'espace de deux électrodes chargées l'une positivement ($q_1 > 0$), l'autre négativement ($q_2 < 0$), on dispose de l'huile contenant des grains de semoule.

Observation : Les grains dessinent des courbes appelées **lignes de champ** !

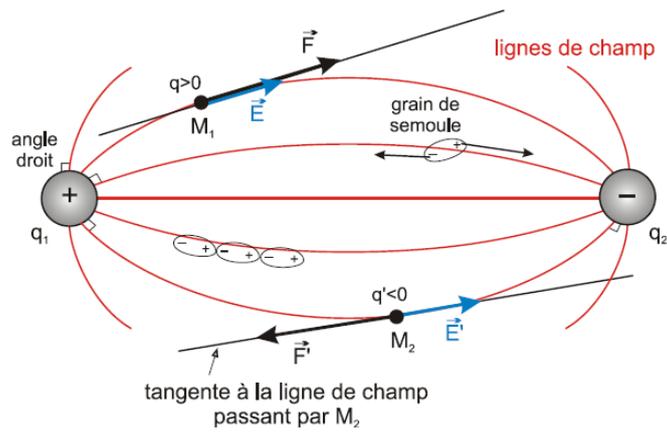


Figure 19. spectre électrique

Sous l'influence du champ créé par les charges q_1 et q_2 , les grains de semoule sont polarisés. Ainsi chaque grain devient un dipôle électrique dont les charges sont soumises à une force électrique exercées par q_1 et q_2 . Ces forces ont pour effet d'orienter le grain parallèlement aux forces électriques.

Les lignes de champ indiquent en tout point du champ la direction des forces électriques et donc la direction du vecteur champ électrique E

II.3. Lignes de champ du champ électrique

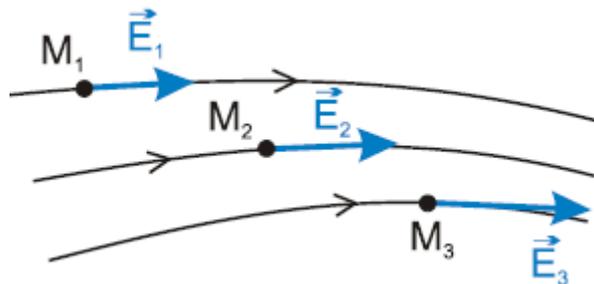


figure 20 ligne de champ

On appelle ligne de champ une ligne qui, en chacun de ses points, est tangente au vecteur champ électrique \vec{E} en un point M

Propriétés des lignes de champ :

- 1) Les lignes de champ ne se coupent jamais.
- 2) Les lignes de champ sont orientées dans le sens du champ électrique \vec{E}

3) La direction du champ \vec{E} en un point est tangente à la ligne de champ

4) L'intensité du champ \vec{E} est proportionnelle à la densité de ligne de champ $E_1 < E_2 < E_3$

5) Si le champ électrique est créé par des **conducteurs** chargés, les lignes de champ partent et entrent perpendiculairement à ces conducteurs. La figure des lignes de champ est une représentation du champ. Elle est encore appelée **spectre électrique**

Exemples de spectres électriques

– Champ créé par un condensateur chargé

(deux plaques parallèles rapprochées chargées l'une positivement l'autre négativement, et avec des charges de même valeur absolue) A l'exception des régions aux bords, les lignes de champ sont parallèles, perpendiculaires aux plaques, et partout de même densité.

Même vecteur \vec{E} en tout point du champ : le champ est **uniforme**. Dans la région des bords du condensateur, les lignes de champ sont courbées vers l'extérieur. On appelle ce phénomène « effet de bord ».

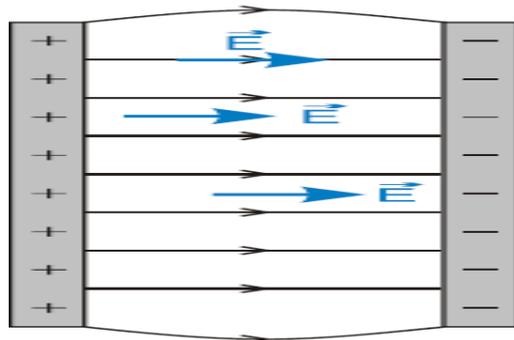


Figure 21 spectres du champ électriques créé par un condensateur chargé

– Champ créé par une charge ponctuelle

le champ est radial

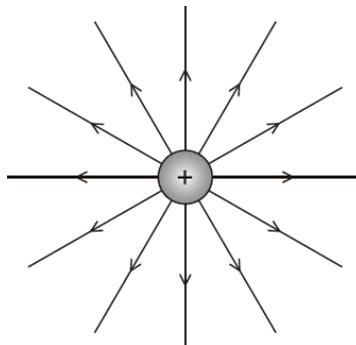


Figure 22 Champ créé par une charge ponctuelle

– **Champ autour d'une pointe**

Au voisinage d'une pointe, le champ est particulièrement intense. Le fait que les lignes de champ se resserrent au niveau de la pointe est appelé « effet de pointe ». C'est aussi à cet endroit que passe le courant le plus important (s'il y a conduction de courant). Applications pratiques de l'effet de pointe : paratonnerres (ou parafoudres), électro-coagulation (technique d'opération où l'on se sert d'un scalpel électrique.

pour couper un tissu ou un vaisseau sanguin sans qu'il n'y ait trop de saignements.

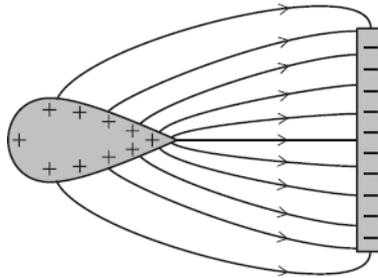


Figure 23. Champ autour d'une pointe

– **Champ électrique créé par deux charges ponctuelles de même valeur absolue et de signe contraire**

Au point considéré on représente le champ E_1 créé par q_1 , et le champ E_2 créé par q_2 . Le champ résultant est donné par la somme vectorielle des champs qui se superposent $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$

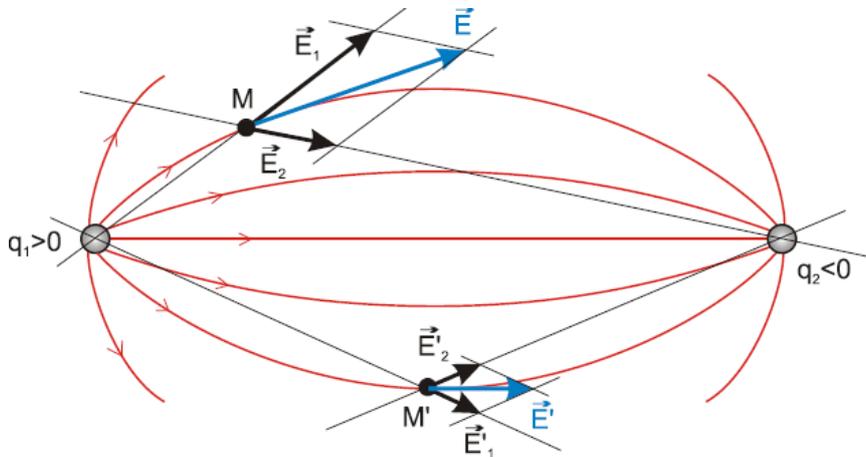


Figure 24. Champ électrique créé par deux charges ponctuelles

De la même façon on peut construire le champ résultant \vec{E} produit par 3, 4,... charges

– **Champ électrique créé par une charge ponctuelle**

Toute charge électrique exerce une force (à distance) sur toute autre charge: des charges de même signe se repoussent, des charges de signe contraire s'attirent (**Loi de Coulomb**)

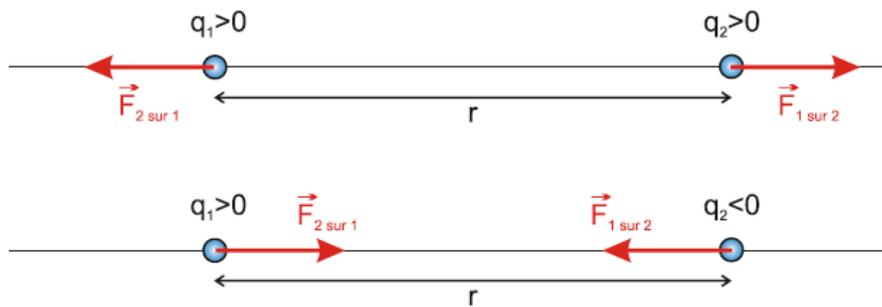


figure 25: représentation de loi de coulomb

q_1 exerce $\vec{F}_{1 \text{ sur } 2}$ sur q_2 ; q_2 exerce $\vec{F}_{2 \text{ sur } 1}$ sur q_1 .

Principe des actions réciproques : $\vec{F}_{1 \text{ sur } 2} = -\vec{F}_{2 \text{ sur } 1}$

Normes: $F_{1 \text{ sur } 2} = F_{2 \text{ sur } 1} = F$

L'expérience montre que :

$$\left. \begin{array}{l} F \sim |q_1| \\ F \sim |q_2| \\ F \sim \frac{1}{r^2} \end{array} \right\} \Rightarrow F \sim \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} \Leftrightarrow F = k \cdot \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

k = constante de proportionnalité = $9 \cdot 10^9$ unités S.I.

La constante k peut être exprimée à l'aide d'une autre constante appelée **permittivité du vide**, notée ϵ_0 :

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad \text{avec } \epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ unités S.I.}$$

Enoncé de la loi de Coulomb:

La force qu'une charge q_1 exerce sur une charge q_2 se trouvant à la distance r de q_1 s'écrit:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

L'effet triboélectrique

I. Définition

La **triboélectricité** (du grec *tribein* qui signifie *frotter*)

désigne le phénomène électrostatique créé par la mise en contact de deux matériaux de nature différente : une partie des électrons de la surface de contact d'un des deux matériaux est transférée à l'autre et ce transfert subsiste lors de la séparation. L'effet triboélectrique peut être augmenté par apport d'énergie mécanique en frottant les matériaux l'un contre l'autre.

II. Caractéristiques

La quantité de charges électriques transférée dépend :

- de la nature des deux matériaux (qui définit aussi leur signe relatif) ;
- de la surface de contact.

Pour le premier de ces paramètres, on définit des *séries triboélectriques*, c'est-à-dire des listes ordonnées de matériaux : la position relative définit le signe des charges, et la « distance » au sein de la liste donne une idée de l'importance de l'échange.

Selon le second paramètre, si au moins un des deux matériaux est un isolant, ils peuvent être utilisés à plusieurs reprises :

- soit en frottant les deux matériaux l'un sur l'autre ;
- soit en faisant « recirculer » une des surfaces (disque en rotation, courroie, etc.).

Une fois les charges créées (ou, plus exactement, séparées), tout dépend de la configuration :

- soit les deux matériaux sont conducteurs, avec un chemin conducteur qui les réunit : les charges « font le tour », se neutralisent mutuellement, et les choses en restent là ;
- soit un au moins des matériaux est isolant, auquel cas les charges sont régies par les lois de l'électricité statique ;
- soit, enfin, cas intermédiaires, les deux matériaux sont conducteurs, mais isolés : on retrouve le cas précédent, à ceci près qu'il n'y a plus rien à attendre d'un frottement de « réutilisation des surfaces », les « anciennes » charges étant neutralisées lors de la fabrication des « nouvelles ». La quantité globale de charges est donc beaucoup plus faible.

II. Situation et paramètres électriques

Pour le Cas d'un isolant dans l'air la tension atteinte par l'effet triboélectrique dépend des paramètres suivants :

- La **résistivité** : il n'y a pas d'isolant parfait. Tôt ou tard, on atteint une tension U telle que le taux de création de charge par unité de temps (autrement dit, le courant...) est égal au ratio U/R , où R est la résistance électrique (en ohms) de l'objet chargé par rapport à un potentiel de référence. La résistivité dépend, entre autres :

- de la température (une flamme est conductrice...), du dépôt éventuel de substances plus conductrices, en surface ou pénétrant dans l'épaisseur.
- La **capacité** : l'objet chargé possède une capacité par rapport au « reste de l'univers ». Plus la capacité de ce condensateur sera élevée, plus il faudra y accumuler de charges pour voir la tension augmenter, selon la formule $U = Q/C$, où Q est la charge (en coulombs), C la capacité (en farads) et U la tension (en volts)
- La **forme** : conformément à la loi de l'électricité statique, pour un potentiel donné, le champ dépend du rayon de courbure géométrique local. Plus concrètement, le champ est maximal au voisinage d'une pointe. S'il est suffisant pour ioniser l'air,
- la **triboélectricité** : cela fonctionne dans les deux sens. Le champ, même s'il ne suffit pas à provoquer une ionisation, suffira à mettre en mouvement les poussières et les molécules polaires (ou polarisables par un champ), créant un « vent électrique ». Ces poussières et molécules, au contact du matériau chargé,

III. La série triboélectrique

La série triboélectrique indique quelle matière sera négative (excès d'électrons) ou positive (déficit d'électron) après une électrisation par frottement. Par exemple :

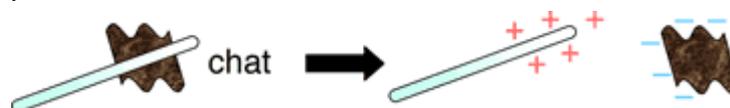
- avec une baguette de verre frottée sur du papier, les électrons se déplacent sur le papier :



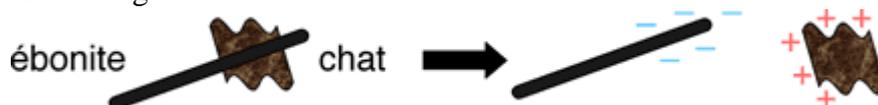
- avec une baguette de verre frottée sur de la fourrure de lapin, les électrons se déplacent sur la baguette en verre :



- avec une baguette en verre frottée sur de la fourrure de chat, les électrons se déplacent sur la fourrure :



- avec une baguette d'ébonite frottée sur de la fourrure de chat, les électrons se déplacent sur la baguette d'ébonite



- L'ordre des matières dans cette série peut être déterminé par des expériences avec un électroscope.

Tableau 1 Liste des matériaux triboélectriques

Mains humaines (très sèches)	Matériaux perdant facilement des électrons, ils se chargent positivement.
Fourrure de lapin	
Verre	
Cheveux humains	
Nylon	
Laine	
Papier	
Coton	
Plexiglas	
Asbeste	
Bakélite	
Verre	
Acier	
Bois	Matériaux gagnant facilement des électrons, ils se chargent négativement.
Polystyrène	
Polyéthylène (scotch)	
Polyvinyl (PVC)	
Silicon	
Téflon	

Série triboélectrique

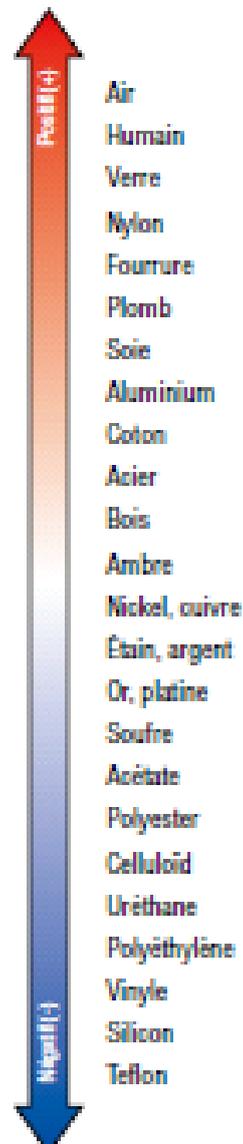


Figure 26 série triboélectrique

V. Combinaisons ayant tendance à produire de l'électricité

Le schéma précédent (figure 26) est appelé série triboélectrique. La série triboélectrique s'organise, lorsqu'on frotte deux objets ensemble lors d'une expérience, en fonction de celui qui portera une charge positive ou négative. Selon cette "série triboélectrique", les objets se trouvant du côté positif de la flèche seront chargés positivement et les objets se trouvant du côté négatif seront chargés négativement. La quantité d'électricité statique produite s'accroît à mesure que l'écart entre les objets frottés ensemble augmente sur la série triboélectrique.

Par exemple...



Figure 26 exemple de combinaison

Décharge électrostatique

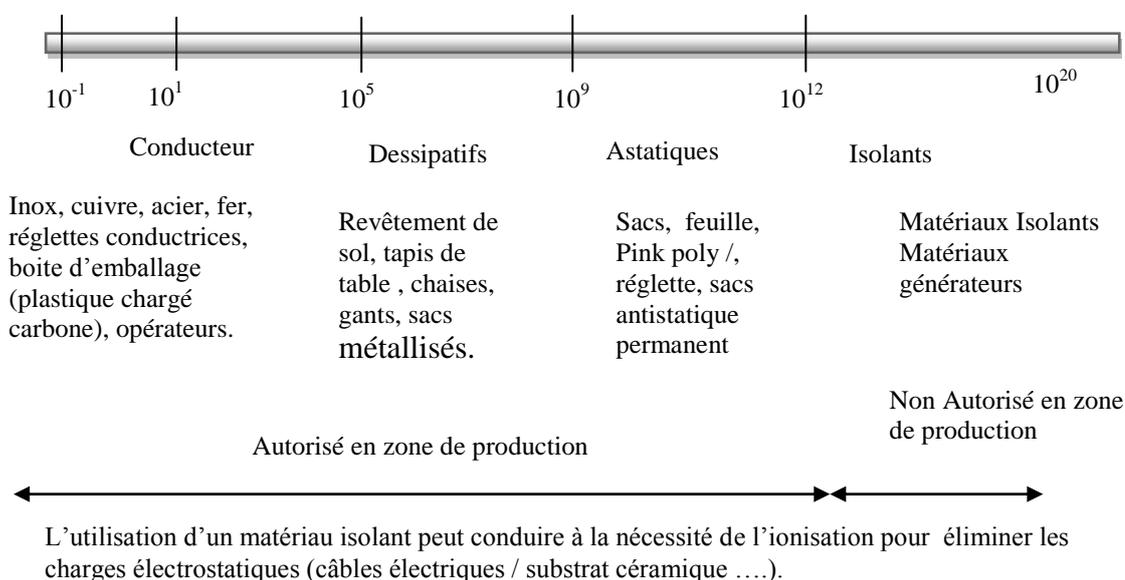
I. Définition

Une décharge électrostatique se produit quand l'électricité statique produite par la main ou par un outil détecte un point où le potentiel électrique est moins élevé, et circule vers ce point. Si la puissance maximale supportée par les différents composants est inférieure à la puissance dégagée par la charge électrique produite, celui-ci peut être endommagé.

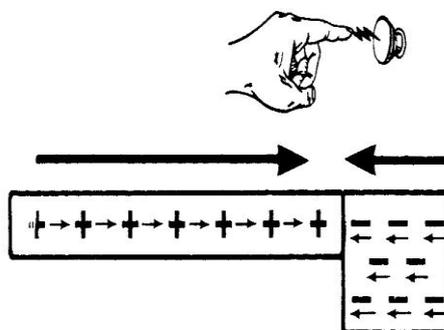
Une décharge électrostatique peut changer les caractéristiques électriques d'un dispositif semi-conducteur, pouvant l'altérer ou encore le détruire. Une décharge électrostatique peut également perturber les opérations normales d'un système électronique, provoquant une défaillance prématurée de l'équipement ou une panne.

Les décharges ESD liées aux personnes sont plus fréquentes

II. Classification et sélection des matériaux, des matériels



II.1. Matériaux Conducteurs



Dans ce type de matériaux

- Le courant circule facilement
- Ils peuvent être reliés à la masse
- Ils peuvent être déchargés
- Exemples : métaux, personnes, carbone.

II.2. Matériaux dissipatifs

- Le courant circule lentement,
- Ils peuvent être reliés à la masse,
- Ils peuvent être déchargés sans risque,
- Ils sont préférés aux matériaux conducteurs, car les décharges lentes enregistrées limitent les risques liés aux ESD (suppression du “contact métal”).
- Exemples :
Revêtements de table, de sol, Surfaces de certains
Sacs métallisés, emballages.

II.3. Matériaux Isolants

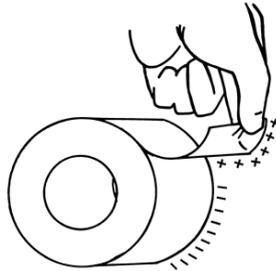
- Le courant électrique ne s'écoule pas facilement
- Ne peuvent pas être déchargés par conduction
- **Exemple :**

Matières plastiques : Typiquement très aptes à la charge.



II.4. Charges fréquemment générées

- Marcher sur une moquette : 1.500 – 35.000 volts
- Marcher sur un revêtement vinyle non traité : 250 – 12.000 volts
- Dérouler un ruban adhésif : 9.000 – 15.000 volts



Le niveau d'acquisition des charges est fortement dépendant de la nature des matériaux, du taux d'humidité, de la pression et de la vitesse de séparation

Tests et modèles de décharges électrostatiques

I. modèles de décharges électrostatiques

Selon qu'elles sont appliquées sur le composant électronique ou que c'est lui-même qui les génère, il est possible de séparer les décharges électrostatiques au niveau du composant en deux catégories et en plusieurs modèles, principalement :

- ❖ le modèle du corps humain (HBM),
- ❖ le modèle de la machine (MM)
- ❖ le modèle du composant chargé (CDM).

Ces modèles permettent de reproduire les formes d'ondes pour les appliquer aux circuits intégrés. Les caractérisations, généralement destructives, permettent d'évaluer la robustesse du composant pendant :

- la période de fabrication
- l'assemblage
- le test final
- le transport
- la soudure sur carte.

Pour chacun de ces modèles, la simulation d'une décharge est réalisée à l'aide d'un circuit de type RLC.

I.1. Modèle HBM (Norme américaine)

- ESD Class 0 : < 250 Volts)
- (ESD Class 1 250 to 1999 Volts)
- ESD Class 2: 2000 to 3999 Volts)
- (ESD Class 3: 4000 to 7999 Volts)

Le modèle HBM (*Human Body Model*), (*Figure 1*) fut le premier à être développé. Il est encore aujourd'hui pris comme référence pour la plupart des tests industriels. Il permet de simuler la décharge d'un individu debout, dans un circuit intégré qu'il toucherait du doigt.

Le circuit électronique permettant de simuler une décharge de type HBM comprend une capacité de 100pF et une résistance de 1500 Ohms supposés modéliser le corps humain.

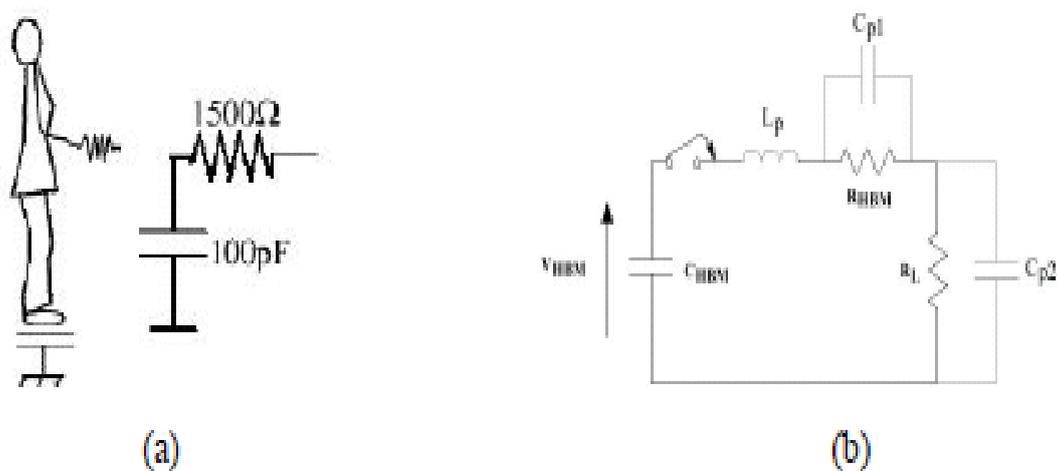


Figure 28: (a) Modèle HBM (Humain Body Mode); (b) Schéma électrique équivalent du circuit de décharge HBM (CHBM=100pF, RHBM =1500 Ohms, Lp =10uH).

La forme d'onde du courant de décharge est spécifiée par une norme militaire, MIL-STD-883C méthode 3015.7. C'est une double exponentielle calibrée pour une charge nulle (RL=0). Le temps de montée mesuré entre 10 et 90% de l'amplitude maximale peut varier entre 2 et 10ns, tandis que la constante de temps de descente définie par le produit RC est de 150ns. La résistance de 1500 Ohms rend ce modèle très proche d'une source de courant. Le schéma du circuit de décharge est représenté sur la figure (b). RL désigne la résistance du composant testé, Cp1, Cp2 et Lp les éléments parasites ramenés par le testeur ESD.

La capacité CHBM de 100pF est initialement chargée sous plusieurs milliers de volts, 2000V étant le minimum requis par les spécifications actuelles. Par l'intermédiaire d'un interrupteur, elle est ensuite déchargée dans le composant à travers la résistance RHBM de 1500Ohms.

La forme d'onde du courant de décharge est montrée à la figure suivante :

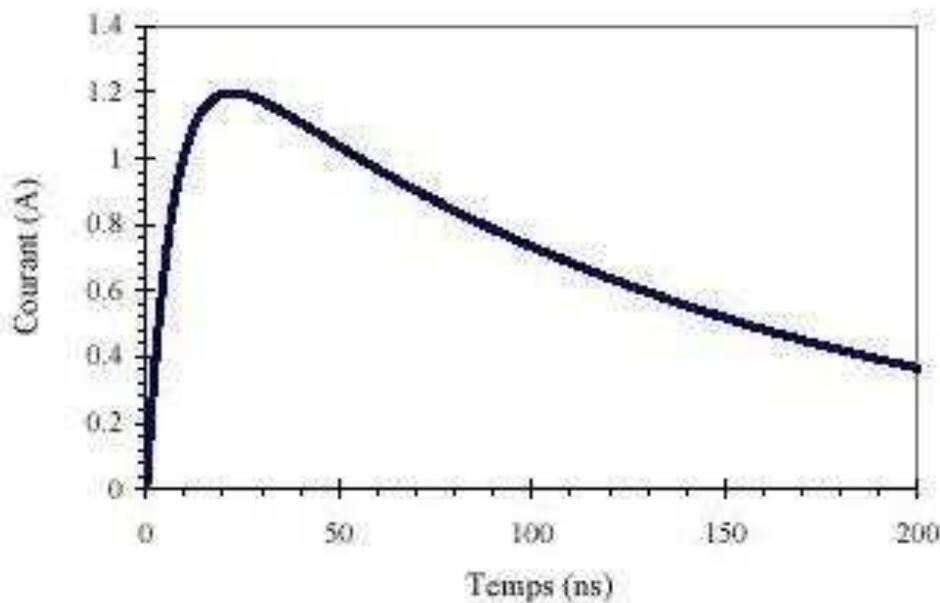


Figure 29: Courant de décharge du modèle HBM.

L'équation suivante donne une expression simplifiée du courant de décharge obtenue pour une charge nulle (RL=0), en négligeant Cp1 et Cp2:

$$I_{HBM} = \frac{V_{HBM}}{R_{HBM}} (1 - e^{-\frac{R_{HBM}t}{L_P}}) e^{-\frac{t}{R_{HBM} \cdot C_{HBM}}}$$

Cette équation conduit à une approximation du temps de montée, tm, et du courant maximal, Imax

$$tm = \frac{2L_P}{R_{HBM}}$$

$$I_{max} = \frac{0.9V_{HBM}}{R_{HBM}}$$

On en déduit par exemple qu'un temps de montée de 10ns correspond à une inductance parasite de 7,5µH, et qu'une tension de charge de 2kV correspond à un courant maximum de 1,2A. En toute rigueur, les capacités parasites Cp1 et Cp2 ont une influence non négligeable sur les valeurs du temps de montée et du courant maximum. C'est pourquoi les formes d'ondes et donc les seuils de défaillance peuvent différer d'un équipement à l'autre. Afin d'y remédier, il est recommandé de calibrer les testeurs en utilisant une charge de 500 Ohms plutôt qu'un

court-circuit. Des spécifications HBM plus récentes que la MIL Standard (ANSI-ESD S-5.1-1993 ou JEDEC-JESD22) normalisent d'ailleurs la forme d'onde à la fois pour une résistance de charge nulle et de valeur 500 Ohms.

I.2.Modèle MM

- (ESD classe M1 < 100 Volts)
- (ESD classe M2 < 200 Volts)
- (ESD classe M3 < 400 Volts)
- (ESD classe M plus que 400 Volts)

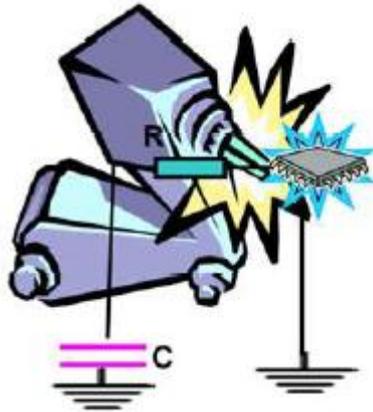


Figure 30 origine du modèle MM

Le modèle de la machine, MM (*Machine Model*) fut introduit, au Japon, en tant que pire cas du modèle HBM . Il est aujourd'hui utilisé pour simuler la décharge d'une machine dans un circuit intégré Il s'apparente au modèle HBM par son circuit de décharge une capacité de 200pF, CMM, est chargée puis déchargée dans le composant à tester dont la résistance est notée RL. Dans ce cas cependant, aucune résistance n'est rajoutée dans le chemin de décharge, si ce n'est une résistance parasite Rp de quelques Ohms seulement, ce qui fait du modèle MM une source de tension presque idéale.

L'inductance parasite Lp de l'ordre du μH est ramenée par l'équipement de test.

Certaines spécifications du modèle MM ont été développées, dont une par Philips en 1990. Cependant, il n'existe pas, comme pour le modèle HBM, un standard bien établi, car le test est rendu très peu reproductible par l'absence de résistance série. L'impédance dynamique du circuit, les capacités et inductances parasites ramenées par l'équipement de test, ont une forte influence sur la forme d'onde du courant de décharge. L'inductance parasite Lp peut varier entre 0,5 et 2,5 μH selon le testeur et le boîtier utilisés.

Les spécifications actuelles exigent des circuits intégrés qu'ils supportent au minimum des déchargesLes spécifications actuelles exigent des circuits intégrés qu'ils supportent au minimum des décharges d'amplitude 200V selon le modèle MM et 2000V selon le modèle HBM. Cet écart se justifie essentiellement par la présence, dans le second cas, d'une résistance série qui limite le courant maximum délivré. Les deux modèles sont des formes différentes d'un même mécanisme dans lequel le circuit intégré reçoit la décharge d'un corps externe, qu'il s'agisse

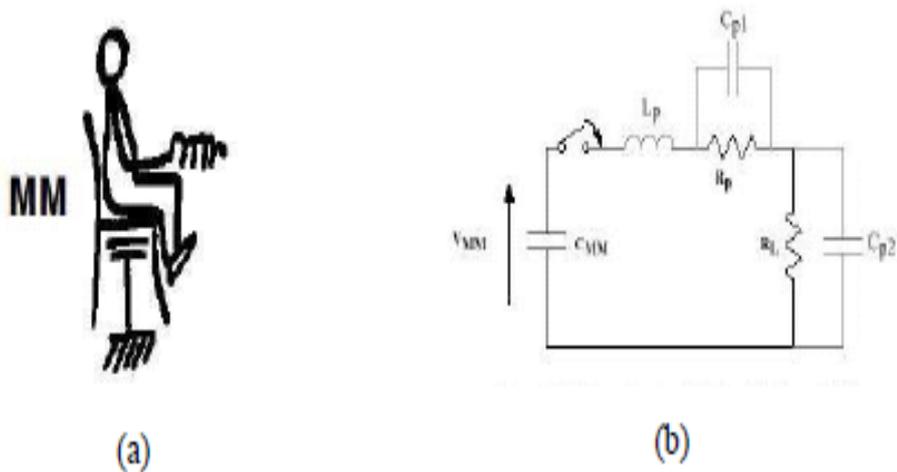


Figure 31 : (a) Modèle MM (Machine Model) ; (b) Schéma électronique équivalent du circuit de décharge MM. ($C_{MM} = 200\text{pF}$, $R_L = 10\ \text{Ohms}$, $L_p = 0,75\ \mu\text{H}$).

I.3. Modèle CDM

- (ESD classe C1 < 125 Volts)
- (ESD classe C2 < 250 Volts)
- (ESD classe C3 < 5 00Volts)
- (ESD classe C4 < 1000 Volts)
- (ESD classe C5 < 1500 Volts)
- (ESD classe C6 < 200 Volts)
- (ESD classe C7 plu que 2000Volts)

Le modèle du composant chargé, CDM (Charged Device Model) est simple par son concept mais très difficile à mettre en pratique. Il devient cependant d'une grande utilité pour les environnements modernes de production où l'automatisation se généralise. Les composants, après assemblage, peuvent se charger de diverses façons comme, par exemple, en glissant le long d'un rail vers une machine de test, d'insertion automatique ou de marquage. S'ils entrent en contact avec une surface métallique à la masse, il se produit une décharge extrêmement rapide, notamment juste quelques nanosecondes, pendant lesquelles le niveau de courant peut atteindre plusieurs ampères. Le claquage du diélectrique est très souvent occasionné par des décharges du type CDM, et plus rarement par des décharges de type HBM ou MM.

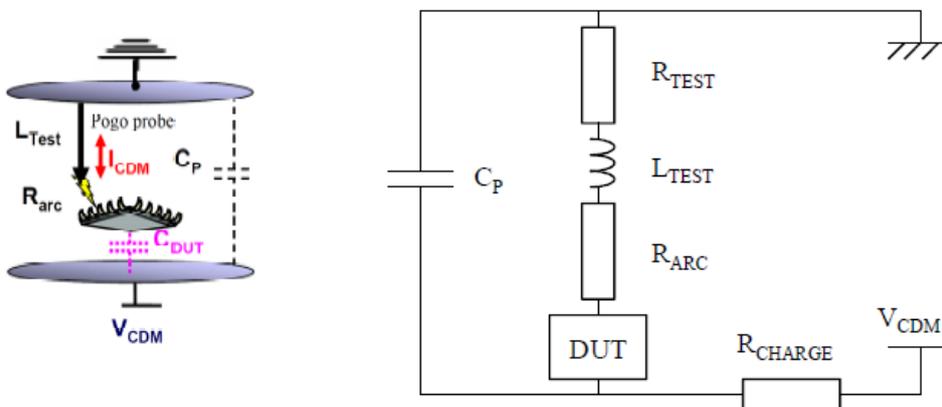


Figure 32: Origine du modèle CDM (Charged Device Model)

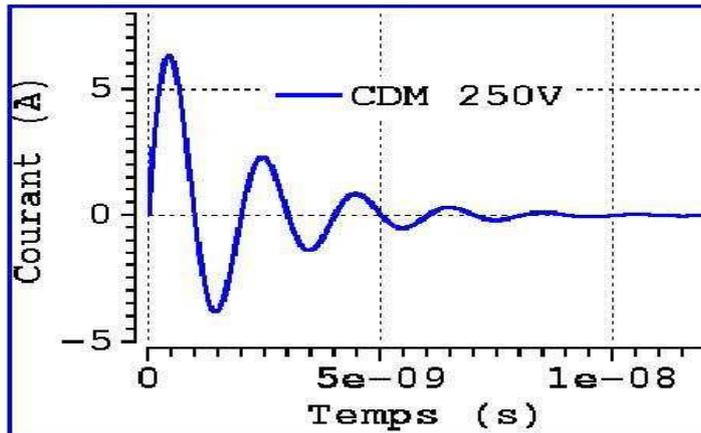


Figure 33 Forme d'onde du courant de décharge CDM de 250V

I.4. Modèle du contact métallique humain

Dernièrement, de nouvelles normes ont été mises en place afin de prendre en compte d'autres phénomènes. Avec le développement des appareils autonomes, tels que les téléphones portables, disques dur externes et autres lecteurs multimédia, l'utilisateur est de plus en plus amené à toucher directement l'appareil avec un objet métallique, que ce soit avec les câbles d'alimentation ou les connexions avec un ordinateur. Le modèle du contact métallique humain (Human Metal Model –HMM) a été mis en place afin de représenter ces phénomènes

Les charges accumulées sur le corps humain se déchargent à travers la connexion métallique. Le testeur de ce modèle est représenté par un schéma électrique identique à celui du HBM et MM .

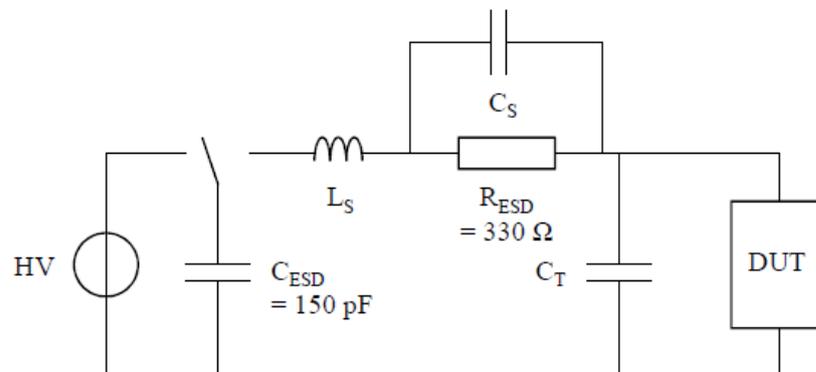


Figure. 34 - Schéma électrique d'un testeur HMM

La résistance RESD représente la résistance de contact entre le corps humain et le circuit électronique via l'objet métallique. Sa valeur est alors beaucoup plus faible que pour le testeur HBM (330 Ω contre 1,5 kΩ pour le HBM). Cette faible valeur de résistance implique un temps de montée et un courant pic très important, observables avec des simulations électriques de type SPICE. Le test en question est effectué directement au niveau système. La polarisation de la capacité, d'une valeur de 150 pF, est comprise entre 8 kV et 25 kV. Ces tests peuvent être réalisés sur des circuits polarisés ou non (mode power off / power on).

Prévention de phénomène ESD

I. Tests et control

- Audits et contrôles périodiques.
- Contrôle des revêtements de sol.
- Contrôle des surfaces de travail.
- Contrôle des connexions
- Contrôle des sièges.
- Contrôle des outils et équipements.
- Contrôle de la mise à la terre des personnes.
- Contrôle des éléments de manutention / stockage / emballage.
- Contrôle des systèmes d'ionisation.
- Contrôle de la survenance de DES
- Mesure des résistances de protection
- Mesure des équipements des personnes : bracelets, talonnettes et chaussures, blouses conductrices, gants et doigtiers.
- Mesure spéciale : test du marcheur.
- Mesure des champs électrostatiques.
- Mesure des charges électrostatiques.
- Mesure des temps de décroissance de charges.
- Mesure des systèmes d'ionisation.
- Détection des D.E.S.

La susceptibilité des composants en fonction de leur technologie et de leur conception les composants peuvent être sensibles aux contraintes suivantes :

- A l'énergie dissipée (jonction).
- Les composants sensibles à l'énergie sont appelés « Energy Susceptible Devices ».
 - A la tension (MOSFET).
- Les composants sensibles à la tension sont appelés « Voltage Susceptible Devices (VS Devices) ». Pour ce type de composants une surtension provoque le phénomène (claquage en tension), l'énergie dissipée crée le défaut comme pour un composant susceptible à l'énergie. Un MOSFET non protégé est nominalelement sensible aux contraintes de tension. S'il est protégé par une jonction il devient sensible à l'énergie des contraintes de Type HBM par exemple. Une contrainte CDM est tellement rapide ($d \sim 2\text{ns}$) que la jonction peut être inopérante et dans ce cas on peut avoir un percement de l'oxyde (punch through) sur des MOS protégés ou non y compris sur des MOS de puissance.



Figure 35 un moyen de test

II. Les moyens de protection

La suppression des risques liés aux ESD passe par l'application de deux règles

Limitation des charges

- Maîtrise des Décharges Pas de contact "Métal".

La mise en place d'un plan de lutte contre les ESD passe par :

- La connaissance des procédés de fabrication mis en œuvre et les modes de décharges induits.

- La connaissance de la sensibilité et la susceptibilité des composants traités.

- Les conducteurs seront reliés à la masse.

- Les emballages des ESD assureront le blindage quand ceux-ci seront stockés ou transportés hors zone. Les charges sont maintenues à l'extérieur des emballages, il faut fermer les emballages métallisés et fermer les boîtes conductrices

- Les isolants ou les composants isolés seront neutralisés à l'aide d'ioniseurs.

Les décharges seront maîtrisées, suppression du contact

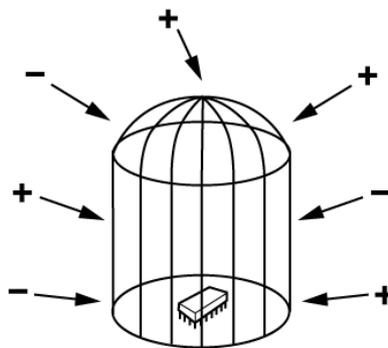


Figure 36 exemple de blindage

- Mettre la personne en équipotentiel : poste fixe - poste mobile.
- La zone de travail doit être protégée.
- Utiliser l'emballages et l'isolation
- Assurer le contrôle des moyens de protection et de prévention des personnes : bracelets, talonnettes et chaussures, blouses conductrices.
- L'hygrométrie.
- L'ionisation.
- Chaussures conductrices ou talonnettes conductrices



Figure 37 chaussure protégée

- Bracelet conducteur



Figure 37 Bracelet conducteur

La fonctionnalité de ces éléments sera garantie par un contrôle journalier. Pour le bracelet on peut préférer un contrôleur permanent de bracelet.

- Surface de travail dissipative

Relier les surfaces de travail ESD à la terre via un cordon de mise à la masse des tapis.

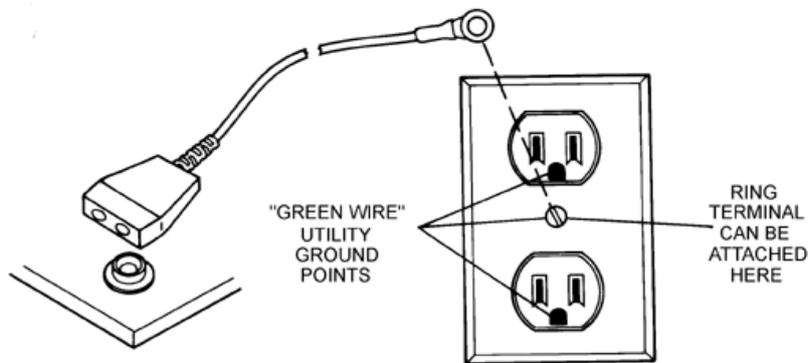


Figure 38 Surface de travail dissipative

Tapis conducteurs: relier les tapis ESD à la terre via un cordon de mise à la masse des tapis.

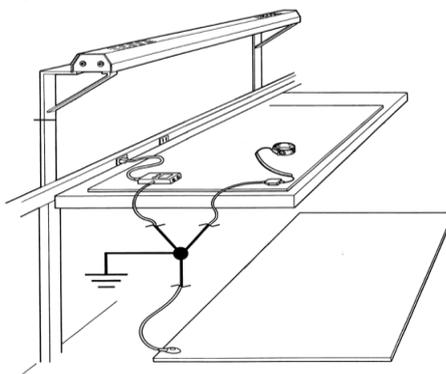


Figure 39 Tapis conducteurs

- Blouses et gants "ESD"

III. La cage de Faraday

Si un corps **C** est placé à l'intérieur d'une enceinte **E**, **C** ne sera pas soumis à l'influence d'une source d'électricité **G** placée à l'extérieur de l'enceinte **E**. L'enceinte **E** joue le rôle d'un écran, d'un "blindage". En radio on utilise ce genre d'écran pour séparer deux étages pour que le rayonnement de l'un n'atteigne pas l'autre. Pour protéger un bâtiment il suffit d'enfermer celui-ci dans une sorte de cage constituée de conducteurs reliés à la Terre et munies de pointes pour capter les charges électriques de l'atmosphère et les diriger vers la Terre. Il n'est pas nécessaire que l'enceinte soit étanche à l'air, ce peut être un grillage ou une tresse comme celle qui entoure l'âme d'un câble coaxial.

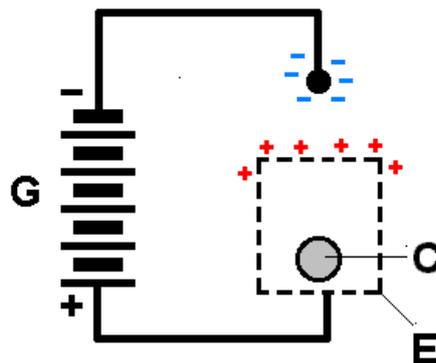


Figure 40 La cage de Faraday

IV. Connexion du circuit à l'enceinte

- Le potentiel de l'enceinte augmente, mais celui du circuit reste proche de la terre. Différence de potentiel significative entre le circuit et l'enceinte. La décharge secondaire produit un courant encore plus important que celui de la décharge primaire (absence de la résistance du corps) On peut empêcher l'arc secondaire de se produire en éloignant suffisamment le circuit des parties métalliques ou en le connectant à l'enceinte.

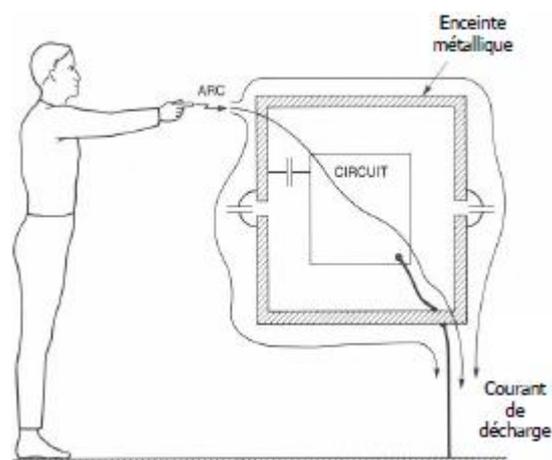


Figure 41. Connexion du circuit à l'enceinte

V. Protection contre la tension parasite en mode commun

Une capacité 'by-pass' de l'ordre de 500 pF, ou une diode Zener peuvent être utilisées pour shunter le courant de décharge vers la terre.

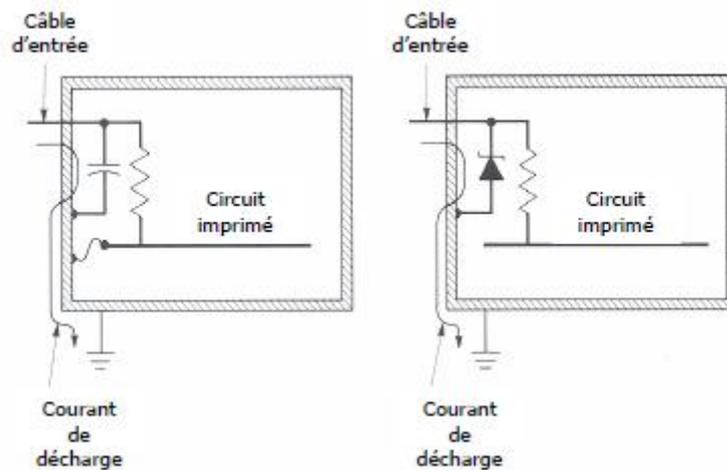


Figure 42. Protection contre la tension parasite

Nature des dégradations et protection contre ESD dans les circuits

I. Nature des dégradations

I.1. Dégradation de jonction :

La dissipation d'énergie dans une jonction provoque un échauffement localisé du silicium dans la zone de charge d'espace. Il se forme alors à 577°C un alliage Al-Si entre les deux matériaux qui pénètre la jonction peu profonde.

Certains paramètres électriques du silicium comme le gain en courant d'un transistor bipolaire, augmentant avec la température formation d'un point chaud qui conduit à un emballement thermique, " claquage thermique." La jonction présente un courant de fuite plus important, mais sa tension

I.2. Dégradation dans un métal

Nous avons déjà cité un mécanisme conduisant à la pénétration du métal dans le Silicium lorsqu'un contact est trop proche d'une source d'énergie. Des bandes de métal dimensionné de largeur trop faible fondent par effet Joule lorsque le courant est élevé.

La densité de courant induit un déplacement d'atomes qui peut conduire soit à un circuit ouvert soit à un court-circuit.

Le perçage d'une jonction ou le claquage d'un oxyde provoque un court-circuit, ayant pour effet d'augmenter considérablement la dégradation du métal

I.3. Dégradation d'oxyde

Le mécanisme de défaillance d'oxyde est beaucoup plus compliqué.

Les défauts créent un décalage des tensions de référence et des courants de fuite.

Il s'agit donc d'un problème critique pour la fiabilité de technologies MOS et CMOS avancées avec oxydes ultraminces.

I.4. Conduction dans le système Si/SiO₂

Le système diélectrique Si/SiO₂ bénéficie d'une bande interdite élevée de 9 eV et un champ électrique de claquage supérieur à 15 MV/cm. Ceci permet une bonne isolation électrique entre la grille et le substrat, et de contrôler correctement le fonctionnement du composant MOS., il apparaît un courant de conduction dans le diélectrique, ce courant de fuite est limité par l'injection des porteurs à partir de l'électrode

II. Principaux éléments de protection ESD

II.1. Diodes

Au début des années 80, la diode était la structure de protection la plus courante. Elle demeure encore utilisée notamment entre les entrées/sorties et l'alimentation. Polarisation directe, elle offre une grande efficacité de protection car elle dissipe très peu d'énergie. En effet, elle se met à conduire pour un niveau de tension très faible (environ 0,5V) et sa résistance à l'état passant n'est que de quelques Ohms. Sa tension de déclenchement n'est pas ajustable, mais il est possible de cascader plusieurs diodes pour augmenter la tension globale de déclenchement. Par contre, sous une polarisation inverse, la diode se met en conduction par claquage selon un mécanisme d'avalanche ou un effet Zener.

La tension de claquage de la diode est basse, typiquement moins de 10V, ce qui est très utile par exemple pour limiter la tension sur les grilles des transistors MOS.

II.2. Transistor bipolaire NPN

Lorsqu'il est utilisé comme structure de protection ESD, le transistor bipolaire NPN a sa base reliée à l'émetteur soit directement par un court-circuit soit par une résistance. Lorsqu'une décharge négative est appliquée sur le collecteur, l'émetteur étant pris comme électrode de référence, le transistor est comme une diode polarisée en direct. Il n'y a pas de courant qui passe par le transistor bipolaire NPN. Ce cas est alors très favorable à la dissipation du courant de décharge pourvu que la résistance série de cette diode ne soit pas trop élevée.

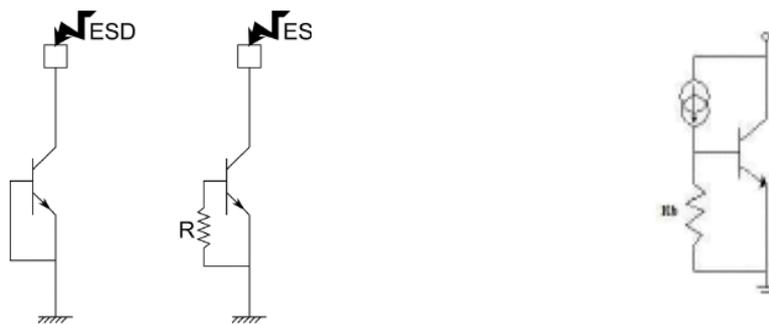


Figure 43: Utilisation des bipolaires en protection ESD

Dans le cas d'une décharge positive sur le collecteur par rapport à l'émetteur, il existe alors deux méthodes pour déclencher le transistor bipolaire. La première consiste à utiliser le courant d'avalanche de la jonction collecteur/base et la deuxième à ajouter une source de courant entre les électrodes de collecteur et base. Dans le premier cas, on parle de transistor bipolaire NPN deuxième cas, la source de courant est fournie par un autre transistor, bipolaire, MOS ou une diode polarisée inverse, généralement une diode Zener, ce qui offre la possibilité d'ajuster la tension de déclenchement du transistor. Les électrons générés par ionisation par impact sont alors repoussés par le fort champ. Le courant de base I_B nécessaire pour polariser la jonction base/émetteur en direct peut donc être calculé grâce à la relation suivante :

$$I_B = \frac{V_{BE}}{R_B} \quad \text{où } V_{BE}=0,5V$$

Au cours de la décharge (modèle HBM) le courant de base du transistor bipolaire est donc donné par la relation suivante :

$$I_{\max} = \frac{0,9V_{HBM}}{R_{HBM}}$$

$$I_B \approx (M-1) \cdot I_C$$

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_{CB}}{BV_{CB0}}\right)^n} \quad \text{où } 2 < n < 6$$

II.3. Transistor NMOS

Les transistors NMOS couramment utilisés dans les circuits intégrés modernes ne sont pas conçus pour supporter des courants de plusieurs ampères. En outre, les technologies avancées actuelles, avec des oxydes de grille très minces ($< 100\text{\AA}$), des drains faiblement dopés ou des siliciures, en font des éléments fragiles aux ESD. Lorsque le transistor NMOS est utilisé comme structure de protection contre les ESD, sa grille, sa source et son substrat sont généralement court-circuités à la masse. Lors d'une décharge négative appliquée sur le drain par rapport à la source, la diode de substrat (formée par la jonction drain/substrat) est alors polarisée en direct. Elle est donc très bénéfique à la dissipation du courant de décharge. Dans le cas opposé où une décharge positive est appliquée sur le drain par rapport à la source, le transistor NMOS ne fonctionne alors pas en régime normal, mais utilise l'action du transistor NPN latéral parasite pour conduire le courant de la décharge.

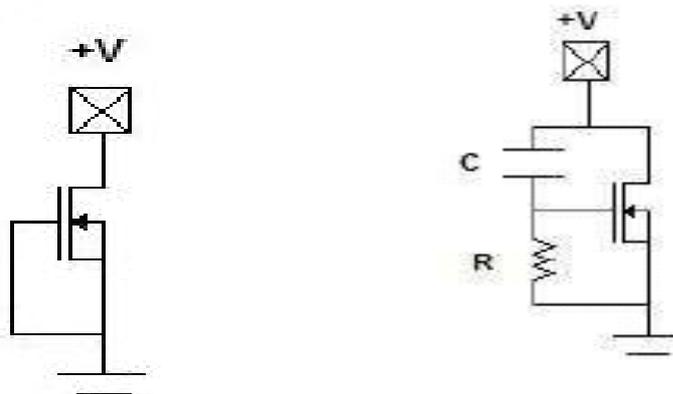


Figure 44: Le transistor NMOS utilisé comme protection ESD

II.4. Thyristor ou SCR (Silicon controlled rectifiers)

Le thyristor est généralement le composant de protection ESD le plus efficace par unité de surface grâce à sa faible tension de maintien et son courant de fuite très faible à l'état OFF.

III. Stratégies de protection ESD

La protection ESD concerne essentiellement les oxydes de grille et les jonctions drain/substrat des transistors MOS dans les étages d'entrée et de sortie; entre différents domaines de puissance, les bus d'alimentation sont liés par des diodes bidirectionnelles. On rencontre deux approches de protection :

III.1. la stratégie de protection distribuée

La stratégie classique ou distribuée consiste à ajouter des dispositifs de protection contre les ESD sur chaque plot du circuit, par rapport à VSS et par rapport à VDD, ainsi qu'entre VDD et VSS. Les entrées peuvent être efficacement protégées par des circuits à deux étages en forme de π

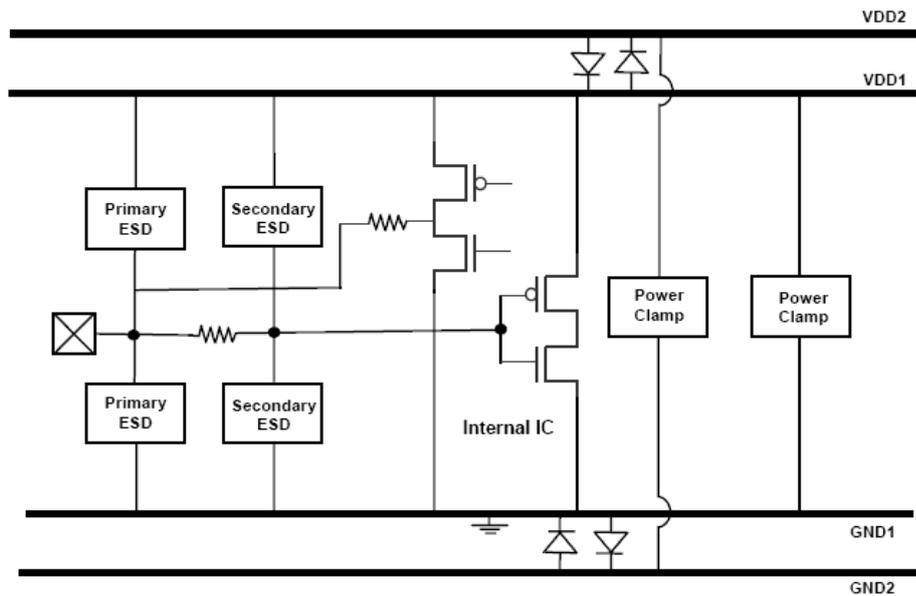


Figure 45: Stratégie générale de protection contre les ESD pour les entrées/sorties

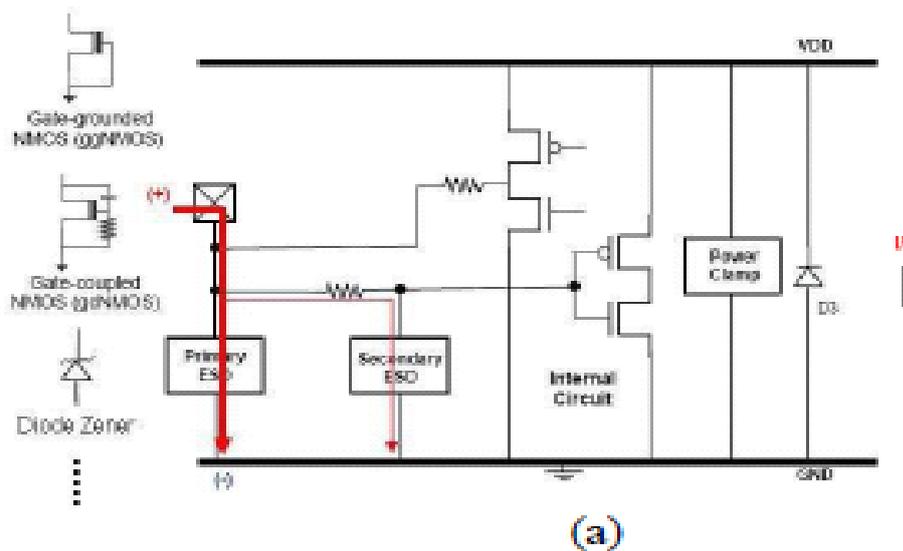


Figure 46 : Stratégie distribuée (Padbased)

III.2 la stratégie de protection centralisée

Dans le cas de la stratégie centralisée, des diodes sont utilisées en direct pour conduire le courant de décharge vers un grand MOS de puissance, appelé BIGMOS. Un circuit de déclenchement ('RC triggering circuit') doit être soigneusement conçu pour activer correctement le BIGMOS pendant l'ESD.

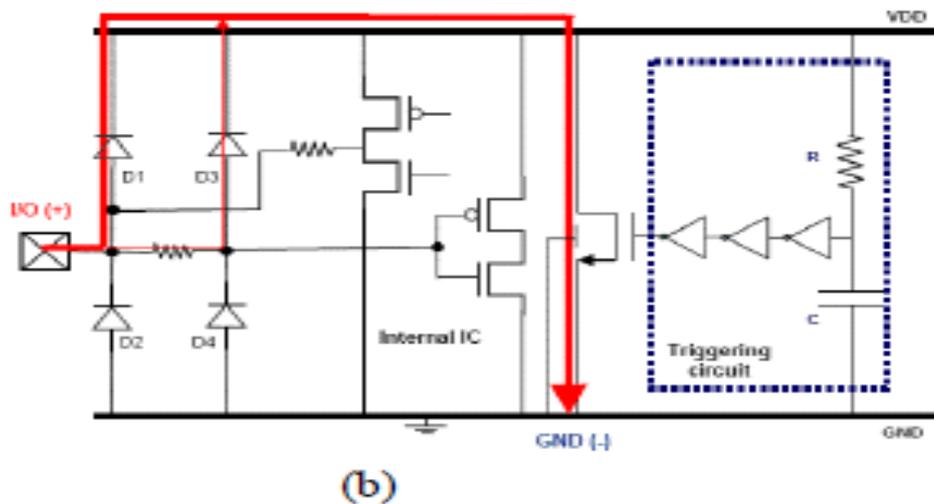


Figure 47 Stratégie centralisée (Rail-based)

III.3. Stratégies de protection ESD d'un circuit intégré :

La conception de protection basée sur la stratégie distribuée est généralement plus directe car il s'agit seulement des broches à protéger. Par contre, les protections sont sensibles à la variation technologique, et ne sont pas portables d'une technologie à l'autre. Pour la stratégie centralisée, si les diodes et les MOS ont des résistivités faibles, la conception ESD bénéficie des avantages de la stabilité des composants ESD par rapport à la variation technologique et de la disponibilité des modèles des composants pour la simulation

IV. Conditions nécessaires sur les systèmes de protection

Afin de protéger les circuits intégrés contre les décharges électrostatiques,

- ✓ La protection ESD doit tout d'abord être capable de fournir des chemins de décharge pendant l'ESD sans endommager les circuits internes.
- ✓ Une structure de protection ESD doit résister elle-même à la décharge contre laquelle elle est supposée protéger. Elle doit donc être capable de supporter des champs électriques intenses et dissiper de très fortes densités d'énergie.
- ✓ la structure de protection peut être assimilée à un interrupteur ouvert. Son impédance doit donc être de très forte valeur pour ne pas perturber la fonctionnalité globale du circuit qu'elle protège.
- ✓ Par contre, lors d'une décharge électrostatique, elle doit se comporter comme un interrupteur fermé de très faible impédance et à vitesse de commutation très rapide pour
- ✓ une structure de protection doit aussi limiter la tension appliquée aux bornes du circuit qu'elle protège, afin d'éviter notamment la destruction d'une jonction interne ou le claquage d'un oxyde de grille.
- ✓ Par ailleurs, il est nécessaire qu'une structure de protection se déclenche très

Rapidement, typiquement en moins d'une nanoseconde pour le modèle HBM/MM et une centaine de picosecondes pour le modèle CDM.

Conclusions

Ce manuscrit est un support de cours pour les enseignants d'électronique et pour la sécurité industrielle, comme il peut être intéressant pour les techniciens qui travaillent dans les entreprises qui fabriquent les cartes et les composants électroniques.

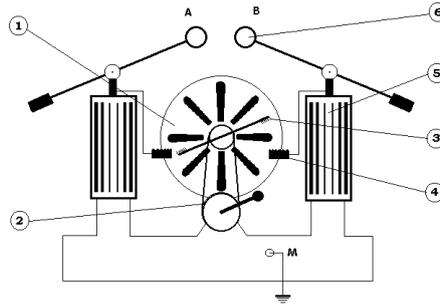
Ce cours donne une idée générale sur les problèmes causés par le phénomène de décharge électrostatique et les procédures suivies pour assurer une maintenance préventive.

Exercices

Exercice N°1

La machine électrostatique de Wimshurt permet de réaliser une électrisation par frottement beaucoup plus efficace.

Les balais frottent sur les parties métalliques régulièrement espacées sur le support isolant, il y a électrisation par frottement des balais. Les électrons transférés lors du frottement, se déplacent vers l'une des deux boules qui porte un excès d'électrons : elle est chargée négativement. L'autre boule possède un déficit d'électrons : elle est chargée positivement.



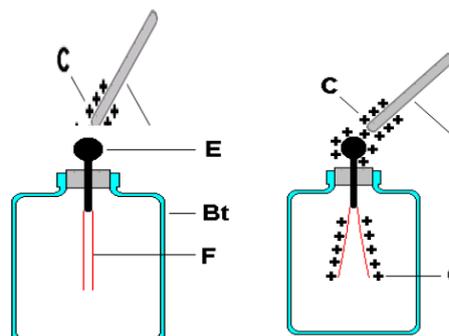
Le tableau suivant représente les Légendes du schéma ci-contre :

Désignation	N°
Disques en matière plastiques	1
Manivelle de mise en rotation	2
Balais métalliques	3
Peignes collectant les charges	4
Condensateurs de stockage	5
Eclateur	6

- 1-Expliquer le comportement électrostatique de deux balais (à droite et à gauche)
- 2-Expliquer pourquoi on obtient des charges positives sur un coté et des charges négatives sur l'autre coté
- 3-Que ce passe -t'il si on rapproche les deux éclateurs, justifier votre réponse.

Exercice 2

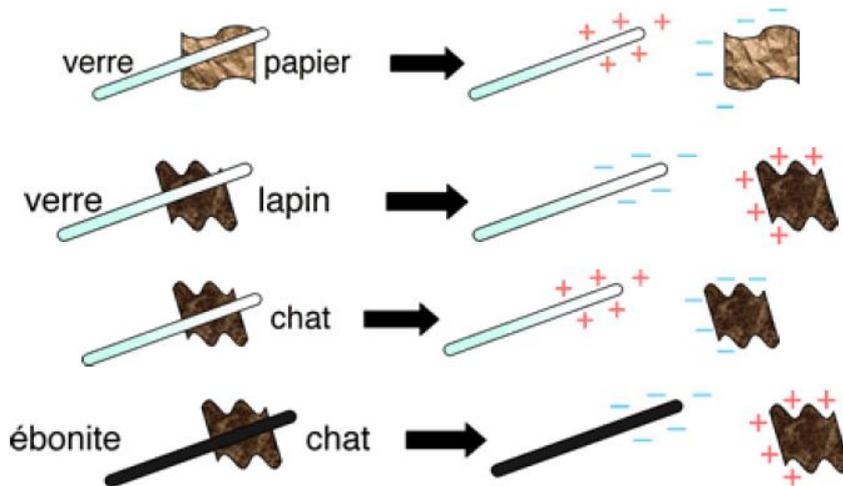
La figure suivante représente le principe de fonctionnement d'un électroscope 1-Définir les éléments E, Bt, F et B de l'électroscope



- 2-Expliquer les deux expériences,
- 3-Déduire le rôle d'électroscope

Exercice 3

La série triboélectrique indique quelle matière sera plus négative (excès d'électrons) ou plus positive (déficit d'électron) après une électrisation par frottement. On considère les expériences de frottement suivantes :



- 1-Déterminer la série triboélectrique des éléments précédents (fourrure de chat, fourrure de lapin, papier, verre et ébonite)

Exercice 4:

Champ électrostatique créée par des charges Trois charges ponctuelles $+q$, $-q$ et $-q$ sont placées aux sommets d'un triangle équilatéral de côté a . Déterminer les caractéristiques du champ électrostatique régnant au centre du triangle. Application numérique : $q = 0,1 \text{ nC}$ et $a = 10 \text{ cm}$.

Exercice 5

Champ électrostatique créée par deux plans Considérons deux plans parallèles distants de d . Le premier plan est chargé positivement avec une densité surfacique de charge $+\sigma$ (en C/m^2). Le second plan est chargé négativement avec une densité surfacique de charge $-\sigma$. Déterminer le champ électrostatique créée par les deux plans en un point quelconque de l'espace.

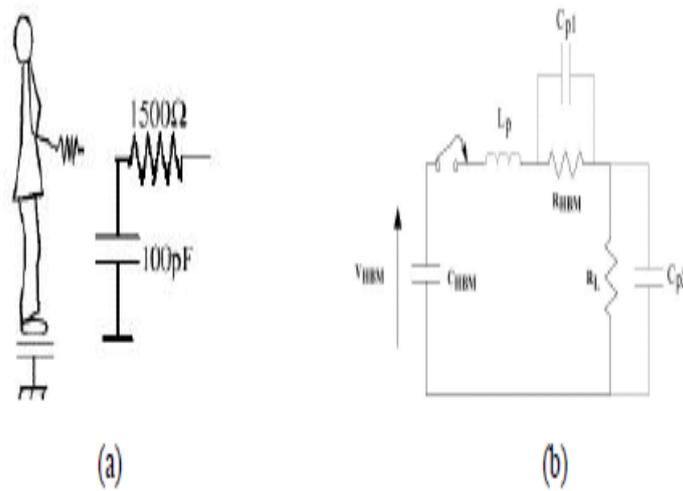
Exercice 6

- 1) Expliquer l'effet de pointe et l'effet de bord d'un champ électrostatique
Une charge $q = 10^{-7} \text{ C}$ se déplace en ligne droite, de A vers B, dans un champ électrique uniforme E d'intensité $E = 600 \text{ V/m}$ et faisant un angle $\alpha = 30^\circ$ avec la direction de AB.
- 2) Etablir, en fonction de q , E , AB et α , l'expression mathématique du travail de la force électrique s'exerçant sur q , au cours du déplacement entre A et B.
- 3) Calculer la valeur de la tension U_{AB} , sachant que $AB = 15 \text{ cm}$.

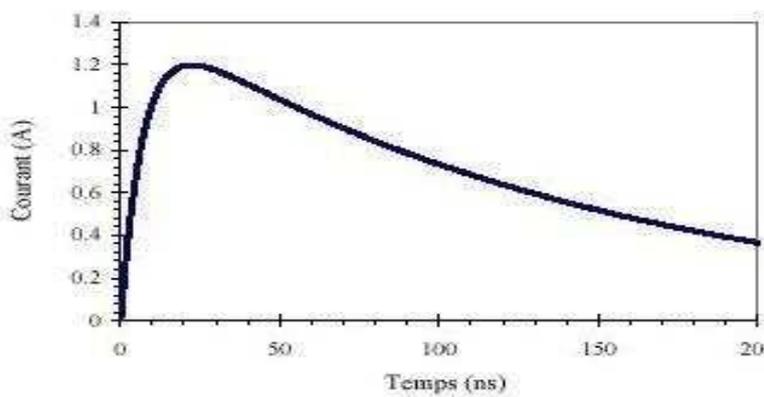
Exercice 7

- 1)-Dans quel cas on utilise le modèle HBM

2) Expliquer la signification de chaque composant utilisé dans le modèle HBM schématisé par la figure suivante



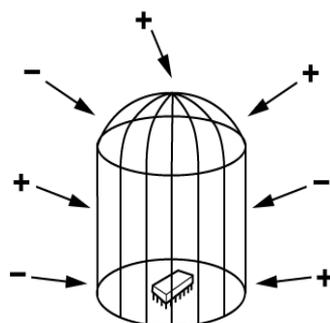
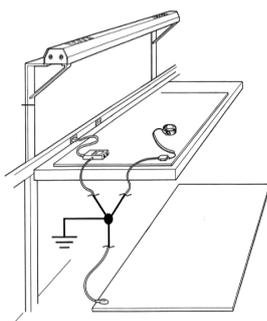
3) La réponse en courant est donnée par la figure suivante, déduire la caractéristique et l'importance du modèle HBM.



Exercice 8

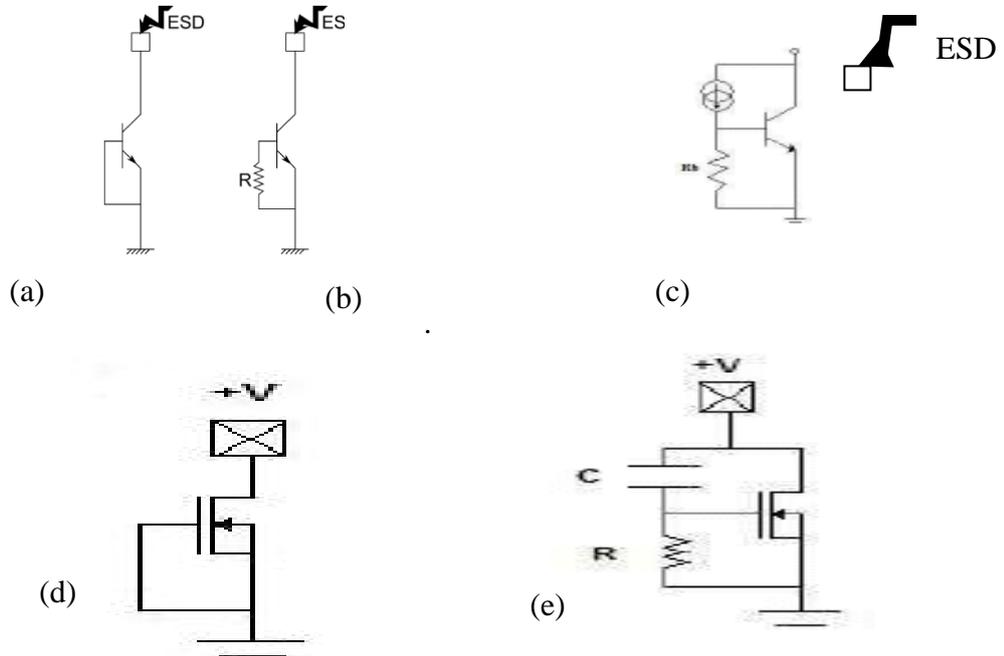
On considère les figures suivantes qui représentent des règles de protection contre ESD

- 1) Expliquer les trois principes de protection en précisant :
- 2) Dans quel cas est utilisé et les effets de chaque principe



Exercice 9

- 1)-Citer trois types de dégradations engendrées par ESD dans les circuits intégrés.
- 2)-Quelle sont les caractéristiques nécessaires d'un dispositif de protection contre ESD.
- 3)-Les circuits suivants representent des strategie de protection contre ESD.
Expliquer le fonctionnement de chaque montage et le mode de conduction lorsqu'il recoit une décharge positive puis négative.



BIBLIOGRAPHIE

- [1]: Nicolas MONNEREAU Développement d'une méthodologie de caractérisation et de modélisation de l'impact des décharges électrostatiques sur les systèmes électroniques. Université de Toulouse 2011
- [2] F. Rachidi. Décharge électrostatique Groupe Compatibilité Électromagnétique École Polytechnique Fédérale de Lausanne
- [3] Tekfouy LIM. Dispositifs de protection contre les décharges électrostatiques pour les applications radio fréquences et millimétriques, Laboratoire IMEP-LAHC dans l'École Doctorale EEATS Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du Signal, 2013
- [4]:N.berger "électricité statique", institut national de recherche et de sécurité, France 2004
- [5]: Paul-Arthur Tortosa "électricité statique"
- [6]: Fabrice Sincère , IUT de Nancy-Brabois <http://perso.orange.fr/fabrice.sincere/>

INTRODUCTION	1
L'ELECTRICITE STATIQUE	3
I. DEFINITION	3
II. ELECTRICITE : HISTORIQUE	3
III. LA Foudre	3
INTRODUCTION A L'ELECTRICITE STATIQUE	5
I. INTRODUCTION.....	5
II. LA THEORIE ATOMIQUE.....	5
III. ELECTRICITE STATIQUE:	5
III.1. les charges électriques	5
III.2. L'électrisation	5
III.2.1.L'électrisation par influence	6
III.2.2. Electrification par contact	6
III.3.Attraction et répulsion	6
TEST ET MESURE DE LA CHARGE	8
I. INTRODUCTION	8
III. LE VERSORIUM.....	9
CHAMP ELECTRIQUE	10
I. INTRODUCTION.....	10
III .CHAMP ELECTROSTATIQUE.....	10
III.1. Définition du vecteur champ	10
II.2. Spectres électriques. Lignes de champ	11
II.3.Lignes de champ du champ électrique	12
Exemples de spectres électriques	13
L'EFFET TRIBOELECTRIQUE	16
I. DEFINITION	16
II. CARACTERISTIQUES	16
II. SITUATION ET PARAMETRES ELECTRIQUES.....	16
III. LA SERIE TRIBOELECTRIQUE	17
V. COMBINAISONS AYANT TENDANCE A PRODUIRE DE L'ELECTRICITE.....	18
DECHARGE ELECTROSTATIQUE	19
I. DEFINITION	19
II. CLASSIFICATION ET SELECTION DES MATERIAUX, DES MATERIELS.....	19
II.1. Matériaux Conducteurs.....	19
II.2.Matériaux dissipatifs.....	20
II.3.Matériaux Isolants	20
II.4.Charges fréquemment générées.....	20
TESTS ET MODELES DE DECHARGES ELECTROSTATIQUES	21
I.MODELES DE DECHARGES ELECTROSTATIQUES.....	21
I.1. Modèle HBM (Norme américaine).....	21
I.2.Modèle MM	23
I.3. Modèle CDM	24
I.4. Modèle du contact métallique humain.....	25
PREVENTION DE PHENOMENE ESD	26
I. TESTS ET CONTROL	26

II. LES MOYENS DE PROTECTION	27
III. LA CAGE DE FARADAY	29
IV. CONNEXION DU CIRCUIT A L'ENCEINTE.....	29
V. PROTECTION CONTRE LA TENSION PARASITE EN MODE COMMUN	30
NATURE DES DEGRADATIONS ET PROTECTION CONTRE ESD	
DANS LES CIRCUITS	31
I. NATURE DES DEGRADATIONS	31
I.1. Dégradation de jonction :	31
I.2. Dégradation dans un métal.....	31
I.3. Dégradation d'oxyde.....	31
I.4. Conduction dans le système Si/SiO ₂	31
II. PRINCIPAUX ELEMENTS DE PROTECTION ESD	31
II.1. Diodes	31
II.2. Transistor bipolaire NPN.....	32
II.3. Transistor NMOS	33
II.4. Thyristor ou SCR (Silicon controlled rectifiers)	33
III. STRATEGIES DE PROTECTION ESD	33
III.1. la stratégie de protection distribuée.....	33
III.2. la stratégie de protection centralisée	34
III.3. Stratégies de protection ESD d'un circuit intégré :	35
IV. CONDITIONS NECESSAIRES SUR LES SYSTEMES DE PROTECTION	35
CONCLUSIONS	36
EXERCICES	37
Exercice 1	37
Exercice 2	37
Exercice 3	38
Exercice 4:.....	38
Exercice 5	38
Exercice 6	38
Exercice 7	38
Exercice 8	39
Exercice 9	40
BIBLIOGRAPHIE	41