

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 74 (1983)

Heft: 5

Artikel: Décharges d'origine électrostatique et leur influence sur les appareils électroniques

Autor: Aguet, M. / Ianovici, M.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-904776>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 30.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Décharges d'origine électrostatique et leur influence sur les appareils électroniques

M. Aguet, M. Ianovici

L'article présente l'origine des charges électriques statiques et des décharges électrostatiques, les méthodes de calcul et de mesure, ainsi que le moyen de limitation et de protection de l'électronique sensible.

Der Aufsatz beschreibt den Ursprung elektrostatischer Ladungen und elektrostatischer Entladungen, die Methoden zu deren Berechnung und Messung sowie die Mittel zur Begrenzung und zum Schutz der empfindlichen Elektronik.

1. Introduction

L'électrostatique a constitué, dès le XVIII^e siècle (fig. 1), les bases nécessaires à l'évolution de l'électrotechnique puis de l'électronique [1]. Aujourd'hui, l'électricité statique ne subsiste que dans certaines applications spécifiques, telles que le procédé de reprographie Xerox, les filtres électrostatiques, la peinture électrostatique [2; ...; 5]. D'autre part on en connaît des effets néfastes [6] comme les décharges électrostatiques du corps humain et les explosions et incendies d'origine électrostatique (tab. I).

La conjonction de deux phénomènes indépendants a contribué à donner une grande importance aux phénomènes électrostatiques depuis quelques années. Il s'agit, d'une part, du recours de plus en plus généralisé à des matériaux plastiques hautement isolants dans l'environnement technique, industriel, des transports, ménager, ainsi que dans le tertiaire, facilitant l'accumulation de charges statiques. D'autre part, on constate l'apparition de composants électroniques de plus en plus sensibles aux perturbations électromagnétiques [8], donc particulièrement sensibles aux décharges d'origine électrostatique (tab. II).



Fig. 1 Inflammation par décharges électrostatiques d'un bac d'esprit de vin

Démonstrations d'électrostatique organisées en 1978 au château de Thunstetten sous les auspices de la Fabrique de porcelaine de Langenthal

Perturbations de composants électroniques soumis à une impulsion de choc rapide [9]

Tableau II

Composants	Energie nécessaire	
	Perturbation (J)	Destruction (J)
CMOS, Circuits intégrés	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶
Transistors	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵
Diodes	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴
Redresseurs	10 ⁻⁴	10 ⁻³
Diodes Zener	10 ⁻³	10 ⁻²
Transistors de moyenne puissance	10 ⁻²	10 ⁻¹
Relais	-	10 ⁻¹
Transistors de puissance	10 ⁰	10 ¹
Diodes de puissance et SCR	10 ¹	10 ²

Limites d'explosion et énergie minimum d'inflammation de quelques gaz et vapeurs [7]

Tableau I

Gaz, vapeur	Limite d'explosion		Energie minimum d'inflammation 10 ⁻³ joule
	inférieure g/m ³	supérieure g/m ³	
Benzine	45...63	231...286	0,25
Benzine de laque	74	222	
Pétrole	64	200	
Benzol	49	280	0,20
Ether diéthylique	59	1585	0,19
Acétylène	29	930	0,019
Hydrogène	3,6	66,6	0,019
Sulfure de carbone	34	1700	0,009
Alcool éthylique	57	370	

Adresse des auteurs

M. Aguet, ingénieur diplômé EPFL/SIA, chargé de cours EPFL; Service de l'électricité de la Ville de Lausanne, 1000 Lausanne 9.
M. Ianovici, Dr ing., adjoint scientifique du Laboratoire de Réseaux d'Energie Électriques de l'EPFL, 16, chemin de Bellerive, 1007 Lausanne.

2. Charges statiques

2.1 Origine

L'origine de l'accumulation des charges électriques est très diverse. Les modes d'électrisation les plus fréquents sont les suivants [10]:

- par frottement (tribo-électricité) (tab. III),
- par contact,
- par influence,
- par ionisation,
- par balloélectricité (chute de particules dans un courant d'air),
- par congélation,
- par clivage (fragmentation).

On peut distinguer des processus de charge statique internes ou externes à un système étudié. Les systèmes, sièges de phénomènes statiques internes, sont, par exemple: des tourne-disques, des enregistreurs magnétiques, des machines à bobiner ou débobiner le papier et les matières synthétiques. Quant aux phénomènes externes, on les rencontre entre autres dans les cas de personnes marchant sur des sols en matière synthétique, de l'électricité atmosphérique (föhn, orages, tempêtes de neige), de véhicules sur pneumatiques, d'avions, de ballons sonde, de fusées et de missiles (fig. 2).

2.2 Calcul de la charge

Afin de fixer les ordres de grandeur des valeurs numériques intervenant dans les procédés de charges statiques, on se limitera au cas particulier de l'électrisation par frottement, qui est la cause la plus fréquente des perturbations de l'électronique sensible.

Lorsque deux matériaux isolants sont frottés l'un contre l'autre, celui à constante diélectrique plus élevée se charge positivement (tab. III). Cette règle [10] s'explique par le fait que dans ce cas, l'isolant à constante di-

Echelle tribo-électrique:
Chaque corps acquiert une charge positive par friction contre tout autre corps classé après lui

Tableau III

Bakélite	+
Silicone	
Verre	
Plexiglas	
Cellulose d'éthyle	
Nylon	
Sel	
Laine	
Peau de chat	
Soie	
Coton	
Bois	
Ambre	
Résines	
Polystyrène	
Polyvinyle	
Teflon	
Caoutchouc	
Soufre	
Polyéthylène	
Polychlorure de vinyle	-

électrique plus élevée se polarise plus facilement et cède des électrons à l'autre corps contre lequel ils est frotté. Elle a été mise en équation expérimentalement par Beach [11], qui indique la densité de charge superficielle égale à

$$\rho_s = 15 \cdot 10^{-6} (\epsilon_{r1} - \epsilon_{r2}) \text{ [C/m}^2\text{]} \quad (1)$$

où ϵ_{r1} , ϵ_{r2} sont les permittivités relatives respectives des deux corps qui sont électrisés par frottement.

Les charges statiques entraînent l'apparition d'un champ électrique (tab. IV). Pour calculer la tension entre deux points, il faut intégrer ce champ le long d'un chemin quelconque entre ces deux points (tab. V).

Champ électrique apparaissant lors de charges électrostatiques

Tableau IV

Nature du champ	E (V/m)
Champ électrique faible	< 100
Champ électrique moyen	$10^2 \dots 10^5$
Champ électrique terrestre:	
par beau temps	100...400
par mauvais temps	$5 \dots 50 \cdot 10^3$
Champ électrique fort	$10^5 \dots 10^8$
Champ électrique disruptif dans l'air	$3 \cdot 10^6$
Champ électrique disruptif dans le SF ₆	$9 \cdot 10^6$
Champ électrique dans les isolants solides	$10 \dots 100 \cdot 10^6$

2.3 Charge d'une personne marchant sur un sol isolant

Lorsqu'une personne marche sur un sol isolant, elle se charge par frottement des semelles sur le sol. Les trois phases du mouvement d'une semelle lors d'un pas comportent le frottement ($d_f = 0$ m), le repos ($d_r = 10^{-4}$ m) et le soulèvement ($d_s = 10^{-2}$ m), d étant la distance entre la semelle et le sol.

Soit $\epsilon_{r1} = 5$ et $\epsilon_{r2} = 2,5$ les permittivités relatives respectivement de la «terre» (sol en nylon) et des semelles (en caoutchouc), $A = 0,025$ m² la surface d'une semelle. En considérant le frottement de la semelle droite, le pied gauche restant immobile, la densité de la charge sur celle-ci est donnée par l'équation (1), $\rho_s = 37,5 \cdot 10^{-6}$ C/m². La charge totale de la semelle vaut

$$Q = \rho_s A = 0,9375 \cdot 10^{-6} \text{ As} \quad (2)$$

Si l'on admet que la personne en mouvement est représentée par le sché-

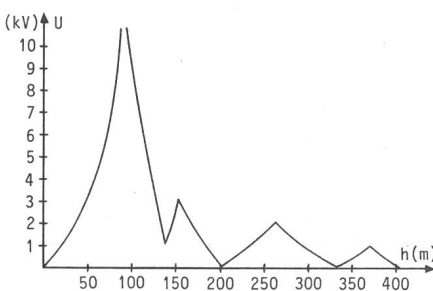


Fig. 2 Potentiel contre terre d'une fusée à revêtement en matière plastique durant son ascension verticale

Vitesse ascensionnelle 240 km/h

La décharge oscillante constatée à partir de 100 m du sol doit correspondre à des amorçages d'arc dans le voltmètre électrostatique utilisé pour la mesure

Tensions apparaissant lors d'une charge électrostatique [7]

Tableau V

Charge électrostatique de	Tensions (V)
Personne marchant avec des chaussures à semelles en caoutchouc	1 000
Personne marchant sur un tapis, avec des chaussures à semelles en caoutchouc	14 000
Laine, lors de son façonnage	3 700
Fibres synthétiques, lors de leur façonnage	9 000
Feuilles de chlorure de polyvinyle, lors de leur fabrication	20 000
Papier dans des machines à papier	jusqu'à 135 000
Papier dans des presses hélio	80 000
Caoutchouc dans des machines à découper	150 000
Cellulose, lors de frottement	40 000
Courroies de transmission à une vitesse de 3 m/s	25 000
Benzol et éther s'écoulant à une vitesse de 3 m/s	3 000
Benzine tombant librement	4 000
Gaz sortant de bouteilles à gaz comprimé	9 000
Encaustique liquide circulant à l'aide d'une pompe	125 000
Sol asphalté passé à la cireuse	5 000

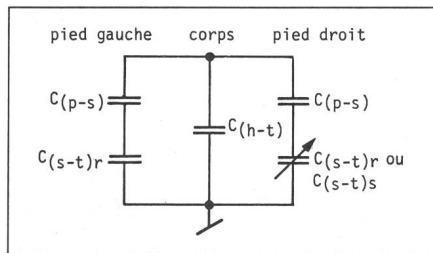


Fig. 3 Schéma équivalent d'une personne en mouvement

ma équivalent de la figure 3, on peut déterminer les valeurs des capacités correspondantes. La capacité pied-semelle de chaque pied a la valeur suivante:

$$C_{(p-s)} = \epsilon_0 \epsilon_{rs} A / d_{p-s} = 55 \text{ pF} \quad (3)$$

où $d_{p-s} = 0,01 \text{ m}$ est l'épaisseur de la semelle. La capacité semelle-terre d'un pied au repos a pour valeur

$$C_{(s-t)r} = \epsilon_0 A / d_r = 2213 \text{ pF} \quad (4)$$

La capacité semelle-terre du pied droit en position de soulèvement vaut

$$C_{(s-t)s} = \epsilon_0 A / d_s = 22 \text{ pF} \quad (5)$$

Le corps humain peut être assimilé à une sphère de diamètre $2r = 0,9 \text{ m}$ dont le centre se trouve à $h = 0,9 \text{ m}$ du sol [10]. La capacité corps-terre vaut alors

$$C_{(h-t)} = 4\pi\epsilon \left[\frac{1}{r} - \frac{1}{(2h-r)} \right]^{-1} = 150 \text{ pF} \quad (6)$$

Comme, par hypothèse, le pied gauche est immobile, les deux capacités s'y rapportant peuvent être mises en série ($C_{g \text{ eq}} = 54 \text{ pF}$). Un nouveau schéma équivalent résultant de la mise en parallèle de cette capacité équivalente du pied gauche ($C_{g \text{ eq}}$) et de la capacité du corps entier ($C_{(h-t)}$) peut être établi (fig. 4):

$$C_{gh \text{ eq}} = C_{g \text{ eq}} + C_{(h-t)} = 204 \text{ pF} \quad (7)$$

Tensions et énergies apparaissant lors de la marche d'une personne sur un sol isolant

Position	Q (As)	C _(s-t) (pF)	U _(s-t) (kV)	U _(h-t) (kV)	C _{h eq} (pF)	W (mJ)
Frottement	0,94 · 10 ⁻⁶	∞	0	0	259	0
Repos	0,94 · 10 ⁻⁶	2213	0,424	0,09	258	1 · 10 ⁻³
Soulèvement	0,94 · 10 ⁻⁶	22	42	8,8	220	8,5

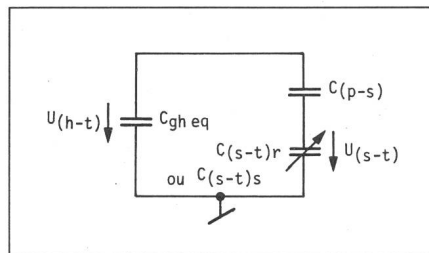


Fig. 4 Schéma équivalent simplifié

La tension qui apparaît entre la semelle droite et la terre en position de repos est

$$U_{(s-t)r} = Q / C_{(s-t)r} = 424 \text{ V} \quad (8)$$

Partant de cette valeur, on peut calculer la tension entre tout point du corps (un doigt, par exemple) et un objet à la terre:

$$U_{(h-t)r} = U_{(s-t)r} \frac{C_{(p-s)} C_{gh \text{ eq}}}{(C_{(p-s)} + C_{gh \text{ eq}}) C_{gh \text{ eq}}} = 89 \text{ V} \quad (9)$$

En position de soulèvement, la tension semelle-terre du pied droit de

$$U_{(s-t)s} = Q / C_{(s-t)s} = 42 \text{ kV} \quad (10)$$

tandis que la tension du corps par rapport à la terre en position de soulèvement $U_{(h-t)s}$, vaut 8,8 kV d'après l'équ. (9).

Pour calculer l'énergie accumulée par le corps d'une personne en marche, on considère une capacité équivalente résultant d'une part de la mise en série des deux capacités se rapportant aux pieds et d'autre part de la mise en parallèle des trois capacités des deux pieds et du corps. En position de repos, on aura alors

$$C_{h \text{ eq } r} = \frac{C_{(p-s)} C_{(s-t)r}}{C_{(p-s)} + C_{(s-t)r}} + C_{gh \text{ eq}} = 258 \text{ pF} \quad (11)$$

$$W_r = \frac{1}{2} C_{h \text{ eq } r} U_{(h-t)r}^2 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ mJ} \quad (12)$$

et en position de soulèvement:

$$C_{h \text{ eq } s} = \frac{C_{(p-s)} C_{(s-t)s}}{C_{(p-s)} + C_{(s-t)s}} + C_{gh \text{ eq}} = 220 \text{ pF} \quad (13)$$

$$W_s = \frac{1}{2} C_{h \text{ eq } s} U_{(h-t)s}^2 = 8,5 \text{ mJ} \quad (14)$$

Le tableau VI résume les résultats du calcul des tensions et énergies dues à la charge accumulée par une personne lors d'une enjambée (pas). Lors d'enjambées successives, la tension tend rapidement vers une valeur limite déterminée par l'apparition de décharges partielles [12].

2.4 Dangers des charges statiques

Par le champ électrique qu'elles créent, les charges statiques peuvent provoquer des perturbations de composants électroniques sensibles (p.ex. des mémoires statiques), voire des destructions. L'expérience montre qu'une injection de charges surfaciques dépassant un certain seuil entraîne la destruction d'un diélectrique (tab. VII). Cette grandeur s'est révélée indépendante de l'épaisseur de l'échantillon, ainsi que des caractéristiques du milieu ambiant.

2.5 Simulation des champs statiques

La simulation des champs statiques est effectuée en connectant une source de haute tension réglable (cascade de Greinacher ou Cockroft-Walton) à deux plaques conductrices isolées déterminant le volume de test.

Seuils d'énergie surfacique entraînant la perforation de diélectriques [13]

Tableau VII

Matériau	W _s /ε _r (mJ/cm ²)	ε _r	W _s (mJ/cm ²)
Verre	0,28	7,5	2,1
Polyimide	0,55	3,3	1,8
Mylar	0,51	3,1	1,6
Plexiglas	0,4	3,5	1,4
Polycarbonate	0,44	3,2	1,4
Acétate de cellulose	0,38	3,7	1,4
Polypropylène	0,67	2,1	1,4
Polyéthylène	0,43	2,2	0,95
Polyamide	0,24	4,0	0,95
PVC	0,28	3,4	0,95
Gélatine	0,063	8	0,5
Téflon	0,19	2,1	0,4



Fig. 5 Appareils de mesure du champ électrique
De gauche à droite: sonde radioactive, moulin à champ (Feldmühle), champmètre électronique

2.6 Mesure des champs électriques

Les champs électriques se mesurent au moyen de voltmètres électrostatiques, de sondes à pouvoir radioactif, de moulins à champ électrique ou de champmètres électroniques (fig. 5).

2.7 Moyens d'intervention contre les charges statiques et leurs effets de champ

Les moyens d'intervention se situent à deux niveaux [14]. Le niveau préventif de charge comprend les mesures suivantes:

- empêcher l'apparition de charges par suppression des frottements, influences, etc.;
- choix judicieux des matériaux en contact selon la classification tribo-électrique (tab. III);
- élimination des charges statiques par abaissement de la résistivité des isolants (tab. VIII) au moyen de produits «semiconducteurs» en surface ou dans la masse (métallisation, graphitisation, etc.) [15]. Les valeurs recommandées sont $R_s < 1...100 \text{ M}\Omega$ et $\rho_s < 10^{-2} \text{ M}\Omega \cdot \text{m}$;
- mise à terre convenable (sol rendu conducteur au moyen de fils métalliques interconnectés);
- élévation de la conductivité de l'air par l'humidité (>70%) ou l'ionisation (lampe UV, effet de pointe en tension continue ou moyenne fréquence (Tesla), produits radioactifs (radium 226, thallium 304, strontium 90, etc. avec une activité < 100 nCi);

¹⁾ Des directives anglaises indiquent que la résistance d'isolation du sol doit se situer entre 0,1 et 1 M Ω .

- neutralisation des charges par injection de charges de signe opposé (injecteur ionisant à quartz piezoélectrique).

Au niveau de protection contre les champs électriques, on peut prévoir

- de limiter, voire supprimer les mouvements dans la mesure du possible;
- d'installer des écrans ou des cages de Faraday agissant par influence;
- d'installer des parasurtensions (éclateurs à air ou à gaz, semiconducteurs) ou des parafoudres.

Remarque: Il est toutefois important de vérifier que les systèmes de limitation des charges statiques ne soient pas eux-mêmes générateurs de charges (inducteur, frottement, etc.) ou de perturbations électromagnétiques (ioniseur).

Dans le cas particulier de la charge d'une personne marchant sur un sol isolant on peut

- au niveau du sujet:
 - choisir des semelles dont la matière est, dans l'échelle triboélectrique, proche de la matière du revêtement du sol;
 - choisir deux semelles de matières différentes de façon à équilibrer les charges positives et négatives;
 - équiper le sujet d'une tenue à fils conducteurs reliée à la terre (cage de Faraday);
 - au niveau de l'air:
 - abaisser la résistance électrique de l'air;
 - au niveau du sol:
 - l'enduire d'un produit lubrifiant afin d'éviter le frottement électrostatique (attention aux glissades).
- La mise à la terre du sol (fils conducteurs) ne résoud pas le problème.

3. Décharges statiques

3.1 Origine

La décharge statique apparaît lorsque le champ électrique maximum atteint la valeur du champ disruptif dans le milieu considéré. Dans le cas de l'air et aux conditions atmosphériques normales (20°C, 760 mm Hg, 11 g/m³ d'humidité), $E_d = 3 \text{ MV/m}$. Pour d'autres conditions atmosphériques on introduit des facteurs de correction

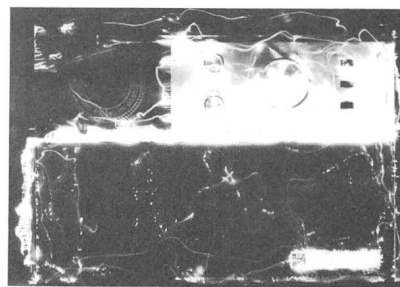


Fig. 6 Décharges statiques sur un poste de radio constitué de matériaux composites conducteurs et isolants

(Film Kodak recording 2475). A remarquer la prépondérance des décharges aux endroits correspondants à la juxtaposition de matériaux isolants et conducteurs

[10]. On distingue deux types de décharges:

- la *décharge partielle*: elle a lieu sur une partie du trajet séparant les deux électrodes soumises à une différence de potentiel;
- la *décharge complète* ou *arc*: elle a lieu sur l'ensemble du trajet considéré.

Une décharge est dite électrostatique lorsque un ou plusieurs corps isolants sont mis en relation galvanique avec un ou plusieurs corps isolants ou conducteurs. La décharge électrostatique peut être provoquée par divers moyens, par exemple:

- l'ionisation de l'air (effet de couronne);
- l'humidification de l'air;
- l'utilisation de matières solides ou liquides partiellement conductrices;
- l'arc;
- la mise à la masse ou à la terre.

Dans le cas d'un corps de décharge isolant on parlera d'une fermeture capacitive, dans le cas d'un conducteur d'une fermeture résistive. Un circuit de décharge électrostatique est, par conséquent, assimilable aux circuits classiques de choc.

Il est à remarquer qu'il ne faudra pas négliger de prendre en considération les phénomènes transitoires d'influence «électrostatique» apparaissant simultanément et faisant intervenir des tensions et des courants transitoires dans des parties insoupçonnées d'un système (fig. 6).

Résistances et résistivités transversales et superficielles de quelques matériaux isolants usuels mesurées en tension continue

Tableau VIII

Matériau	Epaisseur $d(\text{mm})$	Tension (kV)	Courant transversal (μA)	Courant superficiel (μA)	Résistance transversale $R_t(\text{G}\Omega)$	Résistance superficielle $R_s(\text{G}\Omega)$	Résistivité transversale $\rho_t \cdot 10^9(\Omega\text{m})$	Résistivité superficielle $\rho_s \cdot 10^{11}(\Omega\text{m})$
Epoxy	1,45	10	1,9	0,4	5,3	25	25	5,3
Plexiglas	4,1	10	0,75	0,55	13,3	18	22	3,8
PVC	6	10	0,5	0,6	20	17	23	3,5
Dellite	5,6	10	1,6	0,95	6,2	11	7,5	2,2

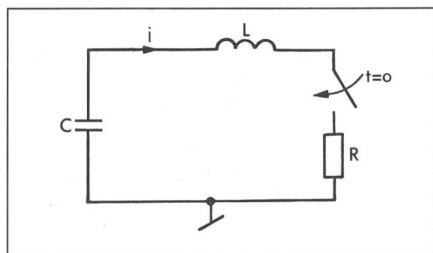


Fig. 7 Schéma équivalent du circuit de décharge
R Résistance de décharge

3.2 Calcul de la décharge

Le schéma équivalent simplifié d'un circuit de décharge électrostatique est présenté à la figure 7. Quelques valeurs de résistances de décharge intervenant couramment dans les problèmes électrostatiques sont présentées au tableau IX. La figure 8 présente la statistique des résistances du corps humain mesurées sur un lot de 128 candidats de 18 à 22 ans.

L'équation différentielle du circuit de la figure 7 est bien connue:

$$L \cdot d^2i/dt^2 + R \cdot di/dt + i/C = 0 \quad (15)$$

Elle comporte deux solutions distinctes:

a) L'onde de choc pour $R > \sqrt{4L/C}$:

$$i = \frac{U}{\sqrt{R^2 - 4L/C}} (e^{-t/\tau_a} - e^{-t/\tau_b}) \quad (16)$$

$$\text{où } \tau_{a,b} = - \frac{2L}{-R \pm \sqrt{R^2 - 4L/C}} \quad (17)$$

Les indices a et b se rapportent respectivement aux signes plus et moins dans la formule (17).

b) Une oscillation amortie pour $R < \sqrt{4L/C}$:

$$i = \frac{4U}{\sqrt{4L/C - R^2}} e^{-t/\tau} \sin \omega_0 t \quad (18)$$

$$\text{où } \tau = 2L/R \text{ et } \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (19)$$

3.3 Décharge d'une personne chargée électrostatiquement

L'amorçage d'une décharge est à attendre au moment du décollement

Valeurs calculées des paramètres de décharge

	Résistances de décharge	Forme d'onde	$\hat{I}_{(A)}$	τ_a (s)	τ_b (s)	τ (s)	f_0 (MHz)
Corps humain sain et sec	50 kΩ	choc	0,176	$1,48 \cdot 10^{-3}$	$0,02 \cdot 10^{-9}$		
Corps humain mouillé	5 kΩ	choc	1,76	$0,148 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-9}$		
Corps humain blessé	500 Ω	choc	17,6	$0,0148 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-9}$		
Barre de court-circuit	5 mΩ	oscillant	3029			$0,4 \cdot 10^{-3}$	10,7

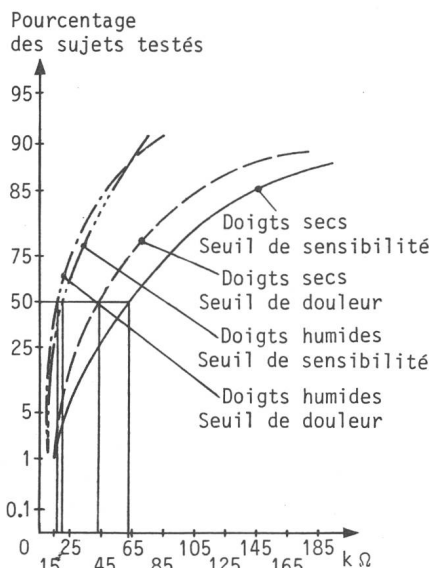


Fig. 8 Statistique des résistances du corps humain

maximum du pied par rapport au sol. Selon le tableau VI on a alors une tension de 8,8 kV, une capacité de 220 pF et une charge de $0,94 \cdot 10^{-6}$ C. Suivant les caractéristiques du circuit de décharge on obtient les paramètres de décharge du tableau IX. L'inductivité a été fixée dans tous les cas égale à $1 \mu H$, ce qui représente environ 1 m de conducteur avec retour du courant par la terre. On constate les effets bien connus que pour une tension constante, si la résistance R augmente, la valeur de crête du courant diminue, le temps de montée diminue et la pente du courant reste pratiquement cons-

tante. D'autre part, si l'inductance L diminue, la valeur de crête du courant augmente, le temps de montée diminue et la pente du courant augmente.

On peut en déduire que l'amélioration du blindage d'un circuit électronique sensible à protéger peut se faire par la diminution de L au moyen d'une cage blindée.

Sur la base des équations (1.1), (1.2) et (1.3) de [16], on peut calculer les champs électriques (tab. X) et magnétiques (tab. XI) induits et rayonnés dans les différentes configurations.

3.4 Dangers des décharges statiques

Les principaux dangers des décharges d'origine statique sont:

- les chocs électriques. Ils ne sont normalement pas dangereux en soi pour les personnes (sauf dans les salles d'opération); toutefois leurs effets secondaires (réactions) peuvent comporter des dangers;
- les perturbations, voire même la destruction de l'électronique sensible;
- les perturbations des télétransmissions.

Les paramètres essentiels de la décharge électrique sont [17; 18; 19]:

- le courant de crête;
- le di/dt (effet dynamique destructeur);

- la décharge: $\int_{t_i}^{t_f} i dt$;
- l'intégrale d'action: $\int_{t_i}^{t_f} i^2 dt$;

Champs électriques en V/m pour une antenne de longueur unitaire ($h = 1$ m)

Tableau X

Distance à l'antenne r(m)	Fermeture sur:			
	impédance haute 50 kΩ	impédance moyenne 5 kΩ	impédance basse 500 Ω	«court-circuit» 5 mΩ
0,01	$0,115 \cdot 10^6$	$1,067 \cdot 10^6$	$10,5 \cdot 10^6$	$182 \cdot 10^6$
0,1	$203 \cdot 10^3$	$11,7 \cdot 10^3$	$107,6 \cdot 10^3$	$1840 \cdot 10^3$
1	108	220	1255	207 700
10	10	12,5	36,5	4400

Le trait gras sépare la zone supérieure où l'induction est prépondérante de la zone inférieure où le rayonnement est plus important.

Tableau IX

Distance à l'antenne $r(\text{m})$	Fermeture sur:			
	impédance haute 50 k Ω	impédance moyenne 5 k Ω	impédance basse 500 Ω	«court-circuit» 5 m Ω
0,01	305	2846	$28,2 \cdot 10^3$	$4,85 \cdot 10^6$
0,1	5,4	31	287	$49,15 \cdot 10^3$
1	0,3	0,6	3,35	554
10	0,03	0,03	0,08	12

Le trait gras sépare la zone supérieure où l'induction est prépondérante de la zone inférieure où le rayonnement est plus important.

– l'énergie de décharge (fig. 12 de [8]) et le taux de répétition dans le temps.

Le tableau XII présente les seuils de destruction des circuits intégrés CMOS.

3.5 Simulation des décharges électrostatiques

La simulation des décharges électrostatiques peut être effectuée par des générateurs très divers: électrostatiques, à cascade de Greinacher (fig. 9), des générateurs d'effet couronne, des générateurs oscillants (Tesla), de fréquence radio ou de choc. Les paramètres essentiels à prendre en compte pour ces générateurs ont été étudiés par le groupe de travail CEI TC 65WG4 [22, 23], qui propose:

- une tension de charge jusqu'à 16 kV;
- une capacité C de 150 pF, tenant compte de toutes les capacités parasites: bornes de traversée, câbles, etc.;
- une résistance de décharge R de 150 Ω ;
- un taux de répétition maximum de 20 Hz;
- un temps de montée de quelques 10 ns;
- un doigt normalisé de décharge;
- le blindage du générateur afin que les effets de rayonnement interne ne faussent pas la mesure à courte distance.

3.6 Mesure des décharges statiques

Les mesures de décharges statiques sont de deux types:

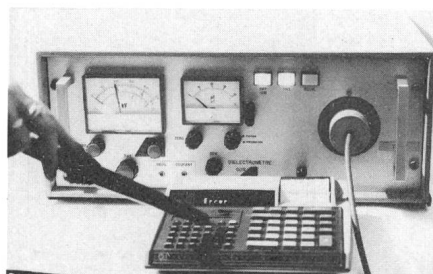


Fig. 9 Perturbation d'une calculatrice de table à l'aide d'un générateur électrostatique GOR, 50 kV à cascade de Greinacher

- les mesures des phénomènes dans la zone d'induction (tension au moyen de voltmètres électrostatiques, champs électriques par des sondes capacitatives [peaking circuit] et champs magnétiques par l'intermédiaire de boucles inductives blindées au champ électrique [24]).
- les mesures de phénomènes dans la zone de rayonnement (champ électromagnétique mesuré au moyen d'antennes adaptées).

Seuils de destruction des circuits intégrés CMOS [21]

Tableau XII

Circuit	Valeur minimum	Largeur d'impulsion		
		25 ns	100 ns	1 μ s
CD4001A Entrée	Tension (V)	350	150	60
	Courant (A)	10	7	1,2
	Puissance (W)	3500	1050	72
	Energie (J)	87,5	105	72
CD4016 Entrée	Tension (V)	150	120	20
	Courant (A)	2,0	4,0	2,0
	Puissance (W)	300	480	40
	Energie (J)	7,5	48	40
CD4049 Sortie	Tension (V)	150	25	12
	Courant (A)	15	6,0	3,0
	Puissance (W)	2250	150	36
	Energie (J)	56,2	15	36
CD4050 Sortie	Tension (V)	170	60	20
	Courant (A)	13	7,5	3,0
	Puissance (W)	2210	450	60
	Energie (J)	55,2	45	60
CD4050 Entrée	Tension (V)	120	60	24
	Courant (A)	4,0	4,0	2,0
	Puissance (W)	480	240	48
	Energie (J)	12,0	24	48
CD4071 Entrée	Tension (V)	80	150	250
	Courant (A)	5,2	0,3	0,4
	Puissance (W)	416	45	100
	Energie (J)	10,4	4,5	100

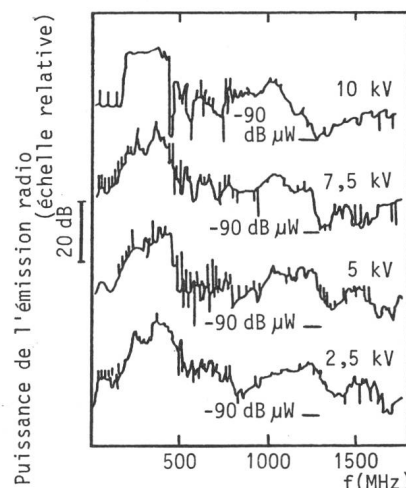


Fig. 10 Spectre d'émission à fréquence radio d'une sphère métallique ($\varnothing 125 \text{ mm}$) se déchargeant sur une plaque pour différentes tensions de charge [20]

Afin de faciliter la localisation de décharges statiques, on peut se baser sur les résultats de mesure sur des structures types. Dans le cas d'une décharge entre une sphère et une plaque (fig. 10), plus la tension est élevée, moins le spectre de fréquence est étendu.

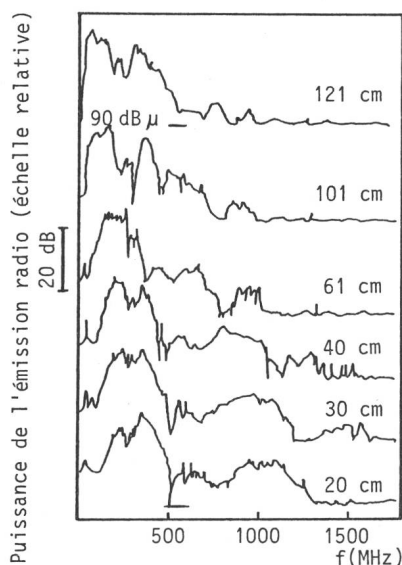


Fig. 11 Spectre d'émission à fréquence radio d'un barreau métallique ($\varnothing$ 13 mm) de longueur variable soumis à une tension de 3,7 kV et se déchargeant contre une plaque [20]

du. Pour une décharge entre un barreau et une plaque (fig. 11), le spectre est moins complexe que dans le cas d'une sphère, et des pics spécifiques peuvent être identifiés en liaison avec la longueur l du barreau ($l = n\lambda/4$, où n est un nombre impair et λ la longueur d'onde).

Pour la mesure des courants de décharge on utilise le shunt à haute fréquence, la boucle inductive et la sonde à effet Hall. Des méthodes dites à «potentiel libre» utilisent des effets électro-optiques (*Faraday*) et des séparations galvaniques par fibres optiques.

Dans tous les cas, les mesures doivent être effectuées avec un plan de masse de référence de bonne qualité (par exemple une plaque de cuivre), des liaisons par câbles coaxiaux à

Limiteurs de surtensions [27]

Tableau XIII

Suppresseur	Tension de tenue (V)	Tension d'amorçage (V)	Capacité équivalente (pF)	Courant maximum (A)	Tension résiduelle pour 10 A (V)	Efficacité de protection α
Claqueur	550/800		3	880	23	4,1
Eclateur	75/830		1	880	17	9,17
Tube néon	110/4500		49	880	–	0,75
Parasurtensions	550/1850		4,2	880	32	0,38
Transzorb	33		2194	357	–	8,85
Diode	6		5267	400	–	106
Varistor au silicium	185		1403	327	300	0,26

double gaine, des cages de mesure blindées, découplées et filtrées [25].

3.7 Moyens d'intervention contre les décharges d'origine statique

Au paragraphe 2.7, on a étudié les moyens permettant de limiter les charges resp. les tensions, les capacités et les énergies d'origine électrostatique. En admettant que ces moyens ne soient pas suffisants pour empêcher l'apparition d'une décharge statique, les moyens de protection suivants sont à disposition:

- intervention sur le circuit de décharge (augmentation de la résistance pour diminuer le courant de crête et diminution de l'inductance pour diminuer les surtensions);
- éviter les décharges électriques en cascade en assurant une bonne continuité entre isolants et conducteurs;
- atténuation des décharges statiques par des filtres, filtres traversants, ferrites, câbles à pertes, supresseurs (temps de commutation quelques ps pour les transzorb par exemple) (fig. 12);

- intervention sur l'interface entre le circuit perturbateur et le circuit perturbé au moyen d'une cage blindée ou par séparation opto-électronique.

La protection contre les surtensions de diverses origines a fait naître au cours de ces dernières années une constellation de composants du type supresseur (tab. XIII) [28]. Dans le cas de la protection contre les surtensions d'origine statique, il est clair que le recours à des composants travaillant sur le principe de l'éclateur (parasurtensions à gaz) ne peut être envisagé puisque les temps de retard à l'amorçage sont du même ordre de grandeur (quelques dizaines de ns). Par contre, le recours à des composants semi-conducteurs est efficace contre les surtensions (temps de retard de l'ordre de la ps). L'inconvénient majeur de ce dernier type de supresseurs est la capacité élevée de la jonction (quelques milliers de pF).

4. Conclusion

Lorsqu'un circuit, un appareil ou un système électronique peut être exposé

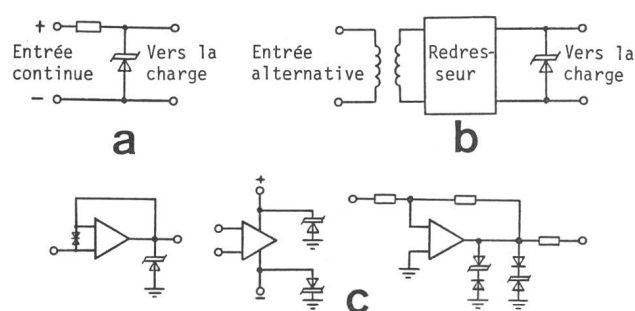
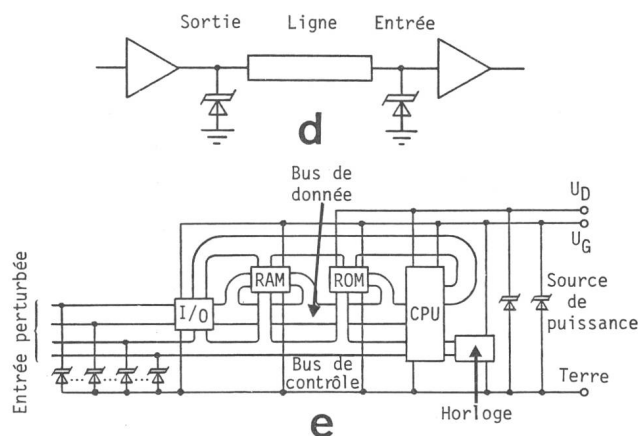


Fig. 12 Différents moyens de protection contre les surtensions [26]

- a pour une alimentation continue
- b pour une alimentation alternative
- c pour un circuit intégré
- d pour une ligne
- e pour un microprocesseur



à des décharges d'origine statique interne ou externe, il est nécessaire de prendre les mesures de précautions propres à éviter les perturbations du fonctionnement voire la destruction de composants [29].

Pour limiter les phénomènes électrostatiques, on agit tout d'abord sur leurs causes en diminuant, par des mesures appropriées, les accumulations de charges. Lorsqu'il n'est pas possible de résoudre entièrement le problème par les moyens correspondants, on doit recourir à la limitation des effets de la décharge. Il faut cependant prendre garde à ce que les moyens d'interventions choisis n'aillent pas à l'encontre les uns des autres.

Etant donné la similitude des temps de montées (1...100 ns) des chocs d'origine électrostatique et ceux pouvant provenir d'une explosion nucléaire à haute altitude (NEMP) [9], on peut considérer que les moyens de protection [30] sont très semblables; ceci est intéressant sur le plan technico-économique pour certaines applications.

Bibliographie

- [1] H. Prinz: Les merveilleuses et étonnantes expériences avec l'étincelle électrique. Bull. ASE 63(1972)1, p. 1...13.
- [2] A. D. Moore: Electrostatics and its applications. New York a.o., John Wiley, 1973.
- [3] S. Masuda: Elektrostatik und ihre technischen Anwendungen. Gastvorlesungen an der ETH Zürich.
- [4] Y. Wada, M. M. Perlman and H. Kokado: Charge storage, charge transport and electrostatics with their applications. - Studies in electrical and electronic engineering vol. 2 - Tokyo, Kodansha Limited, and Amsterdam/Oxford/New York, Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.
- [5] H. Prinz: Statikelektrizität in der Anwendungstechnik. Bull. SEV/VSE 67(1976)2, S. 53...64.
- [6] H. Prinz: Statikelektrizität als Gefahr. Bull. SEV/VSE 65(1974)26, S. 1867...1881.
- [7] E. Bitterli: Les dangers de l'électricité statique. Cahiers Suisse de la Sécurité du Travail - (1959)20.
- [8] M. Aguet, P. A. Nobs et H. Sauvain: Mesures statistiques des perturbations dans les réseaux électriques. Bull. ASE/UCS 73(1982)21, p. 1145...1152.
- [9] T. Ruedy, J. Bertuchoz und B. Wamister: Entstehung und Wirkung des NEMP. Bull. SEV/VSE 71(1980)17, S. 906...910.
- [10] M. Aguet et M. Ivanovici: Haute Tension. Traité d'électricité de l'EPFL, vol. XXII. Lausanne, Presses Polytechniques Romandes, 1983.
- [11] R. Beach: Electrostatic ills and cures of aircraft. Electr. Engng. 66(1947)4, p. 325...334.
- [12] C. J. Nadler: Problèmes soulevés par le phénomène de l'électricité statique. Bull. techn. PTT 57(1979)6, p. 213...221.
- [13] H. Bertein: Etude du mécanisme de la perforation des isolants solides sous l'action des décharges partielles. Identification d'un critère intrinsèque de tenue des isolants à la tension. Rev. Gén. Electr. 79(1970)6, p. 497...505.
- [14] R. Challande: Mesure et élimination de l'électricité statique nuisible. Manuel technique destiné à la détection, à la mesure et à la prévention des accidents dus à l'électrostatique dans l'industrie. Collection de l'Association Nationale de la Recherche Technique (ANART). Paris, Editions Eyrolles et Editions Gauthier-Villars, 1973.
- [15] G. M. Gale and J. Pacitti: Anti-static agents: a critical review of the literature. RAPRA Technical Review No. 43. Shawbury, Rubber and Plastics Research Association of Great Britain, 1968.
- [16] M. Aguet e.a.: Perturbations électromagnétiques dans les réseaux électriques de distribution. Bull. ASE/UCS 69(1978)24, p. 1310...1314.
- [17] G. Frühauf: Erkennung und Beurteilung von Blitzwirkungen. Bull. SEV/VSE 65(1974)26, S. 1903...1908.
- [18] H. Prinz: Gewitterelektrizität als Gefahr. Bull. SEV/VSE 67(1976)24, S. 1313...1322.
- [19] H. Prinz: Die Blitzentladung in Vierparameterdarstellung. Bull. SEV/VSE 68(1977)12, S. 600...603.
- [20] G. J. Butterworth: Radio frequency spectrum analysis as a method for investigating electrostatic sparks in hostile environments. International Report CLM-R 155 of UKAEA Research Group. Abington, Culham-Laboratory, 1975.
- [21] G. Meyer: Die Gefährdung elektrischer und elektronischer Bauelemente durch sekundäre NEMP-Wirkungen. In: NEMP-Schutz von elektronischen Geräten. Bern, Gruppe für Rüstungsdienste, 1983.
- [22] H. A. Kunz: Charge électrostatique et simulation du processus de décharge. Luterbach, Schaffner Elektronik AG, 1982.
- [23] O. Frey: Electromagnetic compatibility testing of electronic components subassemblies, measuring instruments and systems. EMC Technology 1(1982)4, p. 78...83.
- [24] P. Blech a.o.: Impulse wave attenuation factors of shielding cages. Proceedings of the third Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Rotterdam, Mai 1...3, 1979; paper 41 H1, p. 219...224.
- [25] M. Aguet: Informatique et compatibilité électromagnétique. Output 11(1982)6, p. 43...56.
- [26] Transient protector (Transzorb). Tempe/Arizona, General Semiconductor Industry.
- [27] D. R. J. White: EMP-design and measurement of control of susceptibility, EMP-F80. Gainesville, DON White Consultants Inc., 1980.
- [28] P. Hasse: Schutz von Niederspannungsanlagen und Regelstromkreisen vor Überspannungen. Bull. SEV/VSE 73(1982)9, S. 409...416.
- [29] M. Aguet: Charges et décharges d'origine électrostatique. Séminaire de formation EINEV, Yverdon, 30 mars...3 avril 1981.
- [30] M. Wik a.o.: Measurement and application of secondary surge arresters for the purpose of NEMP protection. Proceedings of the fourth Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Zürich, March 10...12, 1981; paper 41 H3, p. 221...225.