

Synthèse

1. Principes de base

L'objectif de cette étude est de modéliser le fonctionnement électrique d'un système « clôture électrique » composé d'un générateur, de la clôture et de personnes en contact avec cette clôture.

Il s'agit d'estimer les effets des impulsions sur le corps humain dans les configurations et conditions d'utilisation et d'exposition réelles raisonnablement prévisibles.

Les cibles concernées par l'étude sont :

- Les personnes avec une hypothèse sur les résistances variant de 50 à 5000 Ω
- Les animaux (non pris en compte dans cette étude)
- La végétation avec une hypothèse sur les résistances variant de 100 à 20000 Ω

Les paramètres à étudier retenus pour ce travail sont les suivants :

- Niveau d'énergie admissible par le corps humains
- Atténuation d'énergie par l'installation
- Résistance du corps humain

Nous avons pris comme hypothèse que l'énergie spécifique (A^2s) était le moyen le plus facile d'évaluer la dangerosité d'une impulsions sur le corps humains.

Nous vous proposons de commenter chacun de ces paramètres.

Niveaux d'énergie admissibles par les personnes

Les normes montrent que l'énergie maximale admissible par les personnes varie proportionnellement à la valeur de l'impédance du corps. Dans le tableau voisin, la valeur d'énergie dangereuse de 4,5 J correspond à la ligne 500 Ω (résistance minimale du corps humains). Cette correspondance peut expliquer le choix de la valeur de 5 joules comme limite normative. Nous voyons de plus que le seuil d'énergie dangereuse s'abaisse rapidement avec la résistance du chemin parcouru par le courant. Attention ce tableau est un simplification de l'analyse en réalité, les valeurs à prendre en compte sont plus complexes et doivent tenir compte de plusieurs paramètres dont certains sont développés en annexe 5.

Seuil maximal d'énergie de danger de fibrillation (J)

Energie spécifique (A^2s)	
	0,009

impédance du chemin (Ω)	Energie dangereuse (J)
50	0,45
100	0,90
500	4,50
1000	9,00
5000	45,00

Comme il est toujours difficile de se représenter une énergie électrique, nous pouvons proposer une image physique plus parlante. Par exemple, la valeur de 5 joules correspond à l'énergie d'une masse de 5kg lâchée d'une hauteur de 100 mm.

Niveaux d'énergie générés par les électrificateurs

Les caractéristiques de l'impulsion délivrée par l'électrificateur sont actuellement limité par la norme EN 60335-2-75(art 22 108) en durée et énergie.

Les impulsions ne doivent pas dépasser sur une charge normalisée de 500 Ω :

- Une fréquence de 1 Hz

Les clôtures électriques - Etude et modélisation

- Une durée de 10 ms
- Une énergie de 5J

La dangerosité augmente avec la durée d'impulsion. Les électrificateurs actuels génèrent souvent des impulsions d'une durée inférieurs à 1 ms (souvent voisines de 0,1 ms).

Atténuation d'énergie par l'installation

Energie délivrée par l'électrificateur (électrificateur UBI-ultra basse impédance et HI – haute impédance)

L'énergie délivrée dépend essentiellement de l'adaptation de l'impédance interne et de l'impédance de charge de l'électrificateur. L'énergie est maximale lorsque ces deux valeurs sont égales.

En conséquence, un appareil dont l'énergie est limitée pour une charge donnée est susceptible de délivrer une énergie plus élevée sur une autre impédance de charge.

Ce phénomène se produit quelque soit l'impédance interne de l'électrificateur.

Par exemple un électrificateur délivrant 5 joules sur 500 Ω avec une impédance interne de 100 Ω peut générer 8 joules sur une charge de 200 Ω .

Et un électrificateur délivrant 30 joules sur 30 Ω avec une impédance interne de 100 Ω peut générer 40 joules sur une charge de 100 Ω .

Effets de limitation d'énergie

La connexion d'une impédance à l'électrificateur (corps humain et clôture), a pour conséquence d'abaisser l'énergie délivrée au corps humain. La résistance interne prélevant une partie de l'énergie totale disponible dans l'électrificateur.

Les éléments conducteurs du circuit (terre, fil de clôture, résistance de contact) introduisent aussi un affaiblissement de l'énergie reçue par la personne.

Les calculs précis sont trop complexes pour l'étude présente. Il est cependant possible de simplifier l'analyse en prenant le cas le plus défavorable de contact de la personne aux bornes de sortie de l'électrificateur.

Les résultats de ces simulations confirment les effets d'atténuation de l'impulsion mais ne permettent pas d'affirmer que dans toutes les configurations prévisibles, ces atténuations sont suffisantes pour assurer la sécurité des personnes en contact avec la clôture.

A titre d'exemple le tableau suivant donne les plage de résistance du corps qui sont susceptibles de subir des chocs électriques en fonction de l'énergie maximale de l'électrificateur.

- Le risque à 5% signifie que la fibrillation est probable pour 5% de la population soumise au choc électrique,
- Le risque à 50% signifie que la fibrillation est probable pour 50% de la population soumise au choc électrique,

Les valeurs données dans le tableau sont des valeurs enveloppes qui peuvent varier considérablement en fonction des paramètres du système.

Les électrificateurs sont tous les deux conformes à la norme européenne (puissance limitée à 5J sur 500 Ω).

Les clôtures électriques - Etude et modélisation

Energie maximale délivrée par l'électrificateur UBI (J)	Plage maximale de résistance du corps humain pour un risque à 5%	Plage maximale de résistance du corps humain pour un risque à 50%
5	150 à 300 Ω	150 Ω
30	500 à 800 Ω	<500 Ω

2. Conclusions

Le modèle proposé n'est pour l'instant pas validé par toutes les parties.

Cependant certains points semblent faire l'objet d'un consensus (à confirmer) :

- La valeur de l'impédance interne du corps humain (contact main/pieds de 500 Ω).
- Les niveaux d'énergie dangereuses traversant le corps humains (
- L'existence d'un affaiblissement de l'énergie du à l'installation de la clôture

Il subsiste quelques divergences

- La prise en compte des résistances de contact (peau, chaussures, etc...)
- La prise en compte des résistances intervenant dans le circuit .
Ces résistances intervenant de façon aléatoire , elles peuvent être prise en compte de façon statistiques ou bien de considérer que leur caractéristiques aléatoires ne permet pas de les prendre en compte.
- L'évaluation de la dangerosité du risque de divagation des animaux (opposition entre l'efficacité de la contention et le risque de choc électrique)
- La prise en compte des cas extrêmes raisonnablement possibles ou autorisés par exemple :
 - Une durée d'impulsion de 10 ms (qui augmente le risque de choc)
 - Les risque de contact sur des circuits proches de l'électrificateur (qui ne permet pas de prendre en compte tous les effets d'affaiblissement de l'énergie)
 - Les valeurs d'impédance internes des électrificateurs

Les solutions

L'objectif est de limiter l'énergie appliquée au corps humain sur des plages raisonnables des paramètres cités ci-dessus.

Les moyens peuvent être de deux ordres :

- Limiter l'énergie à la source (sécurité intrinsèque) pour les plages raisonnablement prévisibles des variables.

Ou

- limiter par l'installation (complément ou installation existante) sous condition de vérification du respect de l'exigence donnée.

Les clôtures électriques - Etude et modélisation

Développement

Sommaire

1. Objectifs de la modélisation	6
2. Analyse du problème.....	6
a) Cibles :	6
b) Perception des impulsions	6
c) Principe d'évaluation de la sensibilité du corps humain aux chocs électriques impulsionnels	7
d) Quantification des valeurs	7
e) Effets sur le corps	8
3. Phénomènes d'atténuation de l'impulsion appliquée	11
a) Energie délivrée aux bornes de l'électrificateur – effet de l'impédance interne de l'électrificateur	11
b) Comparaison avec les valeurs limites	12
c) Atténuation apportée par le système clôture/électrificateur	14
4. Tableau de calcul des énergies	16
a) Comportement en énergie spécifique	16
b) Graphes d'analyse de probabilité de choc électriques.....	21
Evaluation des résistance.....	28

ANNEXE 1 - CALCULS

ANNEXE 2 – ETUDE SUR LES VALEURS DE RESISTANCE INTERNE DES ELECTRIFICATEURS
DE CLOTURE

ANNEXE 3 - ANALYSE FONCTIONNELLE DU SYSTEME « CHOC ELECTRIQUE DANS
CLOTURE ELECTRIQUE »

ANNEXE 4 - ESTIMATION DE LA RESISTANCE INTERNE DU CORPS HUMAIN

ANNEXE 5 - PRISE EN COMPTE DES CHEMINS DE CONTACT

ANNEXE 6 - ESTIMATION DES NIVEAUX D'ENERGIE ADMISSIBLES PAR L'HOMME

1. Objectifs de la modélisation

L'objectif de cette étude est de modéliser le fonctionnement électrique d'un système « clôture électrique » composé d'un générateur, de la clôture et de personnes en contact avec cette clôture.

Il s'agit d'estimer les effets des impulsions sur le corps humain dans les configurations et conditions d'utilisation et d'exposition réelles raisonnablement prévisibles.

Références normatives

UTE C15111 et UTE C 15112 (IEC 60479-2 et 3)

IEC 60479-1

EN 60335-2-76 – annexe BB

2. Analyse du problème

L'objectif est d'estimer les niveaux de danger sur les personnes générés par des impulsions transmises par les clôtures cela passe par la connaissance des effets des impulsions sur l'homme et les animaux. Pour cela, et conformément aux normes IEC 60749, nous prendrons comme paramètre les limites d'énergie inférieures pour seuil de perception (efficacité de la clôture) et supérieures pour les seuils de dangers (intégrité des personnes et des animaux).

a) Cibles :

Les cibles présentent toutes les deux une grande diversité.

Personnes : caractéristiques de sensibilité dépendant de l'âge, la taille, les chemins du courant, la position, les conditions d'ambiance, la tension de l'impulsion.¹ Il a été considéré que les résistances prises en compte pour cette cible varient de 200 à 5000 Ohms. (Certains auteurs donnent une valeur minimale de 100 Ohms).

La norme EN 60479 donne des valeurs préférentielle de 500 Ω pour la résistance interne (ou résistance initiale) du corps et des valeurs comprises entre 650 et 850 Ω pour un courant de 50Hz. Ce point est détaillé en 3c résistance du corps pour les formes d'impulsion de clôtures.

Animaux : Pour les animaux, il convient d'ajouter aux points énoncés précédemment, la diversité de sensibilité propre à chaque famille.² Les résistances prises en compte pour cette cible varient de 200 à 5000 Ohms. Ce point n'est pas développé dans le présent document.

Végétation : les électrificateurs sont utilisés pour la destruction de la végétation qui est susceptible de réduire l'isolement des clôtures. Les résistances prises en compte pour cette cible varient de 100 à 20 000 Ohms selon l'expérience des fabricants.

b) Perception des impulsions

Les normes¹ donnent 3 niveaux de seuil décrivant les effets sur le corps humain :

- Seuil de perception
- Seuil de douleur

¹ Série de normes IEC 60479

² Norme NFC 15112

Les clôtures électriques - Etude et modélisation

- Seuil de danger

Il est important de comprendre que les situations de perceptions et de douleurs ne concernent pas les mêmes organes que la situation dangereuse. Les deux premiers agissent sur le système nerveux global, le dernier agit directement sur le système cardiaque. Ceci implique qu'il n'est pas démontré qu'une situation dangereuse sera nécessairement précédée d'une alarme de douleur même pour des énergies plus basses.

Pour être complet, il est nécessaire d'ajouter le phénomène thermique non décrit dans les normes citées et pour lequel nous ne possédons pas de données. Dans ce cas les tissus internes sont brûlés par le passage du courant. Le phénomène étant essentiellement interne, il est fréquent que les seules traces visibles soient les points de contact. Nous pouvons considérer, sans démonstration pour l'instant, que dans le cas des clôtures cela nécessiterait l'exposition à un nombre important d'impulsions, les effets thermiques étant liés à la puissance moyenne du signal (faible pour les clôtures).

Il est aussi envisagé l'effet d'épuisement généré par la répétition d'impulsion sur une personne immobilisée ou inconsciente. Nous n'avons aucune données relative à ce cas.

c) Principe d'évaluation de la sensibilité du corps humain aux chocs électriques impulsions

Les normes de la série IEC 60479 retiennent deux grandeurs pour l'évaluation de l'effet sur le corps humain.

L'énergie spécifique : S en A^2s

et

La quantité d'électricité : Q en As

L'énergie spécifique est plus souvent utilisée car elle représente mieux le phénomène lorsque l'on veut intégrer l'impédance du chemin du courant.

La formule

$$E(j) = Z(\Omega) * S(A^2s)$$

permet de lier les grandeurs pertinentes pour évaluer les effets aux grandeurs facilement utilisables en électricité.

E : énergie électrique en joule

Z : impédance du chemin de passage du courant dans le corps

S : énergie spécifique

Cette formule prend en compte l'intensité et la durée du passage du courant.

d) Quantification des valeurs

Valeur d'énergie

Une des difficultés est d'imager les conséquences des valeurs d'énergie en joule. Le meilleur moyen est d'établir une équivalence mécanique.

5 Joules correspondent à une masse de 1 kg lâchée d'une hauteur de 50 cm.

Résistance interne des électrificateurs

Nous avons procédé à un relevé des caractéristiques des électrificateurs mesurées lors des essais de certification en 2006 et 2007 (voir annexe 2). Les résultats montrent une forte

Les clôtures électriques - Etude et modélisation

corrélation entre la résistance interne et l'énergie délivrée. Les valeurs varient entre 100 et 1500 Ω si l'on exclut les cas extrêmes.

Impédance du corps

La variabilité de l'impédance du corps est très grande. Les paramètres principaux sont la tension, la fréquence, de la durée de passage du courant, des surface et pression de contact, de l'état d'humidité, de la température et du type de peau (EN 60479-1 § 2.2). Les chemins du courant dans le corps sont aussi un élément important dans le cas de la fibrillation, seule la part de courant dérivée vers le cœur sera à prendre en compte.

Dans les applications particulières des électrificateurs, il est important de noter que la norme EN 60479-1 (§ 2.3) précise que l'impédance de la peau diminue avec la tension et que pour des tensions de contact élevées elle peut disparaître en cas de perforation. Dans ce cas seule l'impédance des tissus internes sera prise en compte.

Un autre paramètre qui est la résistance initiale (EN 60479-1 §2.4) peut considérablement augmenter les risques pour le cas étudié. En effet, le courant au début du contact peut être beaucoup plus élevé en raison de la charge des capacités du corps, ce qui a pour conséquence de court-circuiter les impédances de la peau et encore une fois de ne considérer que la résistance interne du corps pour la modélisation.

Enfin pour les chemins de passage du courant, Les valeur de courant limites sont données pour un contact main gauche/pieds, elles peuvent être diminuées en cas de chemins différents (les coefficients varient de 0,4 à 1,5).

Une classification des différents chemins avec leurs impédances est proposée en annexe 5.

e) Effets sur le corps

Effets neurologiques (perception et douleur)

- Effets fibrillation ventriculaire (perturbation du rythme cardiaque)
- Effets thermiques
- Certaines expertises évoquent la possibilité de décès par épuisement suite à des stimulations répétées.

Les normes ne prennent pas en compte les effets d'impulsion multiples.

Les effets dépendent de la surface de contact, de la charge et de la valeur crête de la tension d'impulsion.

Les valeurs limites de la norme UTE C15111 art 4.3 et 4.4 sont statistiques et sont données pour une proportion de la population sensible.

pour une impulsion triangulaire d'une durée de	0,001	s			
	S		I		
seuil de perception (ordre de grandeur)	1,00E-06	A ² s	0,03	A	
seuil de douleur mini	5,00E-05	A ² s	0,22	A	
seuil de fibrillation (5% de la population)	9,00E-03	A ² s	3,00	A	
seuil de fibrillation (50% de la population)	2,50E-02	A ² s	5,00	A	

Quelques exemples pour illustrer

Evaluons les valeurs d'impédance qui correspondent aux effets neurologiques

Les clôtures électriques - Etude et modélisation

Seuil de perception	0,03	A	
Tension maximale d'impulsion	10 000	V	
Impédance minimale du circuit pour la perception	333333	Ω	
Seuil de douleur	0,22	A	
Tension maximale d'impulsion	10 000	V	
Impédance minimale du circuit pour la douleur	45455	Ω	

Il apparaît que les valeurs normalisées de l'impédance du corps (entre 200 et 5000 Ω) sont très inférieures aux valeurs minimales des circuits données dans ce tableau. Ce qui explique qu'il n'est pas nécessaire de toucher directement la clôture pour percevoir l'impulsion car les résistance de contact entre les corps et la clôture est suffisant pour transmettre ces énergies (effet capacitif par exemple).

Cas particulier

Il est expliqué par certaines personnes que la perception du choc électrique est moins forte quand la clôture est saisie à pleine main.

Ce phénomène peut s'expliquer physiquement. Le fait de tenir la clôture à pleines mains abaisse l'impédance du réseau et augmente le courant délivré par l'électrificateur ce qui a pour effet de dissiper une partie de l'énergie dans l'impédance interne de l'électrificateur. Lorsque l'on touche de façon furtive la clôture cet effet est beaucoup moins important. Le seuil de sensibilité étant très bas et bien plus dépendant de l'intensité du courant que de l'énergie, le courant traversant est suffisant pour que l'on perçoive une douleur.

Ceci ne signifie pas que tenir une clôture à pleines mains n'est pas dangereux, mais seulement que la perception est moins forte. Le danger existe toujours car il fait intervenir non pas le courant mais la quantité d'énergie qui dans certains cas peut être suffisante pour induire une fibrillation cardiaque alors que la sensation immédiate est moins perceptible.

Effets cardiaques

Seuil de fibrillation ventriculaire :

Les données sont très dépendantes des chemins de passage du courant dans le corps, des trajets main/main ou main gauche/pieds ou tête/main sont probablement plus contraignant que des passages pieds/pieds.

Seuil maximal d'énergie de danger de fibrillation (J)

Energie spécifique seuil de danger (A2s)	0,009	0,025
pourcentage de la population concernées par le risque	5%	95%
impédance du chemin (Ω)		
50	0,45	1,25
100	0,90	2,50
500	4,50	12,50
1000	9,00	25,00
5000	45,00	125,00

Tableau 3 Energie limite

Nous retrouvons ainsi la valeur voisine de 5j comme limite imposée par la norme de construction des électrificateurs pour une impédance du corps de 500, une impulsion de 1ms et une tension de crête de 10 000 V.

Les clôtures électriques - Etude et modélisation

Cela signifie que cette énergie présente un risque de fibrillation cardiaque pour 5% de la population qui sera soumise au choc électrique dans les conditions de passage du courant entre main et pieds.

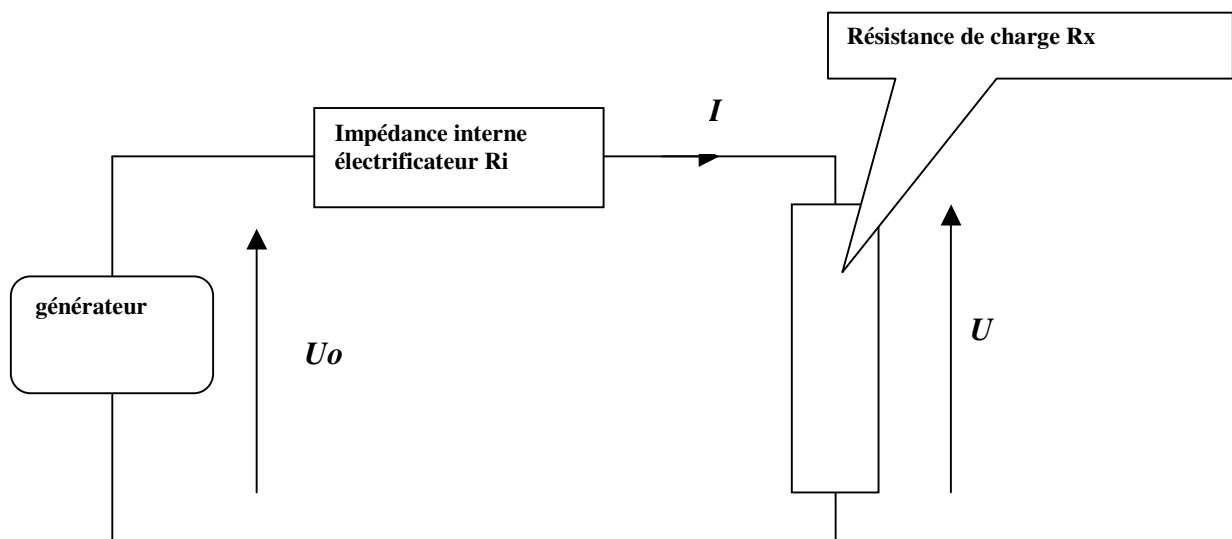
La lecture de ce tableau nous montre aussi que l'énergie maximale admissible varie proportionnellement à la valeur de l'impédance du corps. En conséquence, les matériels délivrant des énergies supérieures aux valeurs de ce tableau dans les gammes de résistances sont dangereux.

Ce point nécessite un développement car l'énergie réellement délivrée par l'appareil est atténuée par les caractéristiques physiques du système en particulier les impédances internes les impédances de la clôture et les chemins de passage dans le corps (chemins de contact associé à la notion de facteur de courant de cœur) . Quelques propositions de réflexions sont données en annexe 5

3. Phénomènes d'atténuation de l'impulsion appliquée

Nous allons intégrer les phénomènes de façon progressive dans la modélisation . Nous aborderons l'effet de l'impédance interne de l'électrificateur puis les effets de l'impédance de la clôture sur l'énergie réellement délivrées au corps. Les deux hypothèses simplificatrices principales sont que l'on considère que le circuit de passage du courant dans le corps va de la main vers les pieds et que l'électrificateur ne possède pas de dispositif limiteur.

a) Energie délivrée aux bornes de l'électrificateur – effet de l'impédance interne de l'électrificateur



En négligeant l'effet de la clôture elle-même, il est aisé de calculer l'influence de la connexion d'une impédance à la clôture pour une forme d'onde carrée et en ne prenant pas en compte les effets de résonance éventuels dus à des charges non résistives. Le circuit peut être représenté par un schéma électrique équivalent :

La relation entre les énergies dissipées à l'extérieur E_x (énergie traversant la charge) et à l'intérieur E_i est donnée par la formule (voir annexe calculs):

$$(9) \quad E_x = \frac{E_{xm} R_x (R_{xm} + R_i)^2}{(R_x^2 + 2 R_i R_x + R_i^2) R_{xm}}$$

E_x : énergie délivrée à R_x
 R_{xm} : résistance de mesure de l'énergie
 E_{xm} : énergie mesurée sur R_{xm}

L'énergie transmise est maximale pour des impédances adaptées c'est-à-dire

$$R_i = R_x$$

Les clôtures électriques - Etude et modélisation

Pour un système délivrant 5j sur 500 Ω avec une impédance interne 500 Ω la formule donnant l'énergie traversant le corps en fonction de l'impédance de ce corps est :

$$Ex=(10000 * Rx)/(Rx^2+1000 * Rx+250000)$$

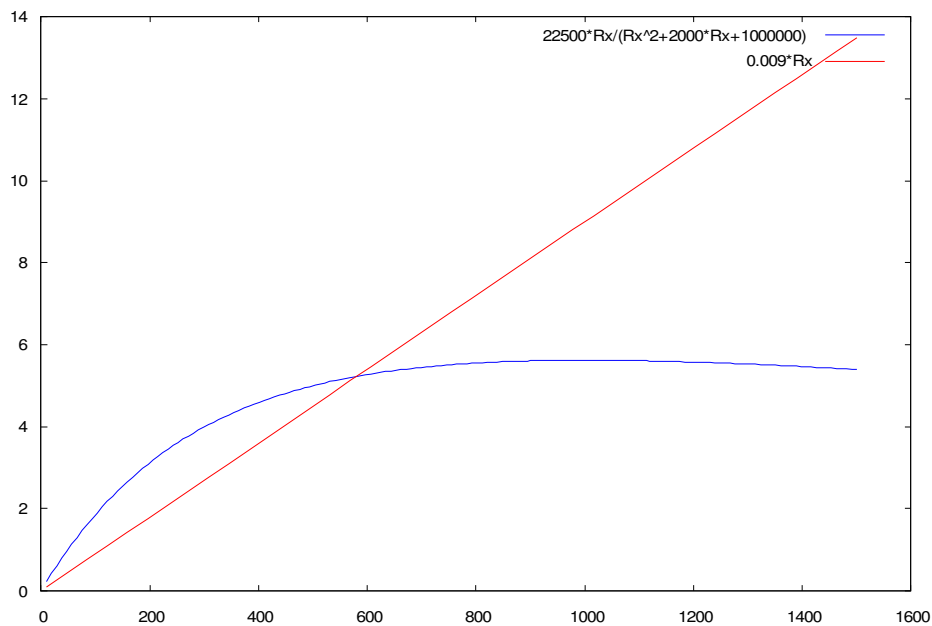
b) Comparaison avec les valeurs limites

Si nous traçons les courbes des valeurs limites d'énergie et des valeurs d'énergie traversantes, nous constatons que dans une zone d'impédance comprise entre 0 et 580 Ω le système présente une situation de danger pour les personnes, même si l'électrificateur limite l'énergie à 5 joules sur 500 Ω (conformément à la norme).

Le danger est limité par la réduction d'énergie apportée par l'impédance interne du générateur, mais cette réduction est insuffisante pour compenser l'augmentation de la sensibilité de la personne. Ce phénomène est très dépendant de la résistance interne de l'électrificateur. Il est critique pour les appareils de forte puissance qui en général ont de faibles impédances internes.

En rouge : énergie limite

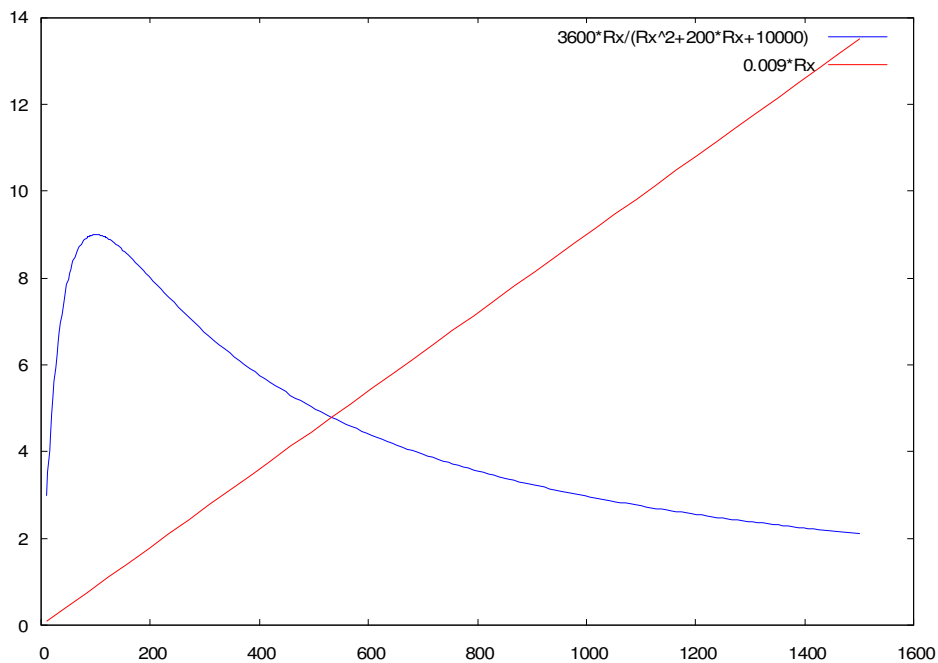
En bleu : énergie traversante



Comparaison entre les valeurs d'énergie (J) en fonction de la résistance du corps (Ω) pour un électrificateur délivrant 5j sur 500 Ω avec une impédance interne de 1000 Ω

Les clôtures électriques - Etude et modélisation

Comparaison entre les valeurs d'énergie (J) en fonction de la résistance du corps (Ω) pour un électrificateur délivrant 2j sur 500 Ω avec une impédance interne de 500 Ω

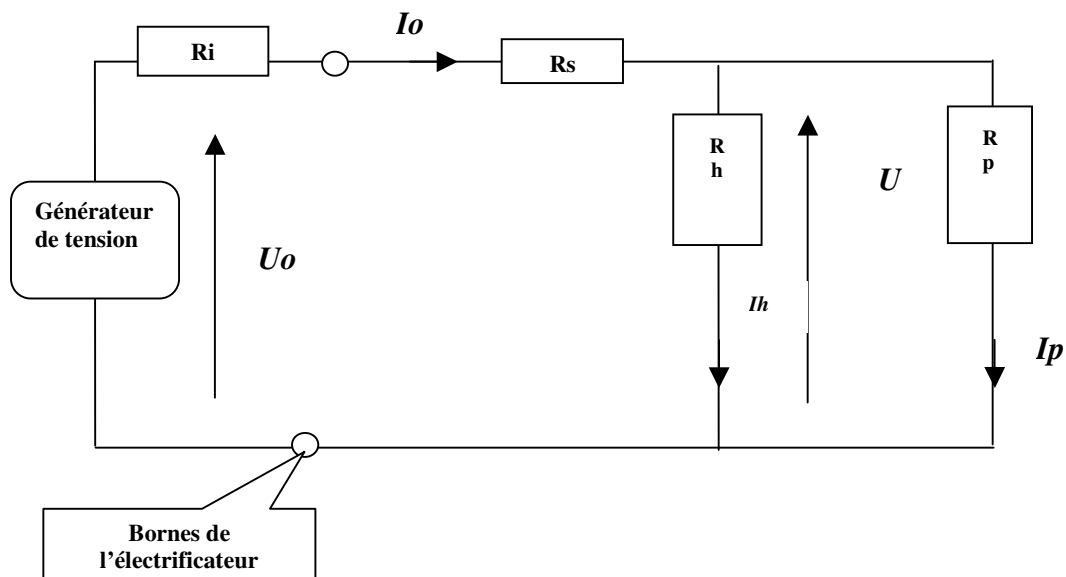


Comparaison entre les valeurs d'énergie (J) en fonction de la résistance du corps (Ω) pour un électrificateur délivrant 5j sur 500 Ω avec une impédance interne de 100 Ω

c) Atténuation apportée par le système clôture/électrificateur

En plus du phénomène décrit au-dessus, l'impédance en ligne de la clôture amène une atténuation de l'énergie traversant le corps humain.

La clôture est électriquement équivalente à un assemblage de résistances mises en série et de condensateurs mis en parallèle. Les calculs sont assez complexes en raison de la répartition sur toute la ligne des ces composants « unitaires ». Si nous prenons le cas le plus défavorable qui correspond au contact de la personne très proche des bornes de l'électrificateur, nous pouvons raisonnablement simplifier la question en représentant le système électrificateur/clôture/cible par le schéma électrique suivant :



- Ri : résistance interne de l'électrificateur
- Rp : résistance entre la clôture et le circuit de retour
- Rs : résistance du fil de clôture
- Rh : résistance du corps
- U : tension de sortie de l'électrificateur
- Uo : tension équivalente à un générateur fictif
- Io : courant dans l'électrificateur
- Ih : courant traversant le corps

L'expression de l'énergie traversant le corps humain (représenté par Rh) en fonction de la résistance interne et de la résistance de la clôture est (voir annexe calculs):

$$E_h = \frac{E_m R_h (R_m + R_i)^2 R_p^2}{R_m (R_p R_s + R_h R_s + R_i R_p + R_h R_p + R_h R_i)^2}$$

Les clôtures électriques - Etude et modélisation

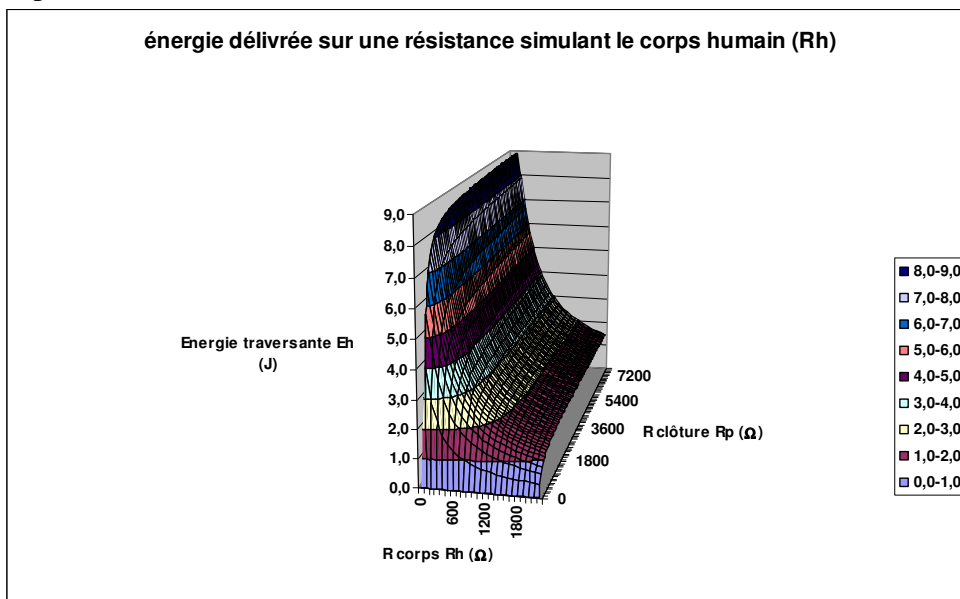
Mais comme nous l'avons vu plus haut il est souvent plus pertinent d'utiliser l'énergie spécifique exprimée en A^2s .

$$Esp = \frac{Em (Rm + Ri)^2 Rp^2}{Rm (Rp Rs + Rh Rs + Ri Rp + Rh Rp + Rh Ri)^2}$$

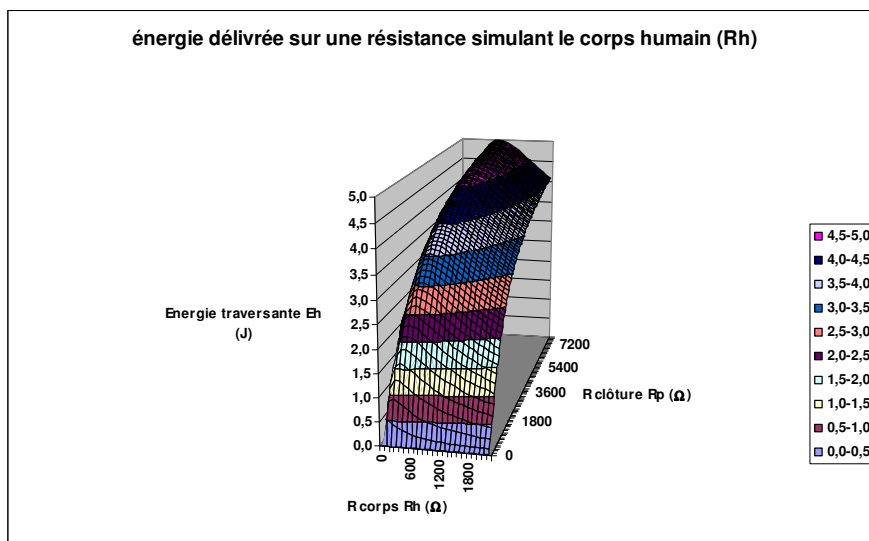
Dans cette formule, Em représentent l'énergie délivrée par l'électrificateur sur une charge Em . (cette mesure peut correspondre à celle spécifiée par la norme EN 60335-2-76 pour l'énergie d'impulsion)

comportement en énergie

Il apparaît que l'énergie traversante Eh est réduite lorsque la résistance de la clôture diminue. Le diagramme suivant donne une représentation de la variation de Eh en fonction des deux résistances en jeux Rh et Rp , pour un électrificateur délivrant 5j sur 500 Ω avec une impédance interne de 100 Ω .



pour un électrificateur délivrant 5j sur 500 Ω avec une impédance interne de 1000 Ω . L'atténuation apportée par la clôture est plus sensible.



4. Tableau de calcul des énergies

a) Comportement en énergie spécifique

L'analyse en énergie spécifique permet une plus grande finesse d'évaluation.

Le nombre de paramètres intervenant est trop important pour une compréhension aisée du système. Nous pouvons avec de nombreuses simplifications classer ces paramètres en deux grandes familles :

paramètres propres à l'électrificateur (E_m , R_m , R_i) qui sont figés pour une installation
paramètres propres à l'installation (R_h , R_p , R_i) qui au contraire des autres sont très variables.
Nous pouvons sur cette base construire un tableau qui nous donne la valeur d'énergie spécifique en fonction de R_p et R_h . Les paramètres E_m , R_m , R_i étant fixés. Etant donné que R_s influe assez peu sur les résultats en intégrant cette valeur aux données fixées, nous pouvons travailler sur un tableau à deux dimensions.

Les valeurs sont colorisées en fonction du niveau d'énergie spécifique correspondant.

Pour éviter de surcharger la démonstration nous avons pris les cas extrêmes d'électrificateurs délivrant 5J et 30J respectivement sur une charge de 500 Ω et 30 Ω .

La surface correspond à la probabilité d'occurrence du phénomène avec l'hypothèse que les valeurs de résistance soient équiprobables.

- Rouge lorsque E_{sp} dépasse le niveau de 0,04 A^2s c'est à dire pour un risque de choc provoquant la fibrillation pour au 50% des personnes exposées.
- Orange lorsque E_{sp} dépasse le niveau de 0,02 A^2s c'est à dire pour un risque de choc provoquant la fibrillation pour 5% des personnes exposées.

Ces tableaux nous permettent de confirmer certaines hypothèses :

- la faible influence de R_s sur le niveau de risque, ce qui signifie que la longueur de la clôture n'est pas un élément suffisant pour accroître la sécurité d'autant plus que nous devons considérer le cas du contact proche des bornes de l'électrificateur.
- l'augmentation du risque avec la valeur de R_p , c'est à dire que plus la clôture est courte ou de bonne qualité, plus le risque est élevé.
- La grande influence de la résistance interne de l'électrificateur, celle-ci peut absorber une grande part de l'énergie d'impulsion.
- L'importance de l'énergie stockée (traduite en E_m énergie mesurée sur 500 Ohm). En effet pour E_m 5J il n'y a pas de cas dangereux pour une résistance de corps R_h supérieur à 500 Ohm. Alors que cette limite passe à 1000 ohms pour 10j.

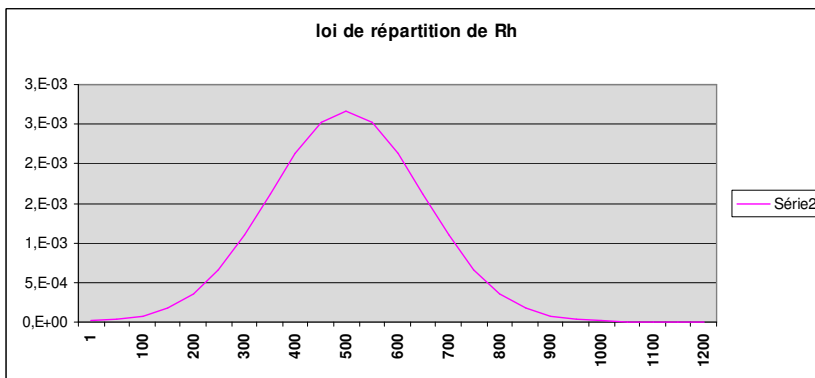
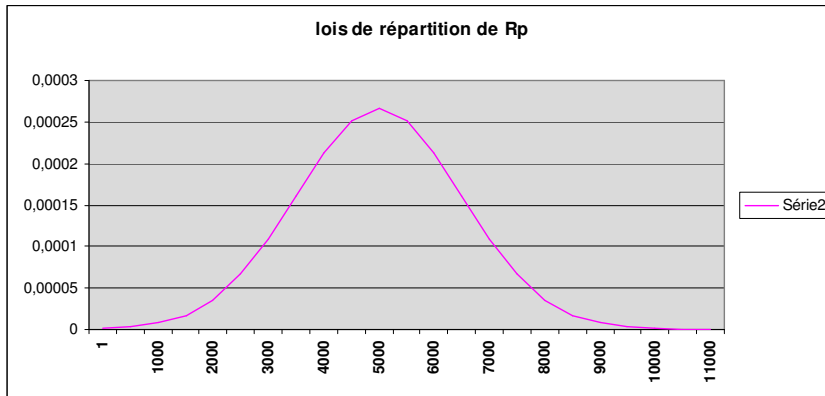
Les clôtures électriques - Etude et modélisation

b) Graphes d'analyse de probabilité de choc électriques

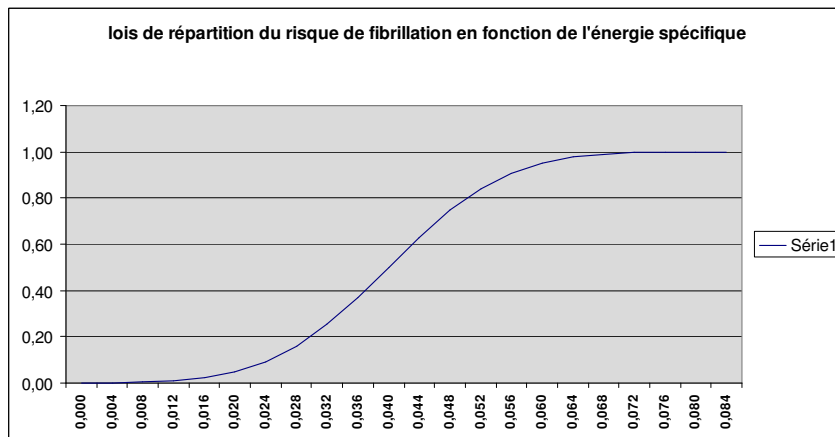
Pour illustrer l'ampleur du risque pour chaque configuration, nous pouvons sur un graphique présenter une surface proportionnelle à ce risque. Cette représentation n'est pas une mesure exacte mais elle permet de donner une image approximative de l'évolution du risque. Nous nous sommes basés sur une probabilité d'occurrence des différentes valeurs des paramètres principaux que sont la résistance d'isolement de la clôture (R_p), la résistance du corps humain (R_h) et la probabilité de fibrillation en fonction de l'énergie appliquée au corps.

Loi de répartition des probabilités de valeurs de résistance

Nous avons pris comme hypothèse que la distribution était normale et centrée sur une valeur de résistance communément admises. Les lois utilisées sont les suivantes :



Loi utilisée pour les risque de fibrillation est la suivante.



Annexe 1

calculs

Energie délivrée à la personne en fonction de l'énergie mesurée sur 500 W et de l'impédance interne de l'électrificateur et de l'impédance du corps

Equation de base du circuit

$$U_o = I_o (R_s + R_i) + I_h R_h$$

intégration du courant

$$I_o = I_h \left(\frac{R_h}{R_p} + 1 \right)$$

$$U_o = \frac{I_h (R_p R_s + R_h R_s + R_i R_p + R_h R_p + R_h R_i)}{R_p}$$

$$U_o = (R_m + R_i) \sqrt{\frac{E_m}{R_m t}}$$

$$E_h = \frac{E_m R_h (R_m + R_i)^2 R_p^2}{R_m (R_p R_s + R_h R_s + R_i R_p + R_h R_p + R_h R_i)^2}$$

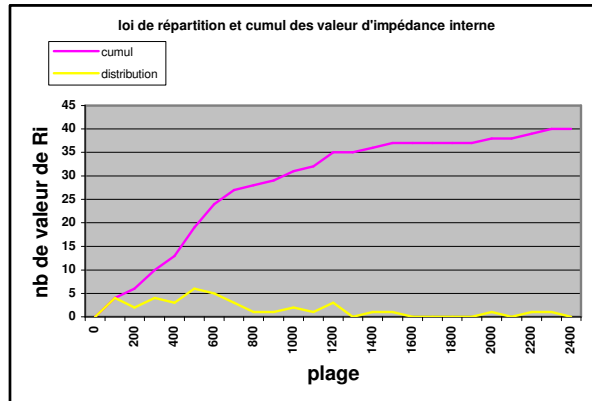
$$E_{sp} = \frac{E_m (R_m + R_i)^2 R_p^2}{R_m (R_p R_s + R_h R_s + R_i R_p + R_h R_p + R_h R_i)^2}$$

Détermination de la valeur de U_o à partir de la mesure de E_x (E_{xm}) sur une charge R_x (R_{xm})
 Valeur de l'énergie traversante en fonction des impédances du circuit et de l'énergie mesurée
 valeur de l'énergie spécifique

Annexe 2

Etude sur les valeurs de résistance internes des électrificateurs de clôture (appareils certifiés APAVE en 2006/2007)

Tension crête à vide (V)	impédance interne (Ω)	energie délivrée sur 500 Ω (J)
9900	1963	0,08
9900	2133	0,08
8160	2220	0,09
11000	1464	0,22
8700	1173	0,25
11500	1355	0,28
7100	544	0,28
8300	758	0,37
9300	449	0,62
8300	241	0,84
10100	1059	0,9
9900	510	1
6400	82	1,1
10000	816	1,1
9200	639	1,2
10600	76	1,2
7200	940	1,4
11000	432	1,4
10900	456	1,5
10600	339	1,9
9300	377	1,9
10600	414	1,9
10500	525	2,3
11800	535	2,3
11000	417	2,4
10700	638	2,6
12800	643	2,7
12500	462	2,7
10040	381	2,8
13200	1150	2,9
9900	576	3,6
12600	906	3,7
9000	23	3,8
9600	274	3,9
7000	74	3,9
9600	274	4,1
9600	238	4,35
8700	159	4,5
7800	100	4,7
12800	1184	4,8



Les valeurs des résistances internes ont été calculées par la formule suivante :

$$R_i = (U_o - U_c) \cdot R_c / U_c$$

avec

R_i : résistance interne

U_c : tension crête sur charge de 500 Ω

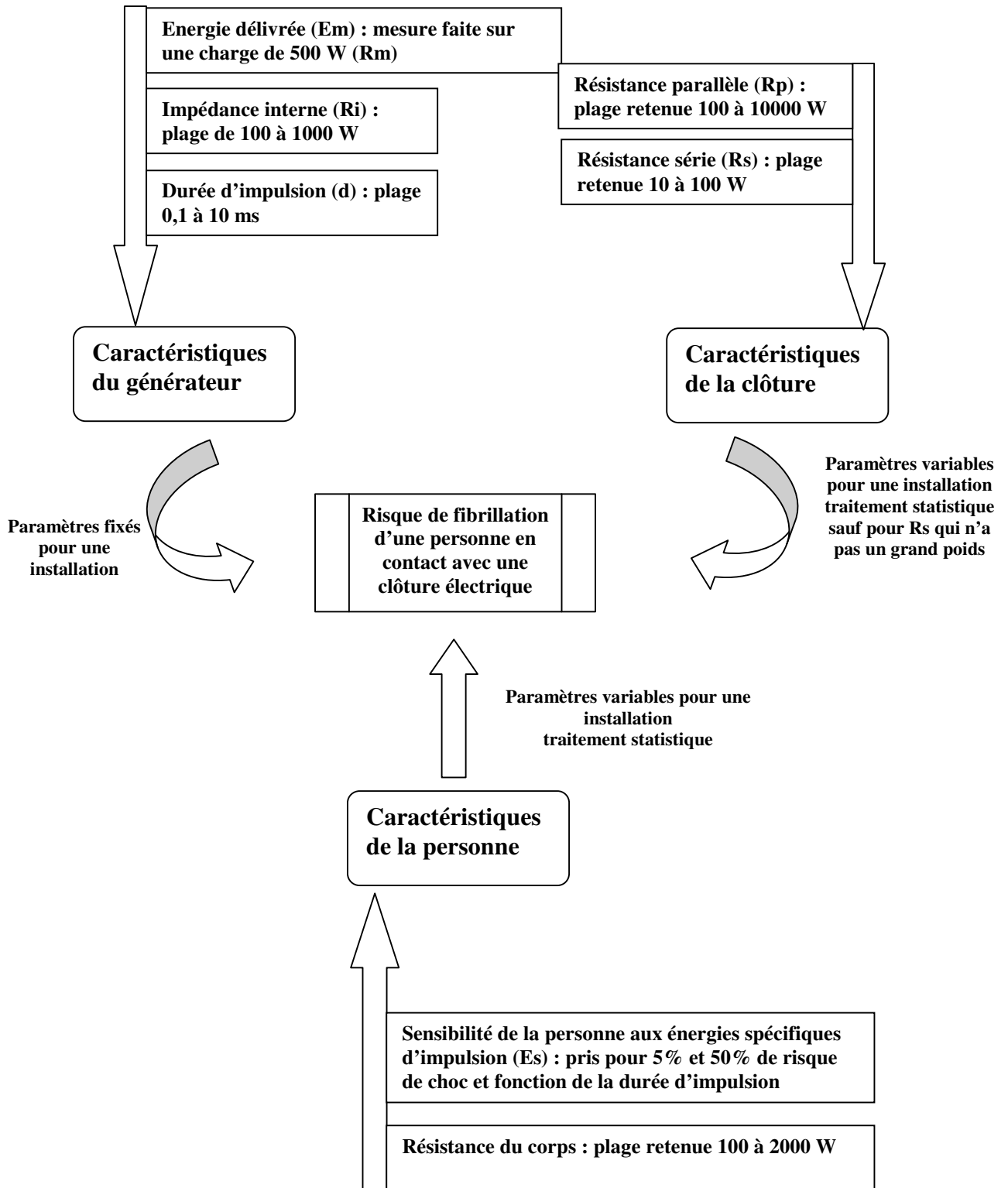
U_o : tension crête à vide

R_c : charge 500 Ω

Le calcul sur la tension crête ne permet de donner une valeur sûre de R_i car il n'a pas été tenu compte des comportements transitoires possibles du circuit.

Annexe 3

ANALYSE FONCTIONNELLE DU SYSTEME « CHOC ELECTRIQUE DANS CLOTURE ELECTRIQUE »



Annexe 4

ESTIMATION DE LA RESISTANCE INTERNE DU CORPS HUMAIN

Objectif :

Déterminer en fonction de différentes configurations de contact quelles sont les valeurs de résistance interne du corps (R_i). La norme IEC 60479 prévoit que cette résistance ajoutées à la résistance de la peau constitue la résistance totale du corps (R_h)

Evaluation des résistance

Les configurations peuvent être classées comme suit

Inférieur à 50 Ω	De 50 à 100 Ω	De 100 à 500 Ω	Supérieur à 500 Ω
Poitrine ou dos/fessier	Poitrine/coude (gauche ou droit)	2 pieds/ tout autre contact	Mains/tête
Poitrine/Dos	Poitrine ou dos/genoux	2 genoux/ parties hautes du corps	Mains/épaule
	Tête/fessier	Fessier/ parties hautes du corps	Mains/coude opposé
		Coude/coude opposé	

Les valeur inférieurs à 100 Ω sont à tempérer car il semble que les nœuds de la norme soient situés dans les parties internes du corps, il conviendrait dans ce cas d'ajouter les chemins qui conduisent à l'extérieur ce qui augmente la valeur de la résistance.

Les configurations basses peuvent apparaître dans les cas réels de franchissement des clôtures.

- Entre deux fils poitrine/dos (cas des retours par fils)
- Poitrine/coude ou genoux

Et dans les cas de personne assise ou couchée.

Le premier tableaux résume les différentes configurations de résistances de corps.

Le second résume les différentes configuration de répartition de courant dans le corps (facteur de courant de cœur)

Le dernier combine les deux tableaux précédents pour donner une valeur de résistance équivalent qui peut-être appliquée dans les formules de calcul d'énergie.

Les clôtures électriques - Etude et modélisation

évaluation des valeurs de résistance interne en fonction des types de contact

valeur de résistance interne (figure 2)

		gauche		droite		asymétriques						
		coude	main	coude	main	épaules	poitrine	dos	fessier	2 pieds	2 genoux	tête
gauche	coude	x	26	28	54	18	21	21	22	48	32	31
	main		x	54	81	44	47	47	49	74	58	57
droite	coude			x	26	18	21	21	22	48	32	31
	main				x	44	47	47	49	74	58	57
asymétriques	épaules					x	17	17	18	44	28	10
	poitrine						x	10	1	27	11	10
	dos							x	1	27	11	10
	fessier								x	26	10	11
	2 pieds									x	14	37
	2 genoux										x	21
	tête											

facteur de courant de cœur (tableau 5)

		gauche		droite		asymétriques						
		coude	main	coude	main	épaules	poitrine	dos	fessier	2 pieds	2 genoux	tête
gauche	coude	x	0,0	0,4	0,4	0,4	1,5	0,7	0,7	1,0	1,0	0,4
	main		x	0,4	0,4	0,4	1,5	0,7	0,7	1,0	1,0	0,4
droite	coude			x	0,0	0,4	1,3	0,3	0,7	0,8	0,8	0,4
	main				x	0,4	1,3	0,3	0,7	0,8	0,8	0,4
asymétriques	épaules					x	1,0	0,7	1,0	1,0	1,0	0,0
	poitrine						x	1,5	0,7	1,0	1,0	0,4
	dos							x	0,7	1,0	1,0	0,4
	fessier								x	0,0	0,0	0,7
	2 pieds									x	0,0	0,7
	2 genoux										x	0,7
	tête											

valeurs estimée non données par la norme

résistance équivalente

		gauche		droite		asymétriques							
		coude	main	coude	main	épaules	poitrine	dos	fessier	2 pieds	2 genoux	tête	
gauche	coude	x		349	679	223	69	149	158	239	159	385	
	main		x	679	1009	553	157	337	346	371	291	715	
droite	coude			x		223	80	347	158	299	198	385	
	main				x	553	182	787	346	464	363	715	
asymétriques	épaules					x		84	129	219	139		
	poitrine						x	33	9	135	55	125	
	dos							x	9	135	55	125	
	fessier								x			81	
	2 pieds									x		265	
	2 genoux											x	149
	tête												x

Ri mains/1 pied :	500	résistance équivalente	
		maximale	1009
		minimale	9
		médiane	221
		écart type	228
		moyenne	286

répartition des cas

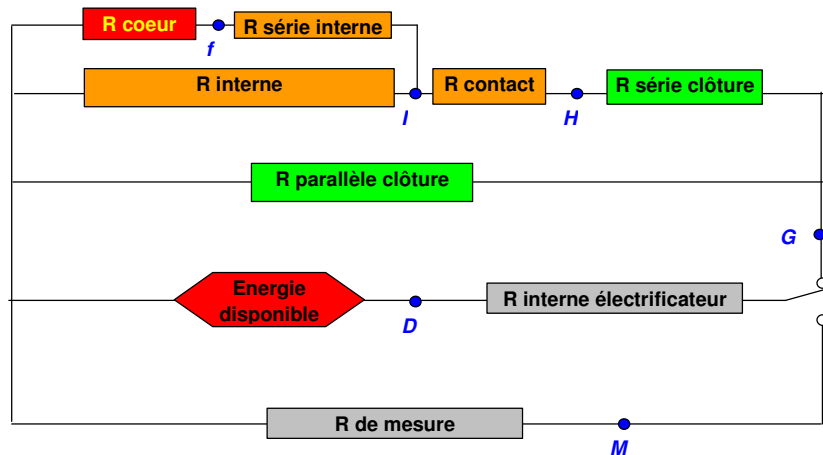
	inf	100
	inf	500
	inf	750
	sup	750

Les clôtures électriques - Etude et modélisation

ANNEXE 5

Prise en compte des chemins de contact

schéma électrique équivalent au système électrificateur/clôture/corps



Nous voyons immédiatement que entre la source d'énergie disponible et le cœur, les composants vont prélever une partie de l'énergie. L'objectif est d'évaluer la part d'énergie prélevée par chacun d'eux. La difficulté est de déterminer les paramètres pertinents et surtout d'évaluer ces paramètres. Les plages de variations sont tellement grandes que cette mesure n'est possible que statistiquement.

L'ensemble R cœur, R série interne et R interne

ne peut-être mesuré directement, il est possible d'en faire une évaluation statistique en utilisant les données de la norme EN 60749.

En prenant comme référence la résistance interne de contact main/ 2 pieds corrigées par les différents cas de contact étudiés. Une des difficultés est l'évaluation de la probabilité d'occurrence de certains cas de contacts.

R contact

c'est la résistance de contact du corps, elle comprend :

- la résistance de la peau avec comme paramètres : l'état de la peau au moment du choc, la surface de contact, l'environnement
- la résistance de pied avec comme paramètres : la surface de contact, le port et l'état de chaussures,

R série clôture

résistance de la distribution d'énergie

- résistance du fil, du circuit de retour (terre ou fil), résistance de la prise de terre de l'électrificateur
- Extrêmement variable selon le climat, la qualité des prises de terre, la nature du sol et le circuit de retour.

R parallèle clôture

représente l'état de la clôture

- résistance des isolateurs, résistance de la végétation en contact avec les fils
- Extrêmement variable selon l'état de la clôture peut aller de quelques centaines d' Ω pour une clôture en mauvais état ou très enherbé, jusqu'à plusieurs M Ω pour une clôture courte ou interrompue

R interne électrificateur

- La résistance des circuits internes de l'électrificateur
- Les mesures réalisées donne une plage de 70 à 1000 Ω

Energie disponible

énergie que pourrait délivrer l'électrificateur idéal

R de mesure

- la valeur de résistance utilisée pour la mesure (éventuellement normative)
- actuellement la valeur de cette résistance est fixée normativement à 500 Ω

Résumé

Il apparaît à l'examen des résultats des calculs que nous pouvons regrouper les types de contact avec les clôtures : en trois familles selon leur probabilité (exceptionnel, occasionnel, fréquent)

Classification selon les type de contact (trajets)

exceptionnel	
poitrine	main gauche
poitrine	main droite
main gauche	main droite
dos	main gauche

occasionnel	
siège	main gauche
siège	main droite
siège	deux mains

fréquents	
main gauche	ped gauche
main gauche	ped droit
main gauche	deux pieds
deux mains	deux pieds

Les clôtures électriques - Etude et modélisation

exceptionnel	correspond à des trajets avec retour par conducteur et des expositions peu probables
occasionnel	correspond à des trajets peu probables ou conditionnés à un état de non réaction de la personne
fréquent	correspond à des trajets habituels (des mains aux pieds)

	résistance limites (Ω)		Energie appliquée dangereuse (J)	
exceptionnel	300	500	2,5	65
occasionnel	150	300	12	
fréquent	300	650	6	9

L'influence de la clôture

L'influence de l'électrificateur

les paramètres utiles de l'électrificateur sont l'énergie délivrée sur une charge et l'impédance interne. si nous appliquons la même classification à l'électrificateur, nous pouvons faire les commentaires suivants

et pour les conditions les plus défavorables d'installation c'est à dire très bonne isolation de la clôture et faible longueur

Cas d'une mesure d'énergie faite sur une résistance de 500 Ω

voir tableau Energie mesurée sur 500 Ω

exceptionnel	il existe des cas où l'énergie maximale à mesurer ne doit pas dépasser la valeur de 1,5 j notamment pour les électrificateurs de basse impédance
occasionnel	la valeur maximale à mesurer est de 4 joules
fréquent	la valeur maximale à mesurer est de 4 joules

Cas d'une mesure d'énergie faite sur une résistance de 300 Ω

voir tableau Energie mesurée sur 300 Ω

exceptionnel	il existe des cas où l'énergie maximale à mesurer ne doit pas dépasser la valeur de 2,7 j notamment pour les électrificateurs de basse impédance
occasionnel	la valeur maximale à mesurer est de 6,9 joules
fréquent	la valeur maximale à mesurer est de 4,7 joules

Cas d'une mesure d'énergie faite sur une résistance de 700 Ω

voir tableau Energie mesurée sur 700 Ω

exceptionnel	il existe des cas où l'énergie maximale à mesurer ne doit pas dépasser la valeur de 1,2 j notamment pour les électrificateurs de basse impédance
occasionnel	la valeur maximale à mesurer est de 3,1 joules
fréquent	la valeur maximale à mesurer est de 2,9 joules

en conséquence, la valeur normative à recommander pour la mesure de l'énergie délivrée par l'électrificateur est de 5 joules sur des résistances comprises entre 300 et 700 Ω

cette recommandation conserve une zone de danger pour les trajets exceptionnels comme poitrine/main gauche et poitrine /main droite

cependant il est possible de considérer ces deux situations comme très peu probables en raison :

des résultats des mesures sur site qui montrent un très fort affaiblissement de l'énergie sur la clôture du faible risque de trouver ces situations dans les cas les plus défavorables analysés ici

Energie mesurée sur 500 Ω

trajet		E dangereuse (J)	Impédance interne du corps (Ω)	Ri résistance interne électrificateur (Ω)				
				10	50	100	500	1000
poitrine	main gauche	2,60	307	1,6	1,8	2,0	2,9	3,4
poitrine	main droite	3,46	307	2,2	2,4	2,6	3,8	4,5
main gauche	main droite	36,56	525	38,5	38,5	38,5	38,6	38,6
dos	main gauche	11,94	307	7,6	8,3	9,1	13,2	15,5
dos	main droite	65,00	307	41,2	45,2	49,7	71,8	84,4
siège	main gauche	11,94	315	7,8	8,5	9,3	13,1	15,3
siège	main droite	11,94	315	7,8	8,5	9,3	13,1	15,3
siège	deux mains	11,94	162	4,2	5,6	7,2	16,6	22,8
main gauche	pied gauche	5,85	650	7,6	7,4	7,2	6,3	5,9
main gauche	pied droit	5,85	650	7,6	7,4	7,2	6,3	5,9
main gauche	deux pieds	5,85	478	5,6	5,7	5,8	6,2	6,3
deux mains	deux pieds	5,85	329	4,0	4,3	4,6	6,4	7,3
main droite	pied gauche	9,14	650	11,8	11,5	11,2	9,8	9,2
main droite	pied droit	9,14	650	11,8	11,5	11,2	9,8	9,2
main droite	deux pieds	9,14	478	8,8	8,9	9,1	9,6	9,9

Les clôtures électriques - Etude et modélisation

Energie mesurée sur 300 Ω

trajet		E dangereuse (J)	Impédance interne du corps (Ω)	Ri résistance interne électrificateur (Ω)				
				10	50	100	500	1000
poitrine	main gauche	2,60	307	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
poitrine	main droite	3,46	307	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
main gauche	main droite	36,56	525	62,5	57,1	52,0	36,1	30,8
dos	main gauche	11,94	307	12,3	12,3	12,3	12,4	12,4
dos	main droite	65,00	307	66,9	67,0	67,1	67,3	67,4
siège	main gauche	11,94	315	12,6	12,6	12,5	12,3	12,2
siège	main droite	11,94	315	12,6	12,6	12,5	12,3	12,2
siège	deux mains	11,94	162	6,9	8,2	9,7	15,6	18,2
main gauche	pied gauche	5,85	650	12,3	10,9	9,7	5,9	4,7
main gauche	pied droit	5,85	650	12,3	10,9	9,7	5,9	4,7
main gauche	deux pieds	5,85	478	9,2	8,5	7,8	5,8	5,1
deux mains	deux pieds	5,85	329	6,4	6,3	6,3	6,0	5,9
main droite	pied gauche	9,14	650	19,2	17,1	15,1	9,2	7,4
main droite	pied droit	9,14	650	19,2	17,1	15,1	9,2	7,4
main droite	deux pieds	9,14	478	14,3	13,2	12,2	9,0	7,9

Energie mesurée sur 700 Ω

trajet		E dangereuse (J)	Impédance interne du corps (Ω)	Ri résistance interne électrificateur (Ω)				
				10	50	100	500	1000
poitrine	main gauche	2,60	307	1,2	1,4	1,6	2,8	3,7
poitrine	main droite	3,46	307	1,6	1,8	2,1	3,7	4,9
main gauche	main droite	36,56	525	27,8	29,0	30,3	37,5	42,0
dos	main gauche	11,94	307	5,5	6,3	7,2	12,8	16,9
dos	main droite	65,00	307	29,8	34,0	39,1	69,8	91,9
siège	main gauche	11,94	315	5,6	6,4	7,3	12,7	16,7
siège	main droite	11,94	315	5,6	6,4	7,3	12,7	16,7
siège	deux mains	11,94	162	3,1	4,2	5,6	16,1	24,8
main gauche	pied gauche	5,85	650	5,5	5,6	5,6	6,1	6,4
main gauche	pied droit	5,85	650	5,5	5,6	5,6	6,1	6,4
main gauche	deux pieds	5,85	478	4,1	4,3	4,6	6,0	6,9
deux mains	deux pieds	5,85	329	2,9	3,2	3,7	6,2	8,0
main droite	pied gauche	9,14	650	8,6	8,7	8,8	9,6	10,0
main droite	pied droit	9,14	650	8,6	8,7	8,8	9,6	10,0
main droite	deux pieds	9,14	478	6,4	6,7	7,1	9,4	10,8

Annexe 6

ESTIMATION DES NIVEAUX D'ENERGIE ADMISSIBLES PAR L'HOMME

limites admissible d'énergie pour fibrillation - figure 22 de la publication UTE C 15-111

Energie spécifique admissible			
durée d'impulsion (s)		1,00E-04	
courbe	courant eff (A)	Es (A ² s)	E (J) sur 500
C1	7	4,9E-03	2,5E+00
C2	14	2,0E-02	9,8E+00
C3	20	4,0E-02	2,0E+01

Energie spécifique admissible			
durée d'impulsion (s)		1,00E-03	
courbe	courant eff (A)	Es (A ² s)	E (J) sur 500
C1	1,4	2,0E-03	9,8E-01
C2	2,5	6,3E-03	3,1E+00
C3	4	1,6E-02	8,0E+00

Energie spécifique admissible				résistance :	500
durée d'impulsion (s)		1,00E-02			
courbe	courant eff (A)	Es (A ² s)	E (J) sur 500		
C1	0,5	2,5E-04	1,3E-01		
C2	1	1,0E-03	5,0E-01		
C3	1,6	2,6E-03	1,3E+00		

courbe	
C1	limite supérieure du risque 0 fibrillation
C2	limite supérieure du risque 5% fibrillation
C3	limite inférieure du risque 50% de fibrillation

La norme limite la durée des impulsions à 10 ms (art 22.108)

Les valeurs habituelles d'impulsion sont de l'ordre de 0,1 ms

Nous voyons que l'énergie spécifique admissible varie en fonction de la durée de l'impulsion

Si l'on prend comme référence le matériel existant, les durées d'impulsion sont voisines de 0,1 ms

mais nous devons prendre en considération le cas des impulsions de 10 ms

Les courbes correspondent aux cas suivants :

- C1 : limite entre le risque de fibrillation négligeable et le risque pour 5% de la population
- C2 : limite entre le risque pour 5% et 50% de la population
- C3 : limite du risque pour plus de 50% de la population