

Université de Poitiers

Faculté de Médecine et Pharmacie

Année 2014

Thèse n°

Thèse pour l'obtention du

DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN MEDECINE

(décret du 16 janvier 2004)

Présentée et soutenue publiquement

par Monsieur **Jean-Jacques Curutchague**

Né le 21/07/1982 à Saint-Palais

Le 4 novembre 2014 à Bordeaux

**Les accidents médicaux induits par l'orage et la foudre :
médicalisation en urgence, le suivi au long cours, la prévention**

COMPOSITION DU JURY

Monsieur le Professeur François Sztark	Président
Monsieur le Professeur Vincent Casoli	Juge
Monsieur le Professeur Jean-Michel Mazaux	Juge
Monsieur le Professeur Christian Virenque	Membre invité
Monsieur le Docteur Marc Renoux	Directeur



Le Doyen,

Année universitaire 2012 - 2013

LISTE DES ENSEIGNANTS DE MEDECINE

Professeurs des Universités-Praticiens Hospitaliers

1. AGIUS Gérard, bactériologie-virologie
2. ALLAL Joseph, thérapeutique
3. BATAILLE Benoît, neurochirurgie
4. BENSADOUN René-Jean, oncologie - radiothérapie
5. BRIDOUX Frank, néphrologie
6. BURUCOA Christophe, bactériologie - virologie
7. CARRETIER Michel, chirurgie générale
8. CHEZE-LE REST Catherine, biophysique et médecine nucléaire
9. CHRISTIAENS Luc, cardiologie
10. CORBI Pierre, chirurgie thoracique et cardio-vasculaire
11. DAGREGORIO Guy, chirurgie plastique et reconstructrice
12. DEBAENE Bertrand, anesthésiologie réanimation
13. DEBIAIS Françoise, rhumatologie
14. DORE Bertrand, urologie
15. DUFOUR Xavier, Oto-Rhino-Laryngologie
16. EUGENE Michel, physiologie
17. FAURE Jean-Pierre, anatomie
18. FRITEL Xavier, gynécologie-obstétrique
19. FROMONT-HANKARD Gaëlle, anatomie et cytologie pathologiques
20. GAYET Louis-Etienne, chirurgie orthopédique et traumatologique
21. GICQUEL Ludovic, pédopsychiatrie
22. GILBERT Brigitte, génétique
23. GOMBERT Jean-Marc, immunologie
24. GOUJON Jean-Michel, anatomie et cytologie pathologiques
25. GUILHOT-GAUDEFFROY François, hématologie et transfusion
26. GUILLET Gérard, dermatologie
27. GUILLEVIN Rémy, radiologie et imagerie médicale
28. HADJADJ Samy, endocrinologie et maladies métaboliques
29. HANKARD Régis, pédiatrie
30. HAUET Thierry, biochimie et biologie moléculaire
31. HERPIN Daniel, cardiologie
32. HOUETO Jean-Luc, neurologie
33. INGRAND Pierre, biostatistiques, informatique médicale
34. IRANI Jacques, urologie
35. JABER Mohamed, cytologie et histologie
36. KARAYAN-TAPON Lucie, oncologie
37. KEMOUN Gilles, médecine physique et réadaptation (détachement)
38. KITZIS Alain, biologie cellulaire
39. KLOSSEK Jean-Michel, Oto-Rhino- Laryngologie
40. KRAIMPS Jean-Louis, chirurgie générale
41. LECRON Jean-Claude, biochimie et biologie moléculaire
42. LEVARD Guillaume, chirurgie infantile
43. LEVILLAIN Pierre, anatomie et cytologie pathologiques
44. MAGNIN Guillaume, gynécologie-obstétrique (surnombre)
45. MARCELLI Daniel, pédopsychiatrie (surnombre)
46. MARECHAUD Richard, médecine interne
47. MAUCO Gérard, biochimie et biologie moléculaire
48. MENU Paul, chirurgie thoracique et cardio-vasculaire
49. MEURICE Jean-Claude, pneumologie
50. MIMOZ Olivier, anesthésiologie - réanimation
51. MORICHAU-BEAUCHANT Michel, hépato-gastro-entérologie
52. NEAU Jean-Philippe, neurologie
53. ORIOT Denis, pédiatrie
54. PACCALIN Marc, gériatrie
55. PAQUEREAU Joël, physiologie
56. PERAULT Marie-Christine, pharmacologie clinique
57. PERDRISOT Rémy, biophysique et médecine nucléaire
58. PIERRE Fabrice, gynécologie et obstétrique
59. POURRAT Olivier, médecine interne
60. PRIES Pierre, chirurgie orthopédique et traumatologique
61. RICCO Jean-Baptiste, chirurgie vasculaire
62. RICHER Jean-Pierre, anatomie
63. ROBERT René, réanimation
64. ROBLOT France, maladies infectieuses, maladies tropicales
65. ROBLOT Pascal, médecine interne
66. RODIER Marie-Hélène, parasitologie et mycologie
67. SENON Jean-Louis, psychiatrie d'adultes
68. SILVAIN Christine, hépato-gastro-entérologie
69. SOLAU-GERVAIS Elisabeth, rhumatologie
70. TASU Jean-Pierre, radiologie et imagerie médicale
71. TOUCHARD Guy, néphrologie
72. TOURANI Jean-Marc, oncologie
73. WAGER Michel, neurochirurgie

Maîtres de Conférences des Universités-Praticiens Hospitaliers

1. ARIES Jacques, anesthésiologie - réanimation
2. BEBY-DEFAUX Agnès, bactériologie - virologie
3. BEN-BRIK Eric, médecine du travail
4. BOURMEYSTER Nicolas, biologie cellulaire
5. CASTEL Olivier, bactériologie - virologie - hygiène
6. CATEAU Estelle, parasitologie et mycologie
7. CREMNITER Julie, bactériologie - virologie
8. DAHYOT-FIZELIER Claire, anesthésiologie - réanimation
9. DIAZ Véronique, physiologie
10. FAVREAU Frédéric, biochimie et biologie moléculaire
11. FRASCA Denis, anesthésiologie - réanimation
12. GUILLARD Olivier, biochimie et biologie moléculaire
13. HURET Jean-Loup, génétique
14. JAAFARI Nematollah, psychiatrie d'adultes
15. LAFAY Claire, pharmacologie clinique
16. LEVEZIEL Nicolas, ophtalmologie
17. MIGEOT Virginie, santé publique
18. ROY Lydia, hématologie
19. SAPANET Michel, médecine légale
20. THILLE Arnaud, réanimation
21. TOUGERON David, hépato-gastro-entérologie

Professeur des universités de médecine générale

GOMES DA CUNHA José

Professeur associé des disciplines médicales

SCEPI Michel, thérapeutique et médecine d'urgence

Maîtres de Conférences associés de Médecine générale

BINDER Philippe
BIRAULT François
FRECHE Bernard
GIRARDEAU Stéphane
GRANDCOLIN Stéphanie
PARTHENAY Pascal
VALETTE Thierry

Professeur certifié d'Anglais

DEBAIL Didier

Maître de conférences des disciplines pharmaceutiques enseignant en médecine

MAGNET Sophie, bactériologie - virologie

Professeurs émérites

1. BECQ-GIRAUDON Bertrand, maladies infectieuses, maladies tropicales
2. DABAN Alain, oncologie radiothérapie
3. FAUCHERE Jean-Louis, bactériologie - virologie
4. GIL Roger, neurologie
5. LAPIERRE Françoise, neurochirurgie

Professeurs et Maîtres de Conférences honoraires

1. ALCALAY Michel, rhumatologie
2. BABIN Michèle, anatomie et cytologie pathologiques
3. BABIN Philippe, anatomie et cytologie pathologiques
4. BARBIER Jacques, chirurgie générale (ex émérite)
5. BARRIERE Michel, biochimie et biologie moléculaire
6. BEGON François, biophysique, Médecine nucléaire
7. BOINOT Catherine, hématologie - transfusion
8. BONTOUX Daniel, rhumatologie (ex émérite)
9. BURIN Pierre, histologie
10. CASTETS Monique, bactériologie -virologie – hygiène
11. CAVELLIER Jean-François, biophysique et médecine nucléaire
12. CHANSIGAUD Jean-Pierre, biologie du développement et de la reproduction
13. CLARAC Jean-Pierre, chirurgie orthopédique
14. DESMAREST Marie-Cécile, hématologie
15. DEMANGE Jean, cardiologie et maladies vasculaires
16. FONTANEL Jean-Pierre, Oto-Rhino Laryngologie (ex émérite)
17. GOMBERT Jacques, biochimie
18. GRIGNON Bernadette, bactériologie
19. JACQUEMIN Jean-Louis, parasitologie et mycologie médicale
20. KAMINA Pierre, anatomie (ex émérite)
21. LARSEN Christian-Jacques, biochimie et biologie moléculaire
22. MAIN de BOISSIERE Alain, pédiatrie
23. MARILLAUD Albert, physiologie
24. MORIN Michel, radiologie, imagerie médicale
25. PATTE Dominique, médecine interne
26. PATTE Françoise, pneumologie
27. POINTREAU Philippe, biochimie
28. REISS Daniel, biochimie
29. RIDEAU Yves, anatomie
30. SULTAN Yvette, hématologie et transfusion
31. TALLINEAU Claude, biochimie et biologie moléculaire
32. TANZER Joseph, hématologie et transfusion (ex émérite)
33. VANDERMARCO Guy, radiologie et imagerie médicale

REMERCIEMENTS

A mon Président et à mes Juges,

A Monsieur le Professeur François SZTARK,

Professeur des Universités, Université de Bordeaux,

Service d'Anesthésie-Réanimation au CHU de Bordeaux,

Je vous remercie de l'honneur que vous me faites en acceptant de présider cette thèse. Soyez assuré de ma sincère reconnaissance et de mon profond respect.

Monsieur le Professeur Vincent CASOLI,

Professeur des Universités, Université de Bordeaux,

Service de Chirurgie Plastique, Reconstructrice et Esthétique au CHU de Bordeaux,

Je vous remercie pour le temps que vous avez accordé à la lecture de ce travail. Pour avoir accepté de juger cette thèse, je vous suis reconnaissant.

Monsieur le Professeur Jean-Michel MAZAUX,

Professeur des Universités, Université de Bordeaux,

Service de Médecine Physique et de Réadaptation au CHU de Bordeaux,

Je tiens à vous remercier de l'honneur que vous me faites en acceptant de juger mon travail. Veuillez croire à mon sincère respect et à ma reconnaissance.

Monsieur le Professeur Christian VIRENQUE,

Professeur des Universités, Université de Toulouse,

Service des Urgences au CHU de Toulouse,

Vous me faites l'honneur de siéger à ce jury et de donner votre avis sur mon travail. Veuillez croire en le témoignage de mon profond respect.

Monsieur le Docteur Marc RENOUX,

Spécialiste en médecine générale,

Tu as accepté de diriger cette thèse, je te remercie sincèrement de m'avoir fait confiance pendant cette année, et de m'avoir redonné courage quand il le fallait. Trouve ici la marque de toute ma reconnaissance.

Je tiens à remercier ici tous ceux qui ont participé à l'élaboration de cette thèse.

Merci à Constantin Ardilouze pour m'avoir introduit dans le monde de la météorologie, et merci à Françoise Honoré, responsable de l'équipe foudre à Météo France.

Merci à Stéphane Pedeboy et Stéphane Schmitt de Météorage pour leurs précieux conseils.

Merci à madame Marie-José Le Cam Peynaud, documentaliste à Bayonne, pour sa gentillesse et pour son aide précieuse il y a un an.

Merci à l'équipe de consultation de foudroyés de Toulouse, Philippe Birmes, Jacky Laguerre et Christian Virenque, pour leurs avis.

Merci à Mary Ann Cooper, pour sa disponibilité et son extrême amabilité.

Merci à Edwin Beguermont, responsable de la sécurité en entreprise de BTP, et merci à toutes les personnes qui ont bien voulu témoigner de leur histoire.

A mes parents, pour m'avoir permis de réaliser mes rêves, et de garder les pieds sur terre. Merci pour votre ouverture d'esprit. Votre confiance sans faille m'a été indispensable. Désolé pour la liste des soucis occasionnés, longue de Béguios à Poitiers. Maman, tu peux commencer à écrire ton livre maintenant.

A mes sœurs, Patricial et Chantal, pour leur patience, leur dévouement, et leur amour de grande sœur. Sans vous je n'aurai jamais eu le courage de tenter cette aventure.

A mes beaux-frères, Patrice et Christophe (par ordre d'arrivée), Christophe et Patrice (par taille et par âge), merci pour toute la joie de vivre que vous nous apportez, et merci d'aider vos épouses dans leur rôle de grande sœur.

A mes neveux et nièces, Thomas, Marie, Emma, Hugo et la petite Pauline. Vous êtes les plus adorables des neveux et nièces, Otto est fier de vous !

Merci à ma deuxième grande famille et club de soutien, mon coach Cécile, Philippe, Xabi, Virginie, Louissette, Aurélien, Sylvie, Hervé, Céline, Nicolas.

Merci à mes amis de Béguios, Bénat, Fredo, Gaby, Jérôme, Nicolas, Olivier, Panpi, Philippe. Pour ces bons moments.

Merci à Lionel, Maella et Muriel pour m'avoir aidé à supporter la traversée du désert.

Marion, également mon compagnon d'infortune. Les pieds dans l'eau et la tête dans les nuages, je te retrouverai n'importe où. Mais ne t'éloigne pas trop quand même !

Merci à mes compatriotes et collègues, expatriés à Bordeaux, Carole, Pauline, Stéphanie, Amaia, Maitena, Xabier, vous avez rendu ces études plus agréables.

Merci à la famille des internes d'Angoulême, Aurore, Géraldine et Jean, Geoffroy, Louis, Sandie, pour avoir accompagné mes premiers pas en psychiatrie, pour cette année absolument merveilleuse, et pour avoir terminé mes « 24 œufs » jusqu'à la fin.

Merci à mes colocataires de Poitiers, Racha et Martin, pour avoir transformé ces 6 mois périlleux en un moment inoubliable au coin de la cheminée, et pour avoir presque tout fini !

Merci à Fanny et Philippe pour avoir hébergé un SDF pendant un an à Paris.

Merci à mes amis lourdais, Claire, Christelle, Fiona, et beaucoup d'autres.

Merci à toi Marie pour ton aide précieuse.

A Caroline, pour m'avoir courageusement supporté et soutenu tout au long de cette épreuve.

A tous ceux qui m'ont fait confiance.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	13
PREMIERE PARTIELA Foudre.....	15
CHAPITRE 1 : Histoire d'une connaissance	16
A) Des premières interprétations à la connaissance rationnelle de la foudre.....	16
B) Les représentations de la foudre aujourd'hui.....	20
CHAPITRE 2 : L'orage.....	23
A) Notions de météorologie	23
B) Formation des nuages orageux.....	25
C) Électrification atmosphérique	28
CHAPITRE 3 : La foudre	32
A) Décharge électrique	32
B) Les différents types de foudre	33
C) Courants engendrés	36
D) Phénomènes associés	37
CHAPITRE 4 : Conséquences de la foudre.....	38
A) Utilité.....	38
B) Dégâts causés.....	39
C) Sévérité orageuse et probabilité d'atteinte.....	39
D) Détection en France	42
DEUXIEME PARTIE : LE Foudroiement	43
CHAPITRE 5 : Illustration par sept cas cliniques en Aquitaine	44
A) Cas clinique 1.....	44
B) Cas clinique 2.....	45
C) Cas clinique 3.....	47
D) Cas clinique 4.....	48

E) Cas clinique 5.....	49
F) Cas clinique 6.....	49
G) Cas clinique 7.....	50
CHAPITRE 6 : Une pathologie bien spécifique	51
A) Définitions	51
B) Éléments d'électropathologie	52
C) Différence entre les électrisations par courant de fréquence industrielle et les électrisations par la foudre	55
D) Les différents modes de foudroiement.....	56
E) Effets de la foudre sur l'homme.....	58
CHAPITRE 7 : Sémiologie somatique et psychique.....	60
A) Evaluation de la gravité des atteintes	60
B) Lésions neurologiques (25)	62
C) Conséquences psychiques et comportementales.....	66
D) Pathologies cardio-respiratoire.....	69
E) Brûlures et marques cutanées	70
F) Préjudices traumatiques	72
G) Lésions auditives	72
H) Lésions oculaires	73
I) Insuffisance rénale aiguë.....	74
J) Lésions chez la femme enceinte	75
K) Dysfonctionnement sexuel.....	75
CHAPITRE 8 : La mort par foudroiement.....	76
A) Causes de la mort	76
B) Physiopathologie de la mort par arrêt cardiaque ou respiratoire : asystolie, fibrillation ventriculaire et inhibition respiratoire centrale.....	76
CHAPITRE 9 : Epidémiologie.....	78
A) Introduction.....	78
B) Mortalité.....	79
C) Morbidité.....	79
D) Données épidémiologiques actuelles	80
E) Sexe ratio, âge et circonstances	82

F) Evolution depuis un siècle	83
G) A travers le monde	85

**TROISIEME PARTIE : QUELS ENJEUX POUR UN MEDECIN
GENERALISTE AUTOUR DE LA QUESTION DU
FOUDROIEMENT ?..... 86**

CHAPITRE 10 : La prise en charge d'une personne foudroyée..... 87

A) Prise en charge aiguë	87
B) Le suivi à court et moyen terme.....	93

CHAPITRE 11 : Principes de prévention et de protection..... 95

A) Anticiper un danger imprévisible	95
B) A l'approche d'un orage : estimer le risque d'exposition au danger.....	97
C) Prévention : éviter le danger.....	99
D) Protection : quels sont les lieux les plus sûrs.....	99
E) En milieu extérieur : éviter les situations à haut risque.....	106

CHAPITRE 12 : La recherche et l'enseignement..... 112

A) Un domaine de recherche en développement	112
B) Les priorités actuellement en kéraunopathologie.....	113
C) Recherche en phénoménologie de la foudre et protection des bâtiments.....	115
D) Enseignement et documentation.....	116

**CHAPITRE 13 : En pratique, envisager des solutions pour améliorer la
prise en charge et la protection des personnes 118**

A) L'avenir : vers une politique nationale de protection des personnes ?.....	118
B) Une nécessaire coordination.....	120
C) Sensibilisation au risque.....	121
D) Réflexion sur le contenu d'un message de prévention.....	124
E) Proposition de diffusion d'un message de prévention	128
F) Amélioration de la prise en charge des personnes foudroyées.....	132

CONCLUSION 135

BIBLIOGRAPHIE 137

RESUME.....143

LISTE DES ABREVIATIONS

AMS	American Meteorological Society
APF	Association Protection Foudre
ARF	Analyse Risque Foudre
BTP	Bâtiments et Travaux Publics
CEI	Commission Electrotechnique Internationale
CHU	Centre Hospitalier Universitaire
CIM	Classification Internationale des Maladies
CNRS	Centre Nationale de la Recherche Scientifique
EDF	Electricité de France
ICPE	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
INSERM	Institut de la Santé et de la Recherche Médicale
INVS	Institut National de Veille Sanitaire
IRM	Imagerie par Résonance Magnétique
LSESSI	Lightning Strike & Electrical Shock Survivors International
LSG	Lightning Safety Group
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NWS	National Weather Service
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
SPFE	Système de Protection contre la Foudre Externe
SPFI	Système de Protection contre la Foudre Interne

INTRODUCTION

Les cas de foudroiement ne sont pas rares, et contrairement aux idées reçues, ils ne sont que rarement fatals. Ils provoquent en revanche une multitude de symptômes et de séquelles plus ou moins visibles. Que nous soyons médecins ou non, nous savons très peu de chose sur la foudre et sur la pathologie qui en découle. Pourtant l'atteinte de l'homme par la foudre est un domaine d'étude bien spécifique. Actif dans de nombreux pays, il porte le nom de kéraunopathologie (du grec kéraunos : la foudre).

Il existe une littérature qui traite de la phénoménologie de la foudre et de la kéraunopathologie. La recherche scientifique a beaucoup avancé récemment, mais le savoir reste confiné, trop éclaté entre les différentes disciplines (physique, météorologie, physiologie, médecine, médecine vétérinaire, etc.). Outre ce manque de coordination entre spécialités, peu de travaux de vulgarisation aident à appréhender la foudre dans sa globalité, afin d'envisager une meilleure prise en charge des cas de foudroiement humain.

L'Association Protection Foudre constitue une des exceptions. Regroupant les principaux acteurs de la protection contre la foudre en France, elle vise à améliorer la protection des biens et des personnes. En 2013, à l'occasion de son 20^e anniversaire, M. Jean Le Penven, ancien président de l'association, en faisait le bilan : *« En 20 ans, la protection des biens a beaucoup évolué et est devenue efficace. En revanche on ne peut que constater une grande lacune en ce qui concerne la protection des personnes. Pourquoi les choses n'ont-elles pas avancé ? Est-ce un défaut d'information du public ? »*

Les représentations anciennes et très fortes de la foudre empêchent les comportements rationnels. Sont-elles un frein au développement de la recherche clinique et à la mise en place d'une prévention efficace comme le supposait Elysaabeth Gourbière ? Décédée prématurément en 2006, cette médecin attachée au service de recherche médicale d'Electricité De France et de Gaz De France avait acquis une renommée mondiale dans la recherche en kéraunopathologie. Elle avait imaginé la création en France d'un centre national multidisciplinaire d'information, qui abriterait toutes les données disponibles sur la foudre et ses conséquences, centre toujours en projet depuis plusieurs années.

La foudre n'est jamais mentionnée dans les enseignements de médecine à la faculté, ou dans les manuels de premiers secours, alors qu'elle n'est pas moins meurtrière que les morsures de serpent ou les avalanches.

Ce travail a pour objectif de rendre plus abordables les informations pertinentes aux yeux d'un médecin généraliste, acteur central de la prévention et du suivi des accidents liés à la foudre. Il commencera par une présentation, aussi claire que possible, de l'état actuel de connaissances sur la foudre (Partie I). La deuxième partie s'attachera au foudroiement et ses conséquences médicales, ainsi que les données fournies par l'épidémiologie, en France et à l'étranger. Les grands principes de prise en charge feront l'objet de la partie III. Il y sera également question des enjeux et perspectives de la sensibilisation des particuliers et des médecins aux dangers du foudroiement.

PREMIERE PARTIE



LA Foudre

CHAPITRE 1 : Histoire d'une connaissance

A) Des premières interprétations à la connaissance rationnelle de la foudre

1. Mythologies et premières tentatives d'échapper à la fatalité divine

Les historiens considèrent que la plus ancienne représentation avérée de la foudre a été découverte en Mésopotamie. Il s'agit d'un sceau-cylindre akkadien de la première période babylonienne (vers 2.200 ans avant notre ère, Louvre à Paris, British Museum à Londres), où figure **Enlil-bel**, le dieu suprême babylonien. Son nom signifie seigneur des vents, dieu de la justice qui peut punir ou récompenser. Dieu gouvernant les météores il brandit un fouet ; à côté de lui une divinité féminine brandit des éclairs, feux du ciel.

On date également de cette même période une gravure rupestre située en France dans le parc du Mercantour. Parmi les 36 000 gravures retrouvées près du Mont Bego (be-go : lieu de culte du taureau), un des sites les plus foudroyé de France, celle dite du « sorcier » dessine un homme les bras au ciel, une lame de poignard dans chaque main (1).

L'homme a toujours eu besoin de donner du sens aux phénomènes anxiogènes qui l'entourent. La foudre, avec ses saisissants effets visuels et sonores, son extrême soudaineté, dépasse notre entendement. Elle conserve un pouvoir émotionnel et fantasmatique, une force exceptionnelle, et il n'est pas surprenant que, dans toutes les mythologies, on trouve une divinité qui la gouverne. A l'image du dieu Zeus des Grecs, le maître de la foudre est souvent le plus puissant des dieux. Dans la plupart des civilisations antiques, la foudre est adorée pour la crainte qu'elle inspire mais aussi pour le pouvoir fertilisant de la pluie qui l'accompagne, et représente la dualité foudre puissante-fertilité /fécondité (2).

Il est par contre frappant de constater une tendance universelle à mêler explications naturelles et interprétations surnaturelles. Les premières tentatives d'explication scientifiques sont souvent rapportées à Aristote, Sénèque, puis Benjamin Franklin, mais de nombreux éléments de l'histoire nous montrent que les deux raisonnements, objectifs et subjectifs, ont toujours été intriqués (3).

Un siècle avant notre ère, le poète et philosophe latin Lucrèce tente de réfuter les croyances d'une foudre punitive. Il explique le phénomène physique et évoque les « atomes originels de la foudre » qui pénètrent la matière en feux liquides. Dans son seul ouvrage, inachevé, *De la nature des choses*, il remet en question la volonté divine en se demandant pourquoi les innocents sont touchés tout autant que les coupables. Les fautes des hommes n'étant pas une donnée très objective et pouvant être cachées, il argumente plus loin : « *Pourquoi les dieux visent-ils les lieux déserts, ce qui est perdre leur peine ? Est-ce pour exercer leur bras ou fortifier leurs muscles ?* » (3). Juste après, en Chine, Wang Chong (26-99) conclut également à un phénomène purement physique, avec des arguments comparables à ceux de Lucrèce. Il observe tout d'abord qu'il y a plus d'éclairs – et de victimes d'éclairs – en été qu'en hiver, pourtant les crimes sont uniformément répartis tout au long de l'année. Pourquoi donc le ciel punirait-il différemment selon les saisons ? Cela prouve qu'il n'y pas de relation entre crime et foudre (3).

Pourtant la théorie de réduire la foudre à un hasard dépourvu de sens aura du mal à s'imposer au cours des siècles suivants. Mais l'histoire nous montre très tôt une volonté de maîtriser ce phénomène dangereux, basée sur une observation attentive de la nature. Les Gaulois plantaient de longues épées en terre auprès de cours d'eau, la pointe en haut, tandis que les guerriers se couchaient à terre. Halfergen, un philosophe du Moyen Age, décrit : « *souvent la foudre tombait sur la pointe d'une épée, sans faire de mal au guerrier, et s'écoulait innocemment dans l'eau où, après s'être liquéfiée, elle finissait par se solidifier dans les temps de grande chaleur* » (4). Au X^e siècle, Gerbert, un pape savant connu sous le nom de Silvestre II, aurait inventé un paratonnerre plus élaboré que celui des gaulois. Il faisait planter en terre, à l'approche des orages, de longues perches terminées par des pointes de fer très aiguës. Mais cette observation est restée relativement méconnue (4).

2. La protection des saints au Moyen Age

Au Moyen Age, la foudre est encore très symboliquement punitive, comme elle l'est dans les trois grandes religions du Livre (5). Mais elle reste également un danger incontrôlable : la plus grande partie de la population est paysanne, et passe beaucoup de temps dans les champs. Les risques de foudroiement sont très élevés. Les dégâts sont parfois immenses, régulièrement des poudrières sont touchées : en 1723 à Campo Maior au Portugal, une telle explosion tue 1

500 personnes (3). Dépourvus de moyens de protection efficace, les hommes se tournent naturellement vers la religion.

La pratique la plus courante consiste à sonner les cloches des églises, pour y réunir les habitants et éloigner l'orage. Pendant longtemps, les cloches des églises étaient estampillées par deux mots magiques *fulgura frango*, « je dompte (brise) la foudre ». Malgré ses conséquences fatales – le sonneur de cloche constituant une cible de choix au bout d'une corde mouillée – cette pratique perdurera et persistera même après l'arrivée du paratonnerre (6).

Parmi les 14 saints invoqués pour se protéger de la foudre, le plus connu est Sainte Barbe. Convertie au christianisme contre l'avis de son père, celui-ci la décapita lui-même, et se fit foudroyé aussitôt après. Associée au bruit et feu, Sainte Barbe est aujourd'hui fêtée le 4 décembre comme patronne des artificiers et des pompiers. Saint Elme a donné son nom à un phénomène avant-coureur annonçant l'orage : « les feux de Saint-Elme ». Les marins de la région de Saint-Malo racontent que Saint Elme fut secouru en mer, et pour remercier le capitaine qui refusait tout dédommagement il promit d'envoyer un petit feu d'avertissement, chaque fois qu'une tempête menacerait (3).

3. L'invention du paratonnerre et la découverte de l'électricité

L'invention du paratonnerre est un tournant dans l'approche de la foudre. Elle relève de l'empirisme le plus total étant donné qu'elle a devancé la connaissance théorique de l'électricité. Cette idée est née grâce à l'intuition géniale que la foudre était de même nature que le flux électrique, mais elle repose sur une hypothèse fautive : la possibilité qu'aurait une pointe de « décharger les nuages » (3).

La puissance d'attraction de l'ambre jaune (*elektron* en grec) une fois frotté avec du tissu est connue depuis longtemps : en Grèce, Thalès de Milet (625-547 avant notre ère, célèbre pour son théorème) en fait mention, mais personne alors ne trouve cela très intéressant. Il fallut attendre 1600 pour qu'un médecin de la famille royale d'Angleterre, William Gilbert, désigne par le terme « électricité » les substances qui possèdent cette propriété d'attraction, et décrive dans son traité *De Magnete* les lois de répulsion et d'attraction des aimants. C'est le début des premières machines électrostatiques, capables de produire de grêles étincelles (3). Très rapidement, on note des similitudes entre la foudre et l'électricité, et une vive concurrence s'engage entre les scientifiques pour tenter de prouver cette hypothèse. Le 10 mai 1752, à

Marly-la-Ville, en France, Dalibard observe des étincelles entre une tige isolée du sol et pointée vers un nuage d'une part, et une pointe reliée à la terre d'autre part. Cette expérience, qui avait été proposée par Benjamin Franklin (1706-1790), confirme que la foudre est constituée de « flux électrique ». La célèbre expérience du cerf-volant dans un orage prétendument réalisé par Benjamin Franklin aurait été en fait l'œuvre d'un physicien français, Jacques de Romas. Elle a eu lieu à Nérac dans le Lot-et-Garonne, et elle est clairement décrite dans une lettre à l'académie des sciences de Bordeaux, le 12 juillet 1752 (3).

Benjamin Franklin pense en outre pouvoir « décharger un nuage » afin d'éviter la foudre, application grandeur nature du pouvoir qu'ont les pointes de décharger un condensateur en créant des étincelles en laboratoire. Mais les décharges violentes infligées aux expérimentateurs font changer d'avis Benjamin Franklin, notamment après la mort du physicien Georg Wilhelm Richmann, foudroyé dans son laboratoire à Saint-Pétersbourg en 1753. Il observe en particulier les dégâts causés par la foudre sur une église à Newberry en 1754, où l'éclair a suivi le fil de laiton qui actionne le marteau de la cloche sans endommager les murs. Il abandonne l'idée de décharge silencieuse et pense désormais que la tige de métal peut peut-être conduire la décharge aussi loin que se prolonge la tige dans la terre. Un paratonnerre ainsi conçu a fonctionné efficacement pour la première fois de l'histoire à Philadelphie, dans le courant de l'été 1752 (3).

4. L'abandon d'un mythe ?

Le paratonnerre rencontre à ses débuts beaucoup de réticence du fait d'une ignorance de la théorie de l'électricité. On se demande si tout ce fluide électrique ainsi attiré et emmagasiné dans la terre ne provoquera pas de séismes. On ne comprend pas bien le concept de « chemin de moindre résistance » offert à la foudre : pour beaucoup, y compris des scientifiques, l'objectif était de prévenir les coups de foudre en déchargeant les nuages, pas de les « attirer » (3).

Quoi qu'il en soit, les hommes ont enfin trouvé, en partie du moins, une explication naturelle à ce phénomène mystérieux, ainsi qu'un moyen de le guider. Mais pour autant cela marque-t-il la fin d'une période d'obscurantisme autour de la foudre ? La réponse est clairement non, au vu des résistances soulevées par à cette invention sacrilège, capable de détourner la volonté divine. Dans les campagnes, les cloches des églises continuent de manière ancestrale à être agitées, en dépit des centaines de morts recensés chez les sonneurs de cloche. Des décrets

de loi et une position officielle de l'Eglise visent à interdire cette pratique. Le cas de la cathédrale de Strasbourg illustre bien ces comportements irrationnels tenaces. A partir de l'année 1759, elle est détruite par la foudre et reconstruite 4 fois avant que ne soit installé un paratonnerre... en 1835. Les projets présentés par l'académie des sciences et par Benjamin franklin lui-même se sont vus rejetés pendant près de 80 ans sans aucune justification.

En France les mentalités évoluent après qu'un procès extrêmement médiatisé ait fait jurisprudence le 31 mai 1783. C'est le procès de Saint-Omer, gagné par un propriétaire de paratonnerre contre ses détracteurs. Le jeune avocat de 25 ans, un certain Maximilien Robespierre, avait rappelé l'accusation hérétique de Galilée 150 auparavant.

5. L'ère scientifique moderne

La connaissance scientifique de la foudre est très récente. C'est au XX^e siècle, avec le développement de la photographie, puis de l'oscilloscope à tube cathodique, qu'il est devenu possible d'étudier précisément la foudre. Ces techniques ont en effet permis d'observer la trajectoire des éclairs et de mesurer la tension et l'intensité du courant en jeu. Aujourd'hui, les mesures de terrain, grâce aux ballons-sondes et aux satellites, ainsi que les expériences en laboratoire, permettent d'avancer dans la physique de l'éclair (7), même si encore de nos jours, la phénoménologie reste en partie incomprise.

B) Les représentations de la foudre aujourd'hui

1. Les mythes persistent

Les connaissances scientifiques les plus récentes sur la foudre demeurent inconnues du grand public. On retrouve en effet dans la pensée populaire énormément d'incertitudes et d'erreurs. M. A. Cooper, médecin urgentiste dans l'Illinois et chercheur en kéraunopathologie mondialement reconnue, en a dressé la liste :

- Les foudroiements sont toujours mortels.
- Les décès sont la conséquence d'une brûlure. Les victimes de la foudre sont le plus souvent retrouvées entièrement carbonisées.

- La brûlure est une composante majeure des atteintes par la foudre.
- Des points d'entrée et de sortie de la foudre sont visibles, et il y a toujours des brûlures internes.
- Le métal attire la foudre.
- Attendre que la pluie s'arrête et que l'orage passe pour partir est une option sûre.
- Si l'on peut voir un ciel bleu le danger de la foudre est minime.
- Les atteintes par la foudre ne peuvent pas se produire à l'intérieur d'un bâtiment.
- Les pneus en caoutchouc (ou chaussures, imperméables, sac à dos) protègent une personne contre le coup de foudre.
- Un bâtiment mis à la terre est à l'abri de dégâts de la foudre.
- Il est dangereux de toucher une victime de la foudre.
- Un paratonnerre protège sous une zone conique centré sur sa pointe avec un demi-angle de 45°.

Ces propositions sont toutes entièrement fausses. La liste pourrait être beaucoup plus longue en relevant certains conseils donnés dans des médias de grande écoute (5), mais nous allons surtout essayer de comprendre pourquoi ces croyances persistent dans la pensée populaire.

2. Le besoin de donner du sens

La foudre se résume-t-elle de nos jours à un phénomène naturel, convenablement expliqué par les lois de l'électricité ?

Dans toutes les cultures, et même à notre époque, la foudre pose invariablement une autre question. La foudre vient du ciel et s'abat sur la terre avec une puissance inouïe. Le pouvoir symbolique est immense. Lorsque l'éclair frappe aléatoirement, est-ce réellement un hasard ou autre chose ?

Dans un documentaire canadien de 2009, *Act of God*, Jennifer Baichwal se demande si être frappé par la foudre est un «phénomène naturel aléatoire ou un événement prédestiné». Il raconte les histoires de personnes foudroyées qui incarnent cette hésitation entre le sens et le hasard. Parmi elles, James O'reilly, dramaturge canadien, explique : « *Je ne peux accepter que cela se soit produit pour une raison, et je ne peux accepter non plus que vraiment il n'y ait pas de raison* ».

En France, les prières et les lieux saints pour se protéger de la foudre sont nombreux. Le tison dans la cheminée, la hache posée au sol tranchant vers le haut étaient courant jusqu'à une époque très récente. En 1956, une enquête révéla que 143 paroisses sonnaient encore des cloches en cas d'orage, en France dans le département du Gers (3).

Il y a une grande ambivalence dans notre rapport à la foudre. Son aspect spectaculaire, et grandiose nous empêche-t-il de voir la réalité d'un arc électrique intense et dangereux? La frontière entre rationnel et irrationnelle n'est pas claire en ce qui concerne notre représentation de la foudre. La science moderne, pas plus que la découverte de Benjamin Franklin, n'apporte rien à la question du sens. On peut comprendre les mythes soient tenaces (3)(6).

CHAPITRE 2 : L'orage

A) Notions de météorologie

1. L'atmosphère

La météorologie est la branche de la physique qui étudie l'atmosphère. Une atmosphère est une enveloppe gazeuse qui entoure certains corps célestes. Dans la couche entre 20 et 40 km au-dessus du sol, ce rayonnement solaire contribue à la dissociation de l'oxygène en ozone, qui lui absorbera le rayonnement solaire dans l'ultraviolet. Les brusques changements de température ainsi engendrés permettent de définir un découpage vertical de l'atmosphère :

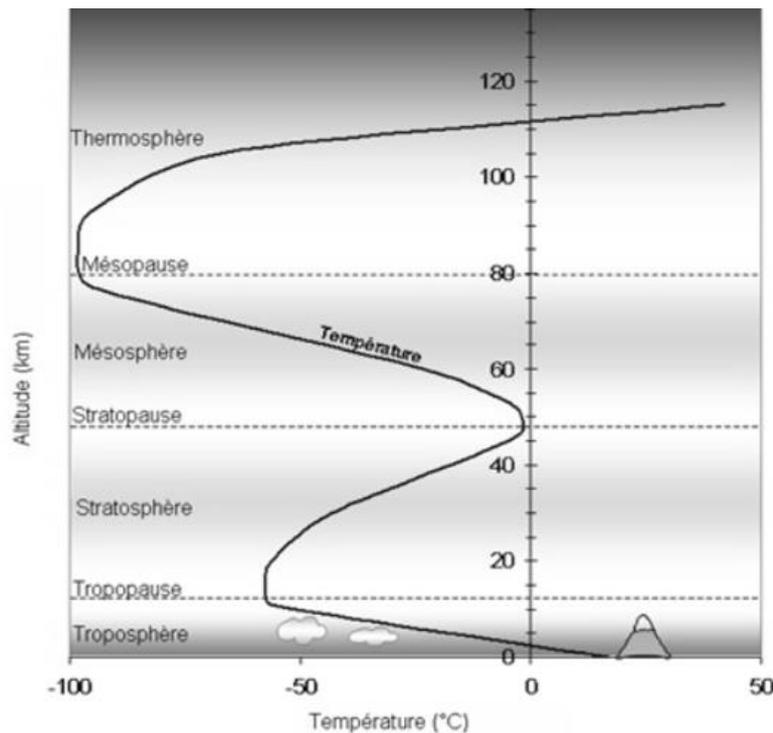


Figure 1 : représentation schématique du profil vertical moyen de température dans l'atmosphère. D'après [McIlveen, 1992].

La troposphère contient 90 % de la masse atmosphérique et quasiment toute la vapeur d'eau. Sa limite – la tropopause, qui correspond à la première cassure dans le profil moyen de la température – se situe à une altitude variable selon la latitude, en moyenne vers 8-6 km aux pôles, entre 10 et 12 km aux moyennes latitudes et vers 16-18 km au voisinage de l'équateur. Elle est la couche dans laquelle ont lieu la plupart des phénomènes météorologiques.

1. Des phénomènes météorologiques d'échelles variables

Les phénomènes météorologiques constituent une perturbation d'un état plus lisse de l'atmosphère. Ce sont toutes les irrégularités atmosphériques, dues à des excitations extérieures telles que les variations du rayonnement solaire et les interactions avec la surface terrestre ou océanique. En réaction à ces excitations, des circulations se mettent en place, en général dans le sens d'une homogénéisation de l'état du fluide, d'un retour vers l'état d'équilibre. Ces phénomènes météorologiques ont des dimensions spatiales et des périodes temporelles qui peuvent être très diverses, de la taille de la planète à moins d'un millimètre, et de plusieurs années (voire dizaines, centaines ou milliers d'années) à moins d'une seconde.

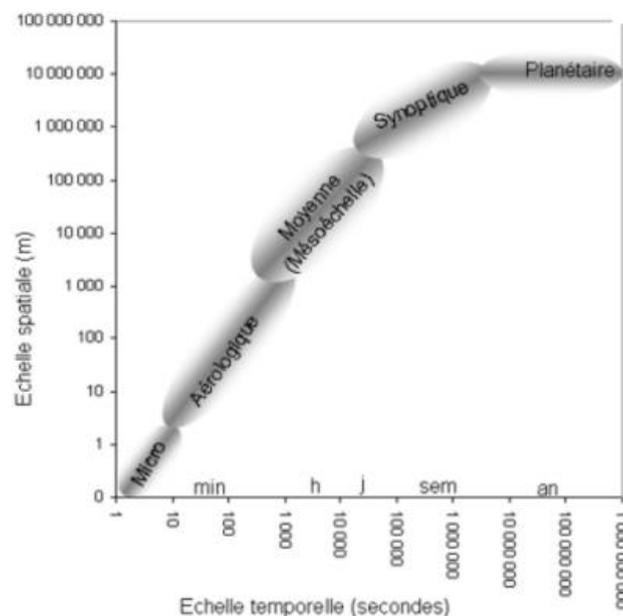


Figure 2 : les principales échelles troposphériques. D'après [McIlveen, 1992].

On range dans l'*échelle planétaire* des circulations persistantes à l'échelle de plusieurs semaines ou de plusieurs mois et qui occupent une bonne partie du globe, tel que la mousson ou la circulation de Hadley. L'*échelle synoptique* (de l'ordre du millier de kilomètres et de quelques jours) contient essentiellement les dépressions et les anticyclones qui se développent surtout sur les océans aux moyennes latitudes. Entre 100 et 10 km et pour des temps caractéristiques d'une heure à une journée, on trouve les phénomènes de *mésoéchelle* comme les vents régionaux, les brises, les **lignes de grains**. Puis entre 10 km et quelques centaines de mètres, on est dans l'échelle *aérolologique*, échelle des **orages isolés**, des tornades. Plus l'échelle concernée est petite, plus la prévision du phénomène météorologique sera difficile (8).

B) Formation des nuages orageux

1. Qu'est qu'un orage ?

Le terme orage dérive de l'ancien français *ore* « vent » (9). Pour **le Littré**, il s'agit d'une « agitation violente de l'atmosphère avec vent, éclair et tonnerre ». **L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM)**¹ le définit, quant à elle, comme une ou plusieurs décharges brusques d'électricité atmosphérique, se manifestant par une lueur brève et intense (éclair), et par un bruit sec ou un roulement sourd (tonnerre) (10). On peut donc dire qu'un orage commence avec le premier coup de foudre et se termine au dernier coup (8).

2. Formation des nuages orageux

Un nuage est un amas de minuscules gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace en suspension dans l'air. Leur formation provient de la condensation de la vapeur d'eau, en général quand une masse d'air et humide se refroidit en s'élevant.

Les nuages de type stratiforme, avec un aspect en couche, sont associés à des zones d'ascendance étendues de plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de kilomètres, mais de

¹ *L'Organisation météorologique mondiale est l'institution spécialisée des Nations Unies qui fait autorité pour tout ce qui concerne l'état et le comportement de l'atmosphère terrestre, son interaction avec les océans, le climat qui en est issu et la répartition des ressources en eau qui en résulte.*

faible intensité. A l'origine des orages les nuages de type cumuliforme, ayant des formes de moutons blancs ou de chou-fleur, sont associés à des zones d'ascendance s'étendant horizontalement sur une petite distance, d'une centaine de mètre à plusieurs kilomètres, mais de forte intensité. Ce sont des nuages d'échelle aérologique ou de mésoéchelle (11).

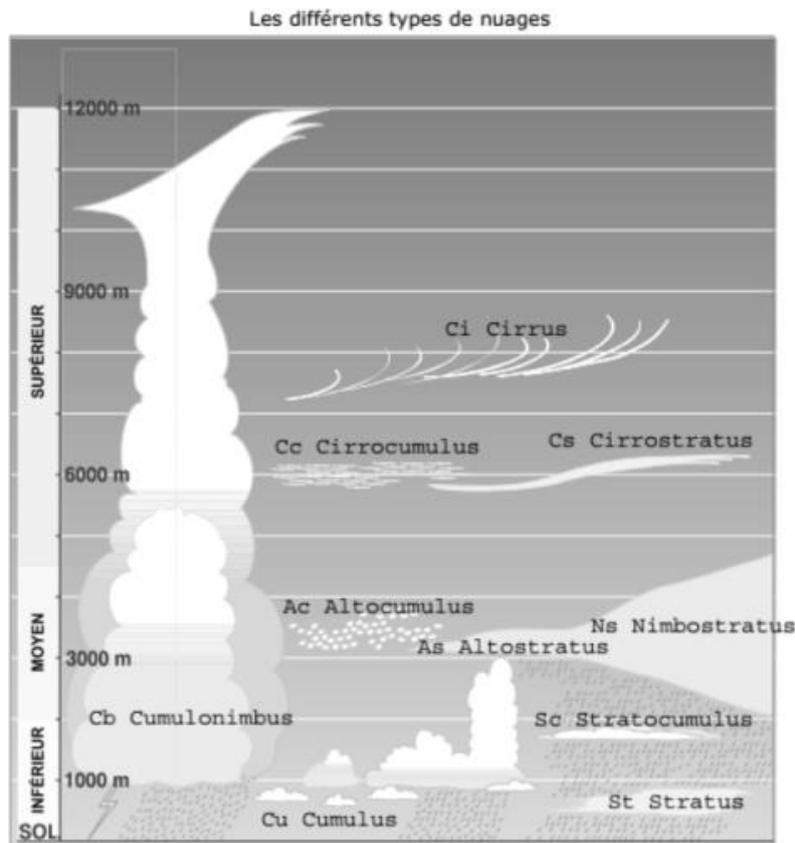


Figure 3: les différents types de nuage, source Météo France. Nuages en couches ou stratiformes : stratus, stratocumulus, nimbostratus, cirrostratus, altocumulus, cirrus, cirrocumulus, altostratus. Nuages en amas ou cumuliformes : cumulus, cumulonimbus. (11)

La configuration nuageuse stratiforme est considérée stable. L'air une fois soulevé retourne en bas à sa position d'origine, car l'air s'alourdit (apparition d'eau liquide). La masse d'air s'affaisse sur elle-même, mouvement appelé subsidence. (10)

La configuration nuageuse cumuliforme est, elle, instable car l'air élevé ne retombe pas, au contraire l'ascension initiale s'amplifie. Pour cela un courant vertical ascendant puissant doit amener les particules à un niveau situé au-dessus de leur point de condensation. La condensation libérant de la chaleur (le contraire de l'évaporation), elles seront plus chaudes que l'air environnant et pourront ainsi continuer à s'élever de plus en plus (*c'est la convection profonde*). Les orages seront donc plus fréquents en montagne et sur les côtes parce que la force

d'ascendance supplémentaire nécessaire (*on parle de situation de forçage*) peut provenir de brises marines, de brises de terre (courants ascendants le long des pentes), d'un soulèvement par le relief (nuage orographique), d'un réchauffement d'un air humide dans l'après-midi, ou de la rencontre d'un air chaud avec un front froid. C'est la très classique transformation du cumulus en cumulonimbus².

3. Le cumulonimbus

Il s'agit de l'unique nuage associé à l'orage. Il est également responsable de toutes les chutes de grêle. Il est constitué d'un monumental conglomérat d'hydrométéores, de 5 à 15 km de haut et 30 km de large. En s'élevant, le cumulonimbus se heurte à la stratosphère et s'étale largement, ce qui lui donne sa forme générale d'enclume (ou, parfois, de panache ou de chevelure ébouriffée) (12).

Son sommet est composé de glace car il a une température de -40 à -50°C , le niveau intermédiaire est composé de neige, et sa base à 0°C est formée d'eau liquide. Cette composition étagée sera à l'origine de son électrification et du déclenchement des éclairs, nous y reviendrons dans la section C.

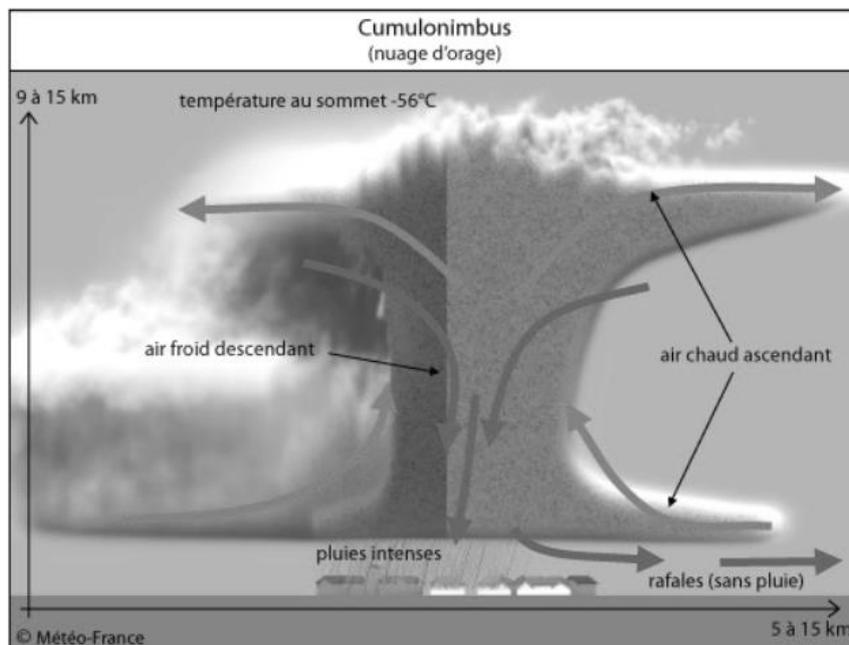


Figure 4 : l'organisation convective d'un cumulonimbus

² D'autres nuages peuvent constituer des nuages pré-orageux susceptibles de se transformer en cumulonimbus. Voir à ce sujet l'ouvrage d'Alex Hermant, *Traqueur d'orage*.

Ce nuage forme une cellule convective. L'air chaud et l'air froid ne se mélange pas pour donner de l'air tiède, l'air chaud monte et l'air froid descend.

L'orage est généralement un phénomène de courte durée : de quelques dizaines de minutes à quelques heures, souvent une seule heure. Il peut être isolé (orage dû à la présence de reliefs ou causé par le réchauffement du sol en été) ou organisé en ligne (dite « ligne de grains » par les météorologues). Sa vitesse de déplacement peut atteindre 80 km/h, et peut se former en moins de 2 heures (13).

C) Électrisation atmosphérique

1. Processus d'électrisation du nuage

Le cumulonimbus est une véritable usine thermodynamique, qui se nourrit d'air chaud et humide pour fournir l'énergie nécessaire aux mouvements ascendants. Son énergie est considérable : chaque seconde, un gros cumulonimbus peut aspirer 700 000 tonnes d'air et absorber ainsi 8 800 tonnes de vapeur d'eau. Le même nuage peut renvoyer à la surface terrestre 4 000 tonnes d'eau, sous forme d'eau liquide, de neige ou de grêle.

Les mouvements verticaux dans cette cellule convective sont très violents : brassées par des vents contraires pouvant dépasser 130 km/h, les particules d'eau et de glace du nuage s'entrechoquent. Ces nombreuses collisions provoquent l'électrisation du nuage lorsqu'un transfert de charge a lieu entre une particule de neige roulée assez lourde et un cristal de glace très léger (12).

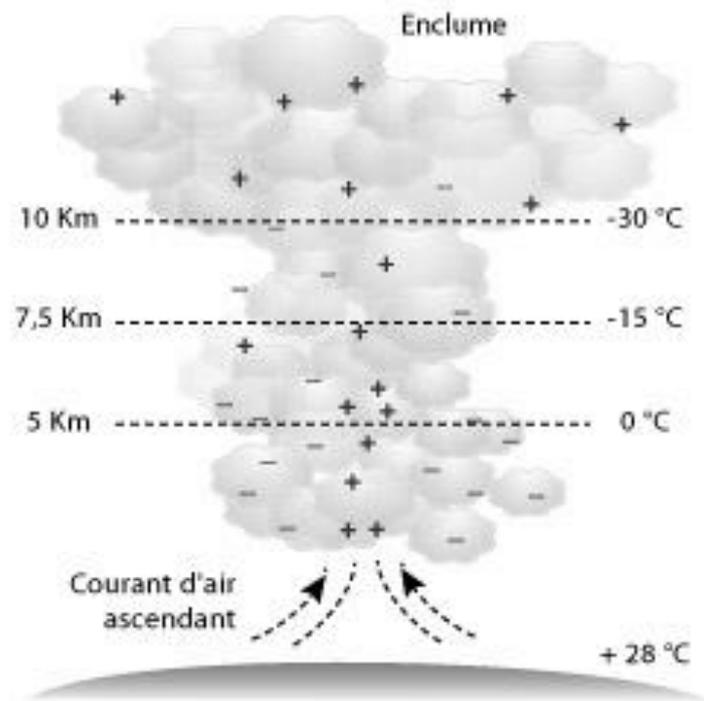


Figure 5: schéma illustratif de la distribution de charges dans le nuage d'orage. Source www.foudre-ineo.com

Quand la température est inférieure à $-10/-20^{\circ}\text{C}$, la neige roulée se charge négativement et le cristal positivement. La particule de neige roulée, trop lourde pour être portée par les ascendances, précipite vers le bas du nuage alors que le cristal est emporté vers le haut du nuage. Le nuage se charge négativement dans sa partie basse et positivement dans sa partie haute. Dans la partie basse du nuage, où la température peut s'élever au-dessus de -10°C , le transfert de charge se réalise dans l'autre sens. Les particules de neige roulée qui précipitent forment une poche chargée positivement. L'ensemble des processus décrits est à la base du modèle tripolaire proposé pour un cumulonimbus isolé (8).

2. Champ électrique engendré

L'électrisation d'un nuage génère un champ électrique entre ses strates, d'une intensité mesurée maximum de 400 kV/m (14). Au sol le champ électrique qui était par beau temps de 120 V/m s'inverse et peut atteindre $15\text{ à }20\text{ kV/m}$ (15). Cependant, ces valeurs sont insuffisantes pour que des décharges électriques se produisent dans l'air qui est normalement très peu conducteur. On dit que l'air est isolant (ou diélectrique) car l'énergie nécessaire pour arracher

un électron et former de ions positifs et négatifs qui le rendraient conducteur est très élevée. Il se produit une **rupture diélectrique** de l'air lorsque l'on dépasse le champ disruptif de l'air, c'est-à-dire la valeur maximum de champ électrique que peut supporter l'air avant le déclenchement d'un arc électrique (tension de claquage). Ce phénomène est semblable au claquage d'un plomb de disjoncteur domestique. Le champ disruptif pour un air sec à la pression du niveau de la mer est de l'ordre de 3 MV/m (8).

De telles valeurs peuvent être atteintes très localement, par un renforcement du champ électrique autour d'aspérités. C'est **l'effet de pointe**, représenté schématiquement en électrostatique par une concentration des lignes de force au sommet d'une aspérité. Dans l'exemple ci-dessous, au sommet d'une demi-sphère, le champ est le triple du champ préexistant. Et si l'objet est encore plus pointu, l'effet s'accroît. Ici pour un demi-ellipsoïde dont le rapport entre le grand axe et le petit axe de l'ellipsoïde est égal à 30, le champ est multiplié par un facteur 300 (4).

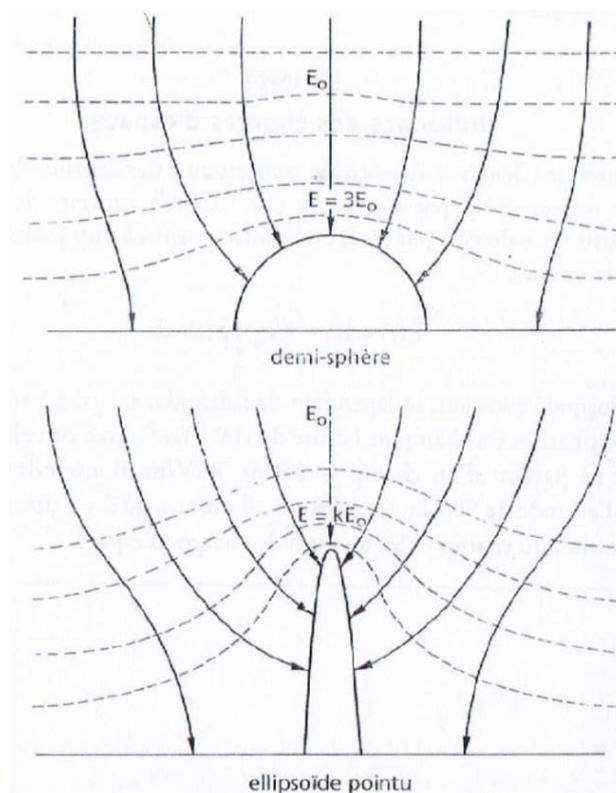


Figure 6: facteur d'amplification du champ électrique au sommet d'une aspérité, lignes de champ trait plein, lignes équipotentiels trait pointillé. Source Claude Gary, la foudre.

Juste avant que ne se produise la rupture diélectrique de l'air, il se produit une ionisation partielle de l'air : un électron est arraché par le champ électrique, et un processus d'avalanches électroniques se produit (ionisation par collision d'un premier électron) sur quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres. On appelle cela un effet couronne ou **effet corona** (en raison du halo lumineux qu'il peut produire autour des conducteurs à haute tension). Cet effet se manifeste sous forme d'effluves bleutés, accompagnés de crépitements (4). Les marins appellent feux de Saint-Elme ces effluves au sommet des mâts de bateau. En montagne, sur et à proximité d'une cime, les alpinistes observent un phénomène similaire au bout de leurs doigts ou de leurs piolets. Les cheveux qui « tirent » et se dressent sur la tête témoignent aussi de l'élévation du champ électrique qui crée des forces électrostatiques. Ces phénomènes précurseurs en montagne sont remarquablement bien décrits dans le roman de Frison-Roche *Premier de cordée* (16).

Une dernière notion à retenir : les ions engendrés par l'effet couronne au sol forment une sorte de "matelas" de charges positives qui masque partiellement l'influence des charges du nuage. Ils forment un écran protecteur d'une épaisseur de 500 mètres, et le champ électrique augmente progressivement, passant de 5 kV/ m au sol à 50 kV/ m lorsqu'on émerge du matelas. On comprend donc la priorité de descendre lorsqu'on est surpris par un orage en montagne (3). Ce matelas protecteur n'existe pas en mer.

Si on admet que cette valeur de champ se maintient ensuite jusqu'à la base du nuage, située à environ 2 km d'altitude, on évalue la différence de potentiel entre le sol et la base du nuage à 100 millions de volts (3).

CHAPITRE 3 : La foudre

A) Décharge électrique

On distingue deux grands types d'éclairs, les éclairs intra-nuages (dans un nuage ou entre 2 nuages) et les éclairs nuages-sol.

→ Les **éclairs intra-nuages** sont les plus nombreux (environ 70% du nombre total d'éclairs) mais les moins bien connus. On perçoit souvent leurs lueurs, sans les entendre. Ils apparaissent les premiers, dès la phase de développement du nuage, environ un quart d'heure avant la maturité indispensable au jaillissement des décharges au sol. En matière de prévention ce quart d'heure apporte une marge de sécurité considérable.

→ Les **éclairs nuages-sol** (30 %) sont les plus étudiés car ils sont à l'origine des dégâts et accidents au sol. La foudre est un éclair qui touche le sol ou un aéronef (8).

L'effet corona constitue une étape nécessaire mais non suffisante pour créer une décharge atmosphérique, car il ne se produit que sur quelques centimètres (14). L'ionisation peut s'auto propager lorsque le champ induit par les micro-décharges de l'effet corona, superposé au champ ambiant déjà existant, est supérieur au champ disruptif de l'air³ (8).

La première phase d'un coup de foudre est donc toujours la formation d'une prédécharge, c'est-à-dire la progression d'un canal légèrement ionisé à travers l'air neutre. Cette pré-décharge est appelée **un traceur** (ou pré-éclair, ou encore *leader* en terminologie anglo-saxonne, terme couramment utilisé en français). Le traceur prend naissance le plus souvent dans le nuage, par effet de pointe sur les gouttelettes d'eau, car elles présentent d'importantes déformations (14). Il avance lentement mais il est peu lumineux donc invisible à l'œil nu. Ce traceur forme un pont suffisamment conducteur pour préparer la voie à la décharge complète, véritable arc électrique. Cette décharge est le **coup de foudre** proprement dit, très lumineux, et progressant à une vitesse de l'ordre du tiers de la vitesse de la lumière (environ 100.000 km/s) (2).

³ Il s'agit là de la théorie explicative actuellement retenue : la théorie des streamers. Elle a été initialement formulée séparément par Rether et par Meek Loeb en 1953 (99).

La pointe du traceur est lumineuse par rapport au reste du canal ionisé car une grande quantité d'énergie est nécessaire pour vaincre la résistance de l'air et ioniser un canal. En raison de cette luminosité et de cette lenteur la foudre est perçue comme descendante du nuage à la terre, même si la grande majorité de l'énergie est dissipée dans la direction opposée : le courant principal se déplace toujours du sol vers le nuage (« la foudre monte toujours »). On l'appelle donc également **arc en retour** (*return stroke*).

B) Les différents types de foudre

La figure suivante résume, selon le professeur Karl Berger, les différents types de traceurs aujourd'hui admis par tous les spécialistes. On peut ranger les décharges de foudre dans quatre catégories selon d'une part la direction, ascendante ou descendante, du traceur qui déclenche la décharge, et d'autre part le signe de la charge portée par le traceur, positive ou négative. Selon que la décharge soit complète ou s'interrompe on dénombre huit situations possibles :

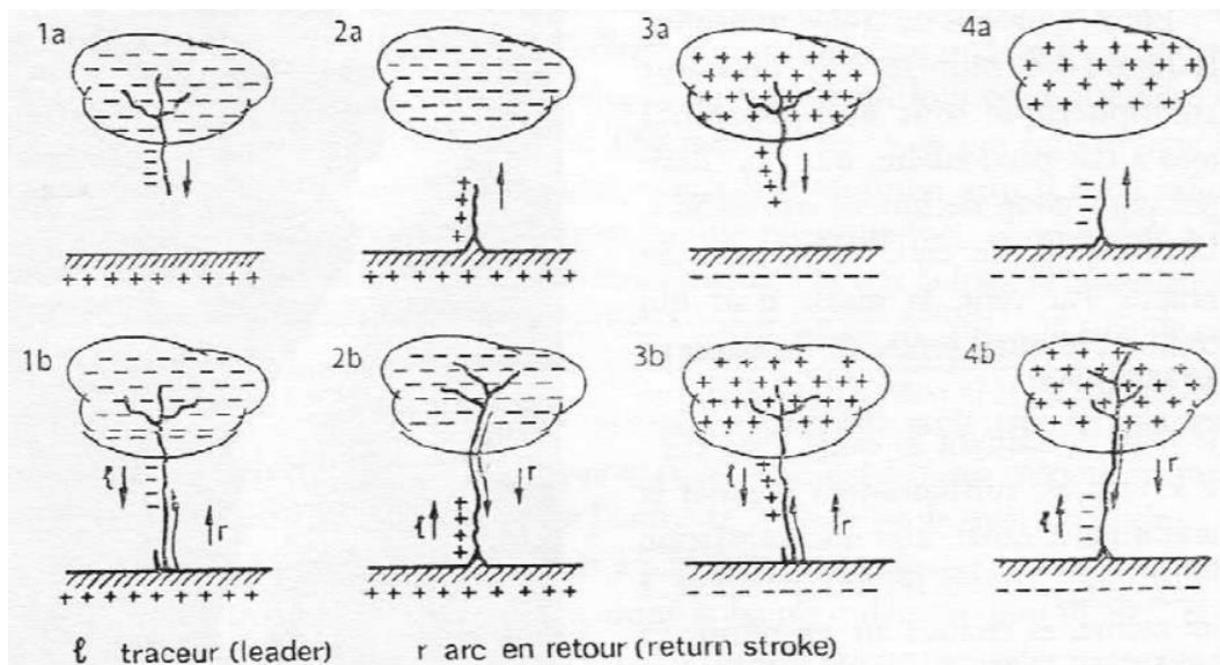


Figure 7: les différents types de traceurs selon le professeur K. Berger. 1a) Traceur négatif descendant normal ; 2a) traceur positif ascendant issu d'une structure de grande hauteur ; 3a) Traceur positif descendant ; 4a) Traceur négatif ascendant issu d'une structure de grande hauteur (rare). 1b à 4b : arcs en retour correspondant à 1a-4a.

1. Le coup de foudre descendant négatif

Sous nos latitudes, il représente 90 % des coups au sol (cf. schéma ci-dessous). Le traceur négatif prend naissance dans le nuage et progresse par bonds successifs de quelques dizaines de mètres (*stepped-leader*), avec des temps d'arrêt de 0,1 à 2 ms, à une vitesse relativement faible (100 km/s). Lorsque la tête du traceur s'approche du sol, le champ électrique y croît fortement, jusqu'à 500 kV/m, et initie des décharges partielles ascendantes positives à partir d'objets pointus ou d'irrégularités de surface du sol. Ces traceurs ascendants positifs se développent jusqu'à ce que l'un d'entre eux intercepte le traceur négatif descendant en un point se situant à quelques dizaines de mètres du sol. C'est l'attachement (2). Le canal conducteur est entièrement formé, le court-circuit s'établit entre le nuage et le sol. Le courant formé par les charges superficielles du sol, induites par les charges du nuage, peut passer du sol vers le nuage (4).

Dans la majorité des cas, le nuage n'est pas complètement déchargé après une seule décharge principale. On assiste à un **coup de foudre multiple** au lieu d'un coup simple. En moyenne 4 phases similaires se produisent dans le même canal. Les décharges subséquentes sont précédées d'un traceur continu ou trait pilote (*dart leader*). A noter que les arcs en retour successifs n'empruntent pas forcément le même chemin. Ainsi 50 % des coups négatifs engendrent plus d'un impact au sol, deux impacts pouvant être séparés de plusieurs kilomètres, avec un maximum observé à 10 km (2).

L'aspect aléatoire du point d'impact au sol est très important. Le traceur par bonds ne perçoit de cibles que dans un rayon de 30 à 40 m. Il progresse en se frayant un chemin essentiellement aléatoire. A l'approche du sol il ne sera donc attiré qu'au dernier moment, les sommets ne sont pas toujours atteints (2). Par ailleurs les coups multiples sont très dangereux car peuvent toucher plusieurs personnes (16). Le parcours tortueux peut être **long** et se déployer horizontalement sur 10 à 20 km.

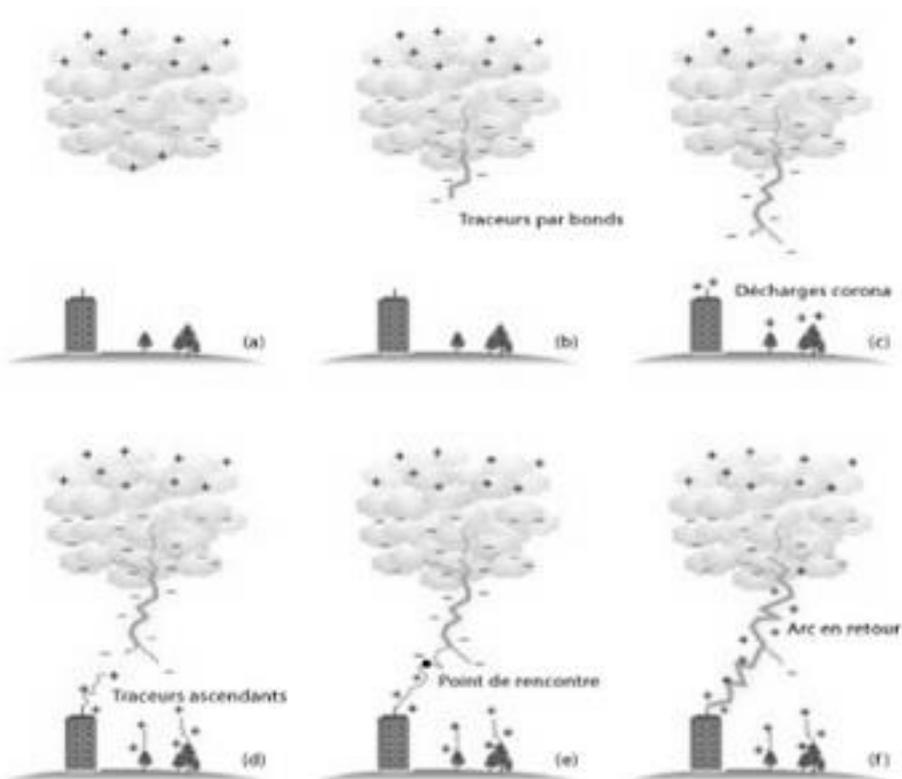


Figure 8 : les phases caractéristiques de l'évolution d'un coup de foudre négatif, source www.foudre-ineo.com.

2. Le coup de foudre descendant positif

Ce type de foudre est plus rare, (10 %), mais associé à des éclairs souvent plus intenses. La proportion d'éclairs positifs semble augmenter à la fin du cycle de vie des cellules orageuses, en altitude, et l'hiver (8).

3. Les coups de foudre ascendants

Lorsque le point d'impact concerne un bâtiment d'au moins 100 m de hauteur ou une haute montagne, l'effet de pointe peut être assez important pour initier un traceur, en général positif, qui se développera suffisamment loin pour atteindre le nuage. Ces coups sont fréquemment observés en haut de la tour Eiffel ou de gratte-ciels. Le traceur positif ne progresse pas par bond mais de façon continue, et il se ramifie plusieurs fois. On assiste à la formation d'arborescences, avec des ramifications orientées vers le haut, appelées *spider* (4) (17). Le courant de retour – improprement nommé dans ce cas-là – est également dirigé du sol vers le nuage (17).

C) Courants engendrés

Les courants des éclairs ne sont ni des courants continus ni des courants alternatifs, mais des courants de nature impulsionnelle (17).

- **Les courants des coups négatifs** sont de forte amplitude mais courts. Le premier coup se caractérise par des temps de montée jusqu'à la crête situés entre 2 et 20 microsecondes, et par des temps de décroissance de 100 à 200 microseconde. Les amplitudes s'étendent sur une très grande plage d'intensités, depuis 3 000 ampères pour les plus faibles jusqu'à 200 000 ampères pour les plus fortes. Les coups subséquents ont quant à eux des temps de montée généralement inférieurs à la microseconde (4). Un coup de foudre multiple dure généralement de 0,2 à 1 seconde.

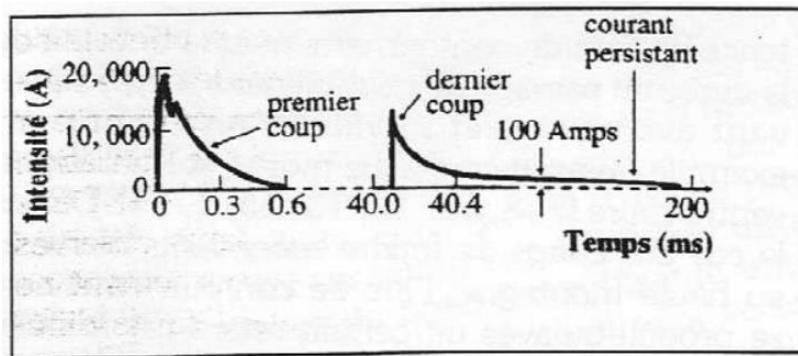


Figure 9 : coup de foudre multiple avec composante persistante longue, d'après M.A. Uman (18).

Entre chaque décharge et après la dernière, un courant persistant (quelques centaines d'ampères) peut continuer à s'écouler par le canal ionisé pendant quelques dizaines à quelques centaines de millisecondes (durée relativement longue). Les coups de foudre suivis de courants persistants constituent des causes majeures de déclenchement de feux de forêts. Ces coups de foudre sont qualifiés de « chauds » contrairement aux coups de foudre plus courts qui sont dits « froids » (16).

Un courant de foudre est donc, dans la majorité des cas, un courant de forme complexe, à composante impulsionnelle suivie d'une composante dite persistante (16).

- **Les coups positifs** se caractérisent par une seule impulsion, mais qui dure beaucoup plus longtemps que les impulsions négatives individuelles. De plus leurs amplitudes sont globalement supérieures à celles des coups négatifs, et dépassent fréquemment 100 000 ampères. Les enregistrements ont confirmés l'existence de « supers-éclairs » ou « super-bolt », dont l'intensité du courant peut atteindre 500 000 ampères. Les orages d'hiver sont donc moins fréquents mais plus dangereux (4).

D) Phénomènes associés

Le rapide délestage d'énergie de l'arc en retour réchauffe le canal jusqu'à une température très élevée (30000 °C) et génère un plasma à haute pression de plusieurs centaines de fois la pression atmosphérique (2). Une violente lumière est émise : on appelle *éclair* l'air chauffé à blanc. L'augmentation de la pression dans le canal est si rapide que la dilatation de l'air entraîne une explosion brutale d'abord sous forme d'onde de choc, qui se transforme en onde acoustique : le *tonnerre*. Selon l'éloignement le bruit du tonnerre sera perçu comme un claquement sec (proche) ou un grondement sourd au loin (16).

Le son se propage à 340 m/s donc l'observateur doit compter la durée (en secondes) entre éclair et tonnerre et la diviser par 3 pour obtenir la distance qui le sépare du canal de foudre. Le tonnerre peut être perçu à plus de 25 km par ciel clair. Par ciel couvert et bas le tonnerre est rarement entendu au-delà de 10 km, soit avec environ 30 secondes de délai entre l'illumination et le tonnerre (1).

Un éclair émet également un large spectre d'ondes électromagnétiques. Celles émises par l'arc en retour sont assez basses (inférieurs à 1 MHz) d'où le brouillage des émissions radio sur les stations « grandes ondes » par temps orageux (8). Ces ondes électromagnétiques peuvent également abîmer les appareils électriques par effet d'induction.

CHAPITRE 4 : Conséquences de la foudre

La foudre frappe en permanence la planète. 50 000 orages se forment chaque jour. A chaque instant, 1000 à 2000 orages produisent une centaine de décharges par seconde (4). En France on compte un demi-million de coups de foudre par an (15). Cependant quiconque se trouve sous un orage peut avoir l'impression d'assister à un phénomène peu ordinaire.

A) Utilité

Nous sommes en présence d'un phénomène atmosphérique à la fois violent et capital pour le système terre-atmosphère.

- Les orages apportent souvent l'essentiel des précipitations dans les régions tropicales, parfois même les seules précipitations des régions très sèches (déserts subtropicaux notamment).
- Ils permettent un réajustement rapide des déséquilibres thermiques qui apparaissent dans l'atmosphère, en amenant de la chaleur et de l'humidité depuis les basses couches vers le sommet de la troposphère, et de l'air froid et plus sec depuis la haute altitude jusque vers les sols.
- Enfin, ils permettent une redistribution des charges électriques entre la terre et l'atmosphère, équilibre indispensable à notre survie.

En effet, l'orage est la seule machine électrostatique capable de recharger la couche ionosphérique qui nous protège des rayons solaires et cosmiques mortifères. Les électriciens appellent ionosphère (ou électrosphère) une partie de l'atmosphère, à une altitude supérieure à 50 km, constamment ionisée par ces rayonnements.

Dans le *circuit global électrique* (cf. schéma ci-dessous), la Terre et l'ionosphère jouent le rôle de deux immenses armatures d'un condensateur, mais soumis à un courant de fuite. L'air n'est pas un isolant parfait car très légèrement ionisé par la radioactivité des sols. Ces ions sont entraînés par le champ électrique de 100 V/m, présent en permanence par beau temps, dans un sens tel que les ions négatifs migrent vers le haut, et les ions positifs vers le bas. Cette fuite

aurait pour conséquence de décharger le condensateur en moins de 500 secondes en l'absence d'orage (4). La conséquence globale des orages est de charger négativement la Terre

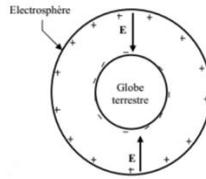


Figure 10: le circuit global électrique.

Les orages ont donc une utilité évidente et jouent même un rôle clé dans le maintien de la vie sur terre.

B) Dégâts causés

Annuellement, en France, la foudre entraîne la destruction de 50 000 compteurs électriques et 250 clochers, la mort de 20 000 têtes de bétail, 17 000 incendies de biens immobiliers et au moins 10 % des feux de forêt (19). Des installations portuaires, des raffineries de pétrole, des réservoirs de matières combustibles sont également foudroyés (4). Les chiffres officiels, probablement sous-estimés, rapportent une dizaine de décès pour une centaine de foudroyés chaque année en France. *Le risque de foudroiement* est donc un enjeu financier pour les industriels et les compagnies d'assurance autant qu'un enjeu de santé publique. Beaucoup de professionnels sont impliqués dans les intérêts d'un calcul du risque de foudroiement.

C) Sévérité orageuse et probabilité d'atteinte

Le risque de foudroiement peut être apprécié par le **niveau kéraunique** d'une région donnée. Il correspond au « nombre de jours par an où le tonnerre a été entendu » (4) (20). Le niveau kéraunique est l'outil le plus simple et le plus répandu pour déterminer la sévérité orageuse d'une région. En France le niveau kéraunique est en moyenne de l'ordre de 20. Il est supérieur à 30 dans les régions montagneuses des Alpes, du Massif Central, des Pyrénées, inférieur à 15 sur les côtes de la Bretagne et de la Normandie. Dans d'autres régions du globe,

ce niveau peut être considérablement plus élevé : de l'ordre de 100 en Floride, il dépasse même 180 dans certaines régions d'Afrique du Sud ou en Indonésie (4).

Cette mesure très simple continue à être utilisée comme outil statistique, mais elle ne suffit plus pour les besoins d'aujourd'hui. Des moyens modernes permettent de détecter chaque coup de foudre, ainsi que l'intensité de l'arc en retour. L'activité orageuse peut donc être plus précisément renseignée par la **densité kéraunique** (nombre de coups au sol par kilomètres carré et par an). En France elle se situe entre 1 et 4 :

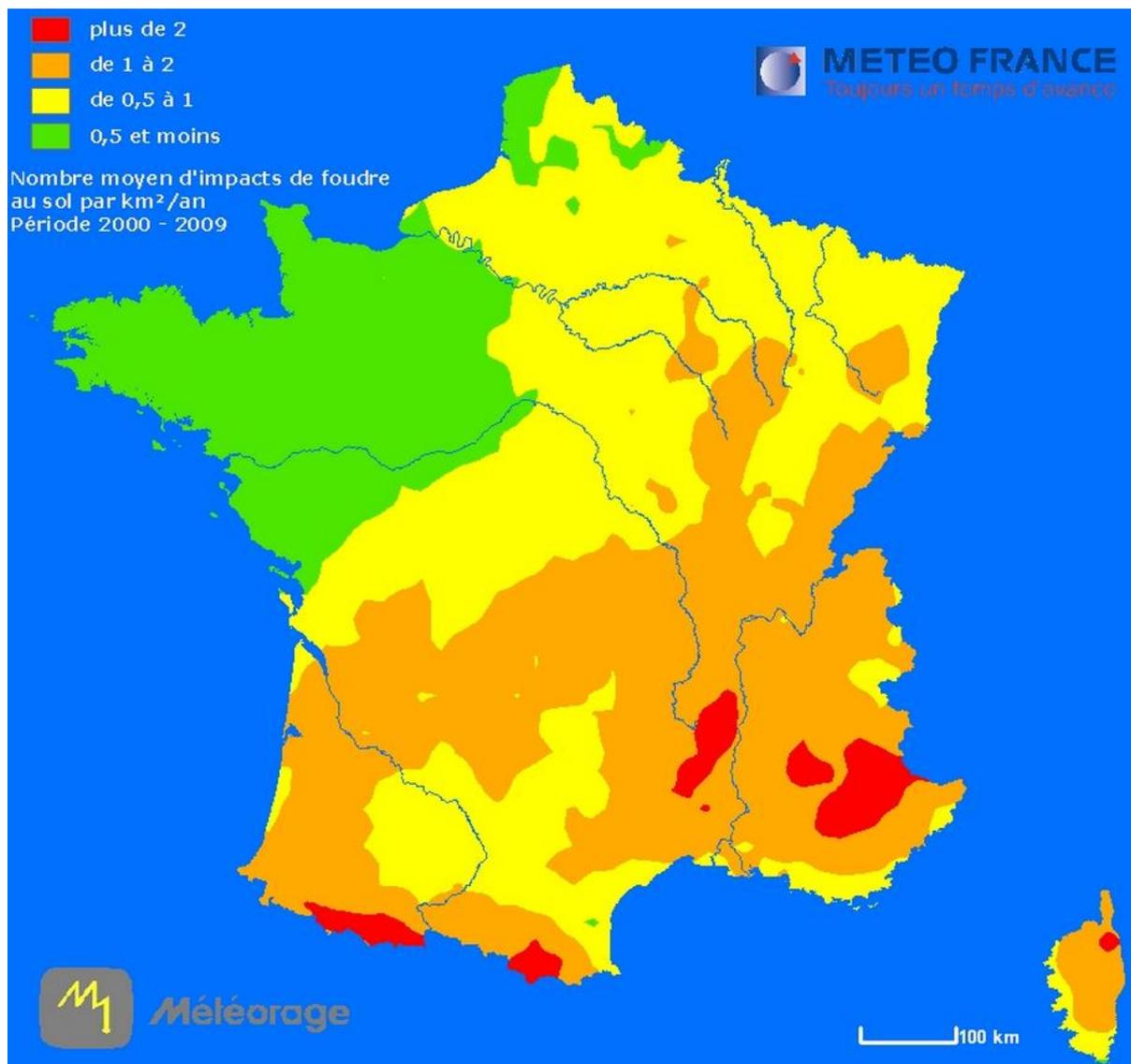


Figure 11 : carte de densité de foudroiement établie par la société Météorage de 1996 à 2005. Toutes les régions françaises connaissent des épisodes orageux et sont susceptibles d'être concernées par les effets de la foudre.

On constate que les densités de foudroiement sont beaucoup plus importantes sur la terre que sur les océans, et que les pays à climat tropical ou subtropical sont particulièrement exposés aux impacts de foudre, de même que les zones de forte altitude et les zones marécageuses (4) (20). Cependant, même la densité de coups par km² et par an n'est pas toujours une mesure suffisamment fine de la sévérité locale. Il est difficile de savoir si des « nids à orages » existent réellement. Selon R.H. Golde (Grande-Bretagne) ils n'ont aucune réalité objective, mais ses conclusions s'appuient sur l'étude d'un seul lieu. Selon C. Gary, deux facteurs, topologiques et géologiques pourraient expliquer leur existence. Un mouvement d'air canalisé par des vallées ou des fleuves favorise l'existence de couloirs orageux, ce qui peut expliquer que quelquefois les versants des montagnes soient plus foudroyés que les sommets (4). La diversité des sols est également un facteur déclenchant la convection. Par exemple une zone boisée réagit moins vite qu'une plaine dégagée aux changements de température. Il se crée un contraste thermique induisant des déplacements d'air et l'apparition de cellules convectives au niveau des surfaces les plus sensibles à la chaleur (21). En dehors de l'effet du relief, la conductivité des sols pourrait être un facteur important. Cette observation repose sur des observations du foudroiement des lignes électriques, ainsi que sur des résultats de recherche en laboratoire. Ces résultats attribuent failles humides, aux nappes d'eau et à des terrains marécageux une certaine attirance pour la foudre. Mais leur zone d'action ne saurait toutefois excéder quelques dizaines de mètres comme nous l'avons vu au chapitre 3 (4).

La foudre est plus fréquente durant les mois d'été. Environ deux tiers des éclairs se produisent en juin, juillet et août. Le long des côtes et des pentes de montagne, les courants ascendants (brise de terre et brise de mer) se produisent presque quotidiennement durant les mois d'été (17). Ailleurs dans le monde, dans les régions tropicales et subtropicales, l'activité de la foudre est à son paroxysme lors de la mousson (17). La foudre est également plus fréquente dans l'après-midi. Près de la moitié des coups se produisent entre 15h et 18h. En effet les courants ascendants nécessaires à la formation d'orage sont plus forts pendant les heures de la journée où le sol est réchauffé par le soleil (17).

D) Détection en France

En France, depuis 1987, un système de détection des impacts commercialisé par la société Vaisalia est géré par la société Météorage, filiale « orage » de Météo-France et basée à Pau (Pyrénées-Atlantiques). Le rayonnement électromagnétique « très basse fréquence » d'un arc en retour se propage sur une grande distance et est capté par chacun des 19 capteurs répartis sur le territoire. Chaque capteur mesure, en particulier, la direction angulaire du rayonnement, la date d'arrivée du signal, la polarité de l'éclair et l'intensité de crête. Les paramètres mesurés pour chaque impact et par chaque capteur sont transmis en temps réel à des calculateurs de Météo-France (Toulouse) et Météorage (Pau). A l'heure actuelle, la précision de la localisation est inférieure à 250 m. Le traitement rapide des données permet de mettre à disposition des prévisionnistes des cartes de localisation quasiment en temps réel (8) (22). Un semblable système de détection est installé dans plus de quarante pays sur tous les continents sauf l'antarctique.

DEUXIEME PARTIE



LE FOUDDROIEMENT

CHAPITRE 5 : Illustration par sept cas cliniques en Aquitaine

A) Cas clinique 1

Le Dr C. est chirurgien en Aquitaine. Il nous a rapporté son accident de foudroiement survenu près de Bordeaux en juin 1985, à l'âge de 31 ans.

Il joue au golf et le temps est clair. Lorsqu'il voit se dessiner au loin un front orageux, M. C. et quatre autres personnes ont le temps de s'abriter de la pluie dans un abri léger en brande. La façade est entièrement ouverte sur l'extérieur, il n'y a rien d'autre à l'intérieur, seulement un robinet d'eau. M.C. se tient près de l'ouverture.

L'orage se rapproche rapidement, le tonnerre devient incessant et extrêmement fort, « ça grésille » en permanence, « comme un champ magnétique ». M. C. se rend compte tout d'un coup qu'il a été projeté à deux mètres cinquante, avec comme seule sensation un sentiment de griller. Il sent l'odeur du brûlé, il voit les clous de ses chaussures et son bras droit fumer, avec deux trous dans l'anorak au poignet et au coude. Il comprend immédiatement que la foudre est en cause.

Autour de lui, ses deux voisins qui se tenaient comme lui près de l'ouverture ont également été projetés. L'un est en arrêt cardio-respiratoire, l'autre essaye de ramper. Les deux personnes restées au fond de la cabane n'ont pas été atteintes. Il reste assommé quelques minutes, puis parvient à se lever. Il présente une hémiparésie des deux membres inférieurs et du bras droit. Il parvient à rejoindre le club house situé à 500 mètres pour chercher les secours. Les parésies disparaîtront complètement au bout de 2 heures.

Au terme de cet épisode il ne juge pas nécessaire de réaliser un bilan médical initial. Il constate simplement un état d'euphorie qui dure une semaine, « comme un syndrome frontal ». Il ne conservera par la suite aucune séquelle somatique ou psychologique.

B) Cas clinique 2

J'ai rencontré monsieur l'abbé I. Il se souvient très bien de sa rencontre avec la foudre en 1987, à l'âge de 56 ans, qu'il a parfaitement consigné par écrit :

Récit de mon accident en montagne, le jeudi 23 Juillet 1987.

Le mercredi soir, constatant que mon travail de fin de semaine est bien engagé, je fais le projet, si le temps le permet le jeudi matin, de faire l'Ascension de la Rhune que je n'ai pas effectué depuis plusieurs mois. Le jeudi matin, à 6h15, je scrute le ciel. Il est couvert mais sans plus: finalement le temps idéal pour faire un rapide aller-retour sur la Rhune. Toilette, petit déjeuner et je prépare mon sac de montagne. Je n'oublie pas non plus, pour prévenir une éventuelle hypoglycémie, de prendre un petit "en cas". Je quitte le presbytère à 7h15. Je me rends à Ascain, auprès de la Carrière et j'amorce l'ascension de la Rhune à 7h45. Je me trouve au sommet pour 9h15. Je ne m'y attarde pas car le temps commence à noircir, mais ce n'est pas bien méchant. Je redescends sans plus tarder avec des personnes qui prennent la même direction, M. Harismendy du quartier Beherreta à Guéthary et M. et Mme Iriarte qui habitent 3 Rue Anatol à St Jean de Luz. Nous cheminons ensemble jusqu'au plateau des 3 Fontaines. Là nos itinéraires divergent pour aller rejoindre nos deux voitures. Avant de nous séparer nous faisons la remarque que nous allons sans doute essuyer une bonne averse de pluie. Et même un orage se fait entendre. Il a l'air de longer la côte depuis Hendaye, Urrugne, Saint-Jean de Luz, Guéthary, Bidart, Biarritz. A partir de ce moment (il est environ 9h45) et jusque après 12 heures, moment où je retrouve mes esprits au pied de la voiture, mes souvenirs s'estompent totalement. Je sais seulement que je me suis arrêté pour mettre mon K. Way car la pluie tombe fort. Je m'étais également dit que je pouvais rejoindre normalement ma voiture pour 10h30 environ. Il y a donc un "trou" de 1h30 au moins. Or, M. et Mme Iriarte m'ont dit qu'un orage violent a éclaté dans le secteur où nous nous trouvions à 10h environ. Me retrouvant au pied de la voiture, passablement assommé, je pense d'abord avoir fait une hypoglycémie, ce qui cependant m'étonne beaucoup car j'avais pris les précautions élémentaires que, maintenant, je connais bien. Je suis tout rempli de boue et j'en conclus que j'ai dû rester un bon moment allongé par terre sous la pluie. Je ne pense plus qu'à une chose: rentrer à Bidart pour prendre une bonne douche. Je ne ressens encore rien de mes brûlures, ce qui fait que je ne sais pas encore ce qui m'est arrivé exactement. Il est plus de 12h30 quand j'arrive à Bidart. Un message sur le répondeur du téléphone me rappelle que je suis attendu chez les Religieuses pour le repas de midi. J'avertis les religieuses que je dois, au préalable, me nettoyer un peu car je suis très sale. Je découvre mes brûlures autour du cou, au moment où l'eau chaude coule sur moi. De plus j'ai une large bande brûlée tout le long de la jambe gauche, mais je n'en souffre pas. C'est en revoyant ma chemise que je comprends: la foudre m'a touché. Le col de la chemise est noirci et les maillons de la chaîne en or que je portais autour du cou avec une médaille du scapulaire, ont éclaté dans tous les sens et se sont incrustés dans le col de la chemise que je garde précieusement comme la preuve la plus frappante de la décharge électrique que j'ai reçue. Le Docteur Marlat que j'ai appelé auprès de moi constate mes brûlures qui sont malgré tout assez superficielles. Mon cœur n'a pas l'air d'avoir souffert et ma tension est normale. Un peu de repos et tout devrait rentrer dans l'ordre. Le médecin me quitte aux environs de 14 heures. Un grand moment plus tard, je ressens une vive douleur dans mes dents et sur la mâchoire inférieure droite. Le dentiste, le Docteur de Poutier, ne peut pas me faire un examen approfondi et il demande un rendez-vous à un stomatologue de Bayonne, le Docteur Gironnet. Je dois m'y rendre le lendemain, vendredi à 17h30. Un paroissien est obligé de m'y accompagner car je suis incapable de marcher si je ne m'arrête pas assez près du cabinet du médecin. Surprise! Le Docteur Gironnet m'apprend que ma mâchoire est cassée ainsi qu'une dent dans le prolongement de cette fracture. Opération le lendemain samedi, à la clinique Lafourcade de Bayonne. Le cardiologue me fait un électro-cardiogramme et tout se passe bien. Je vais rester ainsi 4 semaines avec la mâchoire bloquée. Le plus grand désagrément, outre la souffrance qui est assez vive, c'est de ne prendre que des nourritures liquides. Finalement les désagréments d'un accident qui aurait pu être beaucoup plus grave, sont peu importants. Seules les forces dans les jambes reviennent très lentement: je ne vais pas pouvoir de quelque temps encore faire l'ascension de la Rhune, alors que ce n'est pas l'envie qui m'en manquerait.

Je crois qu'une conclusion se dégage de ce récit assez incroyable: je peux dire bien fort "Mon Dieu, merci!"

La Rhune culmine à 905 m, et se situe à 10 km de l'océan. A cette distance l'orage se fait entendre simplement par un grondement sourd. Les témoins qui l'accompagnaient ont pu lui rapporter par la suite avoir entendu une seule fois la foudre s'abattre près d'eux, environ 15 min après leur séparation.

M.I. décrit parfaitement une amnésie antérograde de 1h30, suivie d'une sensation d'avoir été assommé. Il remarque très justement que sa chaîne et son médaillon ont fondu et éclaté alors que lui ne souffre que de brûlures superficielles dont il ne s'était pas aperçu initialement. Il a probablement été projeté, ce qui expliquerait la fracture de la mâchoire. M. I aura eu recours à son médecin traitant, et à un cardiologue avant l'intervention chirurgicale de stomatologie.

Lorsqu'on l'interroge aujourd'hui, il nous dit que les suites de l'accident ont été relativement simples. Les marques au niveau de la jambe gauche (« large bande brûlée »), indolores, ont disparues spontanément quelques jours après. La description des dessins formés est assez floue, il est possible qu'il s'agisse d'une figure de Lichtenberg, marque caractéristique dont nous parlerons dans le chapitre 8. Ses brûlures ont guéri en quinze jours. Il conserve toujours, 27 ans après, des paresthésies au niveau de la plante des deux pieds à l'appui, pour lesquelles un médecin spécialiste n'a pu lui fournir d'explications. Mais il réalise surtout qu'il n'a jamais véritablement parlé de cet événement, qui reste intrigant à ses yeux, et qu'il a gardé au fond de lui beaucoup de questions sans réponses, comme le fonctionnement d'un orage ou les conséquences d'un foudroiement. Ceci malgré le découpage d'articles scientifiques dans les journaux, articles qu'il conserve soigneusement, tout comme le récit narratif de cette journée.

Pour lui, il n'y a pas eu de conséquences psychologiques, car il ne se souvient pas de l'accident. Il n'a pas de comportement phobique vis-à-vis de l'orage, il trouve le phénomène de la foudre toujours magnifique et attirant, mais ne va plus se promener seul en montagne. M. I. a par ailleurs connu un épisode dépressif réactionnel important, ayant nécessité une hospitalisation et le maintien d'un traitement thymorégulateur à vie. Il n'attribue pas cet épisode au foudroiement, mais on peut se poser la question d'une éventuelle atteinte neurologique sous-corticale qui aurait favorisé ce trouble de l'humeur.

C) Cas clinique 3

Nous rapportons ici le dossier clinique de l'enfant Loïc, 15ans, foudroyé à la piscine de Saint-Jean-de-Luz le 20 août 2005. Lui et son frère sont surpris par un orage : son frère décide de rentrer à l'intérieur du bâtiment, lorsque lui va s'abriter de la pluie sous le grand chêne de la piscine. A l'arrivée du SAMU de Bayonne, il est en arrêt cardio-respiratoire depuis environ 15 minutes, en mydriase réactive. Il n'est pas précisé s'il y a eu une réanimation cardio-pulmonaire par les témoins entre-temps mais cela est probable. Immédiatement défibrillé, il passe en asystolie. Plusieurs épisodes récidivants de fibrillation justifient 4 nouveaux chocs électriques avant de retrouver un rythme sinusal. A l'arrivée aux urgences il est en coma profond (Glasgow côté à 4, existence de mouvements de décérébration), en myosis bilatéral. Il est intubé, ventilé sous sédation. L'hémodynamique est conservé sans l'aide de substances vasoactives. L'ECG retrouve des signes évoquant une nécrose dans le territoire inférieur. La biologie retrouve une troponine à 55 microg/l, une rhabdomyolyse avec une myoglobulinémie à plus de 5 000 microg/l et des CPK supérieures à 4 000 U/l. Enfin un TDM cérébral ne montre rien d'autre qu'un œdème modéré.

Les signes de nécrose inférieure persistent à l'ECG tandis qu'une échographie cardiaque est peu contributive. La rhabdomyolyse est à l'origine d'une insuffisance rénale qui reste modérée. Loïc est gardé intubé, sédaté, ventilé pendant 36h. Au bout de 3 jours le coma s'est allégé et Loïc est transféré près de sa famille au CHU de Rennes. Nous rapportons ce cas, très représentatif des circonstances de foudroiement et de la prise en charge initiale, mais nous n'avons malheureusement jamais pu retrouver la trace de ce dossier à Rennes et connaître le devenir de Loïc.

Les 4 prochains cas cliniques sont les victimes d'un seul et même éclair, survenu sur un chantier de BTP à Saint-Jean-de-Luz, le 27 janvier 2014. Le ciel était pourtant dégagé ce jour-là, et le chef de chantier n'avait pas reçu d'alerte vigilance de la part de Météo France (VIGIMET flash). Une première grue a été frappée par le seul et unique coup de foudre de la matinée, puis la foudre s'est propagée à une autre grue par le biais d'un immense éclair latéral.

D) Cas clinique 4

J'ai pu rencontrer monsieur C. Il a 36 ans, sans antécédents médicaux. Au moment de l'accident, il maintient à la main une dalle en béton armé suspendu au bout de la grue numéro 1. Il n'a pas présenté d'amnésie de l'épisode et se rappelle avoir vu un flash blanc extrêmement violent, sans aucune compréhension de la situation, désorienté. Il n'a pas de perte de connaissance initiale, et constate qu'il ne peut pas se lever et qu'il rampe. Il est moins paniqué lorsqu'un collègue vient immédiatement lui expliquer que c'est la foudre qui est en cause. Il sent sa main gauche qui le brûle avec une coloration localisée au niveau de la paume de la main, la couleur passe du rouge vif au violet. Il ressent une douleur au bras gauche et au pied gauche. Il a senti le passage de la foudre sur tout le flanc gauche, et ressent pendant une heure des paresthésies à type de fourmillements et d'engourdissement sur l'ensemble de l'hémithorax avec une limite très nette au niveau du sternum. Les vêtements et les chaussures n'ont pas du tout été touchés.

La paralysie des deux membres inférieurs disparaîtra complètement au bout de $\frac{3}{4}$ d'heure, et les paresthésies à ce niveau persisteront quelques heures. Il est transféré aux urgences de la polyclinique de Saint-Jean-de-Luz. Les constantes sont correctes, tension artérielle à 14/8 et pouls à 82. Un électrocardiogramme retrouve un rythme sinusal, sans trouble de la conduction, du rythme ou de la repolarisation. Il n'y aura pas d'autres examens complémentaires, et retourne à domicile après une consultation simple. Son état nécessitera un arrêt de travail de 3 semaines en raison de l'impotence douloureuse du bras et de l'épaule gauche. Il ressent des courbatures au moindre mouvement et ne peut pas conduire plus de 15 minutes en voiture. Cette gêne diminuera progressivement sur plusieurs mois. Le dossier d'accident du travail est clôturé en avril 2014.

A 9 mois, les douleurs de la main et du bras gauche ont complètement disparues, mais M.C. conserve une douleur significative de l'épaule gauche à la mobilisation. Une IRM réalisée en octobre 2014 retrouve des signes lésionnels avec une arthropathie acromioclaviculaire et œdème sous chondral. Sa phobie initiale vis-à-vis des orages a quasiment disparu, pour laisser place à une grande prudence.

E) Cas clinique 5

M. G. a 26 ans, et n'a pas d'antécédents médicaux. Il se trouve dans la cabine de la grue numéro 1 lorsque celle-ci est touchée par la foudre. A 20 mètres au-dessus du sol, il a une bonne visibilité et n'estime pas la météo menaçante. Il n'y a pas de vent non plus. Soudain, il voit une grosse boule blanche qui surgit d'en haut instantanément, éblouissante. Protégé par la structure faisant office de *cage de Faraday*, il n'a pas été touché par la foudre. Il a par contre été tétanisé par la brutalité du choc, entraînant une entorse cervicale. Il n'a pas ressenti de brûlure, de douleur, ou de paresthésies. Il a été pris en charge aux urgences de la polyclinique de Saint-Jean-de-Luz : l'examen clinique est normal en dehors de l'entorse cervicale ; un ECG retrouve un rythme sinusal. Il s'est seulement senti le lendemain un peu « bizarre », mais il ne décrit aucun symptôme six mois après l'accident, et n'a pas développé une phobie de l'orage.

F) Cas clinique 6

M. S. a 54 ans. Il a un antécédent d'hypercholestérolémie. Lors de l'accident il se trouve à proximité de la grue numéro 2. Le courant de foudre a entraîné une chute de 3 mètres. Il est retrouvé couché en chien de fusil, très algiques, avec des brûlures étendues à la partie sagittale droite du corps. Il a présenté un trauma crânien sans perte de connaissance. A l'arrivée du SAMU de Bayonne, il ne présente pas de troubles de la conscience (score de Glasgow à 15). Un scanner cérébral et thoraco-abdomino-pelvien ne retrouve pas d'anomalies. Son état nécessite l'administration d'antalgiques de pallier 3.

Il est adressé le jour même au service des grands brûlés du CHU de Bordeaux. L'évaluation ne retrouve pas de brûlures graves. Des brûlures du 2e degré superficiel touchent 5 % de la surface corporelle (bras droit, face latérale thorax à droite, cuisse droite, face postérieure jambe droite), et des brûlures du 1er degré touchent le visage et le dos ; on ne retrouve pas de point d'entrée ou de sortie de la foudre. La biologie montre une augmentation de la troponine à 3,02 microg/l et des CPK à 1400 U/l. Il n'y a pas de signes cardiologiques associés, pas de signes à l'électrocardiogramme et une échographie ne retrouve pas de troubles de la cinétique segmentaire. Le patient sort à 48h d'hospitalisation après une décroissance de la troponine.

G) Cas clinique 7

M. M. a 24 ans, et n'a pas d'antécédents médicaux. Il se trouve au pied de la grue numéro 2, et tient à la main une pièce métallique attenante à la grue. A la prise en charge initiale, il ne présente pas de signes de détresse cardio-respiratoire. On retrouve des brûlures avec un point d'entrée main droite, un point de sortie sur les deux pieds, et un trajet de brûlure sur le flanc évalué au 2e degré superficiel, 3e degré au niveau des pieds. Il ne présente pas d'autres points d'appels cliniques, n'a pas subi de traumatisme. Un ECG retrouve un rythme sinusal, sans anomalies. Il a été hospitalisé en cardiologie pour surveillance. Une échographie cardiaque ne retrouve pas d'anomalies et les enzymes cardiaques ne sont pas augmentées. Il rentrera chez lui à l'issue d'une surveillance de 5 jours sans complications.

L'ensemble de ces 7 cas de foudroiement illustre la diversité possible des circonstances de l'accident, des modes de foudroiement (par contact d'un objet, par le sol, par un éclair de côté ou par atteinte directe du canal de foudre, cf. plus loin), et du tableau clinique présenté.

CHAPITRE 6 : Une pathologie bien spécifique

A) Définitions

Il aura fallu beaucoup de temps après la découverte de la nature électrique pour que les spécialistes se penchent sur le problème des pathologies liées à la foudre. Les termes qui s'y rapportent sont donc récents et font l'objet d'un consensus parmi les scientifiques (16) (17).

➤ **Électropathologie** (*electromedicine ou electropathology* en terminologie anglo-saxonne) : terme introduit il y a environ un siècle en Autriche et en Allemagne, pour désigner une nouvelle discipline, relative à l'étude d'un type d'accident du travail, nouveau et relativement fréquent – l'accident électrique – contemporain de l'installation des réseaux électriques de la fabrication massive de matériels et appareils électriques.

➤ **Kéraunopathologie** (*keraunomedicine*) (du grec kéraunos = foudre) : terme introduit dans la littérature médicale pour la première fois en 1995 par le spécialiste australien C. J. Andrews et adopté en France cette même année (É. Gourbière). L'étude de la pathologie liée à la foudre, jusqu'alors un sous-chapitre de l'électropathologie, a les caractéristiques d'une discipline médicale à part entière.

➤ **Électrisation ou accident électrique ou électrotraumatisme** (*electrical injury*) : passage en général accidentel, de courant électrique à travers le corps et conséquences de ce passage. Pour qu'il y ait électrisation il faut que le courant circule entre deux points du corps (points de contact) suffisamment éloignés l'un de l'autre.

➤ **Électrocution** (*electrical death*) : électrisation dont l'issue est mortelle, par effet direct du courant traversant le corps.

➤ **Foudroiement** (*lightning injury*) : en médecine on appelle foudroiement tout accident, mortel ou non mortel, causé par la foudre et au cours duquel la victime est électrisée par le courant de foudre. Il faut éviter d'employer le terme « foudroiement » pour d'autres électrisations que celles dues à la foudre. Une erreur fréquente consiste à utiliser le terme foudroiement pour « accident électrique mortel ». Un accident indirectement lié à la foudre n'est pas un foudroiement.

Le terme **fulguration** a été employé par le passé pour désigner le foudroiement. Mais il est déjà utilisé en cardiologie (application d'un choc électrique endocavitaire pour le traitement de certaines arythmies), on conseille donc de n'utiliser que le terme foudroiement pour désigner un accident lié aux effets directs de la foudre.

L'emploi des termes corrects facilite l'interprétation des dossiers et comptes-rendus, d'autant que les foudroiements risquent d'avoir des conséquences médico-légales (mort violente sans témoin, séquelles tardives chez les survivants).

B) Éléments d'électropathologie

1. Généralités

Le corps constitue une résistance accidentellement incluse dans un circuit électrique. On peut considérer que la tension appliquée à un corps l'oblige à conduire le courant électrique, comme la pression de l'eau appliquée à une extrémité d'un tuyau provoque l'écoulement de l'eau. D'après la loi d'Ohm, si U est la différence de potentiel en volt, entre les 2 points de contact, et R la résistance électrique, en ohm, du corps (la résistance varie selon la tension de contact), l'intensité du courant traversant le corps sera I exprimé en ampère (16).

$$U \text{ (volt, V)} = R \text{ (ohm, } \Omega) \times I \text{ (ampère, A)}$$

La foudre est exigeante dans le choix de son trajet lors d'un foudroiement. Elle préfère les chemins de moindre résistance, qui seront préférentiellement les axes vasculo-nerveux. W.B. Kouwenhoven a déterminé six facteurs qui influent sur le type et la gravité des lésions dues aux accidents électriques : fréquence, durée d'exposition, tension, intensité, résistance des tissus, et voie du courant. Cependant, pour M.A Cooper, C.J. Andrews et R.L. Holle plusieurs incohérences apparaissent lorsque ces facteurs sont appliqués trop littéralement.

L'intensité du champ électrique (calculé par la différence de potentiel entre deux points - les volts - par rapport à la distance entre ces deux points), non répertorié comme l'un des facteurs, est un concept beaucoup plus utile et précis pour expliquer et prévoir ces atteintes. Par exemple un potentiel de 20 000 volts appliqué à la tête d'un individu mesurant 1,80 m provoque un courant à la terre. Cela produit un champ électrique interne d'environ 10 000 V/m. Quand un enfant mâchouille un cordon électrique et se brûle les lèvres, l'intensité du champ est

approximativement le même : une tension même de 110 V appliquée à 1 cm des lèvres génère une intensité de champ de 11.000 V/m. Pourtant personne ne penserait à classer la blessure de l'enfant dans les accidents électriques à haute tension. Ces calculs du champ électrique pourraient être importants dans l'étude des dommages cellulaires par électroporation (voir infra) (17).

2. Effets biologiques du courant électrique

a) Effets excitomoteurs

La durée d'application et l'intensité sont les éléments de risque déterminants. Les effets excitomoteurs concernent toutes les structures cellulaires et tissulaires capables de dépolarisation, donc les cellules cardiaques, musculaires et nerveuses. Au niveau du cœur le risque est une contraction asynchrone des cellules cardiaques (fibrillation) si la stimulation survient pendant la période réfractaire relative (c'est-à-dire quand toutes les cellules ne sont pas polarisées : elle correspond à la première partie de l'onde T et dure 10 à 20 % du cycle cardiaque). Au niveau des muscles striés une contraction soudaine peut entraîner une projection du corps.

b) Effet Joule ou électrothermique

La tension et la résistance sont les facteurs déterminants des brûlures électrothermiques vraies. Plus la résistance qui s'oppose au courant est grande, plus le dégagement de chaleur est important. La moindre élévation de température (moins de 10 °C) provoque la mort cellulaire par atteinte de lipides. La quantité d'énergie dissipée obéit à la loi de Joule :
$$E \text{ (joule)} = R \text{ (ohm)} I^2 \text{ (ampère)} t$$

c) Électroporation

L'électroporation est un processus de perméabilisation des membranes cellulaires soumises à un champ électrique important. Les lésions deviennent irréversibles si le nombre d'électropores est trop important, entraînant la mort cellulaire. De manière distincte, il existe un autre mécanisme de lésion de découverte plus récente, l'électroconformation. La dénaturation des canaux à potassium entraîne un dysfonctionnement cellulaire (23) (24).

Lors du trajet préférentiel vasculo-nerveux, l'atteinte des nerfs est caractérisée par des lésions de la gaine de myéline et le fonctionnement physiologique peut être perturbé par les atteintes des canaux potassiques. L'atteinte des vaisseaux se manifeste par de multiples

altérations telles que des lésions endothéliales, des spasmes artériels, des thromboses multiples vraisemblablement multifactorielles (lésions pariétales, coagulopathie) (25).

3. Arc de contournement

Le plus souvent la tension entre les deux points de contact (tête-pied par exemple) d'un coup de foudre est telle que l'essentiel du courant passe à l'extérieur du corps, par ionisation de l'air autour de lui, ce qui constitue un chemin de moindre résistance (26). Cet arc électrique (arc de contournement) se produit entre la peau et les vêtements. Il peut griller les poils, les cheveux et les vêtements. Il peut vaporiser l'humidité et la sueur et ainsi volatiliser les chaussures et les vêtements, même en l'absence de brûlures internes ou cutanées (exemples de patients « déshabillés » rapportés par Camille Flammarion dans son ouvrage sur les phénomènes de la foudre en 1906) (27). La différence de potentiel diminue donc et n'est plus que de 3 kV environ. Le corps a une résistance moyenne de 200 Ω et selon la loi d'Ohm, le courant traversant le corps n'est en moyenne que de **4 A (1 à 10 A)** (17) (16).

Mais cet arc de contournement ne se produit que si le coup de foudre a une énergie suffisante. La tension nécessaire au contournement du corps est de 300 kilovolts dans des conditions humides (vêtements mouillés ou transpiration). Si l'on évalue la résistance interne du corps à 300 Ω au maximum, il suffit que le courant ait atteint une intensité de 1000 A pour que la condition d'amorçage superficiel soit remplie (4). Lors d'un coup de foudre ascendant, observés sur les pics montagneux ou en haut d'une tour, les énergies sont habituellement modérées et cet arc de contournement peut ne pas se produire ou se produire avec un certain délai (16).

Dans une étude clinique et expérimentale sur des rats, OHASHI et collègues ont démontré le rôle capital de l'arc de contournement. En cas de coup de foudre direct sans arc de contournement ou si cet arc se produit après un délai de plus de 20 microsecondes, les chances de survie sont très minces : environ 15 %. Dans le cas contraire les chances de survie dépassent 50 % (20).

C) Différence entre les électrisations par courant de fréquence industrielle et les électrisations par la foudre

Le courant de foudre n'est ni un courant alternatif ni un courant continu mais est caractérisé au mieux comme un courant impulsionnel massif (17). Les conséquences d'une électrisation par la foudre et par courant de fréquence industrielle diffèrent en de nombreux points, et en tout premier lieu celui de la durée. La **durée** du courant complexe d'un coup de foudre est difficile à définir car chaque impulsion est extrêmement courte, mais on considère que la durée du passage du courant est en moyenne de **10 à 20 ms** dans le cas d'un coup de foudre comportant au moins 2 décharges impulsionnelles suivies d'une composante persistante (20). La brièveté de la durée du passage du courant ainsi que l'éventuelle existence d'un arc de contournement vont avoir un effet salvateur, en évitant par exemple un arrêt cardiaque, ou des brûlures électrothermiques internes (17) (16).

Rarement ce temps est allongé jusqu'à 1 ou 2 secondes en fonction de la composante persistante, notamment dans le cas de coups positifs. Au-delà de 0,5 seconde on qualifie l'éclair de « foudre chaude », elle agit comme un courant électrique à haute tension, cause des incendies de bâtiments ou de forêts, et dans ce cas la mort est immédiate, le patient « coagule » (17).

Une autre différence essentielle se situe dans le **trajet** du courant à travers le corps. Un passage de courant industriel est plus localisé et contribue à une destruction plus importante des tissus traversés (28). Le trajet du courant de foudre est plus diffus et entraîne moins de dommages locaux. Par contre la foudre passe beaucoup plus fréquemment la tête et le cœur étant donné les différents types d'atteintes possibles (voir sous-chapitre D) (17) (20). Le cheminement du courant de foudre a été théorisé. Lors d'un foudroiement direct, il entre par les orifices de la tête (yeux, nez, oreilles et bouche), traverse la zone de l'hypophyse et de l'hypothalamus, continue directement par le tronc cérébral puis par le liquide céphalo-rachidien dans la zone rétropharyngée, puis vers le cœur par la voie des vaisseaux sanguins. Des signes ORL, des signes de dysfonctionnement du système nerveux autonome, arrêt respiratoire central ou atteinte cardiaque, et des perturbations du sommeil peuvent être raisonnablement attendues (17).

Enfin, les **mouvements musculaires** occasionnés sont différents. Lors d'une électrisation industrielle le risque pour la victime est de rester agrippée à la source électrique par contracture réflexe des mains. Alors qu'il ne peut y avoir un tel effet avec la foudre, on

constate plutôt une éjection par une secousse musculaire violente (contracture réflexe en extension de type opisthotonos lors du passage de courant dans les muscles) (17).

D) Les différents modes de foudroiement

La foudre peut atteindre l'homme de différentes manières. Cinq mécanismes principaux sont décrits, pouvant tout à fait coexister (4) (20) (17).

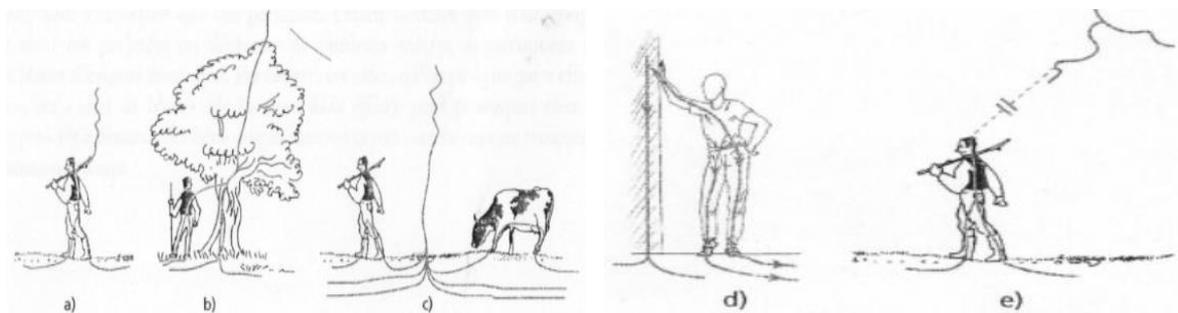


Figure 12: les différents mécanismes de foudroiement d'un être humain. a) Foudroiement direct ; b) foudroiement par éclair latéral ; c) foudroiement par tension de pas ; d) foudroiement par tension de toucher ; e) commotion par courant induit.

a) **Le coup de foudre direct** (environ 3-5 % des blessures (28)) : le sujet est à l'extérieur. La foudre touche la partie la plus proéminente du corps, en général le vertex, et s'écoule par les pieds en contact avec le sol. Même si elle n'est pas toujours fatale, cette configuration est associée à une morbidité élevée car elle implique souvent la tête. La foudre peut pénétrer par les yeux, les oreilles et la bouche pour causer des blessures multiples (28).

b) **Le foudroiement par éclair latéral** (environ 30 % des blessures (28)) : une partie de la foudre qui s'abat sur un arbre par exemple (ou tout autre structure conductrice) « saute » vers un objet voisin ou une personne si celui-ci offre un chemin de moindre résistance que le tronc de l'arbre. Le point de contact se fait souvent à la partie supérieure du corps, au niveau de l'épaule. Les accidents par éclair latéral peuvent se produire aussi bien en plein air qu'à l'intérieur (certains accidents liés à l'usage du téléphone pendant un orage sont dus à un éclair latéral). Certains foudroiements collectifs en plein air sont provoqués par un éclair latéral se propageant d'une personne à une autre, située à proximité (20).

c) **Le foudroiement par tension de pas** (environ 40 à 50 % des blessures (28)) : la foudre tombe sur le sol et se propage dans toutes les directions, en créant un gradient de potentiel d'autant plus important que la résistivité du sol est élevée (comme c'est le cas en montagne). Une personne debout sera soumise à une différence de potentiel d'autant plus élevée que l'écart entre ses pieds (ou entre son pied et sa main dans le cas d'un alpiniste) sera grand, et qu'il sera proche du point d'impact. Ce mécanisme explique qu'un groupe de personnes (sur un terrain de foot par exemple) soient simultanément foudroyés. Il intervient aussi chez les nageurs surpris par la foudre. En général le courant traversant le corps est faible et son trajet d'un membre inférieur à l'autre ne concerne pas les organes vitaux. Dans les cas les plus favorables il produira ce que l'on appelle une kéraunoparalysie (voir plus loin), avec plus ou moins perte de connaissance (16) (20). Chez l'animal quadrupède, ce mécanisme est très dangereux : la distance entre pattes avant et pattes arrière est relativement grande et le cœur est situé sur le trajet du courant. Des troupeaux entiers peuvent être tués par la seule tension de pas.

d) **Le foudroiement par tension de toucher** (environ 1 à 2 % des blessures (28)) : le sujet est en contact avec une structure elle-même foudroyée. Une quantité considérable de courant peut alors s'écouler par le corps de la victime. Ce phénomène peut se produire par exemple lorsque le sujet s'appuie sur un tronc d'arbre, ou lorsqu'une surtension pénètre dans un local par les fils d'alimentation électrique, les fils du téléphone ou la tuyauterie. Si cette surtension a une amplitude suffisante pour percer le cordon d'un isolant électrique, le potentiel de la surtension pourra être porté au pied métallique d'une lampe par exemple (4).

e) **La commotion ou l'électrocution par un traceur** (environ 20-25 % des blessures (28)) : le terme de commotion est employé ici pour désigner un choc électrique non mortel. Un traceur ascendant, même si il ne rencontre pas un traceur descendant pour créer un canal de foudre et un arc électrique, peut provoquer des commotions par couplage capacitif, c'est-à-dire par un courant induit à distance (4). On pourrait penser qu'un traceur a une très faible énergie par rapport au courant principal, pourtant il peut transmettre à la victime un courant de plusieurs centaines d'ampères (17). Parallèlement ce couplage génère des forces électrostatiques que subit la surface du corps, et par conséquent, pour une personne normalement vêtue, le côté extérieur des vêtements. Le champ électrique produit est suffisamment important pour déchirer les vêtements et les éjecter loin du corps (4) (29).

f)

Ce phénomène de couplage capacitif explique qu'un éclair peut se former sous un toit métallique, un abri en tôles par exemple, alors que la foudre tombe à proximité, sans aucun contact direct. Le toit fait ici office de condensateur, à la condition que les parties métalliques soient isolées du sol.

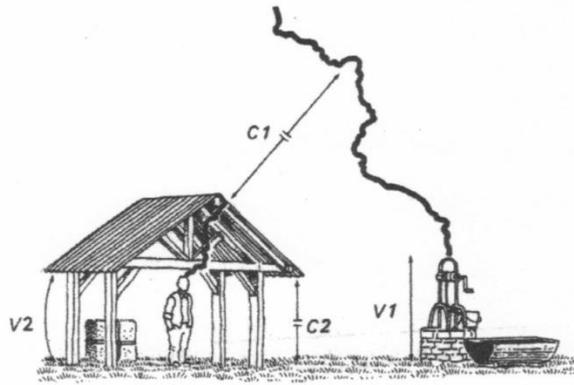


Figure 13: décharge induite à partir d'un toit faisant office de condensateur.

Le coup de foudre direct n'est pas le plus fréquent des modes d'atteintes, mais a généralement la plus grande intensité. Bien qu'il soit le plus à même de produire un arc de contournement, il reste le plus dangereux pour l'homme (20).

E) Effets de la foudre sur l'homme

Le courant de foudre a des caractéristiques peu communes. Ses effets sur le corps humain ne se limiteront pas à la seule électrisation. On distingue parmi eux (17) (20) :

- **l'effet électrique direct** sur les tissus traversés par le courant,
- **l'effet thermique vrai** par contact d'objets traversés par le courant surchauffés par effet Joule,
- **l'effet explosif** du à la surpression (liée à la vaporisation par effet joule) et à la brièveté du courant de foudre, encore appelé «**blast** »,
- **l'effet acoustique,**
- **l'effets lumineux,**
- **et les effets indirects** tels que les traumatismes faisant suite à une perte d'équilibre, à l'effet de surprise, à une panique.

L'effet de blast, associé à des secousses musculaires violentes, entraîne fréquemment des chutes par projections, plus ou moins violentes (parfois à plusieurs dizaines de mètres) (25).

Les effets de la foudre peuvent être aggravés et compliqués par un environnement naturel périlleux (hypothermie en haute montagne, noyade en milieu aquatique). En outre, elle peut blesser indirectement via les incendies de forêt, les incendies de maison, des explosions ou la chute d'objets tels que des arbres. Seules les blessures directement causées par la foudre seront abordées ici.

CHAPITRE 7 : Sémiologie somatique et psychique

La pathologie de la foudre est d'une extrême richesse, tous les types d'atteinte sont imaginables. Il est difficile d'individualiser des formes cliniques, cependant C. J. Andrews et M. A. Cooper ont déterminé trois catégories de tableau clinique. Cette classification, bien que théorique, à l'avantage de fournir au clinicien une méthode rapide et simple pour l'évaluation du pronostic initial (20). Dans un second temps, afin de fournir une information didactique, nous proposerons une énumération des principales complications classées selon les systèmes et les organes.

A) Evaluation de la gravité des atteintes

Selon C.J. Andrews et M.A. Cooper qui se basent sur une étude de plus de 200 cas, on pourrait classer dans un but pronostic les accidents de foudroiement dans trois catégories.

1. Les atteintes mineures

Les victimes sont conscientes et peuvent rapporter des dysesthésies d'un membre, ou, dans les cas les plus graves, un sentiment d'avoir été frappé à la tête ou d'avoir été victime d'une explosion. Elles peuvent ne pas avoir perçu la foudre ou le tonnerre. Elles présentent souvent une confusion et une amnésie d'une durée de quelques heures à quelques jours, une surdité ou une cécité temporaire, une perte de connaissance initiale. Elles présentent rarement des brûlures cutanées ou une paralysie. Des paresthésies, des douleurs musculaires et des céphalées peuvent durer des jours, voire des mois. Elles peuvent présenter de façon séquellaire une rupture de la membrane tympanique due à la force explosive de l'onde de choc de foudre. Les signes vitaux sont habituellement stables même si l'on peut retrouver une hypertension artérielle transitoire. La récupération est habituellement progressive, mais peut ne pas être complète. L'installation d'un syndrome de stress post-traumatique est possible.

2. Les atteintes modérées

Ces victimes peuvent être désorientées, agitées ou dans le coma. Elles présentent souvent une paralysie motrice, en particulier des membres inférieurs, avec des brûlures superficielles et un pouls diminué ou absent. Un pouls périphérique non palpable peut être le fait d'un spasme artériel sur une instabilité sympathique, qui doit être différenciée de l'hypotension. Si cette hypotension persiste, elle doit faire rechercher une fracture, une contusion ou une lésion de la moelle épinière. L'arrêt cardio-respiratoire temporaire est possible, même si cela est rarement documenté (cf. Chapitre 8). Le recouvrement spontané du pouls est attribué à l'automaticité inhérente au cœur. Cependant l'arrêt cardio-respiratoire peut être prolongé et conduire à un arrêt cardiaque secondaire à partir d'une hypoxie par exemple.

Des brûlures au premier et deuxième degré, non au premier plan initialement, sont susceptibles d'évoluer au cours des premières heures. Les brûlures au troisième degré se produisent rarement. On constate souvent une rupture de la membrane tympanique et un hémotympan doit faire rechercher une fracture de la base du crâne. Alors que l'état clinique s'améliore souvent dans les premières heures, les victimes ont tendance à avoir des séquelles permanentes telles que des troubles du sommeil, une irritabilité, des difficultés à la fonction psychomotrice fine, des paresthésies, une faiblesse généralisée, une dysautonomie et parfois un syndrome de stress post-traumatique.

3. Les atteintes graves

Les victimes présentent présentement un arrêt cardio-respiratoire lors du premier examen. La réanimation cardiaque ne sera pas efficace si la victime a subi une période d'ischémie cérébrale prolongée. Des lésions cérébrales sont possibles, causées par le courant de foudre directement ou par l'effet de souffle. La rupture de la membrane tympanique avec hémotympan est fréquente dans ce groupe (17) (30). Le pronostic est généralement mauvais dans ce dernier groupe grièvement blessé en l'absence de réanimation cardio-pulmonaire précoce. (28).

B) Lésions neurologiques (25)

Ces lésions sont souvent immédiates et transitoires. Nous verrons plus loin les conséquences psychiques et comportementales qui sont plus souvent retardées et persistantes. Les symptômes neurologiques découlent d'une atteinte des trois parties du système nerveux, central, périphérique et autonome.

1. Atteintes cérébrales

Il est le plus souvent difficile de savoir si les symptômes sont dus à l'action de la foudre elle-même, à l'arrêt cardiaque initial ou à un traumatisme crânien (25).

Troubles de la conscience

L'effet immédiat du coup de foudre sur le système nerveux central est une **altération de la conscience**, qui varie de la désorientation avec amnésie rétrograde jusqu'à la perte de conscience (28). Le plus souvent, la victime gît au sol à l'endroit où elle a été projetée, immobile. Les contractions musculaires ou les convulsions sont très rares comparativement aux électrisations par courant industriel, mais les pertes d'urine sont possibles.

Une amnésie rétrograde touchant les heures qui précèdent est observée dans plus de 80 % des cas (25). Une perte de connaissance initiale est décrite chez 75 % des sujets foudroyés (17) (31), dont un tiers seulement ne conserve aucune séquelle à distance.

Si la perte de conscience persiste, il y a lieu d'évoquer une lésion cérébrale anoxique ou une lésion cérébrale sous-jacente (28). Un coma peut persister plusieurs jours, voire des semaines. Quand ce coma n'est pas mortel, il persiste le plus souvent des séquelles neurologiques centrales de gravité variable. Des anomalies (diffuses ou en foyer) du tracé électroencéphalographique ne sont pas rares (20).

Accidents vasculaires cérébraux

Les lésions hémorragiques du SNC sont rares et relèvent plus d'un traumatisme non pénétrant (effet de blast ou traumatisme secondaire) que d'un préjudice électrique (nécrose de vaisseaux de petit calibre). On a pu observer quelques cas d'hématomes extraduraux, sous-

duraux ou intracérébraux (17). Les résultats d'autopsies retrouvent souvent des hémorragies pétéchiales profondes (32). Il est évident que des victimes d'arrêt cardio-respiratoire prolongé peuvent présenter des lésions ischémiques du SNC qui ne sont pas spécifiques du foudroiement. Une thrombose cérébrale peut aussi se constituer très rapidement après un foudroiement direct avec contact céphalique (20). Les autres mécanismes peuvent être un spasme artériel entraînant anoxie et œdème, et une lésion directe des structures nerveuses par effet Joule.

Différents *déficits centraux* d'apparition précoce ou secondaire ne sont pas rares : parésies, hémiplégie, tétraplégie, paraplégie, troubles du langage (aphasie). Les déficits peuvent être complètement ou partiellement régressifs (33).

Tronc cérébral

On peut observer une **inhibition respiratoire centrale** par atteinte des centres médullaires respiratoires. Des autopsies d'animaux ont montré des dommages cellulaires directs au niveau du centre respiratoire au-dessous du 4^{ème} ventricule, ainsi qu'au niveau de la face antérieure du tronc cérébral (17).

Atteinte cérébelleuse

L'atteinte des noyaux gris centraux à l'origine de **syndromes parkinsoniens** est encore plus rare après les foudroiements qu'après les électrisations par courant de fréquence industrielle (20). Cette atteinte cérébelleuse reste toutefois possible. Certains auteurs ont suggéré qu'elle était en rapport avec la vulnérabilité particulière de cette région cérébrale aux variations de température. Une dégénérescence rapide du cervelet a été rapportée avec une nécrose des cellules de Purkinje observé moins de 24 heures après le foudroiement. Une atteinte de la partie supérieure du vermis (région médiane du cervelet), visualisée par l'IRM, a aussi été rapportée chez deux patients (25).

Troubles moteurs divers

En dehors de l'atteinte cérébelleuse et des séquelles éventuelles d'un coma initial, des **troubles moteurs d'origine centrale** sont rapportés. Il s'agit de syndromes parkinsoniens, de mouvements involontaires d'un ou plusieurs membres, de dystonies focales ou de tremblements. La distinction entre ces manifestations et des troubles d'origine psychogène est souvent délicate, surtout en cas d'amélioration spontanée (25).

Céphalées

Beaucoup de victimes se plaignent de **céphalées** continues durant les premiers mois suivant l'accident. Elles peuvent s'intégrer dans un syndrome dit des traumatisés crâniens, d'autant plus qu'elles s'accompagnent parfois de **nausées** et de **vomissements** dans cette même phase de récupération. Les vertiges et les acouphènes sont également des plaintes communes, particulièrement lors de foudroiement indirect transmis par le téléphone provoquant des lésions de l'oreille interne (31). Les hypothèses physiopathologiques évoquées sont un déplacement anormal des otolithes, et des troubles vasomoteurs (34).

2. Atteinte médullaire

En dehors de compressions médullaires ou radiculaires liées à des traumatismes vertébraux, des **paraplégies transitoires** ont été décrites. Deux syndromes médullaires post-foudroiement ont été plus particulièrement individualisés.

- Un syndrome dit d'« amyotrophie spinale », surtout décrit après électrisation par courant industriel. Le tableau est celui d'une atteinte du motoneurone périphérique, avec atteinte des quatre membres. Les lésions anatomopathologiques se rapprochent de celles observées lors de scléroses latérales amyotrophiques authentiques.

- La myélopathie retardée, syndrome grave, séquellaire d'une atteinte de la moelle épinière après foudroiement ou électrisation par courant à haute tension, heureusement rare mais caractéristique. Selon le niveau de l'atteinte, la myélopathie peut s'exprimer par une paraplégie ou une tétraplégie. Le délai d'apparition peut aller de quelques jours à 4 mois. Les lésions correspondent à des plages de démyélinisation diffuse (25).

3. Atteintes du système nerveux périphérique

Le système nerveux périphérique est moins souvent touché que le système nerveux central par foudroiement. Il s'agit là d'un phénomène contraire à ce qui est décrit dans le cas

d'électrifications par courant industriel, où l'entrée se fait généralement par l'extrémité d'un membre et où les atteintes du système nerveux périphérique sont la conséquence de brûlures directes ou d'une compression (syndrome des loges) (25). Cependant **les douleurs** et **les paresthésies** sur le trajet du courant, très fréquentes, sont souvent mises sur le compte d'une atteinte du système nerveux périphérique. Les symptômes peuvent être retardés de plusieurs semaines à plusieurs mois (17). Des atteintes liées au traumatisme physique sont possibles, comme une paralysie faciale périphérique par fracture du rocher lors d'un traumatisme crânien sévère.

4. Les kéraunoparalysies

Initialement utilisé par Charcot en 1890, le terme « kéraunoparalysie » désigne un syndrome neurologique transitoire (de une demi-heure à quelques heures) fréquemment observé au décours immédiat du foudroiement, et extrêmement évocateur de celui-ci. Ce syndrome, très spectaculaire, associe un déficit sensitivomoteur complet d'un ou plusieurs membres à des phénomènes vasomoteurs intenses. La peau est froide, pâle, les extrémités cyanosées, les pouls périphériques ne sont plus perçus. La partie du corps affectée est celle traversée par le courant de foudre, et ne respecte aucunement les territoires sensitifs ou moteurs. Le patient ne se plaint d'aucune douleur. Les fonctions sphinctériennes sont préservées. Les symptômes ne durent pas plus de 24 heures et leur résolution est complète. Néanmoins F. Jean a constaté des parésies persistantes durant plusieurs jours (33).

La kéraunoparalysie toucherait deux tiers des foudroyés, avec une prédominance sur les membres inférieurs. Le mécanisme physiopathologique reste mal élucidé. Une atteinte neurologique pure (sidération médullaire ou périphérique), une atteinte vasomotrice par spasme artériel initial, et une atteinte neurovégétative d'autre nature ont été discutées. La présence de troubles vasomoteurs permet de différencier la kéraunoparalysie d'un accident ischémique transitoire ou d'un déficit postcritique. L'absence de douleur va à l'encontre de l'hypothèse d'une atteinte du système nerveux périphérique (25).

5. Atteintes du système nerveux végétatif

De très diverses manifestations dysautonomiques sont observées chez les foudroyés, pour la plupart transitoires (quelques heures à quelques jours). Elles sont aussi variées que :

- des troubles de la régulation de la pression artérielle et des troubles du rythme cardiaque ;
- des troubles de la thermorégulation et de la sudation ;
- divers troubles gastro-intestinaux et urinaires, dominés par l'iléus paralytique et la dysfonction vésicosphinctérienne (25);
- des modifications du diamètre pupillaire : une mydriase aréactive peut être observée chez un foudroyé, en dehors de toute atteinte neurologique identifiable. La mydriase bilatérale ou l'absence de réponse à la stimulation lumineuse ne sont pas des critères formels du diagnostic de mort cérébral (20).

Un aspect particulier de l'atteinte neurovégétative du foudroiement est l'apparition d'une algoneurodystrophie quelques heures à quelques jours après le traumatisme. Elle peut accompagner d'autres signes d'atteinte du système nerveux périphérique dans la même partie du corps traversée par la foudre. Sa sévérité est indépendante de la gravité des lésions initiales.

C) Conséquences psychiques et comportementales

Les victimes ont rencontré beaucoup de suspicion par rapport à leurs plaintes cognitives ou fonctionnelles. Mais les nombreux rapports de cas convergent vers un ensemble de symptômes similaires. Ils doivent être pris en compte, d'autant plus que les conséquences familiales, sociales et professionnelles peuvent être lourdes (17).

Parmi les manifestations immédiates on compte une sensation d'avoir été assommé, une irritabilité, des états d'agitation considérables avec anxiété ou au contraire une apathie avec désintérêt, des confusions avec désorientation, ou encore des troubles conversifs (cécité, paresthésies, paralysie). Les amnésies antérogrades et les troubles du sommeil sont fréquents (35). Cet état peut durer une semaine et, par la suite, soit l'état se normalise, soit il persiste des séquelles psychologiques tardives. Elles sont variables en intensité et en durée, leur gravité n'est pas corrélée à l'intensité du traumatisme, et leur étiologie n'est pas facile à clarifier (35)

(31). Nous décrirons d'abord le syndrome d'un point de vue clinique, puis nous le discuterons à la lumière de la littérature existante. Cette diversité de symptômes a très tôt été reconnue par Critchley dans les années 1930 (35).

Ces symptômes peuvent être d'ordre neuropsychologiques ou affectif (17). Un **trouble neurocognitif modéré** peut apparaître, avec trouble de la mémoire à court terme, trouble de l'attention et de la concentration, et troubles des fonctions exécutives et de la coordination (17). Les personnes ne peuvent plus appréhender un contexte nouveau, sont facilement distraites. Elles ne sont plus en mesure de coordonner plusieurs tâches simultanément, et ont, par voie de conséquence, tendance à s'isoler (17). Ces symptômes peuvent ne pas être évidents à déceler jusqu'à ce que les personnes reprennent leur travail ou usent de fonctions mentales fines (28). Les **troubles affectifs** comprennent une labilité émotionnelle, de l'agressivité, des troubles du sommeil et cauchemars, un comportement phobique, des troubles de l'humeur (dépression, etc.). Peuvent s'ajouter des **signes fonctionnels** tels que des sensations de fatigue générale intense ou de fatigue dans les jambes, des étourdissements, des douleurs chroniques (17). Il est parfois difficile de catégoriser les symptômes, beaucoup décrivent des sentiments d'étrangeté, d'irréalité, ou des changements de personnalité.

Les résultats des tests neuropsychologiques soulignent une similitude remarquable entre les victimes, et rappellent les résultats des tests des traumatisés crâniens. Les troubles de la mémoire verbale, de l'attention et des difficultés d'apprentissage sont très souvent identifiés. Au contraire, les perturbations du langage, de la conscience ou des fonctions visuo-spatiales semblent être très rares (35). L'encodage et la récupération sont plus touchés que le stockage, comme on peut le voir dans les syndromes sous-corticaux ainsi que dans les troubles affectifs (35).

La recherche étiologique est difficile. Bien que les symptômes psychiques puissent être secondaires à un état dépressif, il est aisé de comprendre qu'une personne puisse réagir sur le mode dépressif lorsqu'elle ne peut plus travailler comme avant ou mener une vie sociale ou familiale (les pertes d'emploi, divorces, isolements ne sont pas rares) à cause de difficultés cognitives, de douleurs, du manque de sommeil. Et ce syndrome anxio-dépressif peut à son tour affecter la cognition (35).

Par ailleurs, les plaintes rapportées de troubles du sommeil, troubles de la mémoire, dépression, dysfonctions sexuelles, douleur chronique, sensation de faiblesse peuvent découler de lésions neurologiques, d'une réaction psychique ou d'une interaction entre les deux (35).

Ainsi, Engestatter a étudié les séquelles d'une centaine de personnes foudroyées, et trouve deux grands facteurs qui expliqueraient le mieux la variance parmi ces symptômes très diffus. Le facteur 1 englobe diverses plaintes neurocomportementales, notamment la dépression, la fatigue, des étourdissements, confusions, troubles du sommeil, acouphènes, paresthésies, engourdissement, céphalées, et des déficits neurocognitifs (diminution de l'attention, mémoire et coordination). Le facteur 2 inclue les autres symptômes pouvant être qualifiés de « réaction anxieuse » : anxiété, douleur chronique, faiblesse générale, cauchemars, changements de personnalité, idées suicidaires (35) (36).

Parmi les modèles étiologiques proposés, Primeau et *al.* comparent ce syndrome à plusieurs autres syndromes : le syndrome des traumatisés crâniens pour lequel ils retrouvent beaucoup de similitudes, le tableau des lésions cérébrales (1 cas d'atteinte de la substance blanche retrouvé à l'IRM (25)), le syndrome de stress post traumatique, le trouble de l'adaptation, une dépression majeure ou un trouble conversif (35). Dans une étude approfondie aux Pays-Bas, Van Zomeren et *al.* ont noté des signes de dépression et des « signes convaincants de stress post-traumatique ». Mais ils ont déclaré que les plaintes durables et les troubles cognitifs légers ne pouvaient pas être expliqués sur la base de réactions d'anxiété ou de dépression. Pour eux, une atteinte du système sympathique (fréquente chez le foudroyé) expliquerait les symptômes du type : céphalées, fatigue, troubles cognitifs divers. Cela est d'autant plus probable que des signes classiques de dystonie végétative sont souvent associés (6).

Primeau et *al.* pensent que l'on peut spécifier un syndrome de choc post-électrique, pouvant évoluer pendant 3 ans avant d'être considéré comme chronique. Mais, d'après eux, les patients qui n'auraient pas récupéré dans un délai de 3 mois risqueraient de garder des séquelles à long terme.

D) Pathologies cardio-respiratoire

1. Lésions cardio-vasculaire

Même si la victime est asymptomatique initialement, la survenue de symptômes cardiaques ou de modifications électriques reste tardivement possible, durant 24 heures (17). Ces pathologies ne laissent qu'exceptionnellement des séquelles (20).

Les troubles du rythme cardiaque les plus divers peuvent être observés (arythmies ventriculaires ou supraventriculaires). Le signe électrique le plus fréquemment retrouvé est l'allongement du segment QT.

Des anomalies électriques évoquant une ischémie, voire une nécrose myocardique sont assez fréquentes (10 % selon M.A. Cooper). Alors que la plupart des modifications électriques disparaissent en quelques jours, certaines peuvent persister pendant des mois (17). Les complications à type d'infarctus du myocarde ont été rapportées avec plus de fréquence qu'à la suite des électrisations par courant alternatif (37) et la douleur thoracique typique peut être absente (38). Le taux de CPK-MB peut être également trompeur puisque l'activité plasmatique de cette enzyme peut demeurer normale, alors que l'électrocardiogramme met en évidence des signes de nécrose myocardique. Cela s'expliquerait par la clairance plus rapide de l'isoenzyme cardiaque (CPK-MB) par rapport à l'isoenzyme de la musculature squelettique (CPK) (39) (40).

On peut également observer une instabilité tensionnelle (hyper- ou hypotension artérielle) transitoire, probablement par atteinte du système nerveux sympathique comme nous l'avons vu (20).

Dans son étude sur 104 foudroyés, F. Jean retrouve (33) :

- 2 personnes ayant présenté un infarctus du myocarde,
- 4 cas d'hypotension artérielle réactionnelle spontanément régressive, et 5 cas d'hypertension artérielle avec hypertension artérielle séquellaire chez 2 personnes,
- et 13 cas de trouble du rythme, dont 10 à type de tachycardie réactionnelle, 1 cas de tachycardie paroxystique sur un terrain préexistant de cardiopathie arythmique, 1 cas de fibrillation auriculaire et 1 cas de bradycardie secondaire à un arrêt cardiaque.

Plusieurs théories tentent d'expliquer la façon dont le cœur est lésé : lésion directe des artères coronaires, atteinte directe du cœur par sidération électrique ou effet Joule, lésions

anoxiques (suite à un arrêt respiratoire, une thrombose des artères coronaires, ou un spasme vasculaire), contusion myocardique sur ondes de choc.

2. Lésions pulmonaires

L'œdème pulmonaire peut accompagner des lésions cardiaques sévères. Une hémoptysie grave ou une hémorragie pulmonaire peuvent résulter d'une atteinte directe du parenchyme pulmonaire par le courant de foudre ou d'une contusion (16).

E) Brûlures et marques cutanées

Nous avons vu précédemment qu'il était rare, si ce n'est exceptionnel, d'être confronté à des brûlures internes (musculaires) similaires à celles que provoquent les électrisations par courant industriel (19). Les brûlures et marques kérauniques présentes chez la plupart des foudroyés (près de 90 %) ont surtout un intérêt diagnostique. Les brûlures suivantes sont typiques, surtout lorsqu'elles sont associées (19):

- * Les **brûlures punctiformes et profondes**, aux points d'entrée et de sortie du courant. Elles permettent de reconstituer le trajet de la décharge. Elles ont les mêmes caractéristiques que les brûlures électriques, petites zones circulaires brûlées au troisième degré et centrées sur une petite dépression nécrotique. Dans certains cas (rares) ces brûlures nécessitent une greffe (19).

- * Les **brûlures par flash** sont similaires aux brûlures dues aux radiations d'un arc électrique. Elles sont généralement plus étendues et superficielles. Les plis cutanés sont épargnés. Des brûlures de ce type peuvent intéresser la cornée (19).

- * Les **brûlures linéaires en traits** (de quelques millimètres à 5 cm de large), dues au passage de l'arc de contournement. Elles sont généralement assez superficielles et cicatrisent spontanément en une dizaine de jours. Elles sont bien souvent regroupées et localisées aux zones cutanées où la peau est de faible épaisseur (41) et de moindre résistance, là où les glandes sudoripares sont les plus nombreuses (lignes médianes du tronc par exemple) (19).

* Les **brûlures par contact** d'objet métalliques portés à haute température (chaîne, bracelet, boucle de ceinture, fermeture éclair, pièce de monnaie dans une poche) peuvent être très profondes. Des greffes sont parfois nécessaires. Leur gravité dépend de la taille de l'objet et de la durée de l'échauffement, ces métaux sont parfois fondus ou vaporisés. Des brûlures très étendues et profondes sont possibles en cas d'inflammation des vêtements. Ceci se produit en cas de « foudre chaude », lorsque la durée du coup de foudre est relativement longue (19).

Enfin, on classe à part les marques arborescentes en forme de feuilles de fougère, appelées **figures de Lichtenberg**, qui sont pathognomoniques de la foudre. Elles sont dues à l'amorçage à la peau avant que ne se produise l'arc de contournement, et peuvent de la même manière se former sur un matériau isolant électrifié. Elles ne sont pas véritablement des brûlures mais leur mécanisme reste inconnu. Elles ne blanchissent pas à la pression, sont roses brunâtres et légèrement palpables. Les ramifications ne suivent pas du tout le trajet des vaisseaux sanguins et des rameaux nerveux superficiels. Ces marques disparaissent spontanément en quelques jours (16) (19). Une étude histologique a montré une extravasation d'érythrocytes et une congestion vasculaire dermique et sous-cutanée, mais il n'existe aucune modification de l'épiderme, du derme, des nerfs, du muscle ou du collagène (42).



Figure 14 : figures de Lichtenberg, sur le torse et dans le dos.

F) Préjudices traumatiques

La lésion par blast la plus typique sinon la plus fréquente est la perforation du tympan, uni- ou bi-latérale (cf. lésions auditives). D'après les rapports de cas, les chutes par projection sont fréquentes et plus ou moins violentes (blast et secousse musculaire, environnement montagneux). Il s'ensuit des lésions traumatiques à type de fracture osseuses, de dilacérations et contusion des tissus mous et des viscères. Les fractures sont moins fréquentes que ce que l'on pourrait penser. Il s'agit de fractures du crâne (généralement associées à des issues fatales) ou de fractures de côtes, du rachis ou des membres, éventuellement associées à des déchirures musculaires et à des luxations articulaires. Plusieurs victimes se sont plaintes de douleur à la mâchoire. Certaines ont subi des pertes de dents, des nécroses de mâchoire et plusieurs décrivent un goût métallique dans la bouche persistant plusieurs mois après cette blessure aiguë.

Les contusions pulmonaires et cardiaques graves avec nécrose hémorragiques s'observent surtout lors de l'autopsie de sujets décédés de complications multiples. Des cas de dilatation gastrique aiguë, s'accompagnant d'hémorragies dues à de multiples érosions gastro-intestinales ont également été décrits. D'après les rapports d'autopsie, ces lésions sont dues au blast (19).

G) Lésions auditives

Ces lésions relativement fréquentes sont dominées par la rupture de la membrane tympanique qui se produirait dans 50 % des foudroiements selon M. A. Cooper (19) (16). La rupture, uni- ou bi-latérale, peut être associée à des lésions ossiculaires (43). Une surdité initiale avec ou sans acouphènes n'est pas rare. Le bruit intense ainsi que l'onde de choc peuvent être responsables de la perte d'audition (16). Des troubles vestibulaires (sensations vertigineuses et troubles de l'équilibre) sont fréquents, et peuvent être de courte durée.

Ces lésions sont quasiment tout le temps associées à des brûlures cutanées locales. On retrouve parfois une otorragie (rupture de la membrane tympanique) ou une otorrhée de liquide

endolymphatique (fistule périlymphatique) ou céphalo-rachidien (fracture du rocher). Les séquelles observées chez la majorité des survivants sont le plus souvent d'origine cochléaire (19).

L'oreille, en tant qu'orifice naturel de la partie supérieure du corps, est exposée à tous les effets de la foudre. Cinq mécanismes peuvent être identifiés : les brûlures parfois très profondes du conduit auditif externe et du tympan, le blast, des effets similaires au barotraumatisme, l'effet direct du passage du courant sur les vaisseaux sanguins de petit calibre (comme ceux de la membrane tympanique) et les traumatismes crâniens (19).

Un mode de foudroiement particulier est à relever ici : l'usage du téléphone pendant un orage, spécialement étudié par C.J. Andrews et M. Darveniza en Australie sur une série de 328 accidents. Il est raisonnable de penser que les lésions auditives sont très fréquentes puisque l'oreille est exposée à une surtension transitoire dans 100 % des cas. Cependant, en raison d'une faible amplitude de courant, la rupture de la membrane tympanique est exceptionnelle et les symptômes auditifs (acouphènes et hypoacousie), possibles dans 50 % des cas, sont le plus souvent modérés. Mais des lésions graves (10 %) sont probablement causées par le choc acoustique généré par le déplacement brusque de la membrane du haut-parleur (19). Anecdotiquement, le sexe ratio intervient dans les facteurs de risque de ces accidents médiés par le téléphone puisque les deux tiers des victimes sont des femmes (19).

H) Lésions oculaires

Peut-être moins fréquentes que les lésions auditives, les lésions oculaires sont dominées par la cataracte, parfois d'apparition tardive. Les yeux sont particulièrement vulnérables aux blessures provoquées par le courant électrique, et les lésions les plus diverses peuvent intéresser toutes les parties de l'œil et ses annexes.

On retiendra des lésions conjonctivales (conjonctivite avec chémosis) et cornéennes (kératites ponctuées et opacités cornéennes diffuses avec risque de cicatrice cornéenne) qui persistent parfois, des uvéites antérieures aiguës bénignes ou récidivantes, des anomalies rétiniennes et choroïdiennes (hémorragie, trou maculaire) (44). Sans oublier la très classique cataracte, volontiers bilatérale, probablement sous-évaluée (l'atteinte cristallinienne étant progressive), dont la localisation sous-capsulaire postérieure est assez caractéristique de la

foudre (20). La cataracte due à la foudre semble plus fréquente que les cataractes dues au courant de fréquence industrielle (3 % des foudroiements dans les études de d'C. J. Andrews et M. A. Cooper contre 0,4 % des électrisations par les lignes EDF dans les études de Gourbière se sont compliqués de cataracte). Cette différence pourrait s'expliquer par la fréquence relativement élevée des contacts céphaliques lors des foudroiements. Dans l'ensemble, les manifestations cliniques des cataractes dues à la foudre sont plus précoces que celles des cataractes électriques « classiques ». Elles se manifestent entre 1 et 24 mois après le foudroiement (44). Mais des cataractes quasi immédiates (45) ou très tardives (11 ans après) ont été décrites. En fait deux types de cataracte seraient à distinguer : celles de formation très précoce, tout à fait similaires aux cataractes traumatiques, et les cataractes électriques typiques, plus tardives (20). Bien que certaines cataractes légères puissent régresser spontanément, la majorité d'entre elles sont évolutives.

Une cécité transitoire bilatérale d'étiologie inconnue n'est pas rare. La victime peut présenter initialement une photophobie intense. Les troubles végétatifs de l'œil dont nous avons déjà parlé, consistant en mydriase, anisocorie, syndrome de Claude-Bernard-Horner, ou absence de réflexe photo-moteur, peuvent être transitoires ou permanents (17) (20).

I) Insuffisance rénale aiguë

L'insuffisance rénale aiguë myoglobinurique est beaucoup plus rare à la suite des foudroiements qu'à la suite de brûlures électriques très profondes par courant alternatif haute tension. Cependant quelques cas ont été rapportés par D. Dumont (46), O. Baptiste (47), C.H. Hawkes (48) et J.L. Imbert (49). Les contextes cliniques étaient des brûlures étendues et profondes (18 % de la superficie corporelle dans le cas de Dumont et 20 % dans celui de Hawkes), des brûlures très profondes nécessitant aponévrotomie et greffes dans les deux cas de O. Baptiste, dont l'un a été mortel précisément du fait de l'insuffisance rénale. Par contre, bon nombre d'observations font état d'une élévation modérée et transitoire des enzymes musculaires sans apparition d'insuffisance rénale aiguë. Dans son enquête nationale, F. Jean note la fréquence importante de l'élévation des enzymes musculaires, sans retrouver de cas d'insuffisance rénale (50).

J) Lésions chez la femme enceinte

Les rapports de foudroiement chez la femme enceinte sont heureusement rares (11 cas publiés en l'espace de plus d'un siècle) (17) (26) (51). D'après ces cas on peut conclure que le fœtus court relativement plus de risques que la mère. Les 11 mères ont survécu et cinq fœtus sur dix ont survécu. Les risques seraient maximaux durant le troisième trimestre de la grossesse. La mère convenablement réanimée peut survivre à un arrêt cardio-respiratoire, en revanche le fœtus n'a que très peu de chances de survivre, surtout si l'arrêt cardio-respiratoire a duré plus de 10 minutes. Parmi les cinq cas mortels, le foudroiement a généralement déclenché le travail avec expulsion (à terme ou proche du terme) de mort-nés ou d'enfants vivants mais rapidement décédés.

K) Dysfonctionnement sexuel

Des baisses de la libido chez les femmes et les hommes, ainsi que l'impuissance pour les hommes, sont des plaintes régulièrement rapportées après un foudroiement. Le dysfonctionnement sexuel peut être dû aux lésions endocriniennes et/ou neuropsychologiques, aux lésions de la moelle épinière ou du système nerveux autonome. Une victime de 32 ans a rapporté une aménorrhée ainsi qu'une ménopause prématurée comme la conséquence de son foudroiement. D'autres ont rapporté des menstruations irrégulières durant un à deux ans (52).

CHAPITRE 8 : La mort par foudroiement

A) Causes de la mort

La cause la plus fréquente de décès pour un foudroyé est l'arrêt cardio-respiratoire. Trois principaux mécanismes entrent en jeu : la fibrillation ventriculaire, l'asystolie et l'arrêt respiratoire (20). La mort est même hautement improbable s'il n'y a pas eu d'arrêt cardio-respiratoire immédiatement après le foudroiement ($p < 0,0001$). Les déterminants physiques de la mort seront le trajet du courant, qui intéressera ou non le tronc cérébral et le cœur, ainsi que l'intensité et la durée du courant. D'après M. A. Cooper les personnes qui ont eu des brûlures crâniennes étaient 2 à 3 fois plus susceptibles de présenter un arrêt cardio-respiratoire ; leur probabilité de décès était 3 à 4 fois plus grande (17).

Les autres causes de décès par foudroiement sont principalement de graves lésions cérébrales dues aux fréquents traumatismes par chute violente (projection) et aux effets du blast sur le cerveau ou d'autres organes (20). Les morts par atteinte majeure du cerveau ou par nécrose myocardique sont rares (27). L'arrêt respiratoire par téτανisation prolongée des muscles respiratoires (le diaphragme en particulier), exceptionnellement observé lors des électrisations par courant alternatif 50/60 Hz, n'a jamais été cité comme cause de mort par la foudre (20). Le risque de mort secondaire par brûlures profondes (effet Joule) des tissus sur le trajet du courant caractérise plutôt les électrisations par haute tension industrielle et serait exceptionnel à la suite d'un coup de foudre, même sans arc de contournement (20) (26).

B) Physiopathologie de la mort par arrêt cardiaque ou respiratoire : asystolie, fibrillation ventriculaire et inhibition respiratoire centrale

La pathogénie de la mort par effet direct du courant de foudre est loin d'être bien comprise. Les recherches doivent être poursuivies afin de déterminer avec précision les effets des courants de foudre traversant le corps (20). La fibrillation ventriculaire constitue la cause de mort par courant industriel la plus fréquente et aussi la mieux étudiée. Mais dans le cas du

foudroiement l'asystole est unanimement reconnue comme la cause initiale de l'arrêt cardiorespiratoire. Elle est quasiment tout le temps retrouvée initialement dans les expérimentations animales (20) (31) (53) (37). Le premier électrocardiogramme, fait forcément avec un certain délai, montre plus souvent une asystolie qu'une fibrillation (20).

On ignore si l'asystole et les arythmies induites par la foudre sont provoquées par l'atteinte du muscle cardiaque, de la commande nerveuse centrale, du sinus carotidien, du mécanisme de rétrocontrôle du système nerveux autonome, ou d'une combinaison de toutes ces atteintes. Selon certains auteurs, une décharge de foudre aurait le même effet sur le cœur qu'un courant continu « massif », à savoir une dépolarisation brutale de l'ensemble des cellules myocardiques, et donc une asystole (17). La foudre peut aussi provoquer la mort par inhibition des centres respiratoires bulbaires centraux. Cette cause de mort serait relativement fréquente, d'autant plus que l'existence de brûlures céphaliques est assez souvent relatée (26). L'arrêt respiratoire d'origine centrale (suivi d'arrêt cardiaque) est régulièrement cité comme étant la seconde cause de mort par foudroiement après les causes cardiaques.

C. J. Andrews a réalisé une étude en foudroyant des moutons en laboratoire. Il a constaté dans la totalité des cas une asystolie initiale suivie rapidement par une bradycardie puis une tachycardie, et enfin deuxième arrêt cardiaque asystolique (17) (54). Il explique l'asystolie par une stimulation du nerf vague. La tachycardie qui s'ensuit serait due à une intense réaction du système sympathique, avec une augmentation du taux d'adrénaline circulante vérifiée par les dosages biologiques (26). D'après ces expérimentations, C. J. Andrews a suggéré une séquence avec comme effet immédiat l'asystolie et l'arrêt respiratoire. En raison de l'automaticité du cœur, les contractions reprennent généralement dans un court laps de temps. Mais l'arrêt respiratoire causé par la paralysie du centre médullaire peut durer beaucoup plus longtemps que l'arrêt cardiaque. Si la victime ne reçoit pas d'assistance ventilatoire immédiatement, l'hypoxie associée peut provoquer des arythmies par fibrillation ventriculaire et un arrêt cardiaque asystolique définitif (17) (54). L'asystole semble être à la fois la première et la dernière réponse à un foudroiement fatal (17). Strasser et *al.* pensent également que la durée de l'apnée, plutôt que l'arrêt cardiaque, est le facteur critique de l'éventuelle survie d'une victime de la foudre (55).

Il est possible qu'un certain nombre d'arrêts respiratoires (sans arrêt cardiaque complet) aient été confondus avec un arrêt cardiaque par asystole. Ce fait a d'ailleurs été prouvé expérimentalement par Ishikawa et *al.* (56).

CHAPITRE 9 : Epidémiologie

A) Introduction

Lorsqu'on évoque les phénomènes naturels dangereux, la foudre ne vient pas obligatoirement à l'esprit. Elle n'est même quasiment jamais abordée dans les différentes sources de ce domaine d'étude. Ces sources font plutôt une référence aux « catastrophes » naturelles, phénomènes dévastateurs et spectaculaires tels que les séismes, les cyclones, les tempêtes, les inondations, les volcans ou les avalanches. Pourtant, d'après les statistiques de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), la foudre serait la deuxième cause de mortalité liée à la tempête aux États-Unis, juste après les inondations (57).

Il est très difficile de connaître le nombre précis de foudroyés et de décès parmi ces victimes pour plusieurs raisons. Beaucoup de personnes blessées ou commotionnées ne consultent pas de médecin. Les certificats de décès sont souvent imprécis. Bien qu'il existe une nomenclature spécifique dans la Classification Internationale des Maladies (CIM), les décès sont souvent archivés dans la rubrique « accidents de montagne », car, lorsque la victime était seule, la cause est parfois difficile à déceler en l'absence de signes physique ou en cas de traumatisme concomitant. Les accidents de la foudre sont moins spectaculaires et plus dispersés dans le temps et l'espace que les autres phénomènes naturels, et les seules solutions sont la recherche d'articles de presse ou l'appel à témoignage. Le service de collecte de données par les coupures de journaux de la NOAA a été une importante source de statistiques nationales aux États-Unis. Il a été remplacé par des moteurs de recherche tels que Google (57) (28). En France la recherche clinique a été lancée en 1999 par un appel à témoignage sur le site de l'Association Protection Foudre (APF) et dans les médias.

On recueille donc surtout les cas les plus graves, ou les plus spectaculaires (atteinte grave, en groupe, circonstances particulières). Il en découle une sous-estimation des chiffres globaux d'une part, et une surestimation des atteintes les plus graves d'autre part.

B) Mortalité

On a longtemps estimé le taux de mortalité de la foudre, tous types d'atteintes confondus, à 30 %. Mais, comme nous venons de le voir, les études selon lesquelles 1 foudroyé sur 3 meurt concernaient des accidents graves. En 1986, Berger et Biegelmeier ont déduit d'une expérimentation animale une probabilité moyenne de survenue d'une fibrillation ventriculaire de 30 %, mais le type de foudroiement relevait du coup de foudre direct uniquement (16) (20). Des études plus récentes font état de chiffres beaucoup plus bas. Après une recherche à l'hôpital du Colorado, Cherington conclut qu'une mortalité de 10 % est probablement plus raisonnable. Selon M.A. Cooper, médecin d'urgence, spécialiste des foudroiements aux États-Unis, la mortalité serait plus vraisemblablement de 3 à 5 % (16) (17). Aujourd'hui, d'après E. Gourbière, on considère que le risque de décès immédiat par la foudre est compris entre 10 et 20 % (16).

C) Morbidité

Selon les publications médicales, les foudroiements non mortels provoquent des séquelles invalidantes dans près de 70 % des cas (58). L'atteinte mineure la plus fréquemment rencontrée est la rupture des membranes tympaniques (59). Les atteintes les plus rapportées sont les brûlures superficielles et les atteintes oculaires. Les séquelles chroniques les plus fréquemment citées sont les lésions cérébrales et les syndromes de douleur chronique (28). Enfin, les séquelles neuropsychologiques peuvent entraîner une morbidité importante, ainsi que des conséquences sociale non négligeables. Les états d'anxiété, hyper-irritabilité, les déficits de la mémoire, les troubles du sommeil, les déficits de l'attention et le syndrome de stress post traumatique sont fréquents et importants (60).

D) Données épidémiologiques actuelles

Dans la Classification Internationales des Maladies (CMI) le codage des causes externes de morbidité et mortalité est particulier par rapport à celui des maladies car elle distingue la Cause Initiale (l'exposition à la foudre est signifiée par le code X33) et le traumatisme lui-même (les effets de la foudre sont signifiés par le code T75.0). Pour la foudre, les seules données exploitables sont les informations fournies par les certificats de décès (X33 : décès provoqué par la foudre). En France, les chiffres officiels sont donnés par l'Institut de la Santé et de la Recherche Médicale (INSERM). En France métropolitaine, sur une période comprise entre 1968 et 2011, la moyenne annuelle est de 11 décès (incidence annuelle de 0,2 pour 1 million d'habitants), avec une grande disparité sur de courtes périodes (Cf. tableau ci-dessous). On peut donc en déduire l'ordre de grandeur d'au moins une centaine de personnes atteintes par la foudre chaque année dans notre pays. Nous sommes intrigués par la baisse radicale des chiffres ces dernières années, mais il ne faut pas oublier qu'ils ne représentent pas l'exacte réalité. La cause du décès est parfois difficile à préciser (et cotée dans la rubrique « accident de montagne » par exemple).

Aux États-Unis, la foudre entraîne plus de décès que les cyclones et ouragans réunis, de l'ordre de 75 à 100 par an d'après la NOAA (17), soit une incidence annuelle de 0,2 à 0,3 par million d'habitant. En Floride, elle cause même plus de morts que tous les autres phénomènes météorologiques combinés (61), avec une incidence annuelle de 1 par million d'habitant (16) (61).

Année	Décès par exposition à la foudre			Décès par exposition au courant industriel		
	Masculin	Féminin	Tous	Masculin	Féminin	Tous
1968	14	4	18	133	20	153
1969	26	8	34	164	33	197
1970	23	2	25	176	26	202
1971	24	8	32	154	35	189
1972	19	8	27	149	22	171
1973	20	2	22	175	31	206
1974	14	3	17	154	17	171
1975	8	6	14	144	29	173
1976	21	5	26	136	27	163
1977	18	2	20	159	20	179
1978	10	1	11	138	28	166
1979	4	1	5	143	22	165
1980	8	1	9	130	19	149
1981	9	2	11	145	32	177
1982	17	1	18	146	23	169
1983	10	4	14	123	28	151
1984	6	2	8	124	19	143
1985	7	1	8	146	22	168
1986	10	2	12	124	18	142
1987	9	2	11	127	27	154
1988	7	0	7	102	13	115
1989	9	3	12	120	15	135
1990	6	2	8	112	22	134
1991	6	2	8	101	16	117
1992	8	0	8	70	15	85
1993	5	2	7	82	11	93
1994	13	1	14	98	18	116
1995	4	4	8	73	10	83
1996	5	1	6	65	12	77
1997	6	0	6	63	4	67
1998	0	1	1	53	2	55
1999	2	2	4	69	12	81
2000	5	1	6	63	11	74
2001	5	1	6	70	13	83
2002	6	0	6	42	8	50
2003	2	1	3	48	8	56
2004	2	1	3	69	6	75
2005	2	0	2	42	8	50
2006	7	1	8	54	5	59
2007	2	0	2	54	6	60
2008	1	0	1	47	5	52
2009	1	0	1	48	1	49
2010	1	0	1	41	7	48
2011	1	0	1	33	4	37
TOTAL	383	88	471	4509	730	5239
Moyenne annuelle	8,7	2	10,7	102,5	16,6	119,1

Tableau 1 : effectif des décès par exposition à la foudre et au courant électrique en France métropolitaine. Chiffres INSERM, communication personnelle (62).

E) Sexe ratio, âge et circonstances

Dans la littérature, les personnes atteintes par la foudre sont pour la plupart des adultes jeunes, entre 20 et 40 ans, en grande majorité des hommes.

En France, le tableau 1 dénombre 471 décès de 1968 à 2011, parmi lesquels 383 hommes et 88 femmes, soit une proportion de 81,3 % d'hommes (62). Dans une étude plus récente et rétrospective, F. Jean établit sur une série de 104 personnes foudroyées un pourcentage de 64 % d'hommes et une moyenne d'âge de 32 ans (33). L. Kubler a étudié en France 34 cas, pour lesquels la moyenne d'âge est de 23 ans, et le pourcentage d'hommes de 76,5 % (63).

Aux États-Unis dans les recueils de données de 1959 à 1994 (pour les décès et pour les atteintes non mortelles), on retrouve un ratio de 83 % d'hommes. Un chiffre similaire est retrouvé à Singapour, en Angleterre et au Pays de Galles (17).

Le lieu de l'accident est le plus souvent en plein air, essentiellement en zone rurale, et les foudroiements se concentrent évidemment lors des mois les plus orageux, de juin à septembre (au moins les deux-tiers des cas) et l'après-midi (on note les $\frac{3}{4}$ des foudroiements entre 14h et 20h) (17) (33). Dans les années 1890, les décès survenaient lors d'accidents à l'intérieur d'une maison dans 23 % des cas, alors que de nos jours ils ne représentent que 2 % des décès (17). Etre à l'intérieur d'une maison ne représente plus autant un risque de foudroiement, probablement en raison du raccord à la terre des circuits électrique et des canalisations, ce qui diminue les risques d'éclair latéral en offrant un chemin de moindre résistance (17).

Le facteur de risque de foudroiement qui arrive encore en tête de liste est le fait de se trouver abrité sous un arbre, qui représentait tout de même au moins 15 % des cas (17), et même davantage pour l'American Meteorological Society (AMS) : cette organisation a tenté de catégoriser les foudroiements par lieu ou activité (64):

Rang	Localisation ou activité	Fréquence relative
1	Espaces en plein air (dont terrains de sports)	45 %
2	En s'abritant de la pluie sous un arbre	23 %
3	Activités aquatiques (natation, pêche, bateau de plaisance)	14 %
4	En jouant au golf en extérieur	6 %
5	Sur un engin agricole ou de chantier avec cabine ouverte	5 %
6	En utilisant un téléphone filaire	4 %
7	En jouant au golf (en cherchant par erreur à s'abriter sous un arbre)	2 %
8	En utilisant un équipement radio	1 %

Figure 15 : répartition des foudroiements par localisation ou activité, source AMS

Les accidents de foudroiement se produisent généralement au cours d'une activité sportive de plein air, mais il existe des professions exposées au risque de foudroiement telles que les agriculteurs, les ouvriers de chantier ou les professionnels de la haute montagne. Ils représentent une part non négligeable des décès, 10 % selon une estimation de Gourbière (65). Citons pour exemple marquant l'étude de F. Jean : sur 104 personnes foudroyées, 26 l'ont été sur leur lieu de travail, dont 15 agriculteurs et 5 dans un bureau (dont 3 au téléphone). Les foudroiements collectifs ne sont pas rares, et peuvent représenter jusqu'à 30 % des personnes foudroyées, et 10 % des personnes décédées (16).

F) Evolution depuis un siècle

D'après le journal de la société statistique de Paris de 1865, la foudre tuait une centaine de personnes par an au IX^e siècle. Malgré une augmentation de la population, on a pu noter une nette diminution de ces décès. Le nombre de décès par an a tendance à décroître : en France il a diminué de moitié entre les années 1920 à 1970 ; aux États-Unis ce chiffre a été divisé par 4 dans la même période. Le diagramme suivant nous montre que cette baisse est parfaitement corrélée à la progression de l'exode rurale. Elle peut également être expliquée par une diminution du nombre de travailleurs manuels en plein air (17) (66).

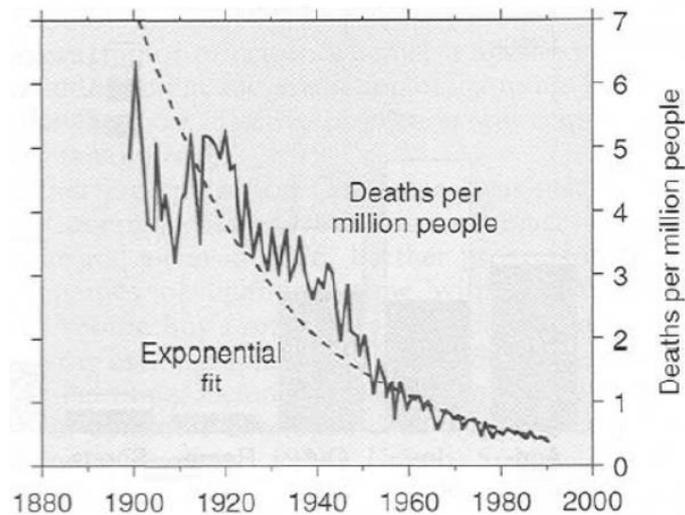


Figure 16 : évolution de la mortalité annuelle par la foudre aux États-Unis (en rouge), comparée à l'évolution de la population en zones rurales (en bleu). Source : Lopez RE et Holle RL : J climatique 11 :2070, 1998.

La diminution soudaine du nombre annuel de décès en 1945 peut s'expliquer par un changement de codage (le nouveau codage ne prenant en considération que les décès directement causés par la foudre).

Les circonstances de foudroiement ont également clairement évoluées : diminution des accidents lors du travail et augmentation lors des loisirs. On peut donc craindre une recrudescence du fait de la pratique croissante de nouveaux loisirs en plein air (football, camping, randonnées pédestres, escalade, golf, nautisme, etc.) (66). Mais de façon très récente, on constate depuis quelques années une diminution de ces chiffres, correspondant peut-être à un travail de prévention qui a commencé au début des années 1990, mais ce facteur est difficile à isoler (17).

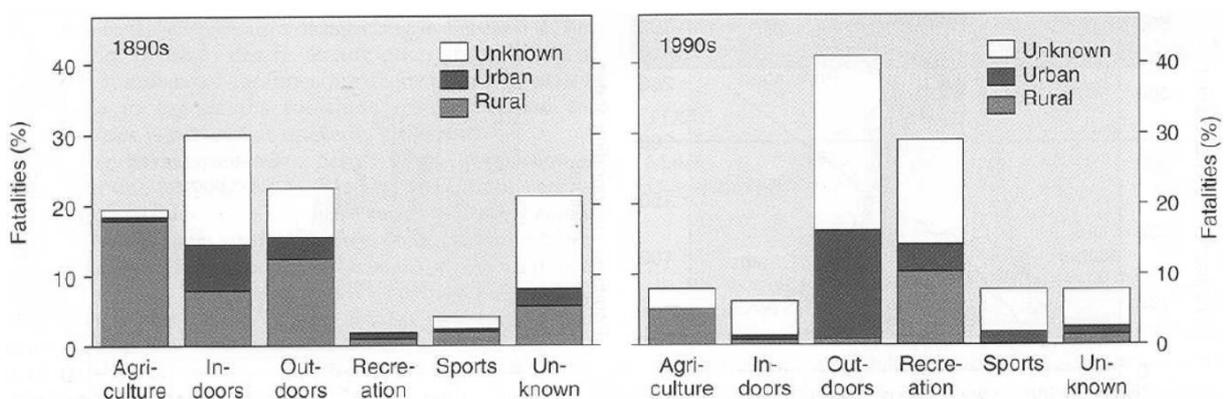


Figure 17 : répartition des foudroiements par activité (17).

G) A travers le monde

L'extrapolation de tous ces résultats dans le monde doit être considérée avec prudence. R. E. Lopez, dans son article, estime le nombre de décès au niveau mondial à 1 000 (67). M. A. Cooper pense, elle, que l'incidence annuelle des décès par foudroiement du début du XX^e siècle (6 par million d'habitants) peut être encore appliquée à une grande partie du globe, notamment les régions tropicales et subtropicales d'Afrique, d'Amérique du Sud et d'Asie du Sud-Est, ainsi que la Chine et le sous-continent Indien. Elle désigne là les pays qui connaissent un niveau céramique beaucoup plus haut que l'Europe ou l'Amérique du Nord, et qui continuent de s'appuyer sur une main d'œuvre rurale importante et peu mécanisée. Les logements y sont peu ou pas du tout reliés à la terre et les populations disposent d'informations météorologiques et de moyens médicaux moins développés. Nous n'avons pas trouvé de statistiques pour ces régions du monde, mais des foudroiements collectifs sont fréquemment rapportés lors de grands rassemblements humains tels que des matchs de football. Si on s'avance à faire le simple calcul du taux de décès de 6 par million d'habitant sur cette population regroupant 4 milliards d'individus, on obtient un chiffre de 24 000 décès dus à la foudre, et l'estimation d'un total de 240 000 personnes atteintes chaque année dans le monde.

TROISIEME PARTIE



QUELS ENJEUX POUR UN MEDECIN GENERALISTE AUTOUR DE LA QUESTION DU FOUDROIEMENT ?

CHAPITRE 10 : La prise en charge d'une personne foudroyée

Le foudroiement peut entraîner chez une même victime un ensemble de lésions très diverses. Un patient foudroyé est « *un électrisé, un blasté, un traumatisé, un brûlé, et un choqué psychologiquement* » (16). Au long cours, des manifestations, essentiellement douloureuses et neuropsychologiques, peuvent entraîner des plaintes fonctionnelles et un handicap socioprofessionnel important. L'ensemble de ces présentations peut égarer le médecin généraliste. Ce dernier tient un rôle central dans la prise en charge car il est fréquemment appelé en premier recours (33), et il assure le suivi des soins.

Il n'existe pas de recommandations consensuelles pour la prise en charge d'une personne atteinte par la foudre. Nous nous appuyerons donc sur les pathologies et sur la littérature déjà existante pour tenter de proposer une conduite à tenir pragmatique.

A) Prise en charge aiguë

1. Pré-hospitalière

a) Les premiers secours

Lors du premier bilan, les premiers soins sont généralement donnés par les proches sur le lieu de l'accident. La victime doit d'abord être protégée d'un sur-accident mortel éventuel (hypothermie, chute, zone très orageuse...). En cas d'arrêt cardio-respiratoire, la précocité d'une réanimation cardio-pulmonaire conditionnera le pronostic. L'appel au centre 15 doit préciser le mécanisme de l'accident, l'état des fonctions vitales, et la description sommaire des lésions. Pour les médecins régulateurs, le foudroiement est l'équivalent d'un accident électrique à haute tension motivant systématiquement l'engagement d'un moyen SMUR (68).

b) Le SAMU

➤ **Bilan initial**

A l'arrivée des secours la prise en charge est non spécifique et s'apparente à celle d'un polytraumatisé. L'interrogatoire des témoins, dans le meilleur des cas, doit être le plus précis possible afin de déterminer le nombre de victimes, le mode de foudroiement, le trajet probable du courant de foudre, un mécanisme de projection, une chute.

En cas de foudroiement collectif, l'affolement des personnes indemnes peut retarder les secours. Si le nombre de victimes dépasse les capacités de prise en charge, les règles habituelles en médecine de catastrophe changent, la prise en charge des victimes en arrêt cardio-respiratoire devient prioritaire. La littérature montre l'efficacité d'une réanimation cardio-pulmonaire débutée précocement.

Une victime indemne à l'arrivée des secours n'aura quasiment pas de risques de décéder. L'examen clinique devra être le plus complet possible, et notamment :

- Contrôle des constantes vitales, de la température.
- Recherche de lésions traumatiques osseuses viscérales, de brûlures, du point d'entrée et de sortie du courant.
- Réalisation d'un électrocardiogramme.
- Réalisation d'un examen tympanique.

Une immobilisation du rachis cervical par un collier cervical est une obligation en cas de chute.

Le transport médicalisé n'est pas nécessaire si les fonctions vitales sont stables, si l'électrocardiogramme ne présente pas d'anomalies, et s'il s'agit d'une atteinte légère (foudroiement par tensions de pas, absence de perte de connaissance initiale, absence de chute).

➤ **Arrêt cardio-respiratoire**

L'arrêt cardio-respiratoire constitue le risque majeur d'un accident de foudroiement. La réanimation instaurée de manière immédiate augmente considérablement les chances de survie. Ces chances sont estimées, dans le cadre du foudroiement, à plus de 20% (69) (70). Un point important à préciser est que la mydriase aréactive est sans valeur pronostique lors d'un

foudroiement en raison d'une possible dysautonomie. Elle peut être due à une atteinte du système nerveux autonome.

Il y a encore quelques années, de nombreuses publications recommandaient une réanimation cardio-pulmonaire prolongée, ou possiblement débutée plus de 10 min après l'arrêt cardio-respiratoire. Cette littérature se rapporte en fait à un seul cas et l'explication avancée (l'arrêt du métabolisme cellulaire lors d'un foudroiement) est fautive. La littérature récente montre que les chances de survie, en dehors de facteurs de protection cérébrale tels que l'hypothermie, sont minces après 20 à 30 minutes de réanimation.

➤ **Prise en charge initiale**

Il n'y a pas de thérapeutique particulière. Le conditionnement des brûlures est classique, avec refroidissement, emballage thermique et protection de la victime. La sédation et l'analgésie seront le plus souvent indispensables dans ce contexte de stress (19). Nous reprecisons cependant que les brûlures ne sont pas forcément identiques à celles des électrisations par courant industriel, en raison de la courte durée principalement. M.A. Cooper distingue (17) :

* les **brûlures électriques classiques à haute tension**, « profondes », nécessitant « souvent fasciotomie et amputation » et provoquant « fréquemment une insuffisance rénale aiguë myoglobinurique »,

* des **brûlures dues à la foudre** « superficielles et minimales », ne nécessitant que « rarement, voire jamais, fasciotomie et amputation » et provoquant « rarement une myoglobinurie et une hémoglobinurie ».

Pour É. Gourbière, cette différenciation reste schématique et ne doit pas induire en erreur lors de l'évaluation clinique initiale (20). Des lésions inapparentes peuvent quand même exister. Dans le cas de brûlures graves, nous nous appuyons sur le traitement des accidents électriques par haute tension, selon le protocole de P.Y. Gueugniaud (63) (71).

- ✓ Pose d'un monitoring cardiaque
- ✓ Une oxygénothérapie est systématique afin de favoriser une meilleure oxygénation pulmonaire.
- ✓ Nécessité d'un abord veineux périphérique. La pose de deux voies veineuses

périphériques est indiquée en cas de brûlures dépassant une surface corporelle brûlée de 20% (SCB)

✓ Les apports liquidiens en cas de brûlures sont les cristalloïdes isotoniques sous forme de Ringer lactate ou de chlorure de sodium à 9 ‰. En cas de brûlures, les doses pour les 24 premières heures sont calculées d'après la *formule de Parkland* :

$$\text{Volume (ml)} = 4 \times \text{surface brûlée (\%)} \times \text{poids (kg)}$$

✓ La moitié du volume doit être perfusée durant les 6 à 8 premières heures suivant les brûlures. En cas de traumatisme crânien, utiliser du chlorure de sodium à 9‰.

✓ Intubation endo-trachéale, en cas de détresse vitale ou si la surface corporelle brûlée est supérieure à 60%.

✓ Analgésie, en fonction de la douleur.

✓ Dans le cas de grands brûlés, envelopper les brûlures dans des champs stériles après avoir enlevé les vêtements.

✓ Prévention de l'hypothermie.

2. Hospitalière

Le bilan initial aura deux buts.

- Evaluer la nécessité d'une hospitalisation. Dans la littérature, les avis divergent quant à une hospitalisation systématique. E. Gourbière préconise une hospitalisation systématique de 24 heures pour surveillance, même dans le cas où un foudroyé n'a pas perdu connaissance ou n'a subi qu'un simple « choc » sans arrêt cardio-respiratoire (20). D'autres auteurs pensent que l'hospitalisation n'est pas utile pour des atteintes légères.

- Réaliser un bilan initial complet. Dans la pratique courante, on constate que ce bilan n'est pas souvent effectué quand il s'agit d'atteintes modérées. Pourtant, la constatation des lésions initiales sera indispensable pour pouvoir évaluer d'éventuelles complications ultérieures.

➤ **Proposition d'un bilan initial hospitalier**

→ L'interrogatoire est primordial. Le patient est très souvent confus et choqué et verbalise difficilement des plaintes très diverses (douleurs, dysesthésies, vertiges, voire même sensations d'irréalité ou sentiment « bizarre »).

→ L'évaluation psychologique. Les états de stress péri-traumatique sont très fréquents. Une évaluation des capacités neurocognitives fines est nécessaire (Cf. Chapitre 7)

→ Constantes vitales à réévaluer : pouls, tension artérielle, saturation en air, température.

→ L'examen physique doit être complet, patient déshabillé.

→ L'examen cardiologique. Un ECG initial de base est indispensable en raison de l'apparition possible de signes cardiaques le deuxième jour. Il doit donc être recontrôlé à 24h. Certains auteurs préconisent un monitoring cardiaque (39).

→ L'examen pulmonaire, avec radiographie pulmonaire en cas de passage du courant à travers le corps.

→ L'examen neurologique, avec IRM en cas de signes cliniques ou en fonction du mode de foudroiement (céphalique). La réalité de certains troubles peut être difficile à établir car les symptômes conversifs sont loin d'être exceptionnels dans le contexte traumatisant d'un foudroiement (25).

→ L'examen abdominal, avec imagerie et bandelettes urinaires en cas de chute ou de Blast.

→ L'examen cutané doit être minutieux : évaluation des brûlures (avec photographies des différentes brûlures pour un meilleur suivi ultérieur), recherche des figures de Lichtenberg.

→ L'examen ORL : sera réalisé en consultation spécialisée, en urgence en cas d'atteinte tympanique, ou de manière systématique le plus rapidement possible en cas d'absence de lésions.

→ L'examen ophtalmologique : systématique, non en urgence en dehors de signes cliniques. Le but est de rechercher des opacités cristalliniennes dès la phase initiale. Les examens seront répétés à intervalle réguliers pendant au moins 24 mois (19).

→ Bilan biologique : à la recherche de souffrances viscérales, notamment ASAT, ALAT, CPK, troponine, ionogramme sanguin complet.

Si nécessaire, il est possible de demander un avis auprès des médecins assurant des consultations de kéraunomédecine en France (cf. sous-chapitre B).

3. Aspects médico-légaux et diagnostics différentiels

Le diagnostic d'une lésion due à la foudre peut être difficile, d'autant plus que la pathologie de la foudre est ignorée d'un certain nombre de médecins. Les brûlures importantes que l'on s'attend à voir sont souvent absentes. Le diagnostic de foudroiement peut être confondu avec celui d'un certain nombre d'urgences médicales ou chirurgicales.

- Neurologique : un accident vasculaire-cérébral, une rupture d'anévrisme cérébral, une crise d'épilepsie, au traumatisme crânien, un hématome intracrânien.
- Cardiovasculaire : un infarctus du myocarde, une arythmie cardiaque, une hypertension artérielle maligne.
- Métabolique : une hypoglycémie, une intoxication par ingestion de certains sels de métaux, une overdose.

Les victimes sont souvent jeunes, il faut donc penser à un foudroiement, entre autres étiologies, en présence d'une perte de connaissance inexplicée suivie de manifestations « bizarres ». Parfois même la personne ne se doute pas de ce qu'il s'est passé. Elle ou ses proches notent des symptômes fonctionnels ou un changement de personnalité inexplicés (17).

Les signes évocateurs d'une atteinte par la foudre sont : des brûlures des phanères, des brûlures cutanées linéaires ou punctiformes, localisées surtout au tronc, à la tête et aux jambes (à la différence des brûlures électriques par courant de fréquence industrielle, plus souvent localisées aux membres supérieurs), d'éventuelles fractures suite à une projection. On recherchera des lésions tympaniques. Les figures de Lichtenberg sont rares mais pathognomoniques. Les vêtements et chaussures peuvent avoir subi des dommages en l'absence de brûlures au niveau du corps.

Selon M. A. Cooper, toute personne retrouvée avec des brûlures linéaires et dont les vêtements ont « explosé » doit être considérée comme une victime de la foudre et traitée comme telle jusqu'à preuve du contraire (17). Cette personne peut être dans un état confus en pleine nature, ou à l'intérieur de sa maison (dans le cas d'un éclair latéral). Les témoins qui ont vu l'accident, ainsi que les signes physiques typiques sur la victime, peuvent faciliter le diagnostic mais ne sont pas toujours présents. Dans ces cas-là, un rapport d'expertise auprès de Météorage objective la présence d'éclairs au sol sur le lieu de l'accident. Ce diagnostic peut avoir une

importance capitale dans le cas d'un sujet jeune, victime de mort violente, et est également important pour la reconnaissance de séquelles dans le cadre d'un accident de travail.

B) Le suivi à court et moyen terme

Une personne foudroyée gardant des séquelles est confrontée à un double problème :

➤ Un retentissement sur sa vie socio-professionnelle : des douleurs inexplicables, un changement de personnalité, des troubles de la mémoire vont grandement affecter sa vie quotidienne, et auront des conséquences parfois lourdes.

➤ Une non-reconnaissance de ses symptômes, par son entourage et par le corps médical. Nous sommes parfois égarés devant des symptômes étranges, dont on ne connaît pas l'explication. Cela contribue à aggraver les conséquences psychiques, voir les éventuels problèmes médico-légaux. L'importance du traumatisme subi n'est souvent pas prise en considération pour expliquer de nombreuses plaintes pouvant relever d'une simulation, de réactions excessives, de phénomènes de conversion (17). De nombreux témoignages recueillis par l'Association Protection Foudre illustrent cette réalité, avec des sentiments de colère et d'injustice forts.

Les médecins sont souvent démunis face à ces situations complexes. Pourtant, des solutions existent. Des consultations multidisciplinaires de foudroyés ont été créées à l'initiative du service médical d'EDF: à Paris (Pr. Jean Cabane), à Grenoble (Pr. Philippe Menthonnex), et à Toulouse (Pr. Philippe Birmes, Pr. Christian Virenque, Dr. Jacky Laguerre) essaient de donner une réponse à des situations complexes, et offre un soutien psychologique. Une prise en charge thérapeutique est possible. Les déficits neuropsychologiques peuvent tout à fait être suivis et pris en charge comme le sont par exemple les traumatisés crâniens. Les états de stress post-traumatique sont parfaitement accessibles à une psychothérapie comportementale cognitive (35).

Le suivi en médecine générale est primordial pour reconnaître les signes précoces d'un syndrome de stress post-traumatique, et rester vigilant par rapport à d'éventuelles complications somatiques. Certains auteurs préconisent une surveillance pendant une durée de 2 ans. Elle

consistera en des examens cliniques réguliers, et de façon annuelle une consultation cardiologique et un électrocardiogramme, une consultation neurologique, une consultation ophtalmologique (cataracte) et un examen auditif (audiogramme).

CHAPITRE 11 : Principes de prévention et de protection

A) Anticiper un danger imprévisible

D'après M. A. Uman, pionnier de la recherche scientifique sur la foudre dans le monde, la plupart des personnes se font frapper par le 1^{er} ou 2^e éclair de l'orage (72). De manière empirique les spécialistes remarquent également que la fin des orages est un piège classique (par exemple lorsque l'on quitte un abri une fois que la pluie a cessé, ou lors d'une accalmie) (52). Une étude en Floride a montré que les personnes foudroyées avant ou après l'averse d'orage constituait la majorité des victimes (61). Le début et la fin de l'orage sont en pratique dangereux car ce sont probablement les deux périodes où l'on pense être hors d'atteinte de cet éclair dont on connaît à présent les caractéristiques : un parcours long, jusqu'à 10 ou 20 km à l'horizontal, et très aléatoire – même à proximité d'un paratonnerre, nous le verrons bientôt.

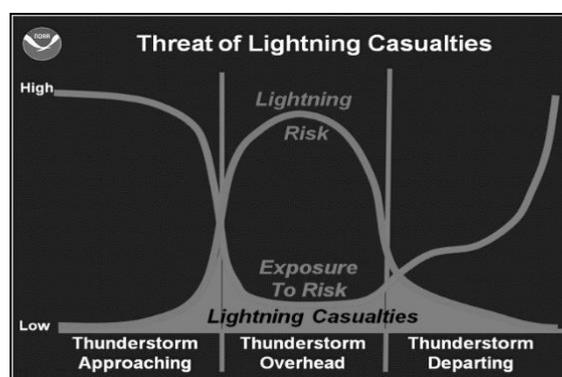


Figure 18 : risque d'atteinte par la foudre : à l'approche de l'orage, sous l'orage, après le départ de l'orage. Source NOAA.

Par ailleurs, nous avons vu que l'orage est un phénomène de petite échelle : donc peu prévisible et fugace. Il se forme généralement en 1 heure et a une courte durée de vie, souvent moins de 30 minutes, et se déplace rapidement. Il n'est pas rare de se faire « surprendre » par un orage, notamment en montagne où ils sont rapidement formés suite à une brise de terre. Enfin, nous verrons, dans les sections suivantes, qu'aucun lieu n'est entièrement sûr vis-à-vis de la foudre, notamment à l'extérieur. Le meilleur moyen de se prémunir de ce danger

imprévisible est tout simplement de l'anticiper en programmant à l'avance les activités de plein air (loisir, travail, ...) en fonction :

- des horaires de la journée : la grande majorité des foudroiements surviennent après 14h.
- des prévisions météorologiques annoncées. Il existe une carte de vigilance par département fournie par Météo France, annonçant les phénomènes atmosphériques violents 24h à l'avance et réactualisée 2 fois par jour. Météo France met également à disposition un numéro de téléphone de « météo montagne » pour chaque massif, où les prévisions d'orage sont réactualisées 3 fois par jour (le 32 50).

Ce dernier point est le plus théorique. Les prévisions météorologiques consultées la veille ou même quelques heures avant sont une bonne indication, mais elles peuvent vite s'avérer insuffisantes dans le cadre d'une activité répétée ou professionnelle : encadrement de groupes (base de loisirs, campings, moniteurs sportifs), travail en équipe en plein air (notamment si présence de grues ou de constructions élevées, et dans des régions à risque), etc. Pour ces cas-là, la société Météorage, filiale de Météo France, commercialise un système d'alerte foudre. Un système de détection des éclairs permet de suivre un orage pas à pas, et d'avertir chaque abonné personnellement quand l'orage est à 20 km du site. Cela laisse un minimum de temps (entre 30 et 45 min généralement) pour stopper l'activité d'une usine ou pour évacuer un chantier en plein air. Météorage signale ensuite la fin de l'alerte lorsque l'orage s'est complètement éloigné.

Anticiper l'orage nécessite d'avoir été sensibilisé au risque que représente la foudre et de recourir à des moyens techniques suffisamment efficaces. De plus, aucune technique ne garantira une sécurité absolue, chaque individu (ou groupe d'individus) est donc responsable de sa propre sécurité en surveillant le ciel et en restant vigilant. Dans la situation où nous sommes surpris par un orage, cas le plus fréquent dans la population générale, la meilleure solution reste de s'en éloigner (prévention). Si cela n'est pas possible, il faudra savoir reconnaître un abri sûr où nous serons protégés en cas d'impact (protection). Le dernier recours sera de savoir quelle attitude adopter dans une situation où on ne peut ni s'éloigner, ni être protégé (en rase campagne, mer, montagne). Encore faut-il savoir où est le danger, point crucial de ce chapitre.

B) A l'approche d'un orage : estimer le risque d'exposition au danger

D'après le schéma simplifié ci-dessous, nous comprenons combien il est difficile d'imaginer toutes les configurations possibles autour de nous. Un nuage d'orage peut être étendu et ne pas avoir une activité uniforme : averse sans éclairs d'un côté, activité électrique « sèche » de l'autre côté. Quand nous cherchons à nous abriter de la pluie, ou que nous quittons un abri lors d'une accalmie, une production d'éclairs peut nous être invisible au niveau de l'enclume du même nuage à des kilomètres de distance. Il n'existe pas de foudre sans cumulonimbus, mais attention au ciel clair au-dessus de nous. Il peut parfois contenir des décharges inter-nuageuses peu perceptibles au loin : le « coup de tonnerre dans un ciel serein » existe réellement !

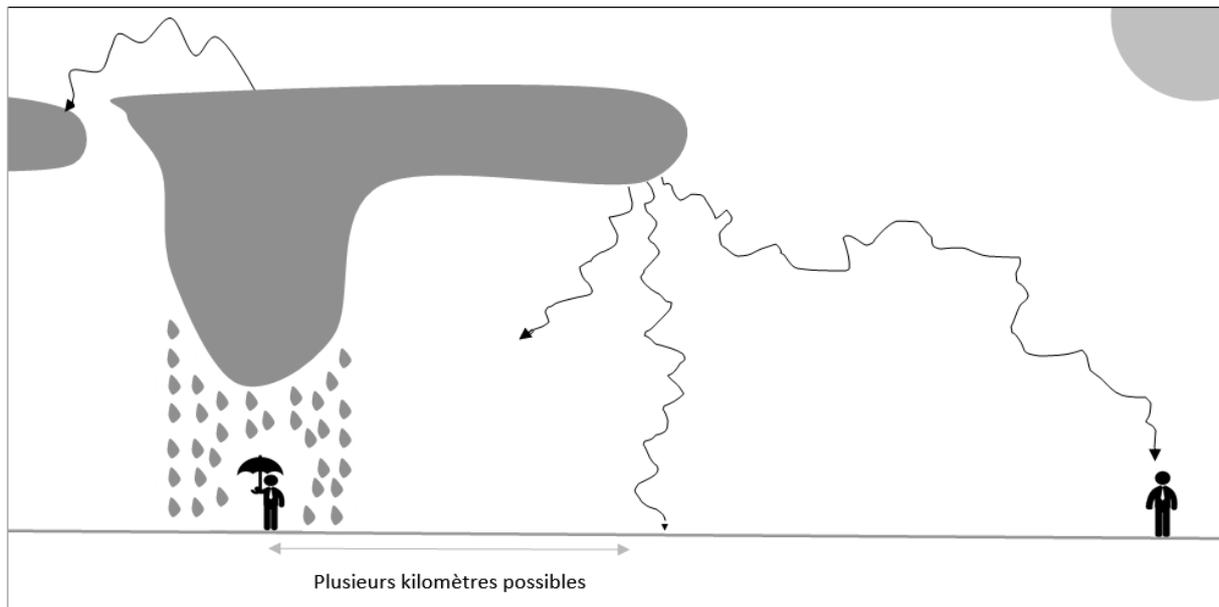


Figure 19 : situations à risque à proximité d'un orage.

Il est donc nécessaire de trouver des repères simples et fiables pour savoir si nous sommes dans une zone à risque, et pour combien de temps. La distance de sécurité, au-delà de laquelle le risque est quasiment nul, est une question débattue depuis plusieurs décennies. Elle a longtemps été considérée comme équivalente à 10 km, ce qui correspond donc à un temps écoulé entre l'éclair et le tonnerre de 30 secondes. On considère également que la menace persiste durant les 30 minutes après la dernière manifestation orageuse. Tout ceci a donc débouché sur la règle dite des 30/30 : se mettre en lieu sûr si le temps éclair-tonnerre dure plus

de 30 secondes, et y rester 30 minutes après le dernier coup de tonnerre entendu. Cependant, cette règle a largement été remise en question car des éclairs ont été détectés jusqu'à 20 km de distance, le record de mesure étant 40 km (61). Etant donné que le tonnerre est audible à une distance de 15 km par mauvais temps, et jusqu'à 25 km par beau temps, nous pouvons grossièrement considérer qu'une personne n'est pas en lieu sûr dès qu'elle entend le tonnerre, même un lointain grondement sourd. Un météorologiste américain, Bill Roeder, a proposé en 2003 l'adage suivant : « When thunder roars, go indoors! » (Quand le tonnerre gronde, rentrez vite !). Pour M. A. Cooper, le tonnerre est le premier signe d'alerte, le plus fiable et le plus important. Mais d'autres signes existent.

➤ Les signes de développement d'un cumulonimbus sont facilement remarquables lorsque l'on y prête attention : vent froid se levant brutalement (aspiration d'air froid), brusque chute de température, nuage avec une expansion en hauteur « cotonneuse », avec une partie sombre (un nuage ne laisse pas passer la lumière dès l'instant qu'il dépasse 500 m de hauteur, donc l'assombrissement ponctuel signe un processus convectif cumuliforme).

➤ Les premiers éclairs d'un cumulonimbus arrivé à maturité sont intranuageux, donc inoffensifs. Ils surviennent 15 min avant les éclairs au sol, et peuvent être un signe précieux si le ciel est clair (comme dans le foudroiement collectif de Saint-Jean-de-Luz). La difficulté est qu'ils sont peu audibles.

➤ L'augmentation du champ électrique au sol sous un nuage électrisé (100 V/m par beau temps, 10 kV/m sous un orage) entraînent différentes manifestations : aigrettes bleutées scintillant au bout d'un piolet, d'une crête rocheuse, bourdonnement d'abeille, cheveux qui se dressent, feux de Saint-Elme chez les marins, brouillage des ondes radio. Il existe sur le marché des détecteurs de champ électrique dont le but est d'avertir de l'imminence d'un orage lorsque le champ électrique atteint ce seuil de 10 kV/m, mais leur efficacité n'a pas été établie objectivement (beaucoup de faux positifs) (64).

➤ L'altimètre (qui finalement mesure la pression atmosphérique) indique une brutale hausse d'altitude lorsqu'arrive une dépression soudaine : l'orage n'est pas loin !

C) Prévention : éviter le danger

A proximité d'un orage, il est parfois difficile de trouver de façon certaine un lieu sécurisé. L'option la plus efficace est d'éviter le danger.

→ En repoussant une activité extérieure si un orage est imminent, ou en prenant la décision d'interrompre un travail, une rencontre sportive. Généralement un orage ne dure pas longtemps, de ½ heure à 1 heure.

→ En s'éloignant suffisamment dès le début de l'orage.

D) Protection : quels sont les lieux les plus sûrs

Malgré les conseils préventifs que l'on peut voir un peu partout, aucun endroit n'est absolument sûr vis-à-vis de la foudre. Dans le cas où on ne peut pas s'éloigner suffisamment de l'orage, il est nécessaire de trouver l'abri qui offre le plus de sécurité. C'est-à-dire où nous avons peu de chances d'être atteints si cet abri est foudroyé. Deux méthodes de protection existent.

1. Le principe de la cage de Faraday

En théorie, la seule méthode permettant une sécurisation totale est celle basée sur le principe de la **cage de Faraday**. Ce principe, découvert en 1830 par le concepteur du champ électrique, Michael Faraday, est simple : à l'intérieur d'un conducteur, les charges, par répulsion électrostatique, vont se répartir à sa surface et le champ électrique à l'intérieur du conducteur sera nul. Pour un conducteur creux, l'espace est isolé du champ électrique extérieur, on parle de blindage électromagnétique. Cela n'empêche pas la foudre de s'abattre sur un tel dispositif, mais le traceur ne pourra pénétrer à l'intérieur, et les surfaces internes des parois ne seront pas électrisées (73). L'enceinte métallique est constituée de parois pleines, ou alors d'un grillage ajouré avec une taille de maille inférieure à la longueur de l'onde électromagnétique ciblée (système d'un four à micro-ondes). Cette méthode est appliquée à certaines infrastructures sensibles à la foudre mais aussi aux ondes électromagnétiques (centres de données informatiques) à l'aide de feuilles d'acier ou de cuivre. Un véhicule à carrosserie

métallique fermée est un exemple courant de cage de Faraday : bien qu'imparfaite en raison de ses ouvertures, elle confère une protection efficace. En conséquence, les voitures décapotables, les engins agricoles sans cabine et les camping-cars dont la carrosserie est constituée de plastique ne joueront pas du tout ce rôle. Les pneus n'empêchent nullement l'éclair de frapper la carrosserie : un ou plusieurs arcs s'établiront entre les jantes et la route, permettant à la décharge de s'écouler dans le sol (74).

2. Le paratonnerre

La deuxième méthode consiste à capter l'éclair et conduire la décharge jusqu'à la terre sans entraîner de dommages autour. C'est bien évidemment le principe du **paratonnerre**. Il est constitué d'un dispositif de capture, d'un conducteur de descente et d'une prise de terre, mais contrairement à ce que l'on imagine il peut revêtir différents aspects. Rappelons-le : le paratonnerre n'augmente pas la probabilité de coups de foudre sur un bâtiment, il sert simplement de guide. Le traceur descendant s'orientera préférentiellement vers ce chemin de moindre résistance jusqu'à la terre lorsque, arrivé à quelques dizaines de mètres du sol, il doit effectuer un dernier « choix » de trajectoire.

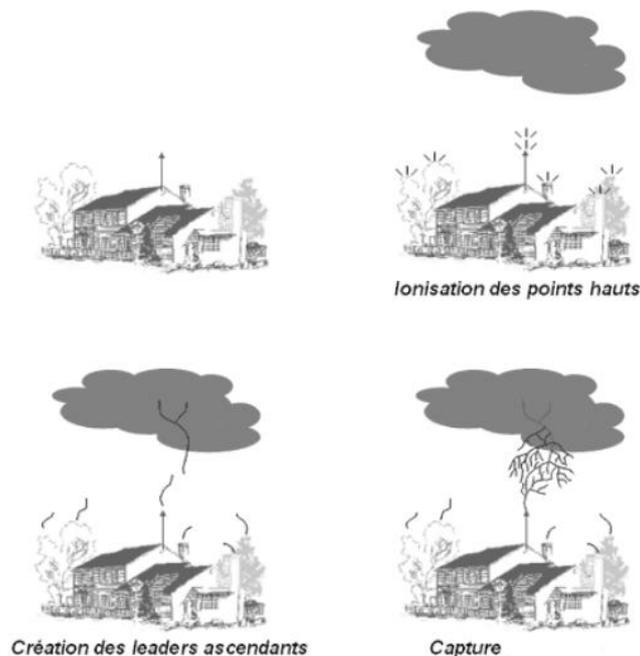
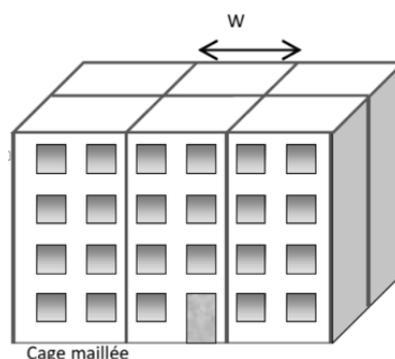


Figure 20 : chemin préférentiel offert par un paratonnerre à tige.

Le schéma ci-dessus (figure 13) décortique le fonctionnement d'un paratonnerre. Sous un orage, le champ électrique augmente, et il se produit une ionisation partielle sur quelques centimètres (effet corona) au niveau des aspérités. La pointe d'un traceur descendant s'approche, au hasard, et génère au-dessous d'elle un champ électrique très important (jusqu'à 100 kV/m). L'ionisation des aspérités se propage sur une plus grande distance et forme les traceurs ascendants. L'un des traceurs ascendants, le plus proche, va entrer en contact avec le traceur descendant en un point appelé point de capture : le canal ionisé est continu, et l'arc en retour peut avoir lieu (4).

3. Les différentes présentations

Les **paratonnerres à tiges** sont les plus connus. D'une hauteur de 2 à 6 mètres et munis d'une pointe effilée, ils sont reliés à un ou plusieurs conducteurs de descente jusqu'à la terre. Mais les conducteurs verticaux fixés aux murs font également office de dispositif de capture : il existe donc des paratonnerres uniquement constitués d'un réseau de conducteurs, verticaux et horizontaux, ce sont les **paratonnerres à cage maillée**. Les mailles mesurent 5, 10, 15 ou 20 mètres selon le niveau de sécurité exigé. Une telle installation est plus complexe à mettre en œuvre et plus coûteuse qu'un paratonnerre à tige, mais elle se révèle plus efficace. C'est la solution souvent retenue pour des bâtiments industriels. A noter que le coût d'installation peut être fortement réduit si la réalisation est effectuée en même temps que le bâtiment lui-même ; il est également possible de se servir des éléments naturels d'une construction (poutres métalliques, tôles, armatures de béton armé) à condition que la continuité électrique soit assurée entre eux et avec la terre. Dans certaines circonstances, le paratonnerre peut même prendre la forme de simples câbles horizontaux – **paratonnerre à fils tendus** – suspendus au-dessus d'une zone de stockage à sécuriser, ou camouflés dans des banderoles publicitaires lors de grands rassemblements sportifs (52).



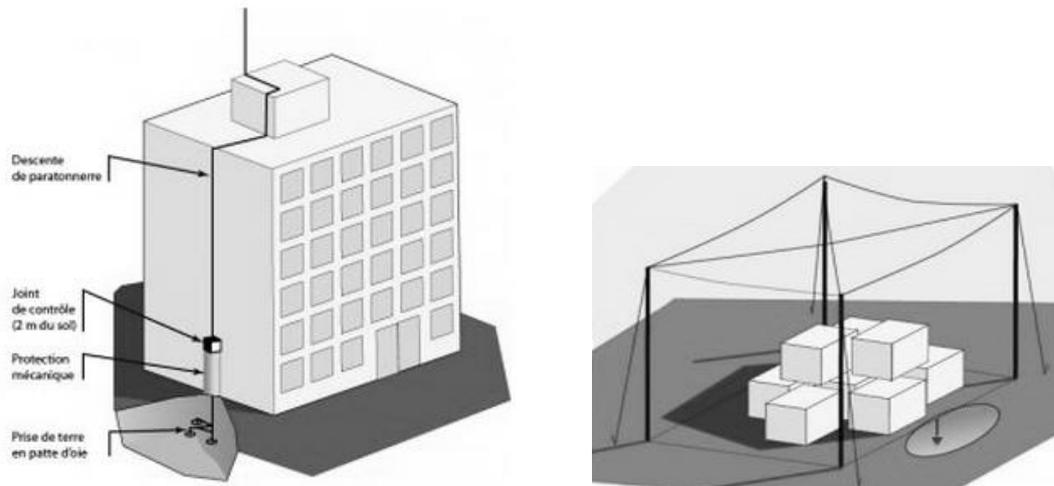


Figure 21 : les différents types de paratonnerre, à tige, à cage maillée, et à fil tendus (75).

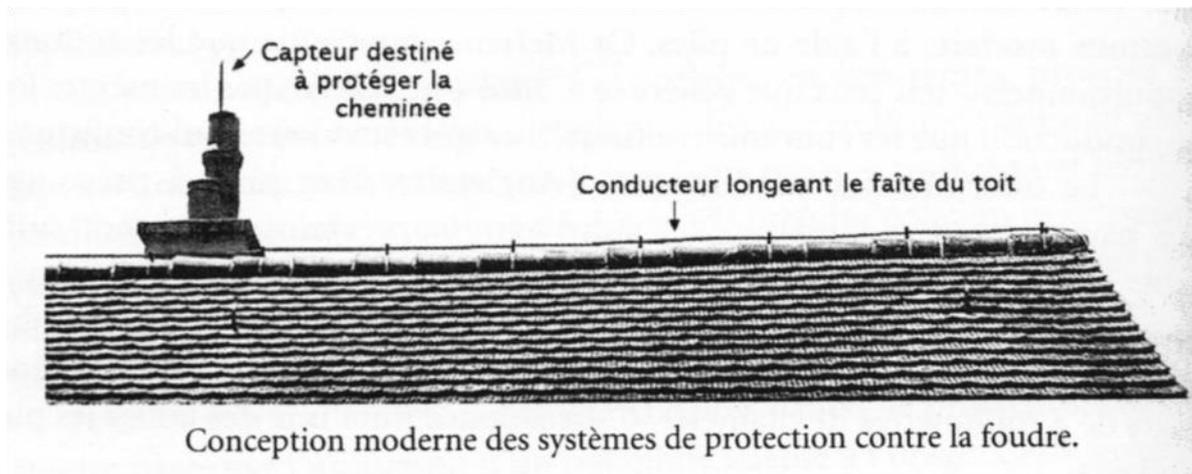


Figure 22 : systèmes de protection contre la foudre (SPF) s'intégrant dans une habitation moderne. D'après Pierre Zweiacker, 2011.

4. Rayon d'action

Le problème sera de prédire le rayon d'action d'un paratonnerre (appelée **zone de capture**), pour pouvoir protéger entièrement un bâtiment et pour savoir quel endroit est le plus sûr à l'extérieur du bâtiment. Cette estimation est difficile pour deux raisons. Tout d'abord cette zone n'est pas fixe, mais varie avec l'intensité de chaque éclair. En effet, plus la charge répartie le long du canal ionisé descendant sera importante, plus le traceur ascendant induit sera long, c'est le modèle théorique dit électrogéométrique. La relation entre la distance de capture et

l'intensité de crête de l'éclair est donnée par la formule $D(m) = 10 \times I^{2/3}$ (kA), ce qui donne à titre d'exemple :

I (kA)	3	10	30	100	150
D(m)	21	46	94	210	273

Figure 23 : distance d'amorçage en fonction de l'intensité du courant de crête, source Claude Gary (4).

On peut matérialiser cette théorie en imaginant une sphère autour de la pointe du traceur descendant, dont le rayon serait la distance de capture (D) (cf. schéma..). Il suffit de faire rouler cette sphère au sol et sur le bâtiment, tout en faisant varier son diamètre, pour savoir si elle touchera en premier le dispositif de protection contre la foudre, ou un des objets à protéger. C'est la méthode pratique dite de la sphère fictive, qui est une bonne indication pour optimiser la protection d'un bâtiment même si elle ne s'applique seulement qu'aux coups descendants négatifs. Elle a permis pour la première fois de comprendre pourquoi la foudre tombe parfois au pied même ou à mi-hauteur d'une tour (lorsque l'éclair est de faible intensité, la zone de protection est très réduite). Elle a permis également de montrer que le concept, longtemps admis, de « cône de protection » sous un paratonnerre est faux.

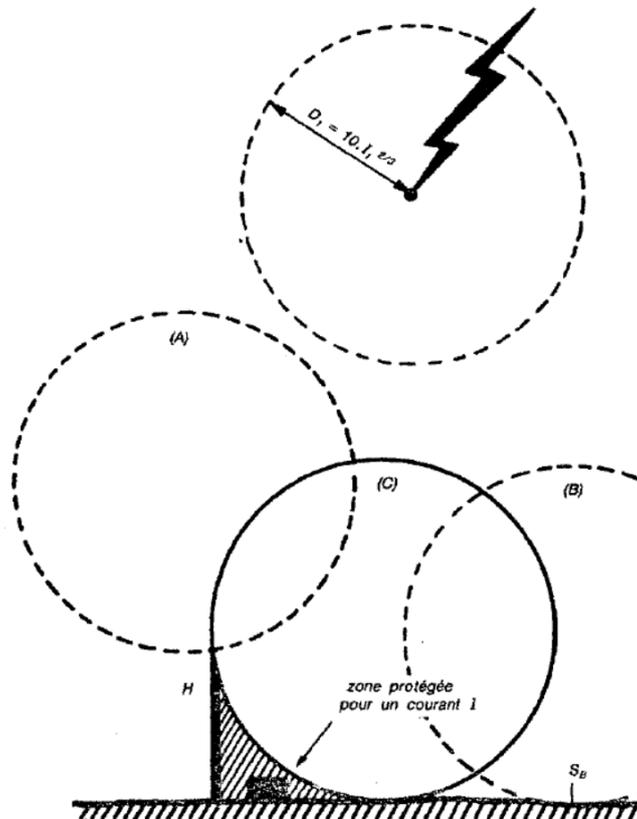


Figure 24 : méthode de la sphère fictive appliquée à une tige de hauteur H, source Claude Gary (4).

La deuxième raison qui empêche de savoir exactement quel endroit va être protégé concerne le « choix » de trajectoire du traceur descendant lui-même. La réalité n'est pas aussi parfaite que les modèles théoriques. Le but d'un système de protection contre la foudre est simplement d'« offrir à la foudre le cheminement le plus favorable possible, et par conséquent le plus probable, parmi tous les chemins que l'éclair pourrait suivre jusqu'à la terre » (3). C'est donc une probabilité, et non une certitude. Cela explique les exemples réguliers de foudroiement de bâtiments industriels importants dotés d'installations de protection dans les normes (raffineries de pétrole, stockages, transports maritimes) (75) (76).

On s'aperçoit que la forme du dispositif de capture n'est pas le facteur prépondérant dans la détermination de la zone de capture. En dehors du paratonnerre à tige simple (que l'on nomme aussi « tige Franklin »), plusieurs paratonnerres munis de dispositifs de capture améliorés sont apparus sur le marché depuis une vingtaine d'années : les paratonnerres à dispositif d'amorçage (PDA), censés agrandir la zone de capture. Ils font grand débat car cette amélioration est techniquement difficile à prouver en conditions réelles, nous aborderons cette discussion dans le chapitre recherche.

Nous retiendrons brièvement des paratonnerres qu'il est pour le moment impossible d'espérer une protection complète. Ces dispositifs sont régulièrement pris en défaut, y compris les paratonnerres à cage maillée qui représentent actuellement la solution la plus performante (77).

5. Équipotentialité

Moins que la technique de capture utilisé, il faut surtout veiller à une installation correcte des conducteurs, de manière à ce que ceux-ci soient reliés avec tous les conducteurs du bâtiment, et avec une mise à la terre correcte. L'**équipotentialité** fait partie intégrante du système paratonnerre, en évitant la formation d'éclairs latéraux : la différence de potentiel gigantesque entre le nuage et le sol entraîne un claquage à travers 2 km d'air isolant, et peut tout aussi bien traverser un mur épais pour aller toucher une tuyauterie ou une personne. L'équipotentialité diminue également le risque de passage du courant par une faille humide dans un mur, ce qui entrainerait une explosion de celui-ci par évaporation de l'eau (4).

6. Parafoudre

Nous consacrons ici un paragraphe au parafoudre, ou Système de Protection contre la Foudre Interne (SPFI), car son installation est indispensable – et légalement obligatoire – pour un bâtiment équipé d'un paratonnerre, ou Système de Protection contre la Foudre Externe (SPFE). Le parafoudre est un élément installé sur le circuit électrique d'une maison qui permet de faire face à une surtension du paratonnerre et d'éviter ainsi un risque d'incendie ou d'éclair latéral. Il est à noter que la majorité des surtensions ne proviennent pas d'une atteinte directe du bâtiment par la foudre, mais surviennent le plus souvent du câble d'alimentation aérien (par atteinte directe du câble ou par induction sur celui-ci) ou d'une élévation du potentiel de la terre lors d'un impact au sol à proximité. Même si les SPFI fonctionnent tous sur le même principe (dériver un débit trop élevé d'électricité en devenant « passant » au-dessus d'un certain seuil), il en existe plusieurs types de sensibilités différentes, qui doivent être coordonnés entre eux. Un SPFI, tout comme un SPFE, doit donc être mis en place par un installateur spécialisé.

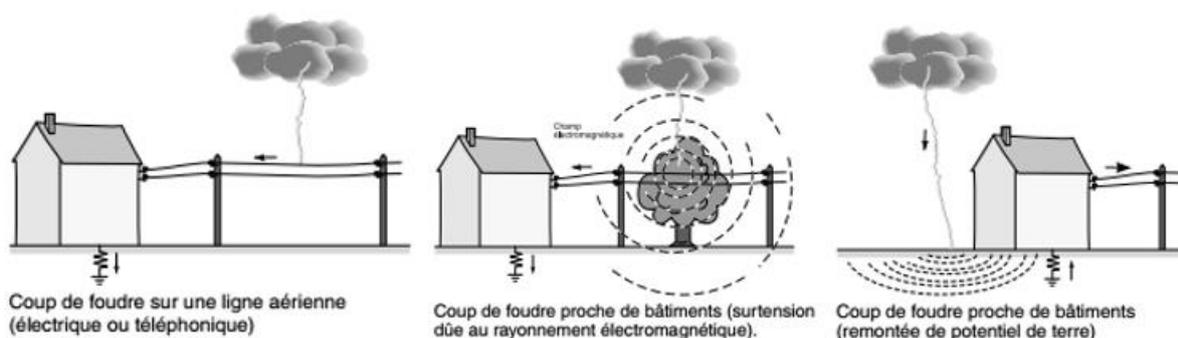


Figure 25 : les trois causes indirectes de surtension d'un circuit électrique domestique. Source Schneider Electric, protection contre la foudre guide 2009.

7. En pratique : où « s'abriter »

Nous venons de voir qu'il n'existe pas de protection efficace à 100 %. Théoriquement la seule solution serait une cage de faraday parfaite : constituée de parois pleines, et d'une épaisseur suffisante pour résister à la chaleur de l'éclair (3). Néanmoins, lorsque nous sommes surpris par un orage, 3 types d'abris peuvent être considérés comme suffisamment sûrs, à la condition de prendre quelques précautions.

- Un bâtiment important ou une grande structure fermée (au minimum une maison individuelle), au mieux équipé d'un paratonnerre et d'un parafoudre (configuration assez rare pour une maison domestique), ou un bâtiment avec conducteurs reliés à la terre (beaucoup plus aisé à trouver). Dans tous les cas, il faudra anticiper la possibilité d'éclair latéral en s'éloignant d'au moins 3 mètres des conducteurs (canalisations, fils électriques, douche, téléphone filaire, béton armé, etc.), en débranchant les appareils électriques et en s'éloignant des fenêtres que l'on gardera fermées.

- Un véhicule, à carrosserie métallique fermée. Il faudra également veiller à fermer les fenêtres, à ne pas toucher l'intérieur des parois (cage de Faraday non parfaite) et, si possible, à enlever l'antenne radio. Malgré une tendance actuelle à utiliser plus de matériaux composites et à concevoir des pare-brise de plus en plus large, la voiture reste un élément de protection relativement fiable. Mais les atteintes à l'intérieur du véhicule restent possibles, il sera donc préférable de se réfugier dans un bâtiment (52).

- Sous une ligne électrique. Cela ne vient pas forcément à l'esprit, surtout lors d'un moment de panique sous un orage soudain, mais une ligne électrique constitue un paratonnerre (à fils tendus...) très efficace pour la zone située juste en-dessous. Il faudra là-aussi faire attention à ne pas s'approcher des poteaux métalliques pour éviter une étincelle dangereuse.

E) En milieu extérieur : éviter les situations à haut risque

En extérieur, absolument aucun endroit ne peut être considéré comme sécurisé de manière fiable. Au vu du caractère aléatoire de la foudre, les précautions à prendre ne peuvent être considérées comme une prévention efficace car il n'existe pas de mesure qui puisse faire baisser le risque de manière significative (78). Par contre on peut essayer d'éviter les situations qui augmentent le risque d'être frappé. Les conseils foisonnent sur les brochures et sites internet consacrés à la météorologie ou aux loisirs de plein air. On peut les regrouper en trois catégories selon que leur but est d'éviter :

- un **foudroiement direct** : diminuer le risque pour notre corps de former un traceur ascendant important.

- Le premier conseil, le plus important, est de descendre en altitude pour diminuer le champ électrique au sol (cf. chapitre 2).

- le deuxième conseil est de ne pas former une proéminence (debout au milieu d'un espace dégagé et plat, et éviter évidemment d'être soi-même sur une proéminence).

- On rappellera ici que c'est uniquement la forme d'un objet ou d'un relief qui conditionnera la formation d'un traceur ascendant, contrairement à ce qui est parfois écrit, la nature de l'objet ne rentre pas en jeu. Ainsi un téléphone portable « n'attirera » pas la foudre, pas plus que le métal. Nous avons déjà évoqué le dilemme des objets métalliques qui peuvent entraîner des brûlures graves (collier, bracelet, etc.) mais qui peuvent favoriser par ailleurs un éventuel arc de contournement⁴. M. A. Cooper estime qu'enlever ces objets peut être une perte de temps, et que le principal danger d'un téléphone ou d'un écouteur est qu'ils empêchent d'entendre le premier signal d'alarme : le tonnerre (52) (79).

- Un corollaire est d'essayer de ne pas constituer le point de départ du traceur « principal », mais d'être à proximité d'une saillie, crête rocheuse qui fera office de paratonnerre. Pour cela, il faudra à nouveau imaginer l'espace de sécurité laissé par une sphère fictive d'un rayon minimum de 20 mètres, en veillant toujours à rester à une certaine distance du « paratonnerre » (cf. paragraphe suivant). Un ordre d'idée simple est de rester par exemple entre 3 et 10 mètres d'une pointe rocheuse, d'une grue, etc. Au risque de se répéter, l'éclair n'ira pas obligatoirement vers cette saillie plutôt que vers nous, mais c'est seulement le plus probable.

➤ **un foudroiement par contact direct ou par un éclair latéral :**

- Il est impératif de se tenir à une certaine distance (correspondant à au moins notre propre hauteur, et jusqu'à 3 mètres pour être tout à fait sûr) de tout objet conducteur (lampadaire, poteaux métallique, cabine téléphonique, clôture, étendue d'eau, etc.),

- ou de tout objet proéminent, ou formant une saillie, quel que soit leur nature : arbre,

⁴ Kitagawa a ainsi décrit « l'effet épingle à cheveux » particulièrement dangereux, et « l'effet fermeture éclair » pour les objets métalliques portés à la partie inférieure du corps qui favorisent la formation d'un arc de contournement. Mais il ne faut pas en déduire que le port d'objets métalliques à la partie inférieure du corps ou même autour du cou protège de la mort par foudroiement (19).

paroi rocheuse verticale paroi d'une anfractuosité, paroi d'un bâtiment protégé mais en surplomb au-dessus de nos têtes. Pour cette même raison, les membres d'un groupe doivent s'écarter de 3 mètres les uns des autres en cas de risque important de foudroiement.

- Un cas particulier est l'arc électrique généré par un toit en tôle par induction lorsqu'un éclair survient à proximité : l'arc peut frapper à plus grande distance. Toutefois il n'y a pas de risques si le toit est supporté par des poutres métalliques.

➤ **un foudroiement par tension de pas :**

- Il faut faire attention à ne pas exposer le corps à une différence de potentiel lorsque la foudre frappe le sol à proximité. Cela consistera à ne pas courir, ne pas marcher à grandes enjambées, mais aussi à ne pas prendre appui sur un rocher avec une main à distance des pieds pour un alpiniste.

- Pour mettre toutes les chances de son côté il faut se tenir à une grande distance du point qui sera le plus susceptible d'être touché car cette tension de pas peut être dangereuse à plus de cent mètres de l'impact au sol.

- Il est recommandé de se mettre sur un isolant (sac, ciré, cordes, sac de couchage, etc.), si possible sec. Cette mesure reste efficace pour des différences de potentiel modérées, et paraît difficile à mettre en œuvre par temps humide. Une possibilité consiste à s'asseoir sur un sac de montagne, non pas qu'il soit suffisamment isolant, mais les armatures métalliques constituent une équipotentielle qui annule localement la tension de pas.

En cas de menace importante, lorsque l'orage est très près, la position souvent recommandée regroupe tous ces conseils : c'est la position accroupie, dans un espace plat, les pieds joints, sur une pièce isolante. En anglais elle est désignée sous le terme de « lightning crouch ». Il n'a jamais été démontré qu'elle pouvait être d'une quelconque efficacité (52).

Par ailleurs, l'application de ces conseils sur le terrain est difficile. La décision à prendre de se réfugier à tel ou tel endroit n'est pas forcément évidente, surtout dans un moment de panique. La confusion peut être aggravée s'il s'agit d'un groupe. De plus, certains conseils peuvent paraître contradictoires (par exemple ne pas marcher à grandes enjambées et descendre d'altitude en montagne, ou éviter les espaces dégagés mais aussi les proéminences). Pourtant

ces mesures peuvent être utiles car les situations à haut risque retrouvées dans les comptes rendus d'accidents semblent fréquentes et souvent évitables (sous un arbre isolé, au bord de l'eau, à proximité d'un rocher). Il est donc nécessaire de rendre applicables ces mesures en les hiérarchisant et en donnant les grandes lignes pour chaque type de terrain.

Lorsqu'on est surpris par un orage dans un bois, il est possible de rester au milieu des arbres en sachant que plusieurs arbres annulent l'effet de pointe, plutôt que de rester à la lisière du bois qui peut faire effet de contraste. Il faudra bien évidemment rester à distance des troncs et des branches basses (80) (81).

En montagne, la priorité est de descendre d'altitude le plus rapidement possible, en évitant les crêtes, afin de faire baisser significativement le champ électrique et donc la probabilité de créer un traceur ascendant (82). Selon la situation exacte sur le terrain et les conditions météorologiques précises, on peut également choisir de se réfugier sous un ressaut, sans se coller à sa paroi : celui-ci doit dominer d'au moins cinq à six fois la hauteur du sujet pour faire office de paratonnerre (voir modèle de la sphère fictive illustré ci-dessous). Il faudra descendre au moins 30 mètres en dessous du pic pour diminuer le risque d'une tension de pas si celui-ci est foudroyé (4) (82).

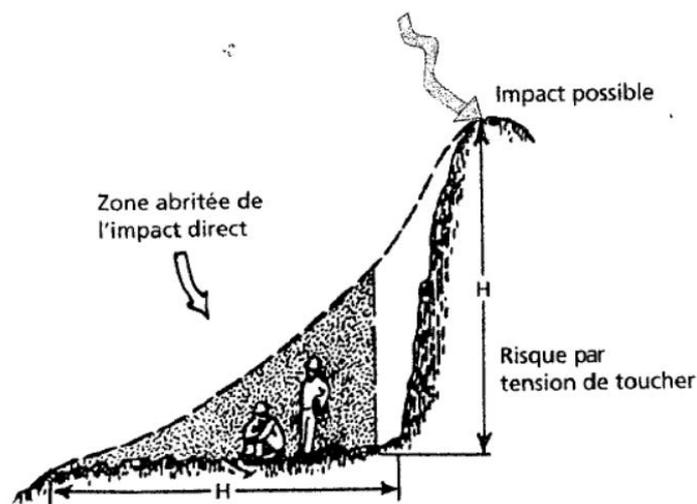


Figure 26 : zone abritée d'un impact direct sous une pointe montagneuse, obtenue par application de la méthode de la sphère fictive (4).

La résistivité du sol est grande en montagne, donc les tensions de pas seront extrêmement élevées (jusqu'à 1 million de volts par mètre) mais ne pourront pas agir sur une grande distance : à 15 mètres elles sont encore dangereuses, et deviennent 50 fois plus faibles à 100 mètres, n'entraînant pratiquement plus de risques. Mais le sol montagneux est loin d'être

homogène et cache de nombreuses failles humides où s'engouffrera préférentiellement le courant. Au final, le foudroiement indirect (tension de pas ou de toucher) représente le risque le plus important pour un alpiniste, et ce quelle que soit sa situation par rapport aux points d'impacts de la foudre. Il faudra donc en permanence veiller à rester assis sans s'appuyer contre une paroi, si possible assis sur un sac de montagne.

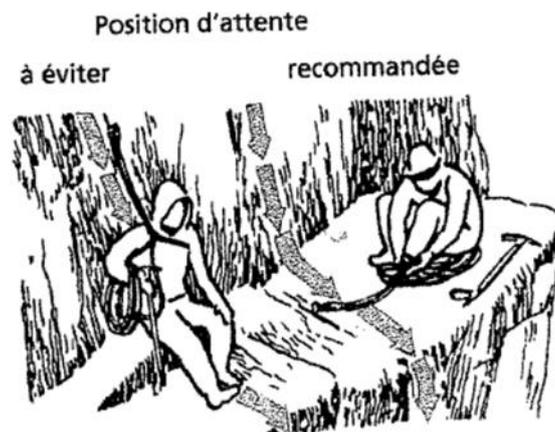


Figure 27 : positions d'attente pendant un orage : la position de gauche doit être évitée, la position de droite est recommandée (4).

Pour les mêmes raisons, il faut se méfier des grottes et anfractuosités car une faille verticale peut y aboutir. Il y a donc un risque de tension de pas même en s'appuyant au fond, et il y a également un risque d'amorcer un arc électrique en se tenant debout près de l'entrée. La meilleure position sera accroupie au milieu de la grotte.

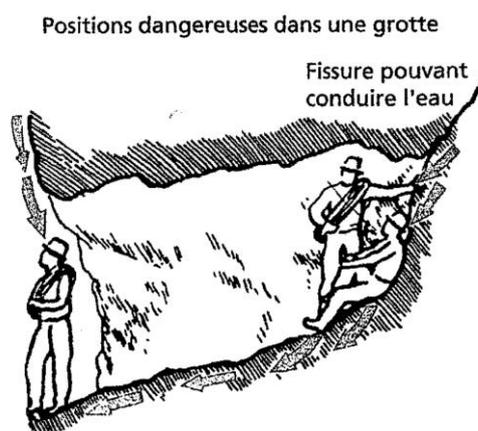


Figure 28 : Dangers de foudroiement indirect dans une grotte : l'alpiniste de gauche risque un amorçage sur sa tête, l'alpiniste de droite risque une tension de pas (4).

Un autre risque doit être précisé : les accidents secondaires, dus à un blast, une secousse musculaire, ou une simple perte de connaissance qui peut entraîner une chute grave. Il doit être présent à l'esprit pour prendre les mesures nécessaires au début de l'orage (s'attacher ou choisir un endroit plat). Enfin nous insistons sur la question des objets métalliques : la nécessité de se débarrasser de son piolet et de ses pitons est une croyance forte dans le milieu alpin. Etant donné qu'ils n'augmentent en aucun cas la probabilité d'être foudroyé, il vaut mieux les garder avec soi pour assurer le retour. Il faudra toutefois veiller à ne pas porter le piolet à la verticale au-dessus de son sac-à-dos, et à le déposer par terre à côté de soi lorsqu'on s'immobilise.

En mer, le risque de foudroiement est statistiquement moins élevé que sur terre (la densité de foudroiement y est moindre), mais il existe tout de même. Cela d'autant plus que les plaisanciers naviguent essentiellement l'été, lorsque les orages sont plus fréquents que les tempêtes. Un orage est même plus dangereux que sur terre car on y détecte une proportion plus importante de coups positifs. L'apparition d'effets couronne à la pointe des mâts (appelé ici feux de Saint-Elme par les marins, il s'agit exactement du même phénomène qu'en montagne car il n'y a pas de « matelas protecteur » d'ions positifs au-dessus de l'eau donc le champ électrique est très important, (Cf. chapitre 2). Sur un bateau ou une barque dépourvus de mât il n'y a pas de protection vis-à-vis de la foudre, le premier réflexe sera donc de rester couché au fond pour les passagers et de regagner rapidement le rivage. Sur un bateau équipé d'un mât la question est de savoir si celui-ci constitue ou pas un système de protection, à type de paratonnerre ou cage de Faraday imparfaite (à mailles lâches). Un voilier moderne ne pose pas de problème, généralement constitué d'un mât, d'un haubanage et d'une coque, tous trois métalliques : la sécurité sera parfaitement assurée à l'intérieur de la coque. Si la coque est en matière synthétique ou en bois, il faudra vérifier qu'il existe bien une liaison conductrice entre le gréement et le lest métallique des voiliers en contact avec l'eau. Sinon, il sera nécessaire de fixer une ou deux chaînes au pied du mât, l'autre extrémité plongeant dans l'eau. On constitue ainsi un véritable paratonnerre, les personnes devront se placer le plus bas possible, et éloignées des chaînes (4). On peut également se servir des filières de sécurité (destinées à prévenir les chutes de personnes à l'eau, désormais obligatoire) pour former une cage de Faraday à mailles lâches en les connectant aux haubans métalliques et à une « mise à l'eau » (4). Pour les anciens voiliers ayant coques et mâts en bois, il faudra installer un conducteur de descente jusqu'à l'eau exactement comme un paratonnerre classique (les normes françaises recommandent soit un conducteur rond de 8 mm, soit un ruban plat de 30 x 2 mm) (4).

CHAPITRE 12 : La recherche et l'enseignement

A) Un domaine de recherche en développement

L'étude spécifique des accidents médicaux dus à la foudre est une conception récente. Le premier article scientifique est publié en 1976 par Golde (physicien) et Lee (médecin)⁵. Il rassemble les travaux de tous les pionniers de l'électro-pathologie et des physiciens qui ont travaillé sur les mécanismes d'action de la foudre (6). Aux Etats-Unis deux météorologues, Ron Holle et Raul Lopez, ont commencé à travailler avec des médecins, Michael Cherington puis Mary-Ann Cooper, dans les années 1980 (83). Par ailleurs, c'est en 1989, en Caroline du Nord, qu'a été créée la première association de soutien aux victimes d'accidents électrique ou de foudroiement : Lightning Strike & Electrical Shock Survivors International (LSESSI). En France la première thèse de médecine consacrée à cette thématique a été soutenue en 1975 par Jacky Laguerre, actuellement médecin de la consultation dédiée aux foudroyés à Toulouse. Elysa-beth Gourbière, médecin attachée à EDF, et Claude Gary, ingénieur-physicien et conseiller scientifique honoraire à EDF, sont à l'initiative du congrès « Foudre et montagne » en 1994 à Chamonix, premier congrès français, et mondial, où l'électro-pathologie de la foudre est considérée comme une spécialité. Le terme de kéraunopathologie apparaît l'année suivante et, dès 1996, né le projet de kéraunovigilance baptisé « Foudroyés en France » (16).

La recherche en kéraunopathologie a pour but d'améliorer la connaissance de cette pathologie (domaines de l'épidémiologie, de la physiopathologie, de la clinique, de l'exploration des courants de foudre), sa prise en charge médico-sociale à long terme (domaine de la neuropsychologie notamment), et sa prévention (domaines de la météorologie, de la physique des plasmas). Elle nécessite forcément une approche multidisciplinaire, ce qui en fait un domaine d'étude certes passionnant, mais complexe. La recherche sur les blessures par la foudre est également difficile car il n'existe aucune réglementation de santé publique qui exige la déclaration de ces atteintes, ni en France ni dans les autres pays. De plus, pour chaque cas,

⁵ Golde RH, Lee WR. Death by lightning. Proc. IEE 1976 ; 123 (10R) : 1163-90.

les manifestations cliniques sont difficiles à analyser car il manque souvent le bilan initial complet (clinique et paraclinique) pour pouvoir évaluer les complications ultérieures, et on ne connaît généralement pas l'état psychologique antérieur (25) (17). Pour E. Gourbière, les études restent tout à fait possibles si les rapports de cas de foudroiement répondent à 3 critères.

1) Un cas doit répondre à la définition du foudroiement : passage de courant électrique à travers le corps. Les traumatisés victimes d'inondations, d'incendies et autres catastrophes ont souvent été considérés à tort comme foudroyés.

2) La description des symptômes doit être accompagnée des données techniques et météorologiques relatives à ce cas. Les symptômes ne permettent pas eux seuls de discuter un foudroiement, la confrontation des données cliniques et physiques est primordiale en kéraunopathologie.

3) Il ne doit pas y avoir que des cas exceptionnels, de par leur gravité ou leur circonstance. Les cas « bénins » ou de gravité intermédiaire font encore grand défaut à la kéraunopathologie.

L'absence d'enseignement de la kéraunopathologie aux médecins et aux secouristes, dont nous parlerons à la fin du chapitre, contribue également à méconnaître de nombreux dossiers. En effet beaucoup de patients pourraient être adressés par leurs médecins (qui souvent ne savent pas à qui les adresser) au réseau de prise en charge des foudroyés en France, et alimenter ainsi la source d'enseignement. Nous pensons que ce cercle vicieux pourrait être surmonté si une information sommaire était dispensée à l'ensemble des soignants. Une fois les médecins informés des séquelles possibles et des moyens existants de suivi, les patients pourraient être adressés beaucoup plus facilement en consultation spécialisée.

B) Les priorités actuellement en kéraunopathologie

Il reste encore beaucoup à apprendre, la connaissance sur le foudroiement des personnes restant à l'heure actuelle partielle. M. A. Cooper et E. Gourbière s'accordent sur les axes de recherche à prioriser, au nombre de trois.

La physiopathologie du foudroiement est loin d'être bien comprise. Ce que nous savons résulte de modélisations faites par les experts physiciens et de l'expérimentation animale, mais l'étude des décharges électriques massives de si courte durée, et de leurs effets sur le corps

humain, n'est pas bien avancée. La foudre est un phénomène de « courant » plutôt qu'un phénomène de « tension » (6) (17). La durée du passage du courant est incertaine (1 à quelques dizaines de microsecondes pour Andrews, 100 microsecondes à 1 seconde pour la Commission Electrotechnique Internationale) (6). Notre connaissance des effets sur les tissus d'un courant si bref, en dessous de la milliseconde, est très limitée, et il n'est pas évident que les résultats pour des durées plus longues soit immédiatement transférables (17). Le fait qu'environ 90 % des victimes survivent à un traumatisme aussi violent est aussi un mystère. La survie est-elle déterminée par les caractéristiques du courant de foudre, des autres conditions météorologiques, ou encore de l'activité et de la position de la victime au moment de l'impact ? Nous rappelons ici que de nombreux conseils d'attitude à adopter sont donnés sans aucune justification statistique. La gravité des atteintes peut varier considérablement avec le mode de foudroiement (direct, éclair latéral, contact, ou tension de pas), mais l'effet de plusieurs arcs en retour (coups subséquents) est très mal connu (6) (17).

Le suivi des foudroyés souffrants de séquelles neuropsychiques est un domaine de recherche actif, en particulier le syndrome de stress post-traumatique. Il semblerait qu'il existe une communauté de symptômes, et les tests suggèrent constamment une origine organique aux déficits. Pourtant son origine reste peu claire. Les troubles anxieux sont souvent très marqués, et la libération de neurotransmetteurs hormonaux peut jouer un rôle (dysrégulation sympathique). Enfin, il est possible que l'ensemble de symptômes visibles représente une « voie finale commune » d'une lésion cérébrale due à de nombreuses étiologies (17). Les efforts s'orientent vers la quête d'un modèle théorique explicatif de ces symptômes neuropsychologiques, et vers la mise en place de recommandations pour l'évaluation et le traitement de ces personnes (35). Très récemment en 2014, à Toulouse, Audrey Joubin a étudié le psychotraumatisme chez les personnes foudroyées, au sein de l'équipe de Christian Virenque, Philippe Birmes et Jacky Laguerre. Dans une série de 28 cas, elle retrouve des symptômes péritraumatiques très fréquents (dans les minutes ou heures qui suivent le traumatisme). Ces symptômes sont durables et retrouvés à la consultation multidisciplinaire dans 40 % des cas, dont un syndrome de stress post traumatique dans 25 % des cas (84).

Le troisième axe de recherche est la protection des personnes. Il soulève moins de questions fondamentales car il dépend surtout des connaissances de la physique de l'éclair et des différents modes de foudroiement. Le problème est ici principalement l'appropriation des conseils de sécurité par le public. Une étude épidémiologique comprenant systématiquement

une analyse des conditions météorologiques et de la position des éclairs permettrait d'étayer le principe d'une zone à risque « large ».

C) Recherche en phénoménologie de la foudre et protection des bâtiments

La kéraunopathologie est de très près liée à la connaissance scientifique de la foudre, cette dernière ayant elle aussi connu un essor récent. Beaucoup d'incertitudes demeurent, les théories avancées dans la première partie pour expliquer l'électrisation d'un nuage et la formation des éclairs sont celles couramment admises, mais sont difficilement vérifiables. La recherche s'est accélérée car des analogies sont possibles avec les grandes étincelles en laboratoire, et la France occupe une très bonne place sur le plan international.

Dans le domaine de la protection, les spécialistes du monde entier considèrent qu'il n'y a pas eu de véritables progrès réalisés depuis la tige de Benjamin Franklin de 1750, mis à part l'invention du paratonnerre à cage maillée par Louis Melsens (1814-1886) (3). Celui-ci s'était directement inspiré de la cage de Faraday. A l'origine il avait muni ce dispositif de multiples petites pointes (dans l'idée de « décharger » les nuages), mais elles ne sont pas forcément utilisées aujourd'hui (en dehors des protubérances à protéger : cheminées, antennes, ...) car elles tendent à uniformiser le champ électrique (80). Le paratonnerre à cage maillé est actuellement la solution la plus efficace. Il rentre dans les normes de protection des installations sensibles (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement ICPE, c'est-à-dire les usines chimiques et pétrochimiques) et est disposé selon le niveau de sécurité calculé d'après une Analyse Risque Foudre (ARF). Le niveau I est le niveau de sécurité le plus haut et doit pouvoir capter des éclairs de faible intensité.

Niveau de protection issu de l'ARF	Courant de crête minimal (kA)	Rayon de la sphère fictive (m)	Taille des mailles (m)
I	3	20	5
II	5	30	10
III	10	45	15
IV	16	60	20

Figure 29 : tableau des tailles de maille selon le niveau de protection exigé par les normes internationales (source INERIS).

La France a une spécificité par rapport à tous les autres pays : elle défend le système de paratonnerre à dispositif d'amorçage, alors que de très nombreux spécialistes ont pris clairement position contre ce système. Le principe consiste à former un traceur plus rapidement qu'une tige simple, donc d'être le premier à capter la foudre et ainsi augmenter la zone de capture. Cette précocité à l'amorçage a été montrée en laboratoire, mais en pratique il est impossible de prouver que leur efficacité est supérieure à celle d'une simple tige Franklin dans des conditions réelles. En 2010 une étude suédoise aurait même démontré une absence de supériorité (85). Ce débat reste l'affaire de spécialistes, nous ne nous y engageons pas plus, mais il ne doit pas cacher le véritable enjeu pour la protection des personnes qui est d'éviter au maximum le danger. Pour Christian Bouquegneau, attendre d'un paratonnerre à tige, quel qu'il soit, une protection parfaite reste de toute façon illusoire (13).

De manière plus expérimentale, en Australie, M. Darveniza a breveté un modèle de cage maillée portable, constituée de 3 pieds télescopiques formant une pyramide et transportable dans un sac de golf une fois pliée (17).

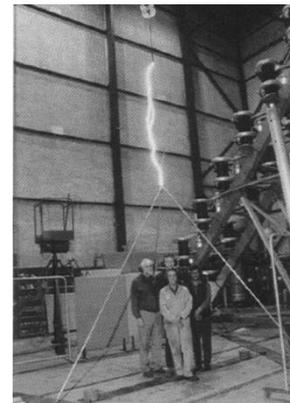


Figure 30 : cage maillée pliable et transportable

D) Enseignement et documentation

L'enseignement des pathologies liées à la foudre, à notre connaissance, est complètement absente des cours de la faculté de médecine ou des manuels de secourisme en France. Une exception était le cours d'E. Gourbière, intitulé « foudre et pathologies liées à la foudre », et dispensé dans le cadre d'un diplôme universitaire de médecine et de secours en montagne. Mais aujourd'hui nous n'en avons pas trouvé d'équivalent. Pourtant un minimum d'informations suffirait à faire connaître le foudroiement comme une pathologie à part entière, (brûlures différentes d'un accident électrique, suivi nécessaire, séquelles particulières, possibilité d'une prévention, etc.). Sans cela, il est difficile d'imaginer qu'un domaine d'étude spécifique à la foudre, ainsi que des données consultables, existent.

Le deuxième problème est l'accès à ces informations, dès lors qu'on veuille les chercher. Les multiples données sur la foudre et le foudroiement sont sectorisées, dispersées dans des organismes très différents. Les travaux de synthèse sont rares. Par ailleurs, il convient de rester

vigilant car, la recherche scientifique sur le sujet étant difficile, beaucoup de données empiriques circulent encore, ainsi qu'une multitude d'informations sur le côté grandiose de la foudre (chiffres, vidéos), ou de situations extraordinaires : foudroiements de groupes, personnes frappées plusieurs fois, effets bénéfiques du foudroiement (descriptions retrouvées partout dans le monde de personnes foudroyées devenus magnétiseur, ou meilleur à l'école par exemple). Les informations consensuelles traitant de la prévention ou de la prise en charge sont peu nombreuses.

CHAPITRE 13 : En pratique, envisager des solutions pour améliorer la prise en charge et la protection des personnes

A) L'avenir : vers une politique nationale de protection des personnes ?

Nous avons déjà rapidement évoqué le problème de l'enjeu que représente le foudroiement des personnes (cf. chapitre 9, épidémiologie). Doit-on le considérer comme un problème de santé publique ? Doit-on considérer la foudre comme une catastrophe naturelle ? Elle fait partie des événements naturels dommageables (86), mais elle ne rentre pas dans le cadre des 11 risques naturels majeurs tel qu'ils sont définis en France ⁶ (et que sont : les risques d'avalanche, de feux de forêt, d'inondations, de canicule, de grand froid, de tempête, de cyclone, de tsunami, de mouvement de terrain, de séisme, et d'éruption volcanique). La foudre n'est donc pas considérée comme telle par les différents organismes de prévention des risques naturels, et ne fait pas l'objet d'une réflexion commune sur la possibilité d'une prévention efficace (87) (88) (89) (90). Même si la foudre frappe les esprits au coup-par-coup, elle reste un phénomène fréquent et disparate, beaucoup moins marquant pour une population que quelques grands événements catastrophiques susceptibles de mettre en péril une collectivité : des hommes mais aussi des infrastructures et l'économie d'un territoire.

Pourtant, à y regarder de plus près, la frontière est étroite entre ces événements et la foudre sur notre territoire. L'incidence annuelle des décès dus à la foudre est comparable à celle engendrée par certains risques naturels majeurs tels que les avalanches (autour de 30) (91), les inondations (incidence annuelle des décès de 12 entre 1999 et 2011) (92). Le montant des dégâts matériels est également comparable. Une étude d'AXA Assurances France conclue que 50 % des entreprises cessent leur activité dans les 5 ans suivant un foudroiement (par atteinte des infrastructures ou suite à un chômage temporaire) (93). En Suisse les remboursements des assurances pour les dégâts dus à la foudre correspondent chaque année à plusieurs millions d'euros (et jusqu'à 2 milliards d'euros certaines années) (94). Aux Etats-Unis ce coût s'élèverait

⁶ Un risque majeur est défini comme « la confrontation d'un aléa avec un enjeu (humain, environnemental, patrimonial, économique), c'est un événement d'une occurrence faible et d'une gravité élevée (nombreuses victimes, dommages importants) » (87) (88).

à 5 milliards de dollars pour l'année 2008 (93). Ces chiffres importants s'expliquent par la fréquence et l'ampleur des accidents industriels (75), la foudre provoquant notamment la moitié des incendies. De plus, la foudre peut être à l'origine d'un risque naturel majeur (feux de forêt) et d'un risque industriel majeur (atteinte des installations classées pour la protection de l'environnement : les industries chimiques et pétrochimiques) et cela dans une proportion non négligeable.

Deux organismes en France ont très récemment souligné la difficulté de classer les risques naturels⁷. Les risques industriels rentrent très facilement dans des catégories selon leur intensité. En comparaison, des spécialistes tentent de hiérarchiser les événements naturels selon le même critère d'intensité, mais cela ne reflète pas la perception de cet événement : un événement de faible ampleur peut être traumatisant ou entraîner de lourdes conséquences. Ces organismes considèrent qu'« une classification sur les conséquences, humaines et économiques serait un bon complément pour la prévention des risques et un outil d'information pour les collectivités » (95) (96).

Dans ce travail, nous nous sommes beaucoup référés aux actions menées aux Etats-Unis, où il existe une véritable politique de prévention et d'aide aux victimes. Cependant chaque politique est propre à son pays, car elle dépend des caractéristiques d'un territoire et de sa population, et ne peut être comparée à un autre pays. Aux Etats-Unis trois grandes raisons peuvent expliquer l'émergence d'une politique de réduction des risques concernant le foudroiement des personnes. Tout d'abord l'activité orageuse est importante dans certaines régions d'Amérique du Nord. Le terrain culturel est également différent, avec des valeurs sécuritaires et de responsabilité importantes. Enfin, une réflexion globale a pu être menée au sein d'un « groupe sécurité foudre » (Lightning Safety Group, LSG). Ce groupe est né uniquement grâce à la motivation d'un nombre restreint de personnes, médecins, scientifiques et victimes, et rassemble tous les acteurs travaillant autour de la foudre (12 organismes au total). Il a pu donner des directives dès 1998, reprises par les pouvoirs publics et enseignées dans des manuels de médecine comme le *Wilderness medicine* de P. Auerbach (83).

Une question récente est le problème de la responsabilité. Ce problème est soulevé depuis que la détection d'orage et l'anticipation du danger sont possibles. Un accompagnateur de groupe en montagne, un propriétaire de camping ou de parc de loisirs, une fédération de

⁷ L'Association Française pour la Prévention des Catastrophes Naturelles (AFPCN) et le Centre d'Information pour la Prévention des Risques Majeurs (CYPRES) ont lancé en juin 2013 un questionnaire de « retour d'expérience des petits événements naturels » auprès des collectivités.

sport, un directeur d'entreprise pourront-ils être tenus responsables d'avoir été surpris par le danger et d'avoir mis une personne en danger ? La réponse est non, elle reste une responsabilité individuelle. La sécurité de chacun dépend de son propre comportement, on ne peut se soustraire à l'obligation de rester attentif et de réagir avec bon sens face à une situation. Météo-France assure un rôle de service public en proposant une carte de vigilance par département : il s'agit d'une information nationale car elle ne peut avertir chaque personne. Bien qu'étant sa filiale, Météorage est une société commerciale qui vend une information individuelle, plus précise et instantanée. C'est un complément d'information pouvant être financièrement intéressant pour une industrie, ou pouvant représenter un gage de responsabilité morale pour un responsable de groupe (loisirs, montagne, etc.). Par exemple en France, suite à l'impulsion d'une fédération de campings, depuis 2008 environ 10 % des campings se sont abonnés à un système d'alerte foudre en temps réel.

Enfin, dans une politique globale de prévention, on peut se poser la question d'une implication financière des assurances dans la prévention, comme c'est le cas par exemple pour des serrures, des stages de conduite, des extincteurs, etc. On ne peut s'empêcher de penser que l'année prochaine, en 2015, les détecteurs d'incendies deviendront obligatoires dans tous les logements, alors qu'un pourcentage non négligeable des départs de feux domestiques est causé par la foudre.

B) Une nécessaire coordination

La recherche en kéraunopathologie s'est développée récemment, et les études commencent à mettre en évidence les lacunes en ce qui concerne la prise en charge des personnes foudroyées, et la prévention de ces accidents. En l'absence de prise de position des pouvoirs publics et des organismes de santé publique, qui porte cette problématique ? Il n'y a guère de spécialiste de la foudre. Beaucoup de personnes travaillent autour de cette question, plus ou moins dans un cadre multidisciplinaire, mais chacun dans un domaine bien spécifique.

E. Gourbière avait donc imaginé un projet de « centre national d'information sur la foudre », soutenu par le ministère de l'Ecologie et du Développement durable, dont le but était de réunir toutes les informations concernant la foudre et de les interpréter pour les rendre disponibles à tout public. Pour cela, l'idée était de former un groupe d'experts de chaque domaine : agriculture, industrie, ingénierie, physique de la foudre, météorologie, médecine,

médecine vétérinaire, assurances, sécurité civile, prévention des risques, etc. Une telle organisation permettrait de réfléchir de manière consensuelle au contenu d'une information de prévention qui soit la plus claire possible et efficace.

Le suivi spécialisé des personnes foudroyées et la recherche épidémiologique soulèvent tous deux le problème du recrutement dans le réseau de consultations spécialisées de foudroyées. Météo France envisage un partenariat avec ce réseau, sous la forme d'une page internet commune sur son site. Un pan sanitaire permettrait au réseau de consultations spécialisées d'améliorer sa visibilité et de rendre accessibles au plus grand nombre des informations de prévention. Et il serait intéressant de croiser les recueils de cas de foudroiement avec les détections d'orage, d'une part pour le réseau afin d'intégrer les conditions météorologiques dans les critères d'étude, et d'autre part pour Météo France afin d'avoir un retour de la précision de ces détections. Un tel partenariat existe déjà avec l'Institut National de Veille Sanitaire (INVS) pour les changements climatiques (canicules et grands froids). Aux Etats-Unis les études sont possibles car une immense base de données existe, avec toutes les circonstances. Elle a été permise en partie grâce au site internet commun au service national météorologique et au programme de recherche de M. A. Cooper⁸.

La foudre étant un phénomène complexe, une coordination entre les différents acteurs est donc absolument nécessaire pour savoir quelle réponse apporter aux victimes (prise en charge, soutien psychologique, explications), aux médecins (patients présentant de multiples symptômes résistants au traitement) et au public (prévention).

C) Sensibilisation au risque

Les messages de prévention du foudroiement ne peuvent avoir aucun impact sans une réelle perception du risque. Le risque de foudroiement est un risque clairement sous-estimé. On sait qu'il existe, et nous y sommes d'ailleurs confrontés régulièrement. On se doute que les conséquences sont graves. Pour autant, l'orage ne fait pas si peur du moment qu'il ne se trouve pas juste au-dessus de nous. Bien que des informations soient disponibles, dans les médias ou ailleurs, plusieurs raisons peuvent expliquer que la question de la foudre soit laissée de côté.

⁸ <http://www.lightningsafety.noaa.gov/>

○ Une méconnaissance de la fréquence de cet évènement. Communément on pense que le foudroiement reste exceptionnel. Cette rareté explique certainement que l'on puisse se sentir hors de danger. Pourtant, on estime qu'au minimum une centaine de personnes sont foudroyées chaque année en France. C'est par exemple le même chiffre que celui des victimes d'avalanches. Et l'estimation de ce chiffre peut même être triplée selon les années.

○ Une méconnaissance de la foudre. Il paraît plus dangereux de se trouver « au cœur » de l'orage, et lorsque celui-ci s'éloigne de nous, tout risque semble alors écarté. Cette constatation est pourtant fautive car l'éclair peut parcourir une très longue distance et son trajet est essentiellement aléatoire.

○ Une méconnaissance de l'efficacité relative des conseils de prévention (ne pas se tenir sous un arbre peut être considéré à tort comme sécurisant).

Il faudra donc tenir compte des conceptions collectives et croyances de chacun, parfois très ancrées, pour amener à une représentation claire de l'orage et de la foudre. Il serait alors utile de réaliser de véritables « prises de conscience » qui supplanteraient les idées reçues, afin de permettre une prévention plus efficace.

- Prise de conscience que les accidents ne sont pas si rares, notamment au début et à la fin de l'orage.
- Prise de conscience que l'orage est dangereux même quand on ne l'imagine pas : dès qu'on entend le tonnerre et durant ½ heure après le dernier coup.
- Prise de conscience qu'aucun endroit à l'extérieur n'est sûr.

Accepter ce risque est le seul moyen pour pouvoir ensuite s'approprier les messages de prévention, c'est-à-dire les comprendre et les mettre en pratique.

Ce travail d'amélioration des représentations et de sensibilisation est peut-être bien le point le plus important d'une prévention efficace. Par contre il n'est pas évident à réaliser. Parmi les clients de Météorage, qui ne compte que de très grandes entreprises, 86 % se sont abonnées car elles avaient déjà été confrontées à un accident, et donc sensibilisées. A l'inverse, beaucoup de grandes sociétés ne s'abonnent pas, estimant que le risque est trop faible. Les spécialistes constatent souvent une sensibilisation importante après un accident, mais ce sont souvent des réactions émotionnelles ponctuelles et la mobilisation retombe rapidement. Un autre exemple caricatural de la nécessité et de la difficulté de cette sensibilisation est l'effort mené en Afrique du Sud par l'université de Witwatersrand : un projet né en 2009 vise à intégrer les visions du

monde du peuple Bochiman dans les stratégies de protection contre la foudre mises en œuvre par les scientifiques (3).

Selon notre point de vue, un travail de sensibilisation efficace devrait porter sur 2 axes principaux :

- diminuer l'**ambivalence** du rapport que nous entretenons avec la foudre.

L'ambivalence de l'homme pour ce phénomène météorologique réside dans le fait qu'elle est à la fois majestueuse et dévastatrice, électrique et mystérieuse, extraordinaire et banale, attirante et redoutée. Face à l'inconnu il est difficile de sortir de l'imaginaire, nos fausses croyances sont tenaces, et le côté grandiose a tendance à camoufler l'aspect dangereux de la foudre. Cependant il ne s'agit pas de remplacer la fascination par la peur, mais d'améliorer la représentation de la foudre, afin d'amener à une réelle perception du risque.

- diminuer le sentiment de **fatalité**, fortement présent dans le cas de la foudre. Il paraît difficile de s'intéresser à ce sujet si l'on reste dans ces convictions, à savoir l'impossibilité de se protéger d'un tel phénomène. La dimension aléatoire de la foudre augmente le sentiment de fatalité, puisque prédire où va tomber la foudre est rigoureusement impossible. Aussi, l'absence de maîtrise sur un phénomène météorologique, et notamment l'orage, renforce aussi l'idée de fatalité, de destinée tragique, contre laquelle on ne peut rien.

En pratique, cet effort de sensibilisation peut s'appuyer sur des images simples et sur une phrase équivalente au slogan de Bill Roeder : « Quand vous *entendez le tonnerre, rentrez vite !* » Il a déjà été repris au Canada et en Allemagne, avec des présentations pour enfants. Le message est ainsi rappelé facilement sur de nombreux supports, et en des lieux très divers.

Ce travail de sensibilisation peut être fait le plus efficacement en amont, dès l'école primaire. La question a été débattue lors du 20^e forum de L'Association Protection Foudre en 2013 : une action de sensibilisation aurait déjà été menée en France, mais sans succès. D'autres projets, faute de temps ou de moyens, attendent de voir le jour : l'édition d'une bande dessinée réalisée à l'initiative du Pr. Gérard Berger, un livre pour enfants imaginé par le Pr. Christian Virenque et Alex Hermant (chasseur d'orages). Par ailleurs, ce message de sensibilisation s'élargirait aux autres risques atmosphériques (tempête, grêle, inondations) et pourrait aider à comprendre les alertes météorologiques fournies par Météo France.

Aux Etats-Unis, Michael Utley, ancienne victime de la foudre, consacre à présent tout son temps à promouvoir la sensibilisation au risque foudre. Il a distribué dans les écoles

primaires plus de 100.000 magnets et autocollants avec le slogan « If the thunder roars, go indoors ! », ainsi que des jeux pour enfants. Par ailleurs, la NOAA organise chaque année début juin une semaine nationale de sensibilisation à la sécurité foudre (Lightning Safety Awareness Week).



Figure 31 :magnet distribué dans les écoles aux Etats-Unis

D) Réflexion sur le contenu d'un message de prévention

1. Appropriation des principes de prévention et de protection du risque

Nous rappelons les principes de prévention et de protection présentés plus haut (chapitre 11), classés ici en trois grandes familles :

- a) Les mesures passives :
 - paratonnerres, parafoudres.
- b) Les mesures pro-actives, avant l'exposition au danger :
 - anticiper la venue de l'orage (éviter certains horaires, prévisions météorologiques, abonnement suivi Météorage)
 - anticiper les endroits sûrs où nous pourrions nous réfugier en cas d'orage (quel endroit de la maison où l'on peut se tenir éloigné des conducteurs, laisser des voitures à proximité lors d'une activité en plein air, quel abri est suffisamment important en montagne...)

c) Les mesures ré-actives, lors de l'exposition au danger :

- s'éloigner
- aller dans un endroit sûr
- les attitudes à adopter en milieu isolé pour ne pas majorer le risque d'être foudroyé.

Avant même d'exposer des mesures préventives il convient de faire accepter le risque. Eviter de sous-estimer et de minimiser le danger est un premier point capital. Si les populations entendent et acceptent que le risque de foudroiement ne soit pas nul en cas d'orage, elles pourront dans un second temps s'appropriier les différentes mesures de prévention existantes. Rappelons que l'éclair peut frapper une cible au hasard alors que la cellule orageuse est encore à plusieurs kilomètres, et que les accidents humains ne sont pas rares. En randonnée en montagne, à la plage, à la pêche, dans un bois ou dans un chantier en plein air : il n'existe pas de lieu sûr à l'extérieur. A l'intérieur ou dans une voiture, beaucoup de précautions sont à prendre. La protection passive est un système fiable à l'intérieur d'un bâtiment, mais ne garantit pas une immunité à 100 %.

Ainsi, accepter le fait que le risque soit partout à l'extérieur permettra de ne pas avoir de faux espoirs, comme se sentir en sécurité en évitant les lieux surélevés, les arbres, ou en restant accroupi. C'est donc favoriser l'anticipation, et essayer de réfléchir à l'avance. On ne prend pas forcément intervenir des mesures anticipatoires pour des activités de courte durée : accepter le risque c'est donc également prendre des décisions rapidement (arrêter une activité, rebrousser chemin...) au lieu de perdre 5 ou 10 minutes à essayer d'estimer la distance qui nous sépare de l'orage (en comptant les secondes entre l'éclair et le tonnerre comme nous avons l'habitude de le faire). Ce laps de temps peut en fait être le moment le plus dangereux.

Sous cet angle, on s'aperçoit de l'ambiguïté de certains conseils, très connus et médiatisés dans la presse généraliste, expliquant « ce qu'il faut faire dans une situation dangereuse ». Ils ne sont pas faux, mais peuvent voiler le danger car faussement rassurants, donc modifier notre perception du risque.



Par exemple, quand on lit l'information « il ne faut pas se mettre sous un arbre », on peut comprendre de manière très logique que les arbres « attirent » la foudre, et donc que ce qui est dangereux est de rester sous l'arbre. En réalité, absolument toutes les situations sont dangereuses, seulement certaines sont *très* dangereuses. Donc dans tous les cas, la sécurité n'est pas assurée pour continuer une balade, il vaut mieux partir.

2. Eviter l'exposition au danger

Depuis plusieurs années la question se pose de savoir quels conseils fournir et quels conseils ne pas fournir. John Jensenius, spécialiste de la sécurité foudre au National Weather Service, a pris position en juin 2014. Il propose de concentrer l'information uniquement sur « que faire pour ne pas se retrouver en situation dangereuse », et « si vous vous trouvez dans une situation dangereuse, comment quitter cette situation ». Pour **éviter l'exposition au danger**, on peut donner les conseils suivants :

- planifiez vos activités à l'avance (avant de partir : surveiller les prévisions météorologiques, et prévoir les abris sûrs),
- surveillez les conditions météorologiques,
- si vous entendez le tonnerre, agissez rapidement : éloignez-vous ou rejoignez un endroit sûr.

3. Y a-t-il quelque chose à faire en situation exposée au danger ?

La réponse est : il faut éviter les endroits à haut risque. Mais, encore une fois, pour ne pas être faussement rassurant, cette information doit absolument être remise dans son contexte :

- 1) En extérieur : aucun lieu n'est sûr, aucune position ne nous met en sécurité.

- 2) Il y a seulement des situations à haut risque à éviter :
- Ne vous mettez pas au-dessus ou contre un objet élevé
 - Evitez les grandes zones dégagées
 - Ne vous abritez pas sous un arbre isolé
 - Dans un groupe, éloignez-vous les uns des autres.

Apporter d'autres informations peut être source de confusion. N'oublions pas que ces conseils sont théoriques, et que leur application est loin d'être évidente sur le terrain. D'autres mesures existent dans des situations plus précises (mer, montagne) et peuvent être présentées à un public particulier, voir à ce sujet le chapitre 11.

En ce qui concerne la position de dernier recours (se tenir accroupi les mains sur les oreilles quand l'orage est très actif juste au-dessus de nous), le NWS la déconseille officiellement à présent car elle ne fait très probablement aucune différence. Il conseille plutôt de courir aussi vite que possible pour rejoindre un endroit sûr. Certes, cela ne protège pas d'une tension de pas, mais peut protéger d'un coup de foudre ultérieur. **La foudre frappe au hasard, il n'y donc pas de réponse claire mais un choix à faire entre deux probabilités d'atteinte.**

4. En résumé

Anticiper, évaluer rapidement le danger pour s'éloigner ou trouver un abri sûr : ce seront donc là les mesures fondamentales d'une prévention efficace, en évitant l'exposition au danger.

Dans une zone exposée au danger, tous les conseils pour éviter les situations à haut risque sont utiles, car on remarque que les accidents surviennent fréquemment en situations très dangereuses. Mais on peut également tout aussi souvent remarquer que ces situations sont l'aboutissement d'une accumulation d'erreurs : une sortie en montagne ou une rencontre sportive organisée sans consultation des prévisions météorologiques, l'arrivée de prémices orageuses n'entraînant pas une annulation de l'activité, hésitation entre plusieurs abris : il est beaucoup plus facile et beaucoup plus efficace d'agir en amont à ces niveaux-là.

E) Proposition de diffusion d'un message de prévention

1. Pour les particuliers

La sécurité d'un individu isolé dépend de sa propre responsabilité, il n'y a que lui qui puisse décider de l'attitude à adopter en fonction des conditions météorologiques. Un message destiné au grand public devra être simple, et prioriser la sensibilisation au risque. Quand vous entendez la foudre il y a un risque et aucun lieu extérieur n'est sûr : le reste découle du bon sens. En voici un exemple d'information :



Figure 32 : une affiche de prévention du danger de la foudre aux Etats-Unis basée sur la sensibilisation au risque. Source www.lightningsafety.noaa.gov.

Cette information concise peut être relayée n'importe où, et peut même entrer dans le cadre d'une courte consultation de médecin générale. En montagne, des panneaux peuvent indiquer quels abris constituent des lieux plus sûrs que d'autres.

Une communication brève ne pourra entrer dans les détails de toutes les attitudes à adopter en extérieur. De plus, fournir de manière brute des astuces pour ne pas majorer le risque de foudroiement (ne pas rester sous un arbre, jambes écartées) est inutile (on ne distingue plus où est la priorité pour éviter le danger) et dangereux (car faussement rassurant). C'est l'exemple ci-dessous :



Figure 33 : exemple d'affiche de prévention trouvé sur internet. Source LeFigaro.fr.

Par ailleurs, la protection d'une habitation domestique peut poser question : est-ce utile d'installer un paratonnerre/parafoudre, lequel des deux d'ailleurs, combien cela coûte, est-ce vraiment efficace ? Il est très difficile d'avoir une information objective car nous sommes car tous les spécialistes sont des sociétés commerciales, qui offrent plusieurs produits. Une excellent source est un site internet (en anglais) indépendant, qui fournit des informations objectives pour discuter du risque et de la pertinence d'installer un paratonnerre (www.lightningsafety.com) (17). La seule chose que l'on peut dire est que, plus que la technique employée, c'est la qualité de l'installation qui prime. Le système le plus efficace reste le paratonnerre à cage maillé ; c'est également le système le plus onéreux. Louis Melsens, à son époque, conseillait déjà de l'installer dès la construction de la maison pour en diminuer le coût d'installation, comme certaines assurances aujourd'hui (3).

2. Pour l'alpinisme et la randonnée en montagne

La montagne est un loisir courant actuellement, et cette grande fréquentation peut engendrer un sentiment trompeur de sécurité (82). Les orages sont fréquents et violents, et les abris sécurisants sont rares. Les adeptes de la montagne sont généralement sensibilisés au risque de la foudre, donc il faudra axer le message de prévention au maximum sur l'anticipation et la rapidité de prise de décision :

- Les prévisions Météo-France donnent un bulletin montagne pour chaque massif, réactualisé 3 fois par jour (et disponible 24h/24 par téléphone en composant le 3250).
- Toute activité est à proscrire l'après-midi à partir de 14h.
- Il faut surveiller le ciel et être attentif au moindre signe : brusque levée d'un vent froid, assombrissement au loin, grondement de tonnerre sourd même très lointain/éloigné. La météorologie est susceptible de changer très rapidement, en quelques dizaines de minutes. Au moindre doute, la soudaine montée d'un altimètre peut nous mettre en alerte même si le ciel est dégagé au-dessus de nous.
- Lorsqu'on est surpris par un orage violent, ou quand le risque est grand (bruit d'abeille, effluves bleutés à la pointe d'un piolet) la priorité est de descendre d'altitude même s'il y a un danger d'atteinte par tensions de pas. Il est important que cette priorité soit clairement établie avant le départ, notamment s'il s'agit d'un groupe, pour ne pas céder à la panique lors d'un orage violent.

Les mesures à prendre pour ne pas augmenter le risque d'atteinte, dans les cas où la descente n'est pas possible, peuvent être précisées sur des fiches mais surtout expliquées pour pouvoir être appliquées sur le terrain. Cela pourrait s'intégrer à une formation plus générale au sein des fédérations sportives, par exemple.

3. Les encadrements de groupe

Il faut distinguer ici les organismes professionnels (camping, guide de montagne, moniteur de sport en plein air, chef de chantier...) et les organismes bénévoles (éducateurs sportifs, manifestations culturelles...). Les objectifs d'un message de prévention seront différents.

Contrairement aux professionnels exerçant une activité extérieure quotidienne, les éducateurs sportifs bénévoles sont peu sensibilisés au problème de la foudre. Nous pouvons constater en France une résistance à mener à bien une véritable politique de prévention, en dépit d'une information claire sur les moyens de détection existant. Cela est dû probablement à une sous-estimation du danger. Aux Etats-Unis la même difficulté s'est présentée, et a abouti à un programme spécifique de sensibilisation des fédérations sportives.

Pour un encadrement de groupe professionnel et non occasionnel, une fiche détaillée pourra expliquer les moyens efficaces de prévision de l'orage, et donner un ordre de priorités :

- Programmer les activités à l'avance :
 - Prévisions météorologiques, alertes Météo-France, abonnement Météorage
 - Horaires de l'après-midi à éviter (voire à proscrire en montagne)
 - Prévoir à l'avance une solution de repli.

- Lorsque le risque est présent :
 - Dès que le tonnerre gronde : agir rapidement
 - S'éloigner suffisamment
 - Ou se réfugier dans endroit sûr
 - Lever l'alerte 30 minutes après le dernier coup de tonnerre

Une information est à donner autant aux professionnels qu'aux bénévoles quant à la prise en charge immédiate d'une personne foudroyée. La conduite à tenir n'est pas forcément évidente si on pense qu'on ne peut pas toucher la victime, ou si on pense qu'il n'y a plus rien à faire puisqu'elle a été foudroyée.

- Si une personne est touchée par la foudre et ne respire plus
 - On peut la toucher
 - Il faut débiter immédiatement un massage cardiaque
 - Et appeler le numéro d'urgence (15)

4. Pour les grands rassemblements humains

Pour une grande rencontre sportive, une manifestation culturelle très importante, les mesures de prévention ne diffèrent pas de ce que nous avons expliqué jusqu'à présent. Deux précisions toutefois (17) :

❖ L'enjeu d'une rencontre ou d'une manifestation peut être grand et la pression forte pour ne pas l'arrêter ou pour la reprendre précocement. Il faut donc prévoir à l'avance :

- le critère précis qui fera arrêter ou reprendre une rencontre. Par exemple aux Etats-Unis, pour ne pas être trop sécuritaire, le critère retenu est un orage à moins de 6,2 miles (10 km) exactement.
- La personne qui décidera elle-seule l'arrêt de la rencontre.
- Un plan d'évacuation du lieu (stade ou autre lieu non-conventionnel).

❖ Il est possible de prévoir une protection pour un grand nombre de personnes

- Des paratonnerres à fil tendu peuvent être camouflés dans des banderoles publicitaires
- L'ordre peut être donné de regagner les cars et les voitures

F) Amélioration de la prise en charge des personnes foudroyées

Le médecin généraliste est un maillon essentiel de la prise en charge des personnes foudroyées. Il est souvent au premier plan en situation d'urgence sur le lieu de l'accident, et parfois même des personnes atteintes par la foudre consultent leur médecin traitant plusieurs jours après l'accident, lorsqu'elles constatent un déficit en usant de fonctions mentales fines (17). Les symptômes multi-systémiques n'orientent pas le patient vers un spécialiste en particulier, et le médecin est souvent démuni face à des symptômes dont il ne comprend pas bien l'explication. En effet, il n'y a pas de corrélation clinique entre la sévérité de l'atteinte et le retentissement de séquelles ultérieures : un médecin non averti imputera difficilement des troubles cognitifs ayant un retentissement majeur dans la vie quotidienne à une perte de connaissance, par exemple. D'autant plus si le patient a une amnésie de l'épisode, et qu'il ne comprend pas lui-même l'origine de ses troubles. L'absence de séquelles somatiques visibles participe également à tromper le regard des soignants et des proches sur l'importance du

traumatisme initial. Cette incompréhension est d'autant plus mal vécue que ces personnes psychotraumatisées ont souvent un sentiment d'insécurité. Dans son article «Les médecins maîtrisent-ils la foudre ? », E. Gourbière estime qu'il y a également une grande ambivalence des médecins vis-à-vis des foudroyés (6). On sait que la foudre est un choc immense, et pourtant de multiples symptômes ne sont pas considérés.

Pour pallier à ce problème, les médecins devraient bénéficier d'une véritable information :

- sur la physiopathologie du foudroiement : un foudroyé peut subir une électrisation par courant de foudre et ses effets de Blast extrêmement intenses sans être complètement carbonisé (arc de contournement, durée très brève). Ce qui signifie 2 choses.
 - On peut croire le patient lorsqu'il affirme s'être fait foudroyé.
 - On doit penser à ce diagnostic devant un malaise brutal dans des circonstances particulières chez un sujet jeune, ou devant un changement neurocognitif soudain.
- Sur les principales présentations cliniques possibles à la prise en charge en urgence.
- Sur les séquelles immédiates ou retardées possibles.

Une autre ressource possible est de prendre avis auprès du réseau des consultations de foudroyés, mais il est peu connu. Peut-on espérer une meilleure visibilité de ce réseau si le projet de partenariat avec un service public comme Météo France aboutit ? Cela permettrait de tisser un lien médecin généraliste/ consultation spécialisée, et de diffuser un message de sensibilisation au risque, prévention, et d'information médicale qui soit « officielle » parmi tant d'autres. Un plus grand recrutement au sein de la consultation contribuerait également à une recherche épidémiologique fiable. Des précédentes études avaient été menées, enquêtes baptisées « foudroyés en France », mais étaient basées sur un appel à témoignage dans les médias.

Le but de la recherche vise à apprendre davantage des foudroiements et peut ainsi étayer un enseignement. Mais l'objectif d'améliorer la prise en charge, mais aussi la prévention, des accidents de la foudre, n'a pas nécessairement besoin de données statistiques nouvelles. Une information médicale devra, comme un message de prévention, nécessairement s'appuyer sur une réelle perception du risque que représente la foudre.

Un moyen simple serait de sensibiliser les médecins exerçant dans des zones rurales, ou à haut niveau kéraunique, aux dangers de la foudre. Et d'offrir ainsi la possibilité d'une meilleure prise en charge des victimes de la foudre, mais aussi de relayer un message de prévention.

CONCLUSION

La kéraunopathologie est un domaine d'étude récent. Cette discipline a notamment montré que les accidents de la foudre ne sont pas rares. Les survivants souffrant de séquelles sont très nombreux, avec des conséquences parfois lourdes. On a vu que l'atteinte de la foudre provoque, entre autres, des lésions neurologiques et des troubles cardio-respiratoires, sans parler des brûlures, lésions auditives et oculaires. Les plaintes au sujet de troubles cognitifs et fonctionnels sont rarement prises en compte. Cette négligence est dommageable en soi : ne pas reconnaître des symptômes tels que des changements d'humeur, des troubles du sommeil ou de la mémoire, et ne pas les imputer au traumatisme peut en aggraver les conséquences psychiques. En France, un réseau de consultations de foudroyés se développe. C'est toutefois l'ensemble des médecins qui devraient être informés des effets du foudroiement, en particulier les médecins généralistes, qui sont souvent les premiers confrontés à des personnes foudroyées. Ils pourraient ainsi assurer une meilleure prise en charge des accidentés et un suivi plus efficace sur le long terme.

S'il n'est guère possible de rendre la foudre moins dangereuse, on peut au moins sensibiliser les populations en amont, pour limiter les prises de risques. Les Etats-Unis, le Canada, l'Allemagne et l'Afrique du Sud, pour ne citer que quelques pays, ont déjà lancé des campagnes de sensibilisation. En dépit de la relative fréquence des accidents liés à la foudre, il n'y a pas de véritable politique de prévention des foudroiements en France. Aucun organisme finançant la recherche médicale ne reconnaît actuellement leur dangerosité. Or, une prévention réaliste et peu coûteuse peut tout à fait reposer sur des bases empiriques. Il faudrait pour cela sensibiliser les (futurs) médecins, en particulier ceux qui exercent en zones rurales, montagneuses et côtières, aux dangers de la foudre. Ils seraient ainsi à même d'en informer leurs patients et de leur indiquer les mesures de précaution élémentaires en cas d'orage. De telles démarches de prévention pourraient également concerner d'autres phénomènes atmosphériques, telles que la grêle ou les inondations.

Chez les patients comme chez les soignants, les démarches de sensibilisation se heurteront certainement à des représentations erronées, ou du moins approximatives, des effets de la foudre et des circonstances facilitant le foudroiement. Bien que les recherches scientifiques sur le sujet se soient multipliées ces dernières décennies, force est de constater que

la foudre reste un phénomène mal connu. Sous-estimé ou surestimé, il est en tout cas symboliquement très chargé. Elisabeth Gourbière remarquait d'ailleurs : « *Il est tentant d'écrire que les mythes et croyances de la foudre participent à la pathogénie du foudroiement. Est-ce seulement la foudre que nous avons à dompter ? N'est-ce pas aussi l'imagination humaine ? Probablement. Cela montre bien la passionnante complexité de la kéraunopathologie* » (4).

La sensibilisation des médecins via l'enseignement et les formations, la diffusion des conseils de prévention auprès des populations, l'essor des recherches et l'amélioration de la prise en charge médicale des foudroyés devront, en tout cas, passer par une « prise de conscience » des risques liés à la foudre. Des risques encore sous-estimés dans un pays comme la France, où les habitants ont pourtant la réputation de n'avoir peur que d'une chose : que le ciel leur tombe sur la tête.

BIBLIOGRAPHIE

1. Hermant A, Lesage C. L'électricité atmosphérique et la foudre. Paris: Presses Universitaires de France; 1997.
2. Bouquegneau C. Doit-on craindre la foudre? EDP sciences; 2009.
3. Zweiacker P. Sacrée foudre! Ou la scandaleuse invention de Benjamin F. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires romandes; 2011.
4. Gary C. La foudre - Nature, histoire, risque et protection. 3ème édition. Dunod; 2004.
5. Bernard-Aubry A. Les représentations passées et actuelles de la foudre et de ses effets sur l'homme [Thèse d'exercice, Médecine]. Lyon: Université Claude Bernard; 2002.
6. Gourbière E. Fulgura frango, les médecins maîtrisent-ils la foudre? Réani. Urgences. 2000;9:319-22.
7. Kasparian J, Mysyrowicz A, Wolf JP. Foudre, laser et filament. 2008,(consulté le 13/01/14). [En ligne]. <http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/couv-pdf/ldp2008/10/>
8. Malardel S. Fondamentaux de météorologie. Cépaduès-Météofrance; 2005.
9. Dictionnaire historique de la langue française - sous la direction d'Alain Rey. Paris: Le Robert; 2010.
10. Calas C. Concepts et méthodes pour le météorologiste. Tome 1. Météo France; 2013.
11. Hermant A. Traqueur d'orages. Nathan nature; 2000.
12. Météo France. (page consultée le 23/02/14). Formation des nuages, [en ligne]. <http://www.meteofrance.fr/web/comprendre-la-meteo/prevoir-le-temps/phenomenes-meteo/les-orages>.
13. Bouquegneau C. La foudre : phénoménologie, effets et protection. Rev. AIM-liège. 2014.
14. Chauzy S, Coquillat S, Soula S. Initialisation des décharges sur les hydrométéores. Revue générale de l'électricité. Toulouse: Université Paul Sabatier - Laboratoire d'aérodynamique. 1994;(6):8-11
15. Météorage. (page consultée le 23/02/14). Le phénomène foudre, [en ligne]. <http://www.meteorage.fr/index.php/meteorage/la-foudre-sous-surveillance/le-phenomene-foudre>.
16. Gourbière E. Foudre et pathologies liées à la foudre. Cours pour le diplôme universitaire de médecine et de secours en montagne, [en ligne]. 2006. <http://www.lafoudre.com/gourbiere/patho.htm>.
17. Cooper MA, Andrews C J, Holle RL. Chap. 3 Lightning injuries. In: P.Auerbach, editor. Wilderness medicine. 4rd,Saint-Louis: Mosby Company; 2001. p. 67-108.
18. Uman MA. All about lightning. New-York: Dover Publications; 1986.

19. Laguerre J, Conil JM, Favarel H et al. Effets de la foudre sur l'organisme humain, illustrés par des cas cliniques. Brûlures. Avril 2000;1.
20. Gourbière E, Lambrozo J, Folliot D, Gary C. Complications et séquelles es accidents dus à la foudre. Réan. Soins intens. MÉD. URG. Juin 1995;(11);138-61.
21. Del Regno D. Phénomène naturel spectaculaire : les orages. La Vallée Heureuse; 2013.
22. Météorage. (page consultée le 18/05/14). Le réseau de détection, [en ligne]. <http://www.meteorage.fr/meteorage/la-foudre-sous-surveillance/le-reseau-de-detection>.
23. Ainaud P, Hautier A, Bernini V, Magalon G, Manelli JC. Électrifications. Paris: Elsevier Masson SAS; 2008. Encyclopédie Médico-Chirurgicale ; traité de médecine Akos, 7-1054
24. Lee RC. Mechanisms of tissue injury in electric shock. Congrès Foudre et Montagne. Chamonix. 1994. p. 43-47
25. Perdrizet O, Zuber M. Atteintes neurologiques liées au foudroiement. Encycl Méd Chir (Elsevier, Paris). 1999; Neurologie, 17-171-A-70.
26. Andrews CJ, Darveniza M, Mackerras D. Lightning injuries - A review of clinical aspects, pathophysiology and treatment. Adv Trauma. 1989;4:241-88.
27. Cabane J. De la physique de la foudre aux effets sur l'homme. Réan. Soins intens - MÉD. URG. Juin 1995;11:131-7.
28. Cooper MA, Fedlich R. Lightning injuries. Medscape Reference. Mise à jour le 10 Février 2012 [en ligne]. <http://emedicine.medscape.com/article/770642-overview>
29. Cooper MA. A fifth mechanism of lightning injuries. Acad Emerg Med. 2002 Feb;9(2):172-4
30. MA, Cooper. Lightning injuries : prognostic signs for death. Ann. Emerg. Med. 1980;9:134-8.
31. Andrews CJ, Cooper MA, Darveniza M, Mackerras D. Lightning injuries : Electrical, Medical and Legal Aspects. Boca Raton (Palm Beach, USA): CRC Press; 1992. p.47-70.
32. Kleinschmidt-Demaster BK. Neuropathology of lightning-strike injuries. Semin Neurol. 1995;15:323-8.
33. Jean F. Enquête nationale à propos de 104 personnes foudroyées : mode de foudroiement, lésions observées, complications et séquelles [Thèse d'exercice de médecine]. Toulouse: Université Paul Sabatier Faculté de Médecine; 1996.
34. Sein C. Le foudroiement : étude lésionnelle comparée entre l'homme et l'animal [Thèse d'exercice de médecine vétérinaire]. Toulouse; 2012.
35. Primeau M, Engelstatter GH, Bares KK. Behavioral Consequences of Lightning and Electrical Injury. Seminars in Neurology. 1995 Sept;5.
36. Engelstatter GH. Neuropsychological and psychological sequelae of lightning and electric shock injuries. Proceedings of the 4th Annual Meeting of Lightning Strike and Electric Shock Victims International; 1994 May; Maggie Valley, North Carolina.
37. Lichtenberg R, Dries D, Ward K, Marshall W, Scanlon P. Cardiovascular effects of lightning strikes. J. Am. Coll. Cardiol. 1993;21:531-6.

38. Gueugniaud PY, Vaudelin G, Bertin-Maghit M, Petit P. Accidents d'électrisation. Conférences d'actualisation de la Société Française d'Anesthésie Réanimation. Paris: Elsevier; 1997. p. 479-97.
39. Dupasquier G, Freeman J. Le foudroiement. *Ann. Fr. Anesth. Réanim.* 1986;5:601-4.
40. Jackson SH, Parry DJ. Lightning and the heart. *Br. Heart J.* 1980;43:454-7.
41. Carsin H, Harou P, Legulluche Y, Perrot J, Mion G, Guilbaud J. Brûlures électriques, Urgences extra-hospitalières. Journées d'Enseignement Post-universitaire d'Anesthésie et de réanimation; 1990; Paris, France. Arnette; 1990. p. 59-77
42. Resnick O, Wetli C. Lichtenberg figures, *Am. J. Frensic. Med. Path.* 1996;17:99-102.
43. Bergstrom L, Neblett LM, Sando I, Hemingway WG, Harrison GD. The lightning-damaged ear. *Arch. Otolaryngol.* 1986;103:343-9.
44. Campo RV, Lewis RS. Lightning induced macular hole. *Am. J. Ophtalmol.* 1984;97:792-4.
45. Royer J, Gainet F. Conséquences oculaires de la fulguration. A propos d'un cas. *Bull. Soc. Ophtalmol. Fr.* 1972;72:491-7.
46. Dumont D, Mathé D, Gobeaux F, Voultoury JC, Piva C, Proteau J. Fulguration au travail. *Arch. Mal. Prof.* 1986;47:261-9.
47. Baptiste O, Girer A, Foray J, Marsigny B. Les accidents de fulguration en haute montagne. *Chirurgie.* 1990;116:60-64.
48. Hawkes CH, Thorpe JW. Acute polyneuropathy due to lightning injury. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry.* 1992;55:388-390.
49. Imbert JL, Capellier G, Poirier N, Roger F, Jacques T, Barale F. Lésions internes observées dans le cas d'un foudroiement fatal. Actes du symposium médical Foudre et Montagne 1997; 1-5 juin 1997; Chamonix, France. Session C 2.1, p. 47-48. SEE/CAF organisateurs.
50. Virenque C, Batut M, Jean F, Roche P. Enquête nationale à propos de 104 personnes foudroyées. Actes du symposium médical Foudre et Montagne 1997; 1-5 juin 1997; Chamonix, France. Session C 3.2, p. 84-86. SEE/CAF organisateurs.
51. Pierce MR, Henderson RA, Mitchell JM. Cardiopulmonary arrest secondary to lightning injury in a pregnant woman. *Ann. Emerg. med.* 1986;15:597-9.
52. Cooper MA, Andrews CJ, Holle RL. Lightning injuries. *Wilderness medicine*, Auerbach. 5th ed. Mosby; 2007. p. 47-48
53. Andrews CJ, Eadie M, Ten Duis HJ, Raphael B, Cash R, Fraunfelder F, et al. Lightning injuries : Electrical, Medical, and Legal aspects. Boca Raton, Florida: CRC Press; 1992. p. 71-114
54. Andrews C, Darveniza M. Effect of lightning strike on mammalian tissue. *Proceedings of the 3rd Int. Conf. Lightning and static Electricity, ERA technology.* Surrey, U.K. 1989.
55. Strasser EJ, Davis RM, Menchey MJ. Lightning injuries. *J. Trauma.* 1977;17:315-9.

- 56.** Ishikawa T, Miyazawa T, Ohashi M, Muto T, Kitagawa N, Tagaki K, et al. Experimental studies on the effect of artificial respiration after lightning accidents. *Res. Exp. Med. (Berl)*. 1981;179:59-68.
- 57.** Zimmermann C, Cooper MA, Holle RL. Lightning Safety Guidelines. *Annals of Emergency Medicine*. 2002;39(6):660-4.
- 58.** Miller SF. The long-term consequences of lightning injuries. *Burns*. 2003 Feb;29(1).
- 59.** Gluncic I, Roje Z, Gluncic V, Poljak K. Ear injuries caused by lightning: report of 18 cases. *J Laryngol Otol*. 2001;115(1):4-8.
- 60.** Cherington M. Neurologic manifestations of lightning strikes. *Neurology*. 2003 Jan;60(2):182-5.
- 61.** National Weather Service Weather Forecast Office-Melbourne (page consultée le 11/05/14). Lightning safety, [en ligne]. http://www.srh.noaa.gov/mlb/?n=lightning_safety.
- 62.** Institut national de la Santé et de la Recherche Médicale (INSERM) [Communication personnelle, mail du 27 février 2014], Service d'Information sur les causes médicales de décès. Le Vésinet, France.
- 63.** Kubler L. Electrification(s) caractéristique(s) de la foudre [Thèse d'exercice médecine]. Lyon: Université Claude Bernard Faculté de Médecine; 2000.
- 64.** American Meteorological Society. Updated recommendations for lightning Safety [en ligne]. 2002, [consultée le 24/11/13]. Disponibilité sur Internet : https://www.ametsoc.org/policy/Lightning_Safety_Article.pdf
- 65.** Gourbière É, Virenque C, Menthonnex PH, Cabane J. "Foudroyés en France", première enquête nationale française concernant les foudroiements de personnes : objectifs, méthodes, premiers résultats. *Congrès Foudre et Montagne*, 1997: M 71-83.
- 66.** Caumont L. Les accidents de la fulguration [Thèse d'exercice médecine]. Clermont-Ferrand: Université d'Auvergne Faculté de Médecine; 1998.
- 67.** Lopez RE, Holles RL. Demographics of lightning casualties. *Seminars in neurology*. 1995;15(3):286-95.
- 68.** Colonna A, Lagourgue A, Jossilet A, Cayrel P, Delahaye A. Foudroyés. Session commune SFMU/ SRLF : Urgences 2012, Chap. 73.
- 69.** Cabane J. Conséquences multisystémiques du coup de foudre chez l'homme. *Rev. Med. Intern*. 1998;19suppl2:239-42.
- 70.** Cooper MA. Emergence care of lightning and electrical injuries. *Seminars in neurology*. 1995;15(3):268-78.
- 71.** Gueugniaud PY, Vaudelain G, Bertin-Maghit M, Petit P. Accidents d'électrification. Conférence d'actualisation. 1997;479-97.
- 72.** Manfred C. Eclairs et foudre [documentaire], diffusé sur France 5 le 21 mai 2014 [en ligne]
- 73.** Guyot V. Electricité et magnétisme [cours de physique], 2013. Disponible en ligne sur <http://www.cvgg.org/Accueil/Physique/electricite-et-magnetisme-version-10>.
- 74.** Wikipédia (page consulté le 22/04/13). Cage de Faraday, [en ligne]. http://fr.wikipedia.org/wiki/Cage_de_Faraday.

- 75.** Protection contre la Foudre des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) : Rapport d'activités Omega 3. Institut National de l'environnement Industriels et des Risques (INERIS); 3 décembre 2011.
- 76.** Caisse régionale d'assurance maladie Rhône-Alpes. Service prévention des risques professionnels. SP 1076 : la foudre, risques et prévention; décembre 2004.
- 77.** Gruet P. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS). Etude des paratonnerres à dispositif d'amorçage - Oct. 2001.
- 78.** Jensenius J. National Weather Service- Lightning Safety (page consultée le 30/05/14). Lightning crouch, [en ligne]. <http://www.lightningsafety.noaa.gov/blog.htm>.
- 79.** Presse Canadienne. Frappé par la foudre et brûlé par son ipod. Article rapporté du New England Journal of Medicine. Toronto, 12 juillet 2007. [En ligne] <http://techno.lapresse.ca/nouvelles/materiel-informatique/200707/12/01-10576-frappe-par-la-foudre-et-brule-par-son-ipod.php.->
- 80.** Bouquegneau C. La foudre par Christian Bouquegneau [documentaire collectif]. Belgorage [en ligne]. Disponible sur Internet : <http://www.belgorage.com/actualites-belgorage-2012-01-25.php>
- 81.** Association Protection Foudre (page consulté le 11/11/13). Les 20 recommandations en cas d'orage [en ligne]. Disponibilité sur Internet : www.apfoudre.com/20recom.htm.
- 82.** Le guide montagne. Météo-France édition. 2006-2007
- 83.** Cooper MA. A brief history of lightning safety efforts in the United States. Proceedings of the 22nd International Lightning Detection Conference; 2012 Apr 2-3; Broomfield: USA.
- 84.** Joubin A. Kéraunopsychotraumatologie : description des symptômes de patients foudroyés. [Thèse de médecine]. Toulouse : Université Paul Sabatier. 2014.
- 85.** Cooray V. Non conventional lightning protection systems. Proceedings of the International Conference on Lightning Protection (ICLP); 2010; Cagliari, Italy.
- 86.** Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer. Direction Générale de la Prévention des Risques (page consultée le 18 décembre 2013). Les événements naturels dommageables en France 2007, [en ligne]. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/evenements_domageables.pdf.
- 87.** Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. (page consultée le 29 août 2011). La politique de prévention des risques, [en ligne]. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/introduction,24018.html>.
- 88.** Institut Français des Formateurs Risques Majeurs et Protection de l'Environnement. (page consultée le 02/03/2013). Le risque majeur, [en ligne]. <http://www.iffro-rme.fr/le-risque-majeur>.
- 89.** Institut des risques majeurs. (page consultée le 07/03/2014). Centre d'information sur les risques majeurs en Rhône-Alpes, [en ligne]. <http://www.irma-grenoble.com/>
- 90.** Prévention des risques majeurs. (page consultée le 10/03/2014). [en ligne]. www.risques.gouv.fr. [<http://www.risques.gouv.fr/risques-naturels>].

- 91.** Association Nationale pour l'Étude de la Neige et des Avalanches (ANEMA). (page consultée le 18/05/14). Bilan des accidents, [en ligne]. <http://www.anena.org/5041-bilan-des-accidents.htm>.
- 92.** Eau France. (page consultée le 22/03/14). Risques d'inondation, [en ligne]. http://www.eaufrance.fr/groupe-de-chiffres-cles/?id_article=465.
- 93.** Protection foudre. Association des spécialistes de la gestion des risques Incendie, Vol-Malveillance, Environnement, Santé et Sécurité au travail, Ingénieurs et Cadres agréés par le CNPP (AGREPI). Compte-rendu de la journée de formation professionnelle du Vendredi 22 mars 2013. Chassieu, Rhône-Alpes Auvergne. [En ligne] www.agrepi.com/REGION_RHONE_ALPES_FOUDRE.pdf.
- 94.** Jolliet M. Situation des assurances incendies vis-à-vis de la foudre en Suisse. 12ème Forum de l'Association Protection Foudre [compte-rendu]. Paris, 2013.
- 95.** Association Française pour la Prévention des Catastrophes Naturelles (AFPCN). (page consultée le 11/05/14). Retour d'expérience des petits événements naturels, [en ligne]. <http://afpcn.org/risques-et-territoires/retour-dexperience/>.
- 96.** Centre d'Information pour la Prévention des Risques Naturels. (page consultée le 11/05/14). Retour d'expérience des petits événements, [en ligne]. <http://www.cypres.org/risques-naturels/retour-dexperience-petits-evenements/rex-petits-evenements/>.
- 97.** McLivraith GR. Electric shock. Nurs. Times. 1975;71:803-5.
- 98.** Golde RH, Lee WR. Death by lightning. Proceedings of the Institut d'Etudes Européennes (EEI). 1976;123(10R):1163-90.
- 99.** Rakotonandrasana JH. Modélisation de la décharge négative dans les grands intervalles d'air. Application à la foudre. [Thèse de Physique?]. Lyon: présentée à l'Ecole Centrale; 2008.

RESUME

La grande majorité des personnes foudroyées survivent et présentent une symptomatologie riche et complexe, que l'on nomme kéraunopathologie. Les séquelles, notamment neurocognitives, sont parfois lourde de conséquences.

La kéraunopathologie est un domaine d'étude récent, née il y a quelques dizaines d'années, dont il n'existe pas d'enseignement à la faculté de médecine.

Nous présentons ici les données actuellement connues sur les accidents médicaux induits par la foudre qui pourraient aider le médecin ou le secouriste, pour une prise en charge en urgence et pour le suivi à lon terme.

On s'aperçoit que le phénomène de la foudre est tout aussi méconnu dans la population, et que les principes de prévention de ces accidents ne peuvent être efficaces. On constate d'ailleurs que de nombreux accidents surviennent dans des circonstances à haut risque évitables.

Selon nous, une sensibilisation des médecins et des patients au risque de la foudre, par le biais d'une amélioration des représentations de celle-ci et de ses conséquences, permettrait d'éviter un grand nombre d'accidents, et permettrait une amélioration de la prise en charge des victimes.

TITLE: Medical accidents induced by thunderstorm and lightning: emergency medicalization, long-term follw-up, and prevention

DICSIPLINE : Médecine Générale

MOTS-CLEFS : Kéraunopathologie, foudroiement, brûlure, montagne, prévention



UNIVERSITE DE POITIERS

Faculté de Médecine et de
Pharmacie



SERMENT



En présence des Maîtres de cette école, de mes chers condisciples et devant l'effigie d'Hippocrate, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de la médecine. Je donnerai mes soins gratuits à l'indigent et n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon travail. Admis dans l'intérieur des maisons mes yeux ne verront pas ce qui s'y passe ; ma langue taira les secrets qui me seront confiés, et mon état ne servira pas à corrompre les mœurs ni à favoriser le crime. Respectueux et reconnaissant envers mes Maîtres, je rendrai à leurs enfants l'instruction que j'ai reçue de leurs pères.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses ! Que je sois couvert d'opprobre et méprisé de mes confrères si j'y manque !

