

## Foudroiement – Accident de fulguration

*J. CATINEAU<sup>1</sup>, L. CAUMON<sup>2</sup>, F. LAPOSTOLLE<sup>1</sup>*

### 1. Définition

La foudre est un phénomène naturel responsable de catastrophes naturelles dont les foudroiements. Un foudroiement est un accident électrique avec passage de courant de foudre à travers le corps d'une personne ou d'un animal. Dans le monde, les foudroiements sont les catastrophes naturelles globalement les plus meurtrières pour les êtres vivants et les plus dévastatrices pour les installations, équipements et matériels.

La prise en charge des victimes de foudroiement n'étant pas spécifique, nous nous focaliserons essentiellement sur les aspects physiques du phénomène, les mécanismes lésionnels et leurs conséquences.

### 2. Historique

La foudre et le tonnerre ont longtemps été rattachés à une cause surnaturelle, colère des dieux ou châtement suprême. C'est la découverte de la nature électrique de la foudre qui a libéré l'homme de ces superstitions. Benjamin Franklin (1707-1790) mit en évidence la nature électrique de la foudre au cours de la fameuse expérience du cerf-volant (2 septembre 1752). L'observation de bâtiments frappés par la foudre lui permet de mettre au point le paratonnerre dont il équipe plusieurs monuments. Cette invention se propage et se vulgarise à tel

1. Urgences, SAMU 93, EA 3409, Hôpital Avicenne, 125, rue de Stalingrad, 93009 Bobigny, France. Tél. : + 33 (1) 48 96 44 55 . E-mail : frederic.lapostolle@avc.aphp.fr

2. Urgences, SAMU 15, centre hospitalier Henri Mondor, BP 229, 15002 Aurillac cedex.

point que la mode s'en empare et que l'on propose des parapluies et des chapeaux paratonnerres ! Le danger potentiel des paratonnerres est envisagé lorsque le physicien G. Wrichman meurt foudroyé dans son laboratoire de Saint-Petersbourg en 1753. Ayant relié un paratonnerre à un fil de laiton, il tentait de mesurer l'intensité du nuage d'orage à l'aide d'un électromètre de son invention...

Au XIX<sup>e</sup> siècle, la photographie naissante a permis la description de la trajectoire, de la longueur de leur partie visible, et de la durée des éclairs. Les premières statistiques attribuent à la foudre 10 000 morts dans ce siècle, essentiellement en milieu rural.

Au XX<sup>e</sup> siècle, la caméra à objectifs tournants rend possible l'analyse fine de la trajectoire et du nombre de décharges successives au cours d'un même coup de foudre. Le barreau magnétique permet pour la première fois une estimation correcte de l'amplitude des courants de foudre.

### 3. Phénomènes électriques (1-3)

La genèse de la foudre nécessite la survenue d'un orage et donc la présence de nuages. Généralement de type cumulonimbus, en forme d'enclume, ils ont une épaisseur de plusieurs kilomètres, un sommet au-delà de 15 000 m et occupent une surface de plusieurs dizaines de kilomètres. Au sein d'un nuage d'orage, deux types d'activités de décharge peuvent exister :

- les décharges intra ou inter-nuages. Elles apparaissent sous forme d'éclairs et jaillissent en nappe à l'intérieur d'un même nuage. Ces éclairs horizontaux peuvent atteindre des longueurs de plus de 20 km. Les courants électriques qu'ils écoulent sont beaucoup plus faibles que ceux associés à la foudre. Ils ne produisent presque pas de tonnerre ;
- les décharges atteignant le sol : la foudre. Dans nos régions tempérées, il y a environ 3 éclairs pour un coup à la terre et ces proportions dépassent 6 pour les orages tropicaux.

Les orages sont de deux origines :

les orages de convection (ou orages isolés). Ils naissent de l'effet combiné de l'humidité et du réchauffement du sol, une masse importante d'air humide commençant à s'élever. Vers 2 km d'altitude, la vapeur d'eau se condense, c'est la base du nuage. Ce changement d'état libère des calories dans la masse d'air qui reste ainsi plus chaude que l'air avoisinant et continue donc son ascension. Il se crée ainsi une vaste « cheminée » qui est parcourue par des courants ascendants violents (20 à 100 km/h). Vers 10 km d'altitude, des cristaux de glace se forment. Ces particules de glaces deviennent de plus en plus lourdes, commencent à tomber et entraînent avec elles l'air environnant. Ce sont les premières précipitations accompagnées de coups de vent très violents. Dans une dernière phase, lorsqu'il n'y a pas assez d'air chaud pour entretenir le courant

ascensionnel, les courants froids terminent leurs mouvements descendants puis le vent disperse le reste du nuage ;

– Les orages frontaux

Ils naissent de la rencontre de masses d'air importantes, de température et d'hygrométrie différentes. Cette rencontre produit également des courants ascendants accompagnés de condensation. Les fronts orageux ainsi formés peuvent durer plusieurs jours et se propager sur des milliers de kilomètres (lignes de grains).

Parallèlement aux phénomènes thermodynamiques décrits ci-dessus, il se produit une séparation de charges électriques au sein du nuage. De multiples hypothèses ont été avancées pour expliquer la séparation de ces charges, mais aucune de ces théories n'est satisfaisante pour expliquer la totalité du phénomène. Quoi qu'il en soit, le résultat de ces processus de séparation est que la partie supérieure des nuages orageux, constituée de cristaux de glace est chargée positivement, tandis que leur base constituée de gouttelettes d'eau est chargée négativement. Souvent un flot de charges positives est inséré dans la masse négative.

Le nuage constitue donc un vaste dipôle créant des champs électriques entre les différentes couches intérieures et entre sa base et la surface de la terre. Ceci a pour effet que la terre, située sous le nuage, s'électrise par influence en sens contraire, conformément aux lois de l'électrostatique. L'orage est mûr pour éclater...

Le champ électrique au sol commence à s'inverser puis croît dans de fortes proportions. Lorsque son intensité atteint  $-10$  à  $-15$  kV/m on peut dire qu'une décharge au sol est imminente. La mesure de ces variations est d'ailleurs utilisée dans des appareils d'alarme sur certains chantiers à risque.

Les valeurs de champs électriques indiquées ci-dessus supposent un sol horizontal et plat. Les reliefs, les proéminences modifient fortement cette situation et renforcent considérablement le champ à sa surface. C'est l'effet de pointe. On peut calculer qu'au sommet d'une demi-sphère posée sur un plan, le champ est le triple du champ de référence. Mais pour une demi-ellipsoïde pointue, cet effet s'accroît encore et le champ est multiplié par 300. Ceci rend compte du surrisque majeur en milieu accidenté !

La différence de potentiel entre le nuage et le sol, bien que très élevée, ne permet pas d'emblée la formation d'un arc électrique. Elle va créer une ionisation progressive de l'atmosphère. Cette pré-décharge, appelée traceur, a son origine, soit dans le nuage et elle progresse alors en direction du sol, soit au niveau du sol et elle progresse alors vers le nuage. Tout se passe comme si le canal ainsi formé établissait entre le sol et le nuage un pont suffisamment conducteur pour préparer la voie au coup de foudre proprement dit. Les coups de foudre sont différenciés selon le sens de développement du traceur, axe ascendant ou descendant et selon le sens d'écoulement du courant principal.

Par convention, le coup de foudre est négatif lorsque c'est la partie négative du nuage qui se décharge et positif lorsque c'est la partie positive du nuage qui se

décharge. Sous nos climats, les coups de foudre positifs représentent environ 10 % des foudroiements.

Lorsque le traceur ascendant atteint le nuage ou lorsque le traceur descendant entre en contact avec le traceur ascendant développé à partir d'une aspérité, s'établit un court-circuit. Il permet le passage d'un courant de forte intensité associé à un trait fortement lumineux : c'est l'arc en retour. En général, un coup de foudre complet dure de 0,2 à 2 secondes et comporte en moyenne quatre arcs en retour. Plusieurs décharges (coups subséquents) peuvent ensuite se développer dans le canal fortement ionisé. Les décharges subséquentes sont précédées d'un traceur beaucoup plus rapide continu appelé trait pilote. Enfin dans l'intervalle entre les décharges, qui sont des courants de forte intensité, un faible courant de l'ordre de quelques centaines d'ampères continue à s'écouler dans le canal ionisé. C'est le courant persistant qui écoule une partie non négligeable de la charge totale d'un coup de foudre.

Il est ainsi possible de distinguer deux types de coup de foudre :

- les coups de foudre ascendants : dans un champ négatif, les effluves d'effet couronne qui apparaissent au sommet des aspérités du sol sont des effluves positives puisque par effet d'induction le sol porte des charges positives. À partir d'une certaine taille de l'aspérité, entraînant une certaine intensité d'effluves, le phénomène se modifie brusquement : l'effluve se transforme en une décharge ascendante : coup de foudre ascendant. Au cours de cette progression, le traceur se ramifie plusieurs fois vers le haut ;
- les coups de foudre descendants : c'est le cas le plus fréquent. Le traceur progresse en direction du sol par bonds successifs de quelques dizaines de mètres avec des temps d'arrêt de 40 à 100 micro-secondes s'il est négatif et de façon continue s'il est positif. Dès que le traceur s'approche du sol, les effluves d'effet couronne, issues d'une saillie, se transforment brusquement en traceur ascendant dans la direction du traceur descendant établissant un court-circuit entre le nuage et le sol permettant le passage d'un courant de forte intensité, l'arc en retour.

L'effet couronne, évoqué ci-dessus, se manifeste visuellement sous forme d'effluves, sorte de filaments bleus violets et du point de vue auditif sous forme de crépitements. Pour expliquer ce phénomène, il faut savoir que les photons issus du rayonnement cosmique et de la radioactivité naturelle sont en permanence en train d'ioniser l'air. Les électrons libérés par ce bombardement photonique s'attachent rapidement à des atomes neutres pour former un ion négatif. L'air atmosphérique contient ainsi en permanence des ions négatifs et positifs. Mais il existe une autre manière de produire des électrons libres et des ions en quantité infiniment supérieure : c'est l'avalanche électronique. Considérons un électron qui vient d'être libéré par un photon cosmique et supposons que cela se passe dans une région où règne un champ électrique, cet électron soumis à une force va acquérir une énergie cinétique et, très vite, il va entrer en collision avec un atome neutre. Si l'énergie acquise est égale ou supérieure à l'énergie

d'ionisation de l'atome considéré, la collision va créer un nouvel électron libre. On désigne ce processus par ionisation par choc. Ce nouvel électron se comporte comme le précédent et crée à son tour un électron libre, etc., le phénomène prenant une allure d'avalanche. L'intensité du champ électrique nécessaire pour qu'un électron puisse ioniser un atome est de l'ordre de 30 KV/cm, dans l'air à pression normale. Il suffit alors d'une aspérité assez effilée pour que le processus puisse se développer. Par exemple, pour un champ ambiant de 4 KV/m et un coefficient d'amplification lié à l'aspérité de 1 000, le champ au sommet d'une telle aspérité est de 40 KV/cm.

Paramètres électriques dans la décharge :

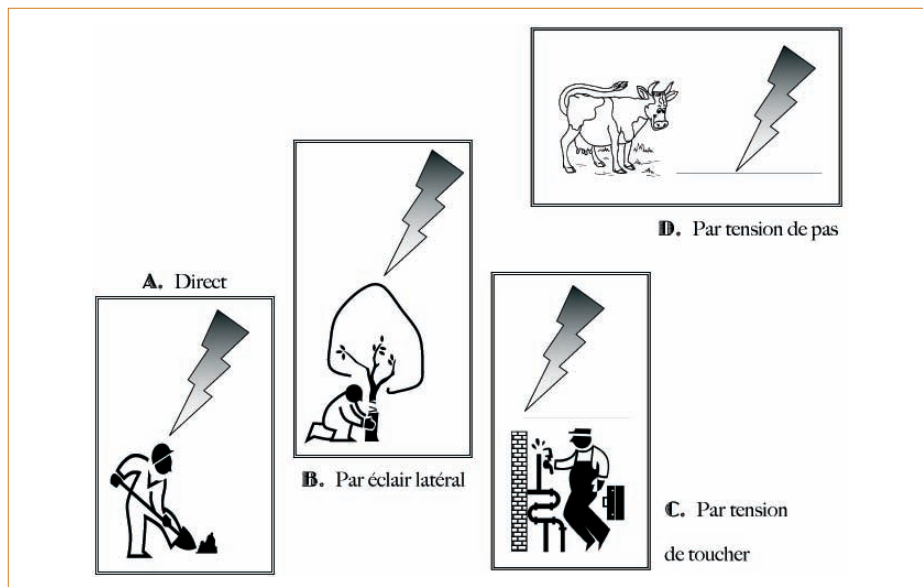
- intensité : l'intensité des courants de foudre positifs peut atteindre des valeurs supérieures à 200 000 ampères. Elle est en général plus faible pour les coups négatifs, de l'ordre de 50 000 ampères ;
- raideurs de front : la raideur de front est définie comme le rapport de l'intensité maximale atteinte sur la durée du front. Les coups négatifs sont de forte amplitude et de nature impulsionnelle. Ils présentent donc une raideur plus grande que les coups positifs qui se caractérisent par une seule impulsion mais qui dure beaucoup plus longtemps ;
- voltage : il semble être de l'ordre de 10 à 100 millions de volts ;
- température : elle peut atteindre 30 000 °C. Elle provoque une ionisation importante de l'air. Le retour à l'état « normal » des atomes ionisés produit l'énergie lumineuse des éclairs ;
- tonnerre : lorsque le courant d'arc en retour s'écoule, des forces électrodynamiques produisent une striction du canal, jusqu'à le rendre très étroit. L'élévation de pression est évaluée à 2 ou 3 atmosphères. Elle disparaît quand l'éclair s'éteint, si bien que l'on peut dire que le cœur du canal explose, produisant une violente onde de choc acoustique. L'intensité de l'onde de choc ainsi que de l'onde sonore dépendent de l'intensité du courant de foudre et de la brièveté de l'impulsion de ce courant. La succession de grondements et de claquements constitue une véritable « signature sonore » d'un coup de foudre car les fréquences élevées engendrées par l'onde de choc se propagent perpendiculairement au canal alors que les basses fréquences rayonnent de façon omnidirectionnelle. Selon l'orientation d'un segment élémentaire par rapport à l'observateur, le bruit est perçu comme un claquement sec ou un bruit sourd.

L'électrisation d'une personne par courant de foudre peut se produire selon quatre mécanismes : un direct et trois indirects.

#### – Coup de foudre direct (figure 1A)

Il se produit lorsqu'une personne, debout en contact avec le sol, est sur le trajet du précurseur de l'éclair. Le courant entre par la partie la plus proéminente (le plus souvent la tête) et s'écoule au sol en passant par les membres inférieurs. Notons que le foudroiement d'une personne par l'intermédiaire d'un objet

Figure 1 – Différents types de foudroiement



brandi au-dessus de la tête, parapluie, fourche ou club de golf, est un foudroiement par coup direct.

– Coup de foudre par éclair latéral (**figure 1B**)

Ce type d'éclair est responsable du foudroiement des personnes qui s'abritent de l'orage sous un arbre, dans une cabane ou une grotte. Dans ces circonstances, la différence de potentiel entre la partie du tronc située à hauteur de la tête de la personne et la terre s'élève alors suffisamment pour produire un éclair latéral. Le courant ainsi dérivé prend tout naturellement le trajet de moindre résistance représenté par le corps de la personne et s'écoule à travers lui vers la terre. Certains foudroiements collectifs en plein air sont provoqués par un éclair latéral se propageant d'une personne à une autre.

– Coup de foudre par tension de toucher (**figure 1C**)

Il intervient lorsqu'une personne touche un objet conducteur, lui-même frappé par la foudre (tuyauterie, paroi d'une grotte...). Une quantité considérable de courant peut s'écouler par le corps de la victime.

– Coup de foudre par tension de pas (**figure 1D**)

Il a lieu lorsqu'un individu se trouve à proximité d'un impact de foudre au sol. Le courant diffuse dans la terre autour du point d'impact, la résistivité du sol crée un gradient de potentiel. Si ce gradient intervient entre des points de contact au sol, généralement les pieds d'une personne, l'individu est parcouru par un courant de dérivation. C'est la cause la plus fréquente de foudroiement du bétail, du fait de la grande distance entre les pattes avant et les pattes arrières et de la présence du cœur entre les deux.

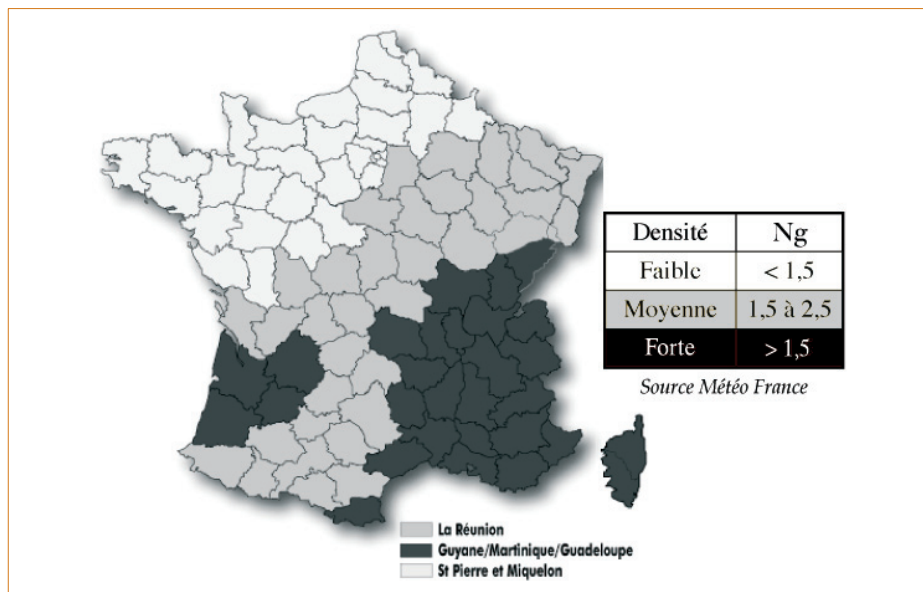
– Un phénomène particulier : la foudre en boule

Elle est le plus fréquemment associée à un coup de foudre au cours duquel se produit une extinction du canal de foudre, mais dont il subsiste une série de sphères lumineuses de 20 à 40 centimètres de diamètre, de couleur jaune orange, enveloppées d'un halo ou d'une chevelure de couleur bleuâtre, de température pouvant atteindre 10 000 °C, accompagnées d'un sifflement ou d'un crépitement et d'odeur sulfureuse. La trajectoire de la foudre en boule est caractéristique : le globe lumineux tombe verticalement puis, à l'approche du sol, change brusquement de direction et se déplace horizontalement selon un trajet en méandres. Sa vitesse ne dépasse pas 1 à 2 mètres par seconde et sa durée de vie se situe autour de 5 secondes. Elle finit par s'éteindre ou par exploser. Ce phénomène est imparfaitement compris, sa durée de vie, sa capacité à traverser des cloisons (portes ou fenêtres) et sa dissipation sans dommage ou son explosion dégageant une énergie considérable demeurent incompris.

#### 4. Conséquences de la foudre (1-3)

La sévérité orageuse d'une région peut être appréciée par son niveau kéraunique (keraunos : mot grec signifiant foudre) : nombre de jours par an où le tonnerre a été entendu. En France, le niveau kéraunique moyen (Nk) est de l'ordre de 20 (figure 2). Mais il est supérieur à 30 dans les régions montagneuses des Alpes, du Massif central, des Pyrénées et inférieur à 15 dans les régions côtières de la Normandie et de la Bretagne.

Figure 2 – Densité de foudroiement (Ng) : nombre d'impact foudre par an et par km<sup>2</sup>



Cette notion, rudimentaire, de niveau kéraunique est insuffisante car elle ne donne aucune indication sur la fréquence des foudroiements ni sur l'existence des zones particulièrement sensibles. Une définition plus précise de l'activité orageuse est exprimée en nombre de coups au sol par kilomètre carré et par an ( $N_g$ ). En France, elle est de 1 à 3 coups/km<sup>2</sup>/an. Les 2 paramètres sont liés par une relation approximative :  $N_g = N_k/10$ .

En données brutes, le bilan annuel de la foudre en France peut se dresser ainsi : 1 million de coups au sol, 1 coup sur un avion de ligne, 50 000 coups sur les lignes EDF responsables de 40 à 50 % des coupures d'électricité, 7 000 incendies et 50 000 compteurs électriques détruits, 20 000 têtes de bétail tuées !

L'étude de cette activité orageuse a permis d'identifier des zones privilégiées de formation de nuages orageux et des critères géologiques semblant attirer la foudre : failles humides, nappes d'eau et terrains marécageux.

Le nombre annuel moyen de foudroyés en France n'est pas connu avec exactitude. Il est estimé à une cinquantaine avec d'importantes fluctuations d'une année sur l'autre. Les seules données statistiques nationales émanent de l'institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM) et concernent uniquement les foudroiements mortels. La mortalité liée aux foudroiements est estimée à une quinzaine de décès par an, ce qui correspond à une incidence annuelle de foudroiement mortel de 0,03 pour 100 000 habitants. Toutefois, il est très vraisemblable que ces chiffres soient sous-estimés. Selon une récente analyse, le risque de foudroiement dans un site donné est directement lié au niveau kéraunique du site (4).

Les décès par foudroiement ont nettement diminué entre le début du siècle et le début des années 1970, essentiellement en raison de l'exode rural. A contrario, la pratique croissante de sports de plein air : VTT, randonnées, escalade, parapente, golf, nautisme, etc. peut faire craindre une recrudescence des foudroiements.

Si la victime est unique dans 70 % des foudroiements mortels, elle était accompagnée d'une autre personne dans 15 % des cas et au sein d'un groupe (> 2 personnes) dans 15 % des cas. Le risque collectif est cependant bien réel (5).

Si un foudroyé sur trois décède, sept survivants sur dix ont des séquelles permanentes souvent invalidantes. Ce chiffre est aussi incertain, essentiellement car les victimes de foudroiements non mortels et non sévères ne consultent pas de médecin (6).

Les foudroiements se produisent dans la quasi-totalité des cas en plein air, souvent dans des régions montagneuses ou côtières aux niveaux kérauniques relativement élevés. En raison de ces circonstances de survenue, le foudroiement, touche plus les hommes que les femmes (sex ratio de 4/1), les sujets jeunes et en bonne santé, survient de mai à septembre, entre 7 et 19 heures.



## 5. Physiopathologie – Lésions de fulguration (4, 7, 8)

Il convient de distinguer les effets directs et les effets indirects du foudroiement.

– Les effets directs sont dus à la libération d'énergie thermique, lumineuse et sonore mais différent selon le type du coup de foudre.

- **Électrocution directe** : la foudre touche le corps humain et le courant électrique peut traverser le corps ou, phénomène très important, s'écouler à la surface de la peau grâce à la formation d'un arc de contournement. Le trajet du courant électrique est en fait déterminé par la différence de potentiel qui existe entre la tête et les pieds et donc, indirectement, par l'intensité du courant électrique.

Dans le cas d'intensité de quelques centaines d'ampères, c'est-à-dire avec les éclairs ascendants positifs, le courant traverse le corps en plusieurs dixièmes de secondes, ce qui est insuffisant pour créer d'emblée un éclair de surface étant donné la faible raideur de front.

Ceci provoque une stimulation ou une inhibition des phénomènes électriques cellulaires.

Lorsque le courant traverse le cœur, il peut provoquer un arrêt cardiaque par asystolie ou par fibrillation ventriculaire. Le danger dépend de l'intensité du courant, de sa durée et du moment de passage par rapport au cycle cardiaque. Le risque de fibrillation est d'autant plus grand qu'il existe un grand nombre de décharges et que le passage du courant se fait pendant la phase vulnérable du cycle, c'est-à-dire pendant la période réfractaire partielle, qui correspond à l'onde T de l'ECG.

Lorsque le courant traverse des structures nerveuses, il peut provoquer des troubles de la conscience et des troubles neurovégétatifs. Ceci peut entraîner un coma profond et un arrêt respiratoire immédiat ou retardé, de quelques minutes à quelques heures.

Ceci provoque aussi des brûlures électrothermiques. Le courant électrique provoque des brûlures par effet joule. Lorsque les points d'entrée et de sortie sont très proches, la brûlure est localisée mais profonde. Lorsque ces points sont éloignés, des lésions tissulaires profondes et étendues peuvent siéger sous une peau saine, le long du trajet intracorporel invisible, parfois associées à des brûlures cutanées minimales. C'est l'effet « iceberg ». Les masses musculaires et les axes vasculo-nerveux sont particulièrement exposés. La résistance électrique de ces derniers étant faible, l'intensité délivrée localement est importante. Des phénomènes de ruptures et de thromboses vasculaires peuvent aggraver les nécroses musculaires. La thrombose de petits vaisseaux distaux peut entraîner des nécroses tissulaires.

Dans les cas d'intensités importantes, c'est-à-dire avec les éclairs descendants négatifs, le voltage du coup de foudre est tel que le courant passe à l'extérieur du corps par ionisation de l'air autour de lui. L'échauffement de la couche d'air

comprise entre la peau et les vêtements provoque une violente expansion de cet air, cause de désintégration et d'éjection des vêtements.

Du point de vue électrique, quand la décharge traverse le corps et que l'intensité atteint un pic de l'ordre de 1 000 Ampères, la différence de potentiel entre la tête et les pieds atteint alors 300 000 Volts. La résistance totale du corps étant aussi faible que 300 Ohms ( $U = R \cdot I$ ), cette tension est suffisante pour que se produise l'arc de contournement. Ainsi quelques microsecondes après le début de l'électrisation, l'intensité du courant cheminant à travers le corps n'est plus que de 4 Ampères en moyenne. Au total, une personne foudroyée est traversée par une succession d'ondes impulsionnelles (2 en moyenne), suivie de courants persistants. La durée totale d'un foudroiement est en moyenne de 10 à 20 millisecondes. L'arc de contournement et la brièveté de l'électrisation ont un effet salvateur.

Le rôle capital de l'arc de contournement sur le pronostic a été confirmé expérimentalement sur des rats (9). En cas de coup de foudre direct sans arc de contournement ou si cet arc se produisait après un délai de plus de 20 microsecondes, la survie était d'environ 15 % alors qu'elle était supérieure à 50 % dans le cas contraire.

Cet arc électrique de contournement peut jaillir entièrement à l'extérieur du corps, grillant parfois les poils, les cheveux, et faisant fondre des objets métalliques portés en surface (collier, fermeture éclair).

- **Électrocution indirecte** : foudroiement par éclair latéral. Selon le trajet du courant, déterminé par les points d'entrée et de sortie et selon l'existence ou non d'un arc de contournement, les lésions provoquées peuvent être bénignes ou graves, voire mortelles.

Foudroiement par induction à distance : il est à considérer comme un cas particulier de foudroiement par éclair latéral.

Foudroiement par tension de toucher : la décharge traverse presque toujours le corps sans être dérivée par un éclair de surface. Les conséquences sont donc souvent graves. C'est un mécanisme de mort pour les personnes abritées de l'orage et qui entrent en contact avec un élément de l'abri qui les héberge.

Foudroiement par tension de pas : le trajet du courant à travers le corps peut être d'un pied à l'autre (lors de la marche), d'une main à un pied (cas d'un grimpeur). Selon le trajet, la victime peut être, par exemple, paralysée des membres inférieurs, dans le premier cas ou être victime d'un arrêt cardiaque, dans le second cas.

Il existe un aspect particulier de brûlures superficielles, en aspect dit de Lichtenberg, en feuilles de fougère (10, 11). Cet aspect particulier correspondrait au passage du courant dans la microvascularisation, zone cutanée de conduction privilégiée.

- Les effets indirects

À proximité du canal de foudre est libérée une énergie thermique et mécanique produisant les mêmes effets qu'une explosion : brûlures et/ou barotraumatisme. L'énergie lumineuse est, quant à elle, responsable de lésions rétinienne et de cataractes à révélation quelquefois tardive.

La foudre peut déclencher une secousse musculaire violente qui est capable d'engendrer une chute. Il faut aussi signaler le syndrome de stress post-traumatique parfois très invalidant, qui est volontiers comparé à celui des traumatisés crâniens.

L'hypothèse du danger du champ magnétique rayonné par le courant de foudre a été exclue compte tenu de la durée très brève d'exposition.

Notons enfin que le rôle favorisant du téléphone est discuté (12-14).

## 6. Conséquences cliniques

– Décès

Une électrisation par foudroiement peut entraîner la mort par trois mécanismes principaux : arrêt cardiaque, inhibition des centres respiratoires et lésions cérébrales.

- L'arrêt cardiaque par fibrillation ventriculaire constitue la cause de mort d'origine électrique la plus fréquente. La période vulnérable déjà évoquée correspond aux 100 à 200 millisecondes de la première partie de l'onde T (soit 10 à 20 % du cycle). La probabilité qu'une décharge descendante négative, unique ou multiple, atteigne le cœur pendant la phase vulnérable serait est de 0,33. Ce résultat est cohérent avec les statistiques de foudroiements mortels. Le seuil de fibrillation ventriculaire (intensité minimale de courant susceptible de déclencher une FV) serait de 9 Joules/500 Ohms soit 18 millijoules/ohm (experts de la commission électrotechnique internationale).

- Arrêt cardiaque par asystolie : certains auteurs pensent que le courant de foudre traversant le cœur provoquerait plutôt une asystole qu'une fibrillation ventriculaire. La fulguration de moutons en laboratoire a provoqué, dans la totalité des cas, une asystole suivie d'une tachycardie. C'est une stimulation vagale qui conduirait à l'asystolie et une augmentation du taux d'adrénaline circulante (vérifiée par les dosages biologiques) à la tachycardie. En clinique, de fait, le premier ECG révèle plus souvent une asystolie qu'une fibrillation ventriculaire (4-6, 14, 15).

Dans une série de 66 victimes de foudroiements graves, 77 % des victimes ayant eu un arrêt cardio-respiratoire initial étaient décédées (malgré une réanimation rapidement mise en œuvre chez 70 % d'entre elles). Il existait une liaison faiblement significative entre la présence de brûlures des membres inférieurs et le risque de décès par arrêt cardio-respiratoire (15).

- Inhibition des centres respiratoires centraux : l'arrêt respiratoire d'origine centrale suivi d'arrêt cardiaque est considéré comme étant la seconde cause de mort par foudroiement. L'arrêt cardiaque est dû à la sidération des centres respiratoires (situés dans le tronc cérébral) par le passage du courant. La fréquence des brûlures céphaliques atteste de la fréquence du passage céphalique du courant. Comme cela est le cas des accidents électriques par courants alternatifs, il est possible que le seuil d'arrêt respiratoire d'origine centrale soit plus élevé que le seuil de fibrillation ventriculaire.

- Les lésions cérébrales graves : elles sont dues aux traumatismes par chutes violentes secondaires à des projections et aux effets du « blast » sur le cerveau. Les lésions peuvent être multiples (16, 17). Ainsi, une patient de 26 ans victime d'un foudroiement direct avec un point d'entrée céphalique ayant présenté un arrêt cardiaque récupéré présentait au scanner une hémorragie méningée, des hématomes intra-parenchymateux des noyaux gris centraux, une hémorragie intra-ventriculaire et un œdème cérébral important conduisant à son décès en 24 heures (Charland F. Données non publiées).

- Autres causes de mort : elles sont dues aux traumatismes et aux effets du « blast » sur d'autres organes : poumons, viscères abdominaux, etc.

– Autres lésions

- Les brûlures ont été largement décrites précédemment.

- Manifestations cardiaques (18-21)

Troubles du rythme : ils sont très variés, des extrasystoles auriculaires et ventriculaires bénignes à l'arythmie complète par fibrillation auriculaire ou au trouble du rythme ventriculaire retardé. À la phase aiguë, ils sont dus à l'excitation électrique directe du myocarde, secondairement à l'ischémie myocardique liée au passage du courant. Une tachycardie sinusale est très fréquente, probablement en rapport avec une libération d'adrénaline (responsable aussi de poussées hypertensives). La fibrillation auriculaire semble aussi fréquente.

Troubles de la conduction auriculo-ventriculaire et intra-ventriculaire : ont été signalés, n'ayant jamais nécessité d'appareillage ultérieur.

Ischémie et lésion myocardique : l'ischémie myocardique est considérée comme inévitable dès lors que le trajet du courant de foudre traverse le cœur. Elle est due, d'une part, à l'effet joule qui provoque des nécroses plus ou moins étendues et d'autre part, à un spasme ou une thrombose coronaire. Infarctus et l'insuffisance cardiaque semblent plus fréquents qu'à la suite d'électrifications par courant alternatif (18). Des anomalies électrocardiographiques d'allure ischémique seraient retrouvées chez 10 % des foudroyés (14), de la simple inversion asymptomatique des ondes T à l'infarctus transmural étendu. Courant de lésion et augmentation de l'intervalle QT seraient retrouvés en cas de foudroiement direct et anomalies non spécifiques du segment ST, sans anomalie coronarienne lors de foudroiement par éclair latéral ou par tension de pas (21). Ainsi, une élévation de la créatine phosphokinase (fraction MB) était présente chez 75 % des victimes d'un foudroiement direct, 66 % des victimes d'un foudroiement par

éclair latéral et 12 % des victimes d'un foudroiement par tension de pas. Des anomalies échocardiographiques ont seulement été retrouvées chez les victimes de foudroiement directs.

Épanchement péricardique : plusieurs cas ont été rapportés dont un cas d'épanchement péricardique compliqué d'une tamponnade (20) chez une jeune femme victime d'un foudroiement direct. L'évolution après drainage a été marquée par l'apparition de péricardites récurrentes pendant 6 mois, finalement contrôlées par une corticothérapie.

- Lésions vasculaires : les vaisseaux constituent des zones de faible résistance, donc des voies préférentielles de passage du courant. Le passage du courant provoque un vasospasme, par excitation directe de la musculature lisse des vaisseaux ou par stimulation des nerfs vasoconstricteurs. Cette vasoconstriction, tant au niveau cardiaque que périphérique, rend compte de l'ischémie myocardique et de paralysies transitoires (17).
- Thrombose vasculaire : elle serait secondaire à l'altération des parois vasculaires après passage du courant de foudre. Nécroses de la média et de la limitante élastique interne susceptible de favoriser la formation d'une thrombose vasculaire ont été décrites.
- Lésion neurologiques : les troubles neurologiques dont souffrent les foudroyés sont extrêmement variés et peuvent être classés en deux groupes :

Symptômes immédiats et le plus souvent temporaires

– Une perte de connaissance est fréquemment rapportée (72 %) (14) et ceci même si le trajet du courant épargne la tête. Les autres troubles sont une amnésie antérograde (environ 46 % des cas) et aussi anxiété, agitation, irritabilité, apathie, céphalées.

– De fréquents troubles parétiques ou paralytiques transitoires des membres (inférieurs surtout) traversés par le courant lors du foudroiement ont été baptisés kéraunoparalysies. Ces troubles seraient dus à une perturbation fonctionnelle directe des nerfs périphériques ou à des phénomènes vasomoteurs intéressants les nerfs périphériques. Il s'agit de paralysies flasques avec disparition de toute sensibilité. La peau est souvent moite, pâle et marbrée. Les pouls périphériques ne sont parfois plus perçus. Il n'y a habituellement pas de trouble mictionnel, ni de trouble de la défécation. Ces symptômes disparaissent en quelques heures ou quelques mois.

– Ces troubles affecteraient deux tiers des victimes. Lors d'un cas de foudroiement collectif dans une église, tous les participants à une célébration ont perdu connaissance. Ceux qui étaient debout sur les dalles de pierre ont eu les membres inférieurs paralysés pendant quelques minutes à quelques heures alors que ceux qui étaient sur une estrade (isolés du courant de sol) en ont été indemnes.

– Les lésions des nerfs crâniens sont moins fréquentes : troubles de l'audition : 10 %, aphonie : 6 %, parésie faciale : 4 %, anisocorie : 3 %, aréflexie pupillaire : 3 %, troubles de la déglutition : 2 %.

- Atteintes médullaires : plusieurs cas de paralysies précoces et permanentes à type de paraplégie ou de tétraplégie ont récemment été décrits (17).
- Atteintes cérébrales : des hémorragies cérébrales avec hématome extradural, sous-dural ou intracrânien sont régulièrement rapportées (22).
- Une thrombose cérébrale peut se constituer suite à un coup de foudre direct avec contact céphalique (15).
- Lésion ophtalmologique et ORL. Les brûlures, les traumatismes secondaires au foudroiement et les dégâts vasculaires et nerveux déjà évoqués sont les principales causes de lésions ophtalmologique et ORL. Les séquelles (fonctionnelles majeures) peuvent être définitives.
- Troubles psychiatriques
  - Un tel accident, individuel ou collectif, peut provoquer chez les victimes, voire chez les sauveteurs, un « traumatisme psychique ». Les réactions immédiates peuvent être inadéquates (prostration ou au contraire réaction de type hystérique). Symptômes dépressifs et phobiques peuvent survenir dans le cadre d'un « syndrome post-traumatique ».

## 7. Stratégie de prise en charge des victimes de foudroiement (23, 24)

La prise en charge de ces victimes est souvent tardive en raison des contraintes géographiques et climatiques inhérentes à ce type d'accidents. L'hélicoptère est souvent utilisé.

Si l'orage est toujours actif, l'intervention des secours doit, en particulier en montagne, obéir à certaines précautions :

- porter un casque de montagne en polycarbonate (protection contre les chutes de pierre) ;
- ne pas rester sur une crête, se réfugier sous un ressaut d'au moins 4 mètres de hauteur ;
- ne pas se coller à la paroi (distance avec celle-ci d'au moins 1,5 mètre) ;
- s'arrimer à la paroi par plusieurs points d'ancrage ;
- éloigner les objets métalliques (excellents conducteurs) qui peuvent fondre ou provoquer un arc électrique ;
- se tenir accroupi ;
- respecter une distance de sécurité, idéalement supérieure à 2 mètres entre les intervenants (afin d'éviter, en cas de foudroiement, la formation d'un éclair latéral) ;
- éloigner la victime d'un arbre ou de tout autre saillie ;
- se réfugier au plus vite en lieu sûr : habitation close, véhicule fermé (antenne de radio rabattue) ;

– éviter d'utiliser la radio, hormis pour demander du renfort.

Le patient foudroyé est électrisé, souvent brûlé, blasté, psychologiquement choqué, éventuellement polyfracturé voire polytraumatisé, parfois hypotherme. Rien dans sa prise en charge n'est spécifique mais tout ces aspects de la prise en charge doivent être considérés. En conséquences, le bilan clinique initial est exhaustif, et la prise en charge complète, en particulier :

- la douleur est évaluée et traitée, le recours aux morphiniques est large ;
- la température mesurée et monitorée, le patient réchauffé s'il le faut ;
- les tympanes examinés, à la recherche d'arguments en faveur de lésions de blast ;
- un électrocardiogramme est systématiquement réalisé, une surveillance électrocardioscopique instaurée ;
- des brûlures (points d'entrée et de sortie du courant) recherchées ;
- une lésion rachidienne systématiquement suspectée, justifiant la mise en place d'un collier cervical et les précautions d'usage ;
- la recherche d'un déficit neurologique (kéraunoparalysie ou traumatique) est importante.

Le bilan initial exhaustif étant réalisé, le traitement de chaque lésion est très essentiellement symptomatique. Quelques points particuliers méritent toutefois d'être soulignés.

– Arrêt circulatoire

Sa prise en charge n'a rien de spécifique. La réanimation cardiopulmonaire est volontiers prolongée, surtout si elle a pu être initiée tôt, en raison du (relatif) bon pronostic de l'arrêt cardiaque dans ces circonstances et de l'hypothermie fréquente.

– Brûlures et blast

L'hypothèse d'une intoxication associée par inhalation de fumées d'incendie doit être systématiquement envisagée. Le traitement habituel est requis.

Les brûlures punctiformes et profondes correspondant aux points d'entrée et de sortie du courant, les brûlures en rapport avec la fusion d'objets métalliques et les brûlures liées à l'arc de contournement nécessitent une désinfection locale et une protection par un pansement stérile.

Les figures de Lichtenberg n'étant pas de véritables brûlures, aucun traitement local n'est nécessaire. Il est toutefois très important d'un point de vue médico-légal, du fait de leurs présences transitoires et de leurs caractères pathognomoniques des accidents par foudroiement, de noter leurs présences sur la fiche d'intervention ou mieux de les photographier.

Les patients foudroyés ayant rarement des lésions tissulaires sous-jacentes majeures, le remplissage massif n'est forcément nécessaire, surtout si des lésions

neurologiques centrales ne peuvent être exclues. A contrario, la règle des 9 de Wallace n'a pas de valeur dans ce cas car la surface cutanée ne rend pas compte des lésions profondes.

Si le blessé doit être ventilé, le risque de brèches alvéolo-capillaires voire de pneumothorax ne doit pas être omis.

## Références bibliographiques

1. INERIS. Le risque foudre et les installations classées pour la protection de l'environnement. 2001 ([http://aida.ineris.fr/guide\\_silo/Fichiers/Article\\_9/foudre2.pdf](http://aida.ineris.fr/guide_silo/Fichiers/Article_9/foudre2.pdf))
2. Gary C. La foudre. La Recherche 1989 ; 211 : 722-34.
3. Hermant A, Lesage C. L'électricité atmosphérique et la foudre. In : Que sais-je (n° 3127), 1997.
4. Adekoya N, Nolte KB. Struck-by-lightning deaths in the United States. J Environ Health 2005 ; 67 : 45-50, 5.
5. Carte AE, Anderson RB, Cooper MA. A large group of children struck by lightning. Ann Emerg Med 2002 ; 39 : 665-70.
6. Lifschultz BD, Donoghue ER. Deaths caused by lightning. J Forensic Sci 1993 ; 38 : 353-8.
7. O'Keefe Gatewood M, Zane RD. Lightning injuries. Emerg Med Clin North Am 2004 ; 22 : 369-403.
8. Whitcomb D, Martinez JA, Daberkow D. Lightning injuries. South Med J 2002 ; 95 : 1331-4.
9. Ohashi M, Kitagawa N, Ishikawa T. Lightning injury caused by discharges accompanying flashovers – a clinical and experimental study of death and survival. Burns Incl Therm Inj 1986 ; 12 : 496-501.
10. Cherington M, Olson S, Yarnell PR. Lightning and Lichtenberg figures. Injury 2003 ; 34 : 367-71.
11. Domart Y, Garet E. Images in clinical medicine. Lichtenberg figures due to a lightning strike. N Engl J Med 2000 ; 343 : 1536.
12. Esprit S, Kothari P, Dhillon R. Injury from lightning strike while using mobile phone. BMJ 2006 Jun 24 ; 332 (7556) : 1513.
13. Althaus CW. Injury from lightning strike while using mobile phone. Mobile phones are not lightning strike risk. BMJ 2006 Jul 8 ; 333 (7558) : 96.
14. Cooper MA. Lightning injuries: prognostic signs for death. Ann Emerg Med 1980 ; 9 : 134-8.
15. Nelson KL, Mills W Jr, Umbel S, Crosson JE, Shaffner DH, Hunt EA. Lightning, sudden cardiac death, simulation and an automated external defibrillator: the perfect storm. Resuscitation 2007 ; 74 : 567-71.
16. Cherington M. Neurologic manifestations of lightning strikes. Neurology 2003;28 ; 60 : 182-5.
17. Cherington M, Yarnell P, Lammereste D. Lightning strikes: nature of neurological damage in patients evaluated in hospital emergency departments. Ann Emerg Med 1992 ; 21 : 575-8.
18. Carleton SC. Cardiac problems associated with electrical injury. Cardiol Clin 1995 ; 13 : 263-6.



19. Saglam H, Yavuz Y, Yurumez Y, Ozkececi G, Kilit C. A case of acute myocardial infarction due to indirect lightning strike. J Electrocardiol 2007 ; 40 : 527-3.
20. Rivera J, Romero KA, González-Chon O, Uruchurtu E, Márquez MF, Guevara M. Severe stunned myocardium after lightning strike. Crit Care Med 2007 ; 35 : 280-5.
21. Robert L. Cardiovascular effect of lightning strikes. J Am Coll Cardiol 1993 ; 21 : 531-6.
22. Steinbaum S, Harviel JD, Jaffin JH, Jordan MH. Lightning strike to the head: case report. J Trauma 1994 ; 36 : 13-5.
23. Zimmermann C, Cooper MA, Holle RL. Lightning safety guidelines. Ann Emerg Med 2002 ; 39 : 660-4.
24. Zafren K, Durrer B, Herry JP, Brugger H, ICAR and UIAA MEDCOM. Lightning injuries : prevention and on-site treatment in mountains and remote areas. Official guidelines of the International Commission for Mountain Emergency Medicine and the Medical Commission of the International Mountaineering and Climbing Federation (ICAR and UIAA MEDCOM). Resuscitation 2005 ; 65 : 369-72.

