

# Vers la maîtrise de la foudre

**À chaque instant, la Terre connaît, en moyenne, plus de 2000 orages qui produisent, chaque seconde, une centaine d'éclairs.**

**Un tiers de ceux-ci frappent le sol, dans un déchaînement d'énergie que l'on appelle la « foudre »...**

Dans l'ouvrage de P.A. Daguin publié en 1861 et intitulé « Traité élémentaire de physique théorique et expérimentale », on peut lire : « Il résulte d'un relevé fait par M. Boudin dans les archives du ministère de la justice, qu'il y a eu, en France, 1308 personnes tuées raide par la foudre, de 1835 à 1852 .../... On a vu jusqu'à 9 personnes tuées par le même coup. Ainsi, le coup de foudre qui frappa l'église de Châteauneuf-les-Moustiers, dans les Basses-Alpes, tua 9 personnes et en blessa plus de 80. Tout dernièrement, à la fin de juin 1861, et dans l'espace de 8 jours, on a relevé 33 coups de foudre, dont chacun a tué ou blessé grièvement au moins une personne. Dans les autres pays de l'Europe, M. Boudin trouve, pour le nombre annuel moyen des individus tués raide par la foudre : en Belgique, 3 ; en Suisse, 9.64 ; en Angleterre, 22. Ces nombres sont évidemment des minimum ; que d'accidents qui n'ont pas été constatés, que de morts dont la cause n'a pas été enregistrée ! »

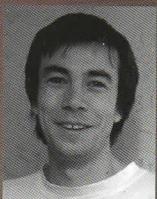
Les temps ont changé mais la foudre reste un phénomène redouté, ceci d'autant plus que la vulnérabilité économique de la société a considérablement augmenté. Guillaume Méjean, qui a travaillé au sein du consortium scientifique « Téramobile », relève que la foudre tue aujourd'hui encore environ 30 personnes par an en France et plus de 500 au Canada et aux Etats-Unis. Or, en déclenchant et en guidant la foudre, il serait possible de s'en protéger. Cette perspective a motivé des travaux de recherche passionnants qui se poursuivent aujourd'hui encore... RB

# Le laser pour guider l'éclair



**Par Guillaume Méjean**

*Dr de l'Université Lyon 1  
Maître de conférence,  
lauréat du prix « jeune  
chercheur » St Gobain  
2005 de la SFP.*



**Par Jérôme Kasparian**

*Dr en physique de l'Uni-  
versité Lyon 1, chercheur  
au CNRS et à l'Université  
de Genève, co-lauréat du  
Prix La Recherche 2005.*



**Par Jean-Pierre Wolf**

*Dr en Physique de  
l'Ecole Polytechnique  
Fédérale de Lausanne,  
membre de l'Institut  
Universitaire de France,  
Professeur à l'Université  
de Genève, co-lauréat du  
Prix La Recherche 2005,  
lauréat du Grand Prix de  
Physique de l'Académie  
des Sciences 2002.*

Dès les années 70, on a eu l'idée d'utiliser un faisceau laser pour ioniser l'air de manière à créer un chemin conducteur qui déclencherait et guiderait la foudre. Malheureusement, la longueur d'onde des lasers utilisés alors se situait dans le domaine de l'infrarouge moyen et était fortement absorbée par les plasmas. Le début de l'impulsion laser créait ainsi un plasma qui absorbait ensuite la fin de

cette même impulsion. On formait ainsi un plasma dense mais de longueur réduite et, de ce fait, les expériences de guidage de décharges de haute tension qui ont pu être réalisées en laboratoire n'ont jamais pu aboutir au guidage de la foudre naturelle. Mais la propagation très particulière des faisceaux lasers femtosecondes amplifiés, apparus au cours des années 1990, a ouvert de nouvelles perspectives...

## *Apparté de la rédaction*

### **Le plasma, 4<sup>e</sup> état de la matière...**

Tout corps est composé d'atomes et ces atomes sont eux-mêmes constitués d'un noyau formé de protons et de neutrons autour duquel gravitent des électrons.

L'intensité des liaisons qui existent entre ces particules élémentaires détermine l'état dans lequel se trouve le corps.

Sur la Terre, les corps se présentent habituellement à l'état solide, liquide ou gazeux. Pour le corps H<sub>2</sub>O, on parle respectivement de la glace, de l'eau ou de la vapeur d'eau. A l'état solide, les atomes d'un corps sont organisés en un réseau rigide. Si la température de ce corps augmente et le fait passer à l'état liquide, ses atomes peuvent glisser les uns par rapport aux autres. A plus haute température, lorsque le corps passe à l'état gazeux, les atomes se déplacent de façon libre et indépendante. Enfin, aux très hautes températures (typiquement plusieurs millions de degrés), les constituants de l'atome se séparent : noyaux et électrons se déplacent indépendamment les uns des autres et forment alors ce qu'on appelle un plasma.

Cet état particulier, découvert en 1870 par le physicien anglais William Crookes, est parfois appelé « quatrième état de la matière ». Mais peut-être avait-il déjà été pressenti, beaucoup

plus tôt, par les Grecs de l'Antiquité qui l'auraient symbolisé par l'un des quatre éléments, le feu. Peut-être...

Si c'est le cas, l'intuition était prodigieuse car les plasmas ne participent pas au décor terrestre quotidien (bien que 99 % de la matière constituant l'Univers, dont notre Soleil, serait à l'état plasmatique) !

La transformation d'un gaz en un plasma ne nécessite pas l'apport d'une énergie minimale, d'une « chaleur latente de changement d'état », comme c'est le cas pour la fusion, la vaporisation ou la sublimation. Cet état peut être atteint par une forte élévation de température mais aussi lorsque le corps est soumis à des champs électriques ou électromagnétiques intenses ou encore à un bombardement de particules. Mais dans tous les cas, des électrons sont libérés, séparés de leur atome : le gaz est donc dit « ionisé ». Cette ionisation rend le plasma conducteur : c'est cette caractéristique qui pourrait permettre de guider la foudre, si l'on arrivait à produire dans l'atmosphère un canal de plasma suffisamment long, même faiblement ionisé, pour constituer un gigantesque « shunt » reliant le sol au nuage orageux. RB

---

**La puissance phénoménale des lasers à impulsions ultra brèves permet la formation de longs canaux plasmatiques dans l'air.**

---

### **Le laser femtoseconde: de nouveaux horizons**

Un laser femtoseconde est un laser dont la durée d'impulsion est ultra brève (1 fs =  $10^{-15}$  s, soit un milliardième de seconde). Lorsqu'il a été possible d'amplifier ces impulsions laser, la puissance instantanée transportée par ce type de faisceaux est devenue colossale, pouvant dépasser la centaine de térawatts (1 TW =  $10^{12}$  W, soit mille milliards de watts). Cette puissance induit un mode de propagation particulier dans l'air. En effet, un faisceau de forte puissance modifie les caractéristiques de l'air lors de sa propagation. En particulier, de longs filaments, des canaux de plasma d'environ 150  $\mu\text{m}$  (un peu plus d'un dixième de millimètre) de diamètre se forment sur des longueurs pouvant dépasser la centaine de mètres. Le plasma créé par ce faisceau est moins dense que celui qui est engendré par les lasers classiques, favorisant ainsi la transmission du faisceau à travers ce plasma, d'autant que la longueur d'onde de ces lasers (0.8  $\mu\text{m}$ ) est moins absorbée dans les plasmas. Enfin, la durée d'impulsion est ultra-brève, ce qui fait que l'arrière de l'impulsion laser est « passée » avant que l'ionisation en cascade n'ait donné au plasma une densité suffisante pour absorber la fin de l'impulsion. Cette nouvelle technologie a relancé l'étude du guidage et du déclenchement de la foudre par laser.

### **Rapport d'expérience**

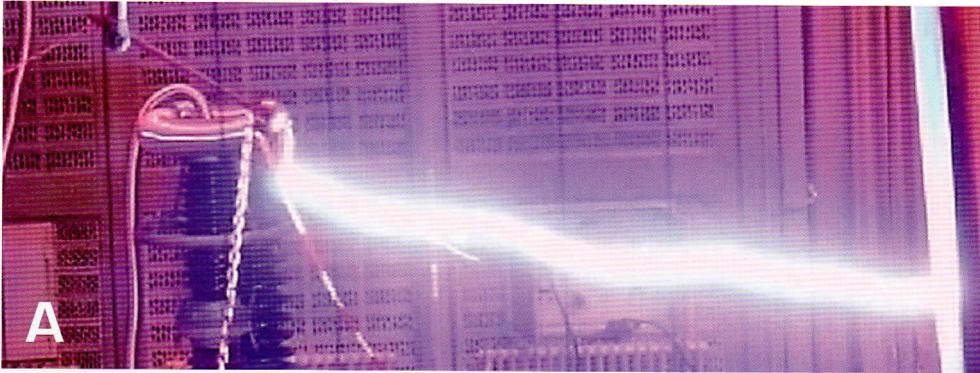
L'idée consiste à envoyer dans l'atmosphère des impulsions laser ultra brèves et ultra intenses, de manière à générer des filaments longs et réaliser ainsi un court-

circuit, entre le nuage et la Terre. Cette idée a été développée en laboratoire, lors d'expériences préliminaires de guidage de décharges produites entre deux électrodes, l'une modélisant le nuage orageux et l'autre la Terre.

Pour réaliser cette expérience, deux outils exceptionnels ont été utilisés : d'une part, le laser TéraMobile, le seul laser « femtoseconde-térawatt » mobile au monde (assez puissant pour être ensuite utilisé en milieu naturel), et d'autre part un générateur d'impulsions à très haute tension, nommé « générateur de Marx ».

La tension créée par le générateur de Marx utilisé pour ces expériences pouvait atteindre 2 MV (2 millions de volts). Les décharges se produisaient entre deux électrodes : une électrode sphérique de 12 cm de diamètre, séparée d'une distance variable (de 1 à quelques mètres), de l'électrode de terre. Cette dernière était une électrode plane de 3 m de diamètre. L'impulsion haute tension était synchronisée avec l'impulsion laser à l'aide d'un générateur de délai variable.

La chaîne laser du TéraMobile délivrait un faisceau au diamètre initial de 9 cm, légèrement focalisé à 15-20 m. L'énergie initiale était de 230 mJ par impulsion pour une durée de 170 fs. Un bouquet d'environ quinze filaments de 4 à 5 mètres de longueur était généré dans un faisceau de 0,5 à 1 cm de diamètre entre les électrodes. Dans la plupart des expériences, les filaments débutaient peu avant la première électrode et se propageaient jusqu'à rencontrer la deuxième électrode plane. Le faisceau passait à proximité de l'électrode sphérique, à environ 1 cm de distance, de manière à ce que les canaux plasmas présents dans les filaments



*Expérience en laboratoire.  
A : décharge haute tension se propageant sur un trajet erratique, de façon similaire à la foudre.  
B : décharge totalement rectiligne, guidée le long du faisceau laser.*

forment un court-circuit entre les électrodes. Il a ainsi été possible de guider et de déclencher des décharges de 1,2 millions de volts entre des électrodes éloignées d'une distance allant jusqu'à 3,80 m. Cette expérience a également montré que la tension de claquage est réduite d'environ 30 % par le laser. Il serait donc possible, en théorie, de décharger les nuages par un éclair avant que celui-ci n'ait lieu naturellement. On pourrait donc non seulement guider la foudre mais aussi la déclencher...

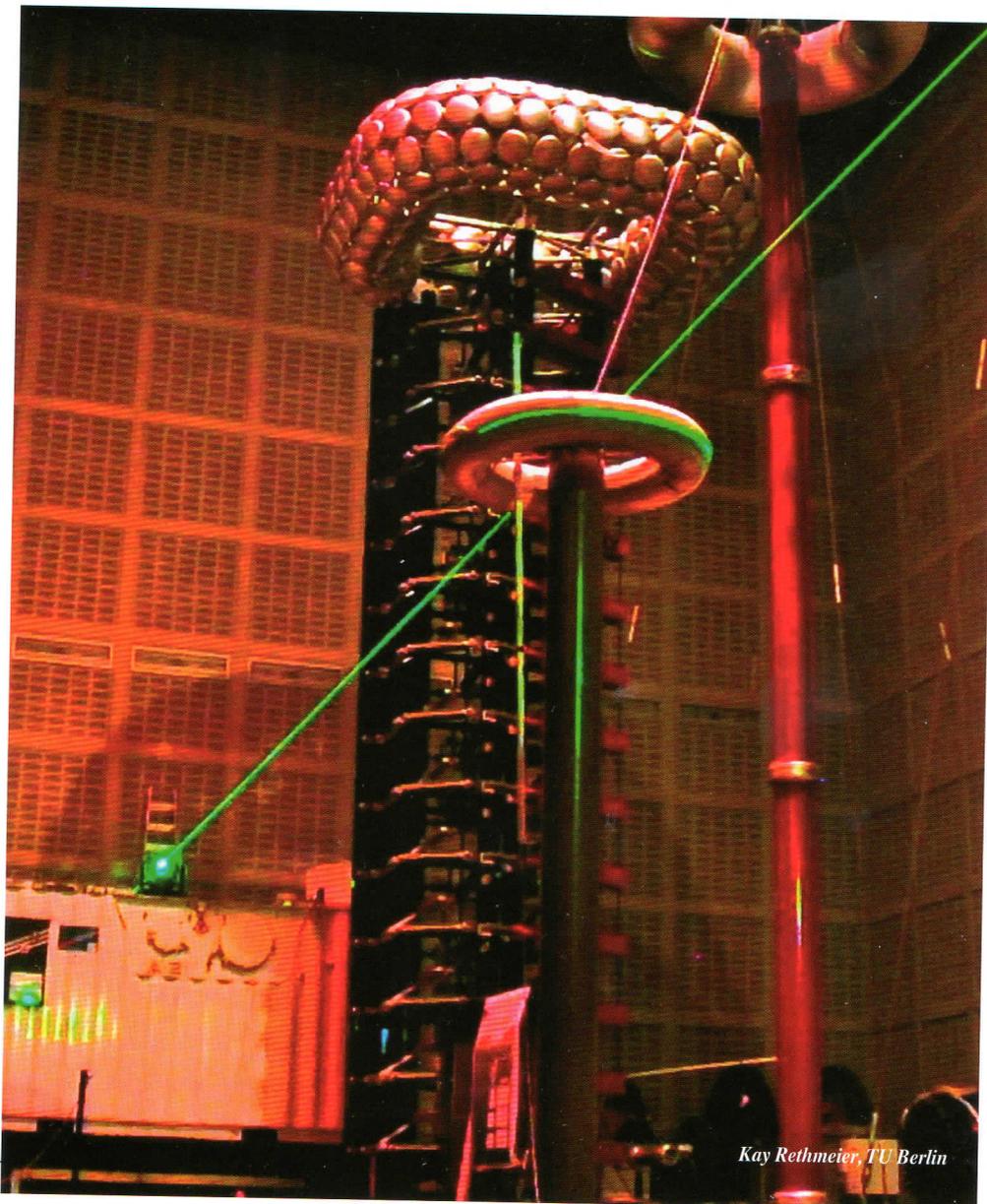
Les expériences précédentes ont été réalisées en atmosphère sèche. Mais un orage s'accompagne de pluie, ce qui pourrait perturber la propagation du faisceau laser et en particulier des filaments, même si les canaux de plasma peuvent se former sous la pluie. Les expériences précédentes ont donc été répétées en

ajoutant un générateur de pluie artificielle qui produisait une pluie dix fois plus intense qu'une pluie orageuse, avec une transmission optique de 34 %, entre les deux électrodes.

La présence des gouttes d'eau a diverses conséquences. Par exemple, le potentiel d'ionisation de l'eau, plus faible que celui de l'air, réduit légèrement la tension de claquage.

Cet abaissement est dû à la polarisabilité des gouttes qui se déforment sous l'effet d'un champ électrique. Elles prennent alors une forme allongée, faisant apparaître deux pointes augmentant ainsi les valeurs du champ électrique à leur extrémité, ce qui favorise, comme dans un nuage orageux, l'initiation de la décharge naturelle.

Comme la pluie abaisse la tension de claquage, on pourrait craindre qu'elle entre en compétition avec le laser pour



*Le Téra-mobile et le générateur de Marx à l'université de Berlin.*

*Kay Rethmeier, TU Berlin*

le déclenchement des décharges. Cependant, malgré la présence des gouttes d'eau du nuage qui diffusent le faisceau et l'absorbent, les filaments restent capables de déclencher et de guider la foudre.

En effet, des décharges de haute tension sous la pluie ont été déclenchées dès 910 kV, soit à peine plus que les 850 kV nécessaires au laser pour déclencher une décharge en l'absence de pluie, et nettement moins que la tension de claquage

sous la pluie et sans laser, soit 1190 kV. Cependant, pour étendre cette technique à l'échelle atmosphérique, la durée de vie du plasma doit être augmentée. En effet, si le mécanisme de pont ohmique n'est, en principe, pas limité en distance, la durée de vie du canal de plasma est brève. Après quelques dizaines de nanosecondes, les électrons libres présents dans le plasma se sont attachés à des molécules d'oxygène formant les ions, qui eux-mêmes disparaissent après

quelques  $\mu\text{s}$ . Or, une décharge guidée se propage à une vitesse de l'ordre de 1 mètre par  $\mu\text{s}$  (3'600'000 km/h). Après avoir guidé la décharge sur quelques mètres, le filament risque donc de disparaître. Aussi, pour étendre cette technique à l'application réelle, c'est-à-dire pour décharger un nuage orageux se trouvant à 200-300 mètres du sol, la durée de vie du plasma doit être augmentée. Dans ce but, il était utile d'étudier l'effet d'une deuxième impulsion laser, plus longue que celle qui a généré les filaments, mais d'énergie relativement élevée.

Le but de cette deuxième impulsion est de générer de nouveaux électrons libres. Cela peut se faire par ionisation par avalanche, par chauffage du plasma, ou par photodétachement des ions. Ces trois effets empêchent les électrons libres de se rattacher trop rapidement aux molécules d' $\text{O}_2$  pour former des ions. Une seconde impulsion laser, même d'énergie modérée (inférieure à 1 J), peut améliorer le taux de déclenchement des décharges sur une distance inter-électrode de l'ordre du mètre.

A 910 kV, le taux de déclenchement passe de 10 % à 57 % en cas de double impulsion. De plus, la seconde impulsion permet d'abaisser le seuil de déclenchement d'au moins 40 kV supplémentaire, soit 5 % de réduction. En effet alors que le taux de déclenchement de décharge est déjà de 0 % avec une simple impulsion à 870 kV, il est encore possible de guider des décharges de haute tension dans une configuration double impulsion jusqu'à 830 kV.

Ainsi, l'utilisation d'une seconde impulsion, même d'énergie modeste, peut

nettement améliorer le taux de déclenchement de décharges de haute tension par les filaments laser si elle est synchronisée avec une impulsion femtoseconde. Il reste à étudier quelle longueur d'onde, quelle énergie et quelle synchronisation optimiseront cet effet.

## **Guider et déclencher la foudre à l'échelle atmosphérique ?**

Les expériences menées en laboratoire démontrent l'efficacité du déclenchement de décharges de haute tension, même sous la pluie, et l'augmentation du taux de déclenchement grâce à une deuxième impulsion laser.

Des expériences de terrain, en grandeur réelle sont maintenant nécessaires. À cet effet, le système TéraMobile que l'on peut déplacer sur des sites hautement foudroyés constitue la chaîne laser la plus adaptée.

Une série de tests préliminaires au guidage et au déclenchement de la foudre en situation réelle a donc été réalisée au Nouveau Mexique, au Langmuir Laboratory, dans le cadre d'une collaboration avec une équipe du New Mexico Tech dirigée par William Winn. Lors de cette campagne, deux orages seulement ont pu être étudiés, limitant le nombre de tests. Les résultats obtenus pendant ces deux orages, encore en cours d'analyse, devraient cependant faciliter la préparation des prochaines campagnes d'expérimentation qui pourraient permettre de faire un nouveau pas vers le paratonnerre du futur. ■