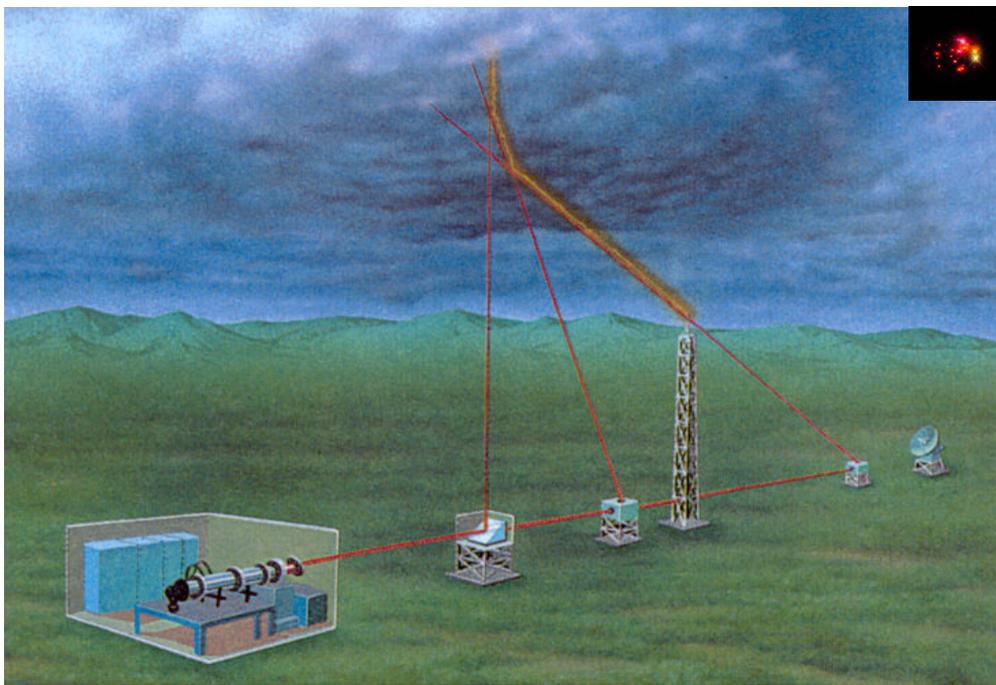


APPLICATION DES IMPULSIONS LASER  
ULTRA-INTENSES  
AU DECLENCHEMENT ACTIF DE LA Foudre



Arnaud Mialon  
Xavier Blanchet

TERE réalisé au LASIM

# Sommaire

<b>Introduction :</b> .....	2
<b>I- La foudre et les protections</b> .....	4
1- Explication météorologique du phénomène de foudre.....	4
a- Electrification des nuages.....	4
b- Processus de foudre.....	7
2- Protection contre la foudre .....	9
<b>II- Vers le déclenchement de la foudre par des impulsions ultra-courtes et ultra-intenses</b> .....	11
1- Le principe de l'expérience.....	11
2- Teramobile : un système terawatt unique au monde.....	13
3- Théorie de la filamentation .....	13
a- Théorie non-linéaire.....	14
b- Effet Kerr optique : auto-focalisation.....	15
c- Création d'un plasma par effet Kerr.....	16
d- Auto-canalisation.....	16
e- Auto-modulation de phase.....	17
4- Contrôle du filament .....	20
a- Focalisation du faisceau.....	20
b- Contrôle de la puissance crête.....	21
c- Expériences récentes.....	24
<b>III- Proposition expérimentale pour le déclenchement actif des foudres</b> .....	28
<b>Conclusion</b> .....	30
<b>Références bibliographiques</b> .....	31

# INTRODUCTION

Les moyens actuels de protection contre la foudre ( paratonnerre, parafoudre et blindages électriques ) ne s'avèrent pas fiables à 100% : en effet, malgré ces systèmes de protection, le champ électrique très haute fréquence de la foudre peut créer des incidents de réseau ou des surtensions

Une des perspectives consisterait à déclencher et à guider la foudre grâce à un faisceau laser de haute puissance, contrôlant ainsi son point d'impact avec le sol.

Dans cette optique plusieurs projets ont été développés à l'aide de laser nanoseconde ou picoseconde. En France, des chercheurs du CEA à Grenoble, autour d'André Eybert-Bérard, avaient démontré en 1996, la possibilité de guider une décharge électrique entre deux électrodes, sans toutefois aboutir au déclenchement de la foudre. L'année suivante, les recherches ont été interrompues pour cause de restructuration. A ce jour, EDF n'a engagé aucun programme sur le sujet, la protection actuelle du réseau étant jugée suffisante et les résultats des recherches trop peu probants. L'équipe d'Hubert Mercure de l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ) développe avec l'INRS (Institut national de recherche scientifique québécois, sous la direction de M. Jean-Claude Kieffer) un laser ultraviolet à impulsions ultracourtes (inférieures à la nanoseconde). Ses travaux restent pour l'instant confinés au laboratoire : «Nous avons obtenu des résultats encourageants de guidage de décharge électrique sur des distances entre 30 cm et 3 m. Actuellement et pendant encore plusieurs mois, nous travaillons entre 10 et 15m». Les expériences sur le terrain n'auront lieu que plus tard.

La disponibilité récente des lasers femtoseconde amplifiés ouvre de nouvelles perspectives. Ces lasers se distinguent des lasers classiques par leur extrêmement courte durée ( < 100 fs ) et par leur grande puissance instantanée ( quelques terawatts ). Ce type de laser est utilisé dans le cadre du projet franco-allemand appelé Teramobile, auquel participe le LASIM ( LAboratoire de Spectrométrie Ionique et Moléculaire ) à l'Université Lyon 1. Destiné aussi à la détection des polluants atmosphériques, un lasers terawatt a été intégré dans un conteneur pour être mobile.

Pour des impulsions ultra-intenses, la propagation dans l'atmosphère provoque des phénomènes non linéaires : l'effet Kerr (focalisation du faisceau ) dû à une modification de l'indice de l'air, concentrera en un point une puissance suffisante pour ioniser les molécules du milieu traversé. Par auto-canalisation, le plasma ainsi généré se prolongera créant un filament conducteur électrique. Dès lors, il apparaît intéressant d'utiliser ces colonnes de plasma induit par laser, pour déclencher et guider la foudre.

Il s'agit d'un nouveau domaine d'application que les chercheurs sont en train d'explorer. Dans notre travail de recherche et d'étude encadré nous ferons le point sur l'avancé récente des connaissances dans ce domaine.

Entre autre, nous expliquerons dans le premier paragraphe, les phénomènes naturels d'électrification des nuages et la génération de la foudre. Nous évoquerons les systèmes de protection opérationnels à l'heure actuelle, tels que les parafoudres et les paratonnerres. Dans un second paragraphe, nous décrivons d'abord le principe du déclenchement de foudre par laser. Nous étudierons ensuite la propagation des impulsions ultra-intenses dans un milieu transparent (l'air par exemple). Nous expliquerons comment sa puissance élevée provoquera une modification de l'indice du milieu (effets non linéaires) entraînant des phénomènes inhabituels tels que l'effet Kerr (focalisant le faisceau ) ou encore l'auto-canalisation. L'énergie du laser ainsi concentrée

permettra d'ioniser les particules constituant l'air, créant ainsi un filament de plasma, dont les propriétés électriques nous permettront de proposer, dans une troisième partie, une conception d'un dispositif expérimental pour le déclenchement et le guidage de la foudre. Des résultats récents obtenus par l'équipe Teramobile et une équipe japonaise travaillant sur le sujet sont aussi présenté succinctement.

# **I- LA Foudre ET LES PROTECTIONS**

L'origine de la foudre, constitue la dernière étape d'une série de phénomènes se déroulant à l'intérieur du nuage. Nous essayerons ici d'expliquer les différents mécanismes mis en jeu, afin de mieux comprendre ce qu'est réellement la foudre.

Nous consacrerons également un paragraphe aux moyens mis en place pour protéger des installations.

## **1-EXPLICATION METEOROLOGIQUE DU PHENOMENE DE Foudre**

La foudre (décharge) est une conséquence d'accumulation de charges négatives dans la partie inférieure du nuage et l'accumulation de charges positives au sol. Nous allons voir quels sont les phénomènes qui engendrent cette répartition de charges qui s'avère complexe.

### **a- Electrification des nuages**

Les nuages responsables de la foudre sont les cumulo-nimbus. Ils se développent à des altitudes comprises entre 1000 et 15000 mètres.

Le processus par lequel le nuage orageux acquiert des charges est plutôt mal compris. Cependant deux théories tentent d'expliquer ce phénomène. Ce sont la théorie de la précipitation ( ou gravitation ) et la théorie de la convection.

La **théorie de la convection** ne considère que les mouvements d'air à l'intérieur du nuage, prenant en compte deux sources extérieures pour fournir les charges électriques du nuage.

La première source concerne les radiations telles que les rayons cosmiques, les U.V., la radioactivité naturelle, présentant des photons suffisamment énergétiques pour ioniser les atomes neutres de l'air. Les photons entrent en collisions avec les atomes neutres de l'air, et lorsque leur énergie est suffisante, leur arrachent un électron formant ainsi un cation. L'électron ainsi détaché va rapidement aller s'attacher à un autre atome pour former un anion. Cet électron peut aussi produire une avalanche électronique à condition que le champ électrique régnant dans le nuage soit supérieur à 26 kV/cm. L'électron que l'on vient de libérer est soumis au champ électrique et subit une force qui va lui communiquer une accélération et donc faire augmenter son énergie cinétique. L'électron ainsi accéléré va entrer en collision avec un autre atome, lui arrachant un électron si son énergie est suffisante : il s'agit de l'ionisation par collision. On assiste alors à une cascade électronique (amplification et propagation du phénomène).

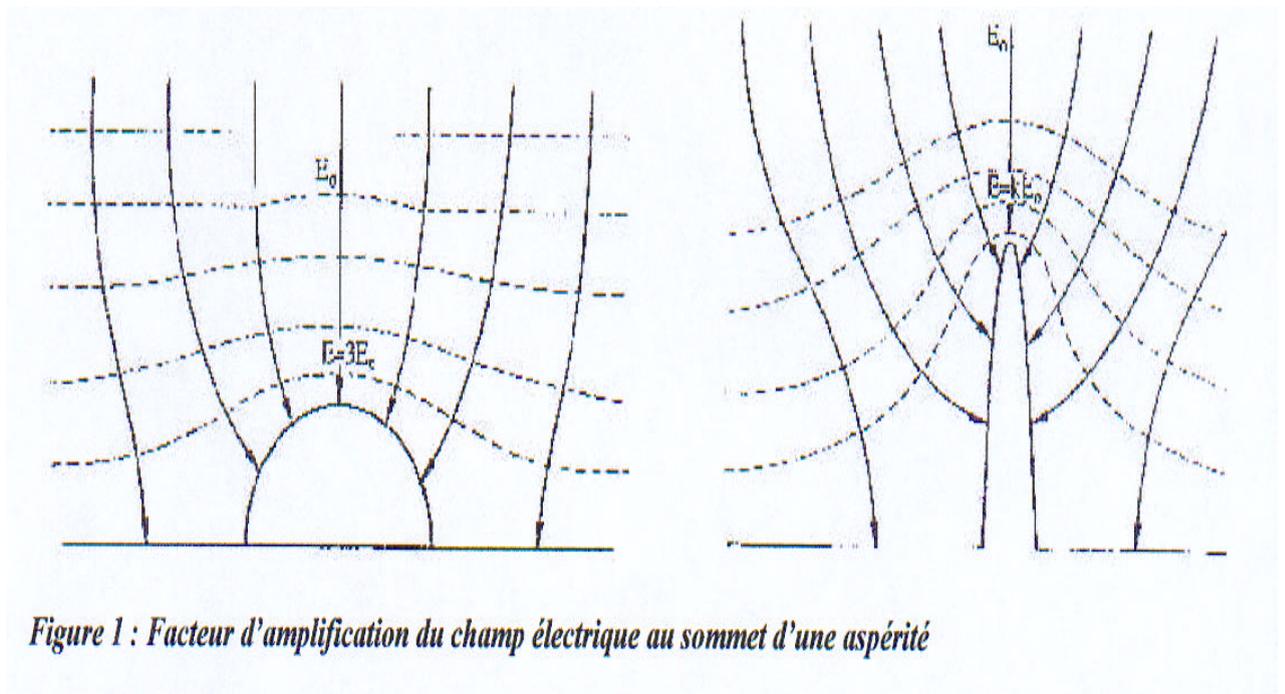
Le travail le long d'une ligne de champ électrique a un effet multiplicateur du nombre d'électrons libres :

$$dN = N \cdot \alpha(E) \cdot dx$$

avec  $\alpha(E)$ : coeff. Multiplicateur de Townsend ( coeff. qui augmente avec le champ électrique, et la diminution de la pression).

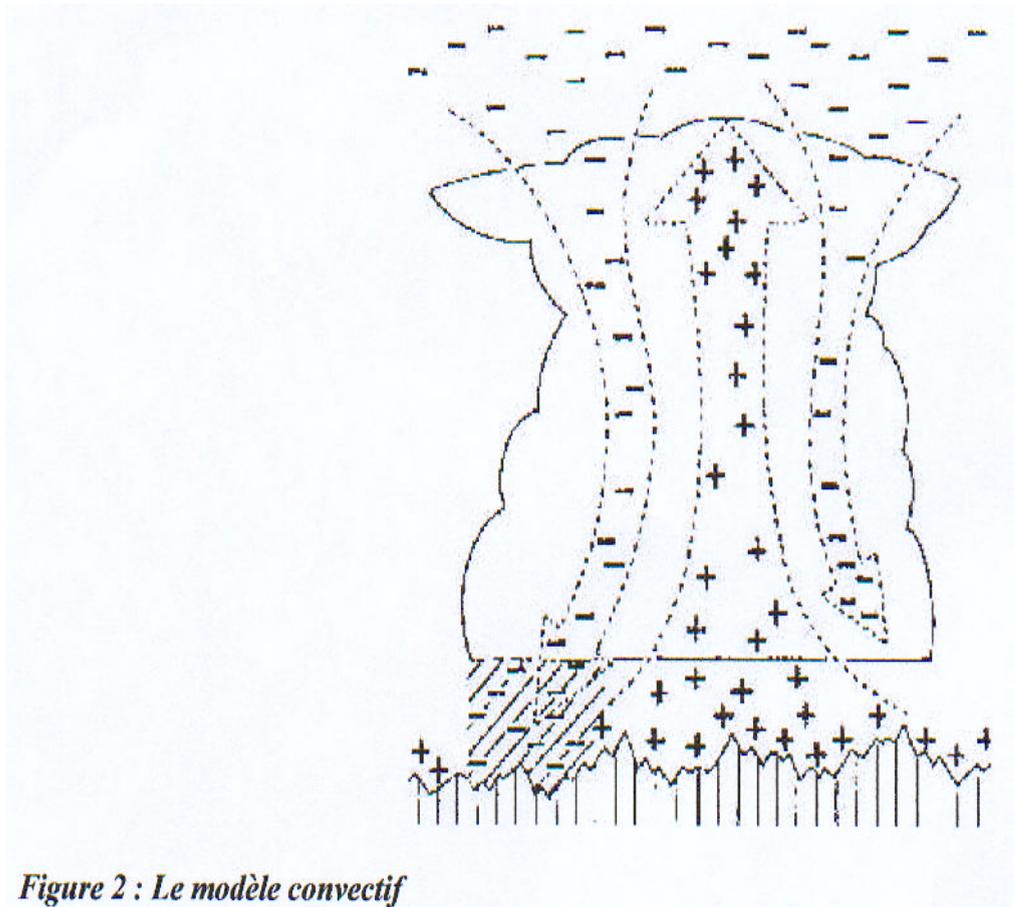
D'où le nombre d'électrons libres :  $N=N_0 \cdot \int \alpha(E) dx$

La deuxième source est la conséquence de l'effet Corona ou couronne (cf. figure 1). Cet effet se manifeste sous la forme d'effluves bleu-violet de quelques cm ( ce sont les feux de Saint Elme, visibles au sommet d'un mât de bateau). Toute aspérité par effet de concentration des lignes de champ et de tassement des surfaces équipotentielles peut considérablement augmenter le champ superficiel local. Une seule demi-sphère triple la valeur du champ moyen. Un demi ellipsoïde pointu fait accentuer davantage l'accroissement du champ. Or on a vu qu'un champ de 26 kV/cm développe des avalanches électroniques. Il se produit alors au voisinage de ces aspérités une ionisation importante.



*Figure 1 : Facteur d'amplification du champ électrique au sommet d'une aspérité*

Cet effet corona engendre des ions qui vont dériver lentement vers le nuage sous l'influence des mouvements d'air chaud par convection (cf. figure 2).



*Figure 2 : Le modèle convectif*

La combinaison de ces deux effets est à la base de la structure électrique du nuage. Une fois dans les régions supérieures du nuage, les ions positifs attirent les ions négatifs formés par le biais du rayonnement. Les ions négatifs se fixent à des gouttes d'eau dès l'entrée dans le nuage. Puis, les courants descendants de la périphérie du nuage entraînent ces charges vers le bas.

**La théorie de la gravitation** est fondée sur le fait que les charges négatives sont plus lourdes que les charges positives et que la séparation des charges se fait par le biais de la différence de masse. La génération des charges peut s'expliquer en faisant intervenir la gravitation. Le nuage est en effet constitué de particules de masses différentes : les cristaux de glace, les grosses particules, le brouillard de petites gouttes d'eau... Les particules qui tombent acquièrent une charge positive alors que le brouillard se charge négativement. La charge est ensuite générée par frottement de l'air sur les gouttes. Mais ces considérations sont loin d'être suffisante.

En fait, la répartition des charges serait due à une inégale pulvérisation des gouttes de pluie. Il faut en effet que ce courant subisse des fluctuations importantes afin de souffler brusquement la goutte en forme de poche dont le fond s'amincit, se perce et éclate en fines gouttelettes emportées par l'air. Les gouttelettes issues du bord de la poche emportent une charge positive alors que les autres gouttelettes entraînent une charge globale négative. La charge ainsi produite atteint les  $10^{-10}$  C/cm<sup>3</sup> d'eau.

La théorie de gravitation nécessite un processus d'échange de la charge entre particules de différentes tailles. Ce processus sera inductif ou non-inductif. Le processus d'échange de la charge glace-glace c'est-à-dire entre les cristaux de glace et les grêlons semble avoir été bien compris. En fait, la glace présente des défauts cristallins  $H_3O^+$  et  $HO^-$ , leur nombre augmentent avec la température. Lorsqu'une particule de glace issue d'une région chaude parcourt une région froide, et donc des particules plus froides, la particule chaude va céder un défaut positif à la particule froide plus rapidement que la particule froide céderait un défaut négatif. Les particules froides vont donc se charger positivement. Cependant, ce processus d'échange entre les régions froides n'explique nullement la foudre dans les nuages chauds.

En réponse, à la surface terrestre des charges positives s'accumulent, formant avec le bas du nuage un grand condensateur.

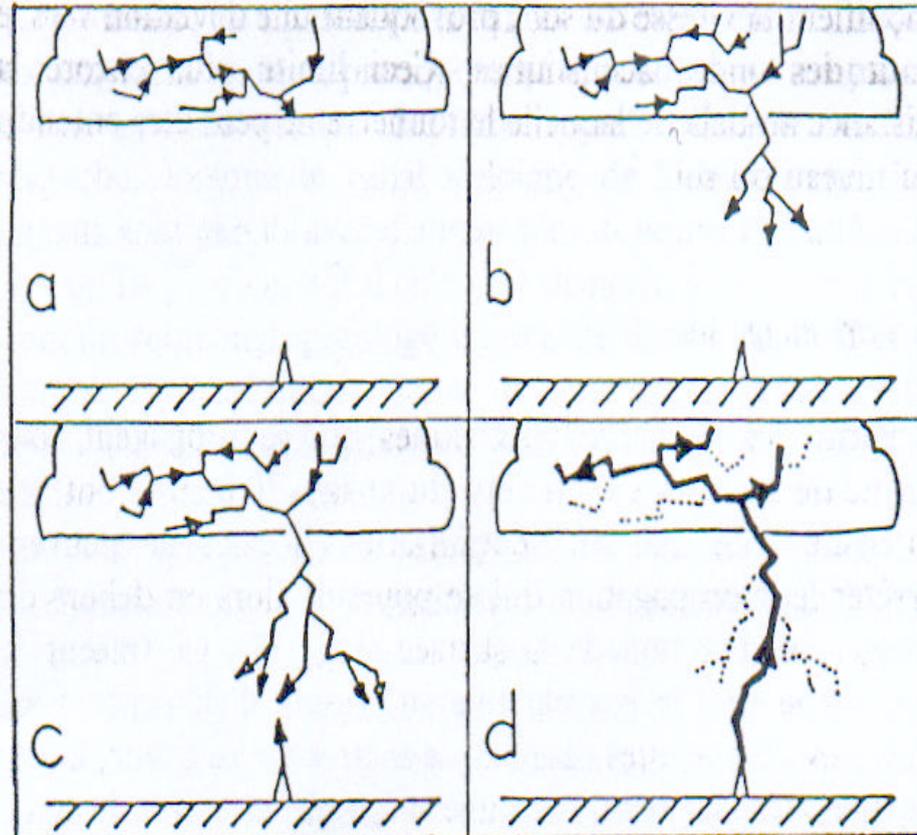
## **b- Processus de foudre**

Le champ électrique à l'intérieur du nuage augmente jusqu'à atteindre une valeur de quelques centaines de kV/m. Renforcé localement par effet Corona ( augmentation du champ à proximité d'une structure ), des mécanismes de cascades électroniques ( production d'e- libres de plus en plus nombreux ) sur les hydrométéores (gouttes, grêlons, flocons ...) provoquent la formation d'étincelles électriques, plasma fortement ionisé conducteur électrique.

Suivant l'intensité du champ, cette micro décharge se propage à des distances de quelques centimètres et des **connexions électriques** s'établissent entre des hydrométéores voisins. L'amplification et la propagation du phénomène à plus grande distance créent alors des **traceurs** se déplaçant à une vitesse de 10 à 20 km/s. Les décharges électriques, qui se propagent dans le nuage, peuvent se connecter à des poches de charges opposées. Celles-ci se neutralisent par circulation d'un courant à travers le canal ionisé.

Parmi ces traceurs, 20 à 30 % ont une intensité telle que les neutralisations locales ne peuvent arrêter leur propagation qui se poursuit alors en dehors du nuage, en direction du sol. A la surface de la terre le même phénomène se produit mais d'intensité moindre.

Lorsque les deux traceurs se rencontrent (à quelques dizaines de mètres de hauteur ), un court-circuit s'établit, et on assiste au phénomène de production d'un éclair. L'intensité du courant est de quelques dizaines de kilo ampère ( cf. figure 3).



**figure 3 : propagation des traceurs et déclenchement de la foudre**

Pour montrer la puissance d'un coup de foudre, il est intéressant de donner quelques caractéristiques à son sujet :

- \*puissance instantanée :  $10^7$  MW
- \*intensité de crête : 100 kA
- \*durée du coup de foudre : 1 milli-seconde
- \*différence de potentiel entre le nuage et le sol : 100 millions de Volts
- \*charge électrique s'écoulant par coup de foudre : 20 C, soit une énergie de  $2 \cdot 10^9$  J

A titre de comparaison, il faut savoir que l'énergie d'un seul coup de foudre suffirait à alimenter en électricité une ville comme Paris (10 millions d'habitants) pendant un jour, et qu'elle dégage une énergie équivalente à 10 bombes d'Hiroshima.

Considérant ces caractéristiques et sachant que ce phénomène se produit 100 fois par seconde à travers le monde (la foudre frappe près de deux millions de fois le sol français par an), il est important d'élaborer un système de protection efficace.

Malheureusement, la foudre tue des centaines de gens en France par an, causant par la même occasion des dégâts estimés à des centaines de millions de francs.

En définitive, des charges négatives s'accumulent dans la partie inférieure du nuage, formant avec les charges positives concentrées à la surface terrestre un immense condensateur. Les champs induits sont suffisamment importants pour engendrer des traceurs hors du nuage. L'accroissement de ceux-ci va permettre la connexion avec ceux issus du sol. Un pont électrique sera alors formé et on observera la décharge du nuage. Le phénomène ainsi observé est appelé « foudre » et généralement suivi d'une onde de choc (grondement) appelé « tonnerre ».

Il semblerait alors intéressant de chercher à connecter ces traceurs (avant qu'ils ne soient trop importants pour relier la terre par eux-mêmes) à notre faisceau laser afin de guider l'éclair.



## 2- PROTECTION CONTRE LA FOUORE

Le premier **paratonnerre** fut la tige de Franklin, elle fut inventer en 1753.

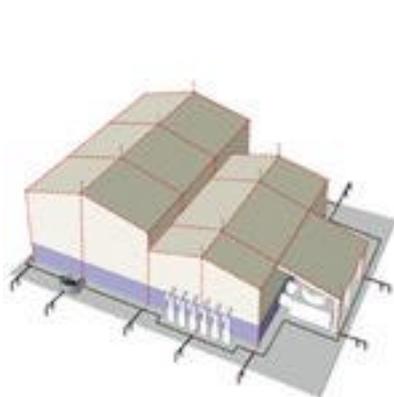
Plusieurs tentatives d'amélioration eurent lieu. Par exemple L. Szillard, un physicien hongrois pensait que des paratonnerres radioactifs pourraient être efficaces. En fait, l'ionisation créée par une source radioactive placée à la pointe d'une tige de Franklin était sensée décharger les nuages orageux. Mais pour que ce dispositif soit efficace il faudrait une activité de milliers de curies, ce qui n'est pas convenable pour un paratonnerre. Cependant la réponse à cette mise en défaut du paratonnerre radioactif fut que les ions créés par ionisations rallongeaient la tige et donc augmentaient son pouvoir attracteur. Ce type de paratonnerre fut interdit à la fabrication devant son manque d'efficacité.

Il existe cependant des **paratonnerres** bien plus efficaces comme par exemple le dispositif à effet corona piloté. Ce dispositif consiste à piloter l'effet couronne par l'émission de trains d'impulsions de haute tension ( de l'ordre de la dizaine de milliers de volts ). Le dispositif à étincelles est également un type de paratonnerre.

Fréquemment les sites sont protégés grâce à **des paratonnerres ou des parafoudres**.

Les paratonnerres sont destinés à la protection des bâtiments contre les effets directs de la foudre. Ils sont constitués d'un système de capture et d'une liaison à la terre pour écouler les courants de foudre.

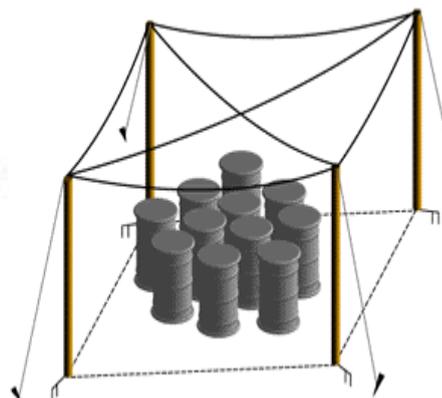
Les dispositifs les plus fréquemment utilisés sont le paratonnerre à cage maillée (cf. figure 4.a), le paratonnerre à dispositif d'amorçage (cf. figure 4.b) et le paratonnerre à fil tendu (cf. figure 4.c).



*figure 4.a*



*figure 4.b*



*figure 4.c*

Les **parafoudres** sont plus ciblés pour la protection des équipements électriques raccordés à l'installation contre les effets indirects de la foudre (phénomène de surtension ). Ils agissent à la fois sur l'amplitude de l'onde et sur la raideur du front d'onde. Dans le parafoudre à éclateur utilisé par exemple pour la protection des transformateurs, un éclateur est relié à la terre par une résistance à décharge. Au moment du coup de foudre, l'arc qui s'amorce dans l'éclateur est soufflé par le champ magnétique produit par self-induction : Une bobine d'induction placée entre l'éclateur est le circuit primaire du transformateur permet de réduire la raideur du front d'onde. Il existe de nombreux parafoudres utilisant des conducteurs, des résistances non linéaires et des auto-valves.

Les deux systèmes sont complémentaires et donc généralement associés.

Les lignes hautes tensions sont en majorité protégées par des **câbles de garde**. Ce sont des câbles que l'on place au-dessus des lignes électriques, directement en contact avec le poteau. Sans ces câbles de garde, lorsqu'un coup de tonnerre frappe une ligne, un courant d'intensité  $i/2$  s'écoulerait de chaque côté du point d'impact.

Si l'impédance caractéristique de la ligne est  $z$ , l'onde de tension associée à en première approximation la valeur  $z.i/2$ . Dans le cas d'un coup de foudre moyen de 25 kA, et d'une impédance du conducteur de  $400 \Omega$ , la valeur maximale de la surtension est de 5000 kV. Si le câble de garde est utilisé, la foudre frappera ce câble, disposé selon le modèle électrogéométrique. Si le pylône est représenté par une inductance  $L$  et la prise de terre par une résistance  $R$ , la surtension aura pour valeur  $R.i(t) + L.di(t)/dt$ . Toujours dans le cas d'un coup de foudre de 25 kA dont le front de montée en courant serait de  $10 \text{ kA}/\mu\text{s}$ , d'une résistance de  $10 \Omega$  et d'inductance de  $10 \mu\text{H}$ , la montée maximale en potentiel serait de 350 kV, valeur bien inférieure à la surtension provoquée par un choc direct.

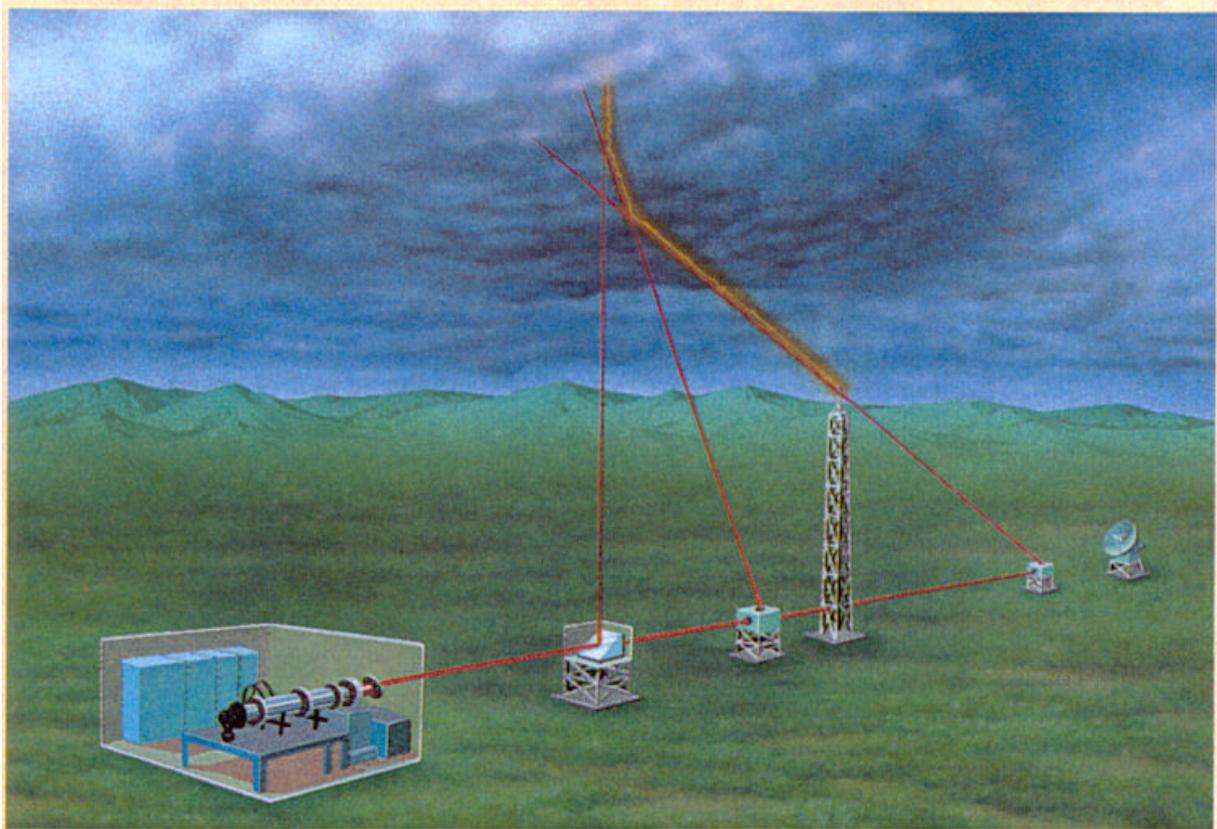
L'explication du phénomène de foudre, nous permet alors d'émettre l'hypothèse selon laquelle il serait possible de la guider par un laser. Il apparaît alors important de comprendre les mécanismes de propagation du laser dans un milieu tel que l'atmosphère, et des effets non-linéaires ( filamentation) qu'ils engendrent. Nous allons donc nous attacher à la compréhension de tels phénomènes.

## **II- VERS LE DECLENCHEMENT DE LA FOUDRE PAR DES IMPULSIONS ULTRA-COURTES ET ULTRA-INTENSES**

### **1- PRINCIPE DE L'EXPERIENCE**

Pour attirer de manière efficace la foudre, l'idée est de produire une décharge locale contrôlée, ce qui avait conduit à la réalisation de pointes radioactives au sommet des paratonnerres. Ces dispositifs ne sont plus aux normes sanitaires actuelles. Le progrès de la technologie laser nous a permis de concevoir un nouveau type de paratonnerre actif qui utilise une colonne de plasma produit au passage d'un faisceau laser intense.

Le principe est illustré par la photo suivante.



On voit ici une maquette d'un dispositif de déclenchement de foudre par laser. Le faisceau issu d'un laser est dirigé vers les nuages grâce à un dispositif à trois angle successivement. L'ionisation se produit le long du faisceau formant un fil conducteur qui relie le nuage chargé et le paratonnerre classique. On voit au fond un radar météorologique qui permet de détecter les nuages chargés.

Les points clés d'un tel dispositif sont d'abord un système laser qui produit des impulsions intenses et qui est opérationnel sur le terrain d'une manière autonome. Ensuite un système optique doit permettre de contrôler d'une manière précise l'emplacement de la colonne de plasma générée. Ce contrôle est cruciale pour un guidage précis des foudres mais aussi pour la sécurité de l'unité laser employée. Un paratonnerre classique est souvent associé à un tel dispositif.

Par la suite nous allons d'abord donner une description brève du dispositif employé par l'équipe Teramobile. Nous nous intéresserons aux bases théoriques des phénomènes de filamentation produisant des colonnes de plasma conducteurs, et nous expliquerons une méthode qui permettra de contrôler le démarrage du plasma et finalement nous donnerons quelques résultats récents.

## 2- TERAMOBILE : UN SYSTEME TERAWATT UNIQUE AU MONDE

Le laser utilisé par l'équipe teramobile produit une longueur d'onde d'environ 800 nm ( Ti:saphir ). Sa principale caractéristique est sa puissance élevée : 5 terawatts. Mais son originalité est qu'il est intégré dans un conteneur, donc mobile. Construit par Thompson CSF Laser ( actuellement Thales ) ce laser est unique au monde.



*Le système teramobile en cours de déplacement vers son prochain site d'expérimentation.*

## 3-THEORIE DE LA FILAMENTATION

Nous allons ici nous intéresser à la théorie non-linéaire ainsi qu'aux différents effets mis en jeu dans la propagation des impulsions ultra-intenses : effet Kerr optique, auto-canalisation et auto-modulation de phase.

## a- Théorie non linéaire

Un faisceau lumineux par son champ électrique, induit une polarisation P dans le milieu qu'il traverse.

$$P = \epsilon_0 \chi^* E$$

On rendra compte de la non-linéarité en développant de la forme :

$$\chi = \chi^{(1)} + \chi^{(2)} * E + \chi^{(3)} * E^2$$

$$\Rightarrow P = \epsilon_0 \chi^{(1)} * E(t) + \epsilon_0 \chi^{(2)} * E(t)^2 + \epsilon_0 \chi^{(3)} * E(t)^3$$

$\chi^{(1)}, \chi^{(2)}, \chi^{(3)}$  : **susceptibilité** d'ordre 1, 2 et 3. Pour l'air, milieu homogène et isotrope,  $\chi^{(1)}$  est un scalaire,  $\chi^{(2)}$  est nul,  $\chi^{(3)}$  représente le premier terme de non linéarité.

$$D' où \quad P = \underbrace{\epsilon_0 \chi^{(1)} * E(t)} + \underbrace{\epsilon_0 \chi^{(3)} * E(t)^3}$$

P = partie linéaire + partie non linéaire

Ce qui permet d'écrire le vecteur déplacement  $\vec{D}$

$$D = \epsilon_0 * E + P = \epsilon_0 * (1 + \chi^{(1)} + 3 * \chi^{(3)} * |E|^2) * E$$

( le facteur 3 représente la dégénérescence )

$$D = \epsilon_0 * \epsilon_r * E(t)$$

$\epsilon_r = 1 + \chi_{\text{eff}}$  : permittivité du milieu

On en déduit l'indice du milieu :

$$n = \sqrt{\epsilon_r} = \sqrt{1 + \chi_{\text{eff}}}$$

$$d' où \quad n = \sqrt{1 + \chi^{(1)} + 3 * \chi^{(3)} * |E|^2} \quad (1)$$

Qui peut s'exprimer sous la forme  $n = n_0 + 2 * n_2 * |E|^2$  (2)

$$\text{Avec } n_0 = \sqrt{1 + \chi^{(1)}}$$

$$(1)^2 - (2)^2 \Rightarrow 4 \cdot n_0 \cdot n_2 = 3 \chi^{(3)}$$

$$\Rightarrow n_2 = \frac{3 \chi^{(3)}}{4 n_0}$$

Si on définit l'intensité comme étant  $I = 2 \epsilon_0 n_0 c E(\omega)^2$  on écrit donc la relation

(3) :

$$n = n_0 + n_2 I$$

En comparant (3) et (4) on peut en déduire que  $n_2 = \frac{3 \chi^{(3)}}{4 \epsilon_0 n_0^2 c}$

Le modèle classique de l'oscillateur anharmonique permet le calcul de  $\chi^{(3)}$  pour l'air ( $T=20^\circ\text{C}$ )

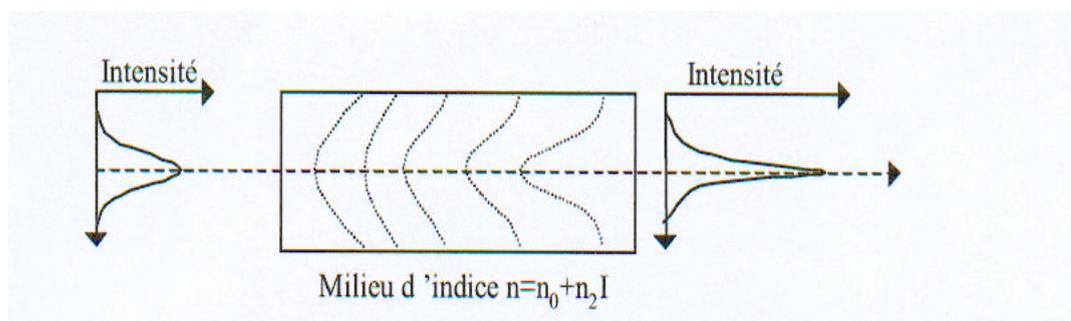
$$\chi^{(3)} = 1.68 \cdot 10^{-25} \text{ m}^2/\text{V}^2$$

$$n_2 = 4.74 \cdot 10^{-19}$$

L'intensité du laser étant importante le terme  $n_2 \cdot I$  n'est plus négligeable par rapport à  $n_0$ . L'indice du milieu varie alors avec l'intensité du laser ce qui entraîne les effets inhabituels introduits ci-après.

## **b- Effet Kerr optique : auto-focalisation**

Dans le cas d'un faisceau à profil d'intensité gaussien, la variation de l'indice du milieu suivra la variation d'intensité. L'indice au centre sera alors plus élevé qu'au bord. La vitesse de phase ( $v_p = c/n$ ) sera elle aussi inhomogène, et entraînera la focalisation du faisceau (cf. figure 5).



*figure 5 : variation de l'intensité au cours de la propagation*

Le milieu se comporte alors comme une lentille convergente : effet Kerr optique, ce qui entraîne l'auto-focalisation.

### **c- Création d'un plasma par effet Kerr**

L'auto-focalisation engendre une augmentation de l'intensité au centre du faisceau. Sous cette forte intensité les molécules composant l'air sont ionisées (cf. figure 6), créant ainsi un plasma.

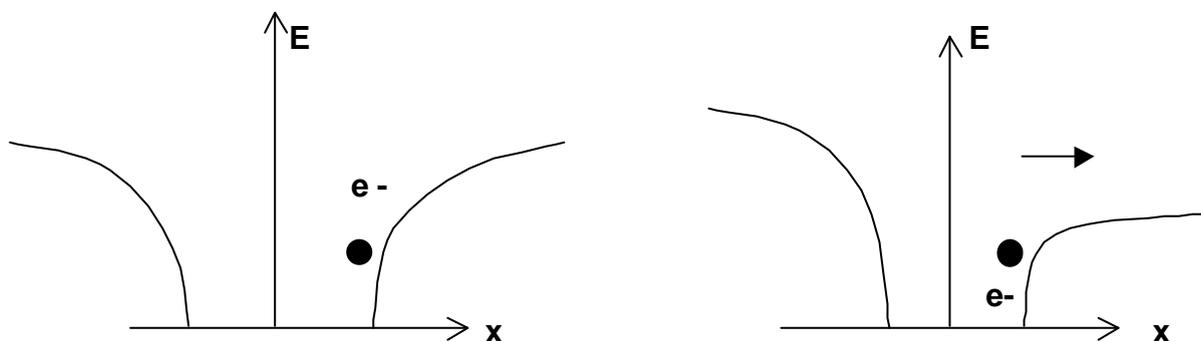
Dans la littérature, on trouve le potentiel d'ionisation :

O<sub>2</sub> : 12.063 eV

N<sub>2</sub> : 15.576 eV

Un photon de 800 nm a une énergie de  $E=hc/\lambda=1.55$  eV. Il faudra donc 10 photons de cette énergie pour ioniser l'air: c'est l'ionisation multi-photonique.

Dans cette optique, on utilise des lasers à haute intensité. Les lasers Ultraviolets, se situant dans un domaine de longueurs d'ondes plus énergétiques semblent plus adéquates.



*figure 6 : Du point de vue classique, le champ électrique exercé par la lumière abaisse la barrière de potentiel et permet l'ionisation de la molécule.*

### **d- Auto-canalisation**

Le plasma ainsi créé va engendrer une divergence de l'indice du milieu. L'équilibre entre l'effet Kerr et ce phénomène conduit à la formation d'un filament de plasma : auto-canalisation.

Au centre du faisceau, le plasma de faible densité va en effet modifier l'indice du milieu en le diminuant suivant la loi :

$$\Delta n_{\text{plasma}} = -\frac{\omega_p^2}{2\omega^2}$$

Avec

$\omega_p^2 = Ne^2 / m \epsilon_0$  : pulsation du plasma obtenue par le modèle de l'e-élastiquement lié

N : densité d'e- libres

Cette nouvelle variation d'indice, s'opposant à l'auto-canalisation, fera diverger le faisceau.

Mais simultanément, au bord l'intensité est encore suffisante pour que l'effet Kerr persiste :

$$Dn_{\text{kerr}} = n_2 * I$$

Si ces deux effets sont du même ordre, un équilibre entre les deux phénomènes se crée et le diamètre du faisceau se conserve. Expérimentalement, les impulsions se propagent en filament sur une distance d'environ cent mètres.

Cet équilibre est très dur à obtenir avec un laser Ultraviolet, c'est pourquoi on utilise un laser Infrarouge.

Grâce à ce filament, on pense pouvoir guider la foudre.

## e- Auto-modulation de phase

L'auto-modulation de phase est un phénomène caractéristique de la propagation d'un laser haute puissance. Cette propriété ne nous intéresse pas dans l'application que nous en faisons. Elle nous permet seulement d'expliquer l'apparition du continuum de lumière blanche au centre du faisceau.

Considérons un faisceau généré d'impulsion gaussienne (cf. figure 7) :

$$E(t) = E_0 * \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right] * \cos[k_0.z - \omega_0.t]$$

L'intensité s'écrit

$$I(t) = \frac{1}{2} * E_0^2 * \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right] = I_0 * \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right]$$

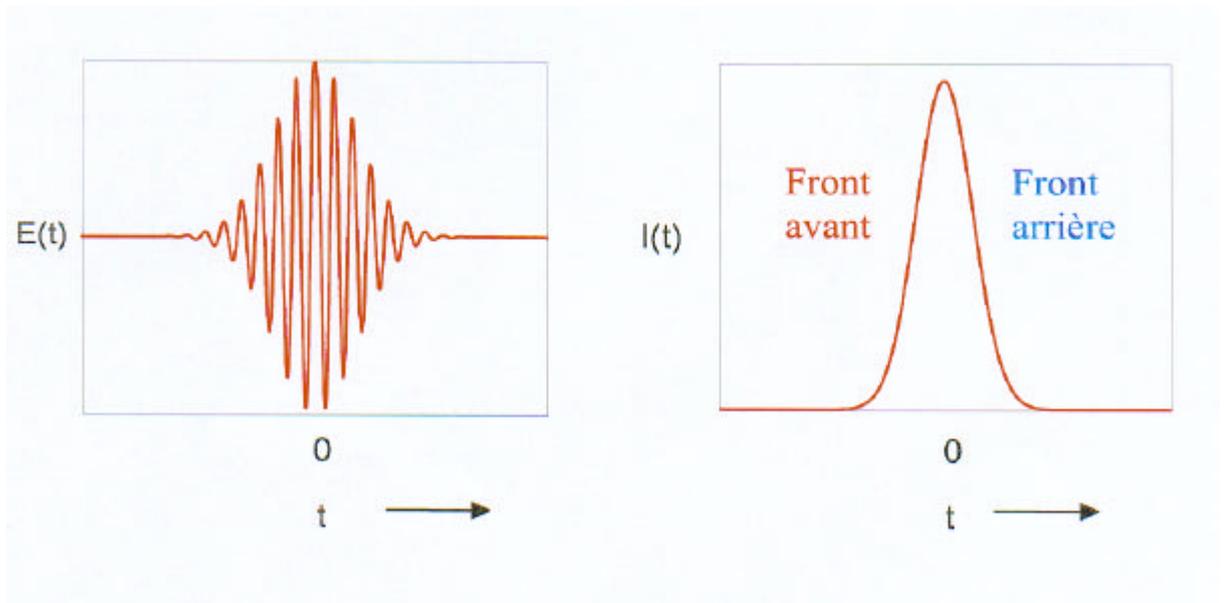


figure 7 : Allure du champ et de l'intensité sans effets non linéaires

Se propageant dans un milieu non linéaire ( indice  $n(t)=n_0+n_2*I(t)$ ) le vecteur d'onde associé s'écrit alors :

$$k(t)=\frac{n(t)*\omega_0}{c}=\frac{n_0*\omega_0}{c}+\frac{n_2*\omega_0}{c}*I(t)$$

La phase d'une telle onde devient:

$$\phi(t)=\omega_0*t-k(t)*z=\omega_0*t-\frac{n_0*\omega_0}{c}*z-\frac{n_2*\omega_0}{c}*I(t)*z$$

La dérivée de la phase par rapport au temps donne la pulsation instantanée :

$$\omega(t)=\frac{d\phi}{dt}=\omega_0-\frac{n_2*\omega_0}{c}*z*\frac{dI(t)}{dt}=\omega_0+\ddot{\omega}$$

$$\omega=\omega_0-\frac{n_2*k_0*z}{n_0}\frac{dI}{dt}$$

La réponse non-linéaire du milieu fait varier la fréquence avec l'intensité du faisceau laser : c'est **l'auto modulation** de phase (cf. figure 8).

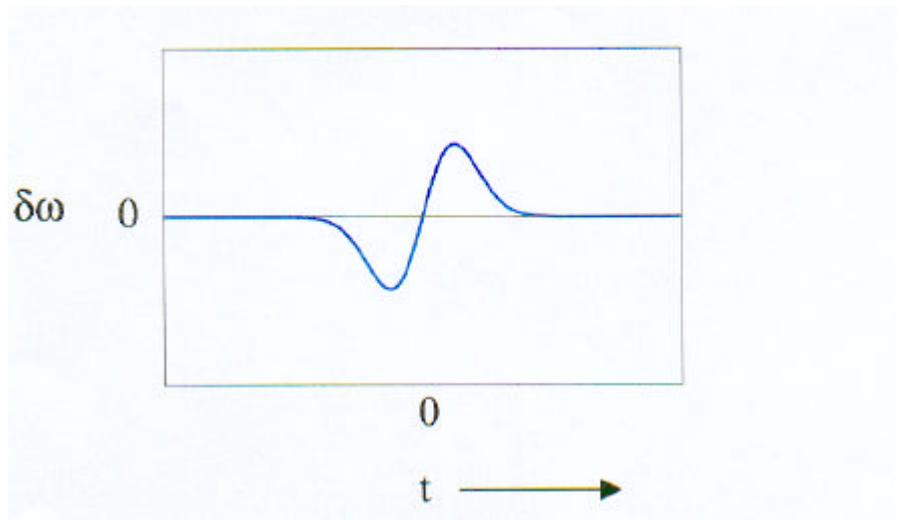


figure 8 : allure du  $\Delta\omega$

Dans le front avant sont générées des basses fréquences, tandis que dans le front arrière sont créées des fréquences plus élevées (cf. figure 9).

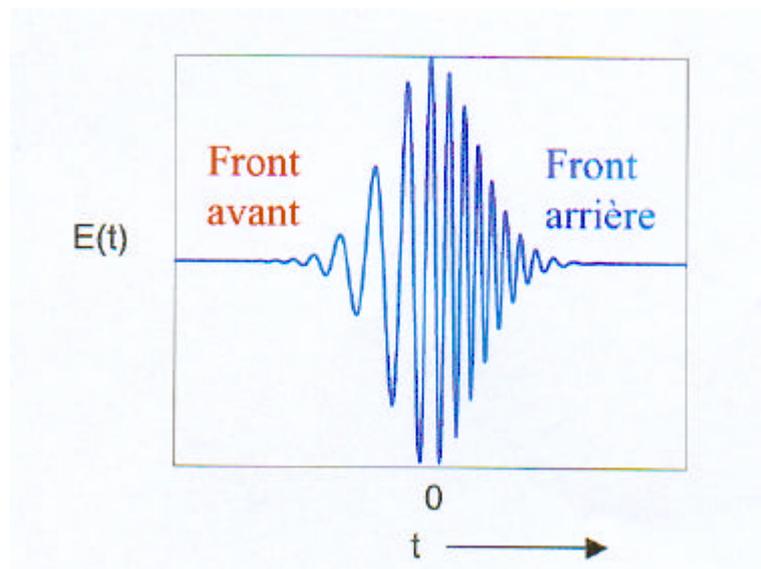
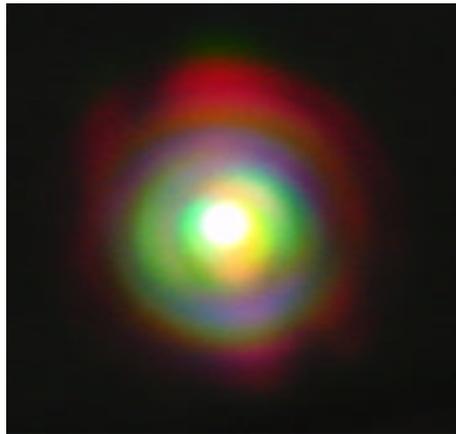


figure 9 : variation de  $E(t)$  sous l'effet d'un milieu non linéaire

Le profil de l'intensité induit un élargissement du spectre de fréquence qui générera un **continuum de lumière blanche**. Le continuum s'échappe du filament sous la forme d'une émission conique.

Nous avons assisté à une expérience de filamentation, effectuée au LASIM. Le laser utilisé avait les caractéristiques suivantes : impulsions de 120 femtosecondes et une énergie de 8 millijoules.

On a observé un continuum de lumière blanche et son émission conique de 12 mm de diamètre (cf. photo 10 ). Pour l'expérience, la focalisation a été obtenue grâce à un miroir concave de 10 m de rayon, ce qui a permis d'obtenir le début du filament au niveau du foyer ( à 5 m du miroir ). On a pu photographier une coupe transversale du faisceau en interposant une cible (feuille de papier ). On a également constaté qu'à proximité du foyer du miroir ( début du filament ), on entendait le claquage de du plasma induit par laser dans l'air.



*figure 10 : génération du continuum de lumière blanche.  
Centre: le canal du plasma, anneaux: émissions coniques.*

## 2- CONTROLE DU FILAMENT

Le contrôle du filament, pour les applications envisagées ( protection contre la foudre ), constitue une partie importante. Il est en effet impératif que le filament débute suffisamment loin pour que lors du déclenchement de la foudre, celle-ci puisse être déviée par un paratonnerre sans endommager le laser.

C'est sur ce point que se concentre actuellement l'équipe du projet téramobile : les récentes expériences en Allemagne ont permis de reculer le début du plasma à une distance de 80 m.

Le principe est de jouer sur la puissance crête, afin d'obtenir une puissance critique ( début du filament ) à la distance désirée. Les deux dispositifs utilisés sont détaillés dans la suite.

### a- Focalisation du faisceau

A l'aide d'une lentille (ou combinaison de lentilles ) on va focaliser le faisceau (cf. figure 11). Ainsi, on va concentrer la puissance de celui-ci en un point, d'où démarrera la filamentation. Mais il est difficile de dépasser 30 mètres par cette méthode.

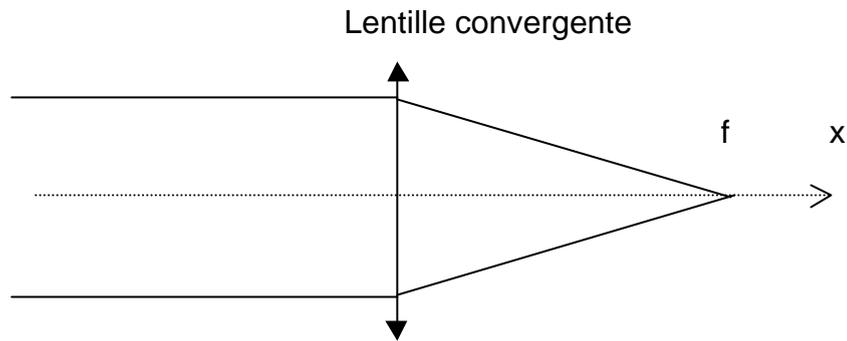


Figure 11 : focalisation du faisceau

C'est ce principe qui est utilisé pour les expériences au LASIM.

**b - Contrôle de la puissance crête**

Le principe de cette méthode est d'utiliser la dispersion dans l'air pour recompresser une impulsion initialement étirée (comportant un "chirp").

Selon l'équation de Sellmeier, l'indice du milieu varie selon la longueur d'onde (cf. figure 13.a).

De plus  $v_p = c/n$ , donc la longueur d'onde correspondant à la lumière rouge se propage plus vite dans l'air que celle correspondant au bleu (cf. figure 13.b).

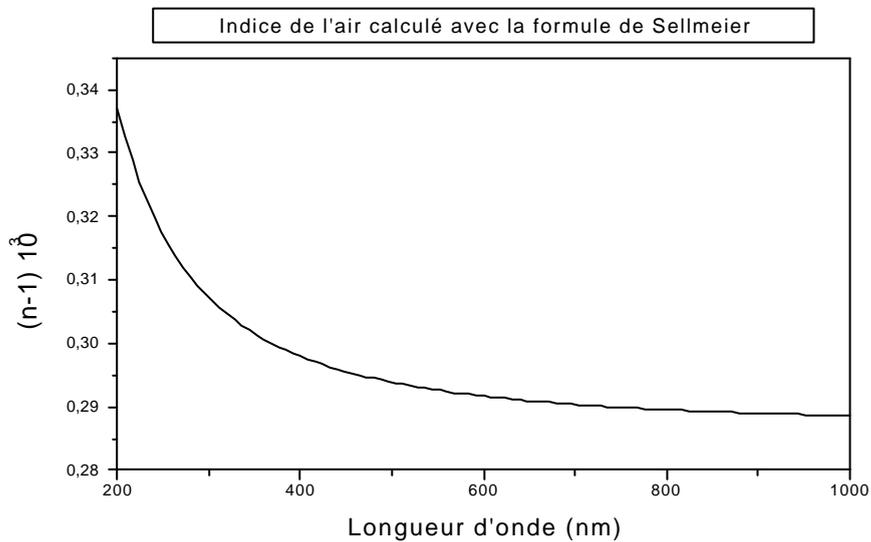
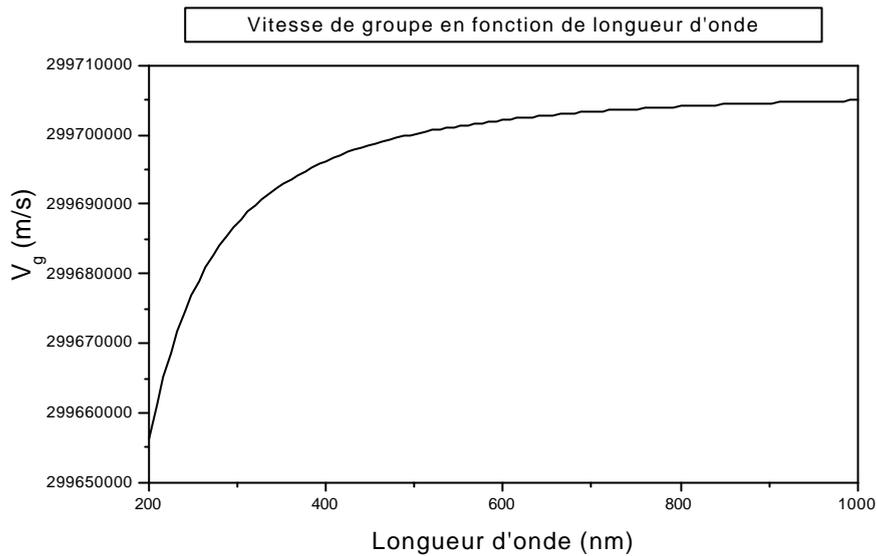


Figure 13.a :  $n=f(\lambda)$



**Figure 13.b :  $v=f(\lambda)$**

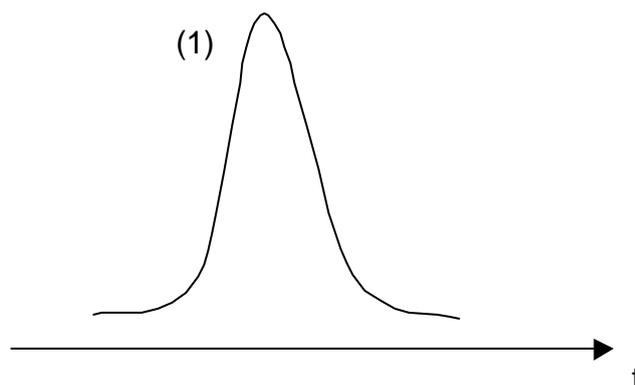
Pour contrôler le début de la filamentation, on va décaler les longueurs d'onde entre elles : on fera d'abord partir le bleu puis le rouge : c'est l'anti-chirpe.

Puisque le rouge va plus vite dans l'air que le bleu, au bout d'une certaine distance de propagation toutes les longueurs d'onde se recompressent pour former une impulsion brève et intense atteignant ainsi une puissance critique suffisante au déclenchement du processus. En contrôlant ainsi le retard, on maîtrisera le point de rencontre des différentes fréquences, donc le début du filament.

Deux systèmes permettent d'anti-chirpé un faisceau :

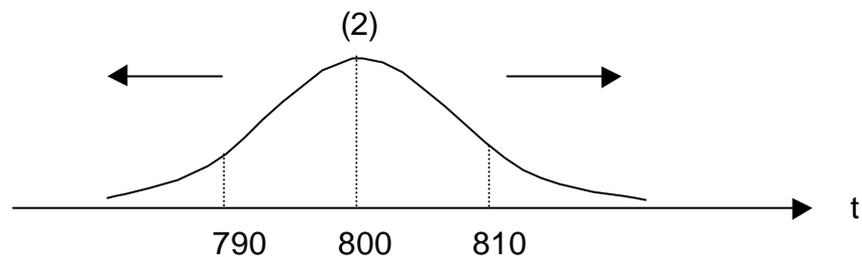
\* A l'aide du compresseur du dispositif d'amplification

Considérons un faisceau de puissance crête  $P$  et de largeur  $\Delta t$  (1)



La puissance est inversement proportionnelle à  $\Delta t$ , durée de l'impulsion. L'impulsion minimale est caractérisée par la relation  $\Delta t \cdot \Delta f = 1.35$ . Ceci induit une largeur de spectre, pour un laser de 50 femtoseconde, de 20 nanomètres autour de la longueur d'onde théorique de 800 nm (domaine spectral compris entre 790 et 810 nm).

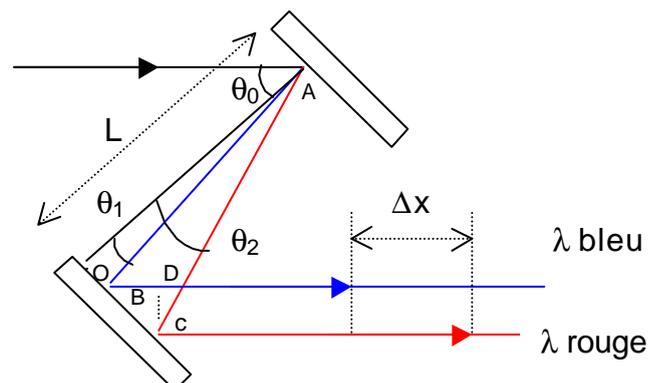
Pour diminuer la puissance crête, tout en conservant l'énergie, on modifie la durée de l'impulsion (2) : on anti-chirpe l'impulsion. C'est le rôle du compresseur. Les longueurs d'onde de 790 et 810 nm sont alors espacées dans le temps. La dispersion dans l'air se chargera de les re-combiner au bout d'une certaine distance de propagation.



\* dispositif d'anti-chirpe à l'aide de réseau blasé

L'autre dispositif consisterait à utiliser un réseau blasé. La réflexion sur un tel réseau a pour conséquence de séparer les différentes longueurs d'ondes du spectre. Un deuxième réseau va permettre de les renvoyer dans des directions parallèles (cf. fig. 14). Grâce au contrôle de la différence de marche engendrée par les deux réseaux ainsi que la vitesse propre des longueurs d'onde, on pourra maîtriser le point de coïncidence des faisceaux. L'énergie en ce point étant alors suffisante, la filamentation débutera.

**Figure 14 : séparation des longueurs d'onde**



$$\cos \theta_1 = L / AB$$

$$\cos \theta_2 = L / AC$$

$$\operatorname{tg} \theta_1 = OB / L$$

$$\operatorname{tg} \theta_2 = OC / L$$

$$BC = OC - OB = L * (\operatorname{tg} \theta_2 - \operatorname{tg} \theta_1)$$

$$\cos (\pi/2 - \theta_0) = BD / BC \quad \Rightarrow \quad BD = L (\operatorname{tg} \theta_2 - \operatorname{tg} \theta_1) * \cos (\pi/2 - \theta_0)$$

d'où la différence de marche entre les deux faisceaux sortant du réseau :

$$\begin{aligned} \delta_{(\lambda_1/\lambda_2)} &= (AB + BD) - AC \\ &= (L / \cos \theta_1) + L * (\operatorname{tg} \theta_2 - \operatorname{tg} \theta_1) * \cos (\pi/2 - \theta_0) - (L / \cos \theta_2) \end{aligned}$$

Sachant que les lois d'optique imposent :

$$d * (\sin \theta_0 - \sin \theta_1) = \lambda_{\text{bleu}}$$

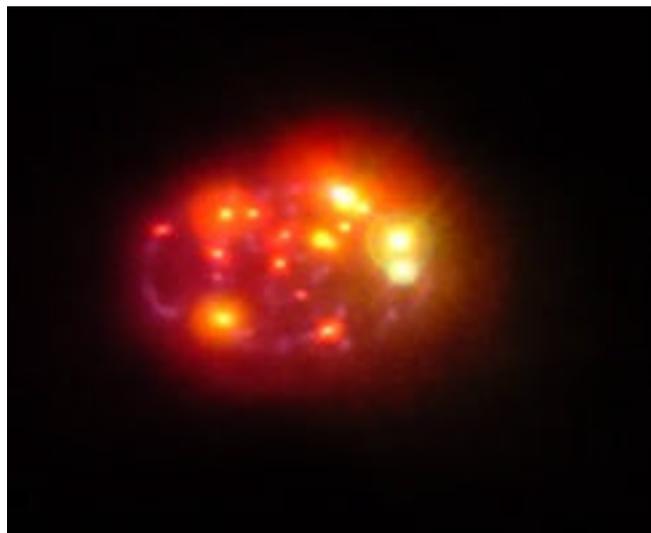
$$d * (\sin \theta_0 - \sin \theta_2) = \lambda_{\text{rouge}}$$

Si on considère d comme le pas du réseau.

Dans la même perspective, on pourrait aussi utiliser un miroir en lieu et place du second réseau, ce qui ne modifierait pas le calcul.

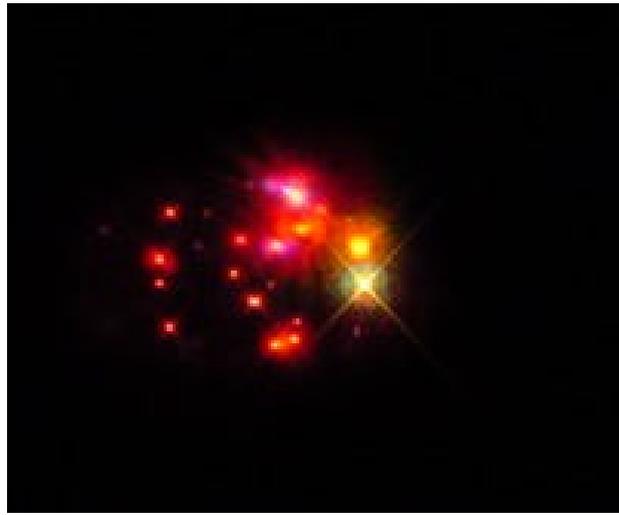
### **c. Expériences récentes**

L'équipe Teramobile a récemment réalisé des expériences en Allemagne ( cf. figures 15 et 16 ), qui avaient pour but de maîtriser le début de la filamentation, grâce à la méthode de l'anti-chirpe par compresseur. Il apparaît possible de déclencher le filament à une distance d'une centaine de mètres.



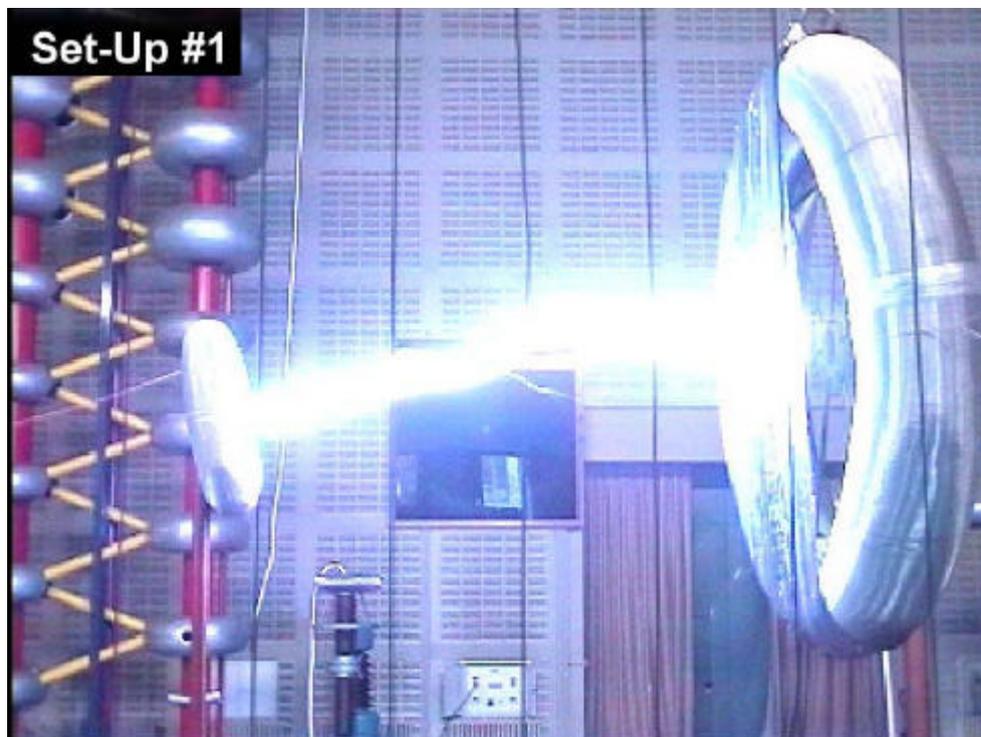
**figure 15 : photo prise lors de l'expérience en Allemagne. On peut observer plusieurs filaments ainsi que leur cône d'émission ; la tâche rosée correspond au laser.**

Grâce à un écran noir, il a été possible de prendre la même photo en mettant en relief les filaments ( cf. figure 16 ).



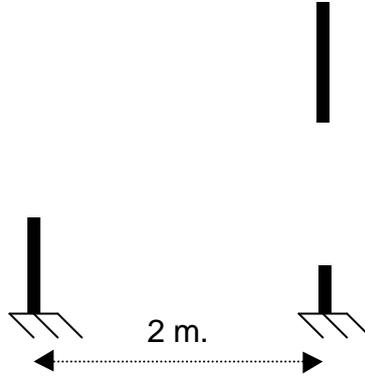
*figure 16: observation des filaments seuls*

Actuellement l'équipe teramobile met en place, un montage visant à déclencher une décharge par laser ( cf. figure 17). Sur la photo, on voit la décharge spontanée entre deux électrodes portées à une différence de potentiel de un méga volt. Dans leur expérience, la décharge sera assistée par un faisceau laser terawatt et ils espèrent atteindre une distance entre les deux électrodes plus grande approchant ainsi un guidage de foudre artificiel.



*figure 17 : décharge entre deux électrodes sans laser*

Une autre expérience est mise en place par une équipe japonaise travaillant pour l'équivalent Japonais de l'EDF : elle vise à guider une décharge entre deux électrodes par un laser au CO<sub>2</sub> ( domaine de l'infrarouge et nanoseconde ). Le montage est constitué de trois électrodes, dont deux ( distantes de 2 mètres ) sont reliées à la masse ( cf. figure 18). La différence de potentiel est de 600 kV.

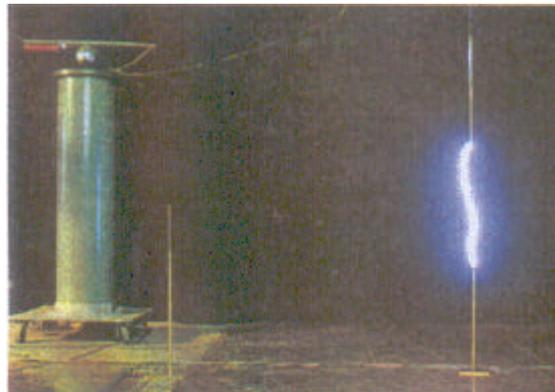


*figure 18 : principe du montage de l'expérience japonaise*

Dans les conditions normales, sans intervention du laser, la décharge suit le chemin le plus court ( cf. figure 19 a ).

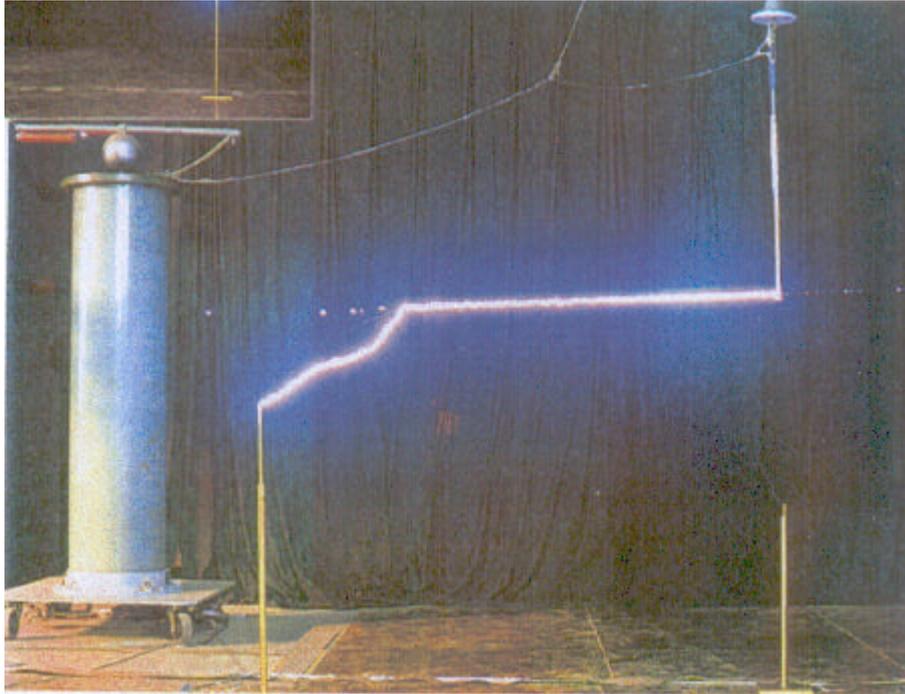


**Nom de la publication de l'expérience**



*Figure 19 a : la décharge se produit entre les deux électrodes les plus proches*

Lorsqu'on place un laser entre l'électrode chargée et celles reliées à la masse, la décharge empreinte le chemin formé par le laser. Elle finit alors sa course dans l'électrode la plus proche du faisceau laser ( cf. figure 19 b ).



**Figure 19 b : guidage par laser**

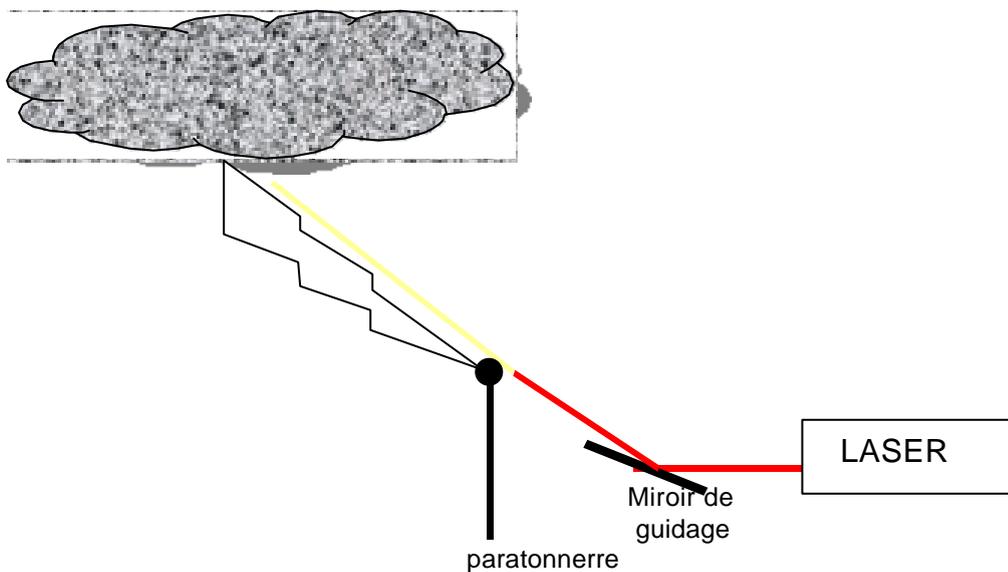
A la différence d'un laser femtoseconde, avec un laser nanoseconde, on n'obtient pas le régime de propagation par filamentation. L'ionisation se fait en pointillé sur des poussières rencontrées par le faisceau. Enfin l'efficacité comparative entre le régime femtoseconde et le régime nanoseconde constitue un sujet de recherche sur lequel les chercheurs travaillent et fourniront des réponse dans un avenir proche.

Aucune expérience à l'heure actuelle n'a été tentée pour déclencher la foudre dans les conditions réelles. Mais les différents résultats obtenus précédemment nous permettent d'effectuer quelques hypothèses quant à un éventuel système de protection contre la foudre.

### III-PROPOSITION EXPERIMENTALE POUR LE DECLENCHEMENT ACTIF DES FOUDRES

Nous, jeunes étudiants en physique avons été enthousiasmés par ce projet qui implique à la fois la toute récente technologie laser et un vieux rêve des physiciens qui est de contrôler et de maîtriser la foudre. En tant que futurs chercheurs nous proposons une amorce de dispositif de protection.

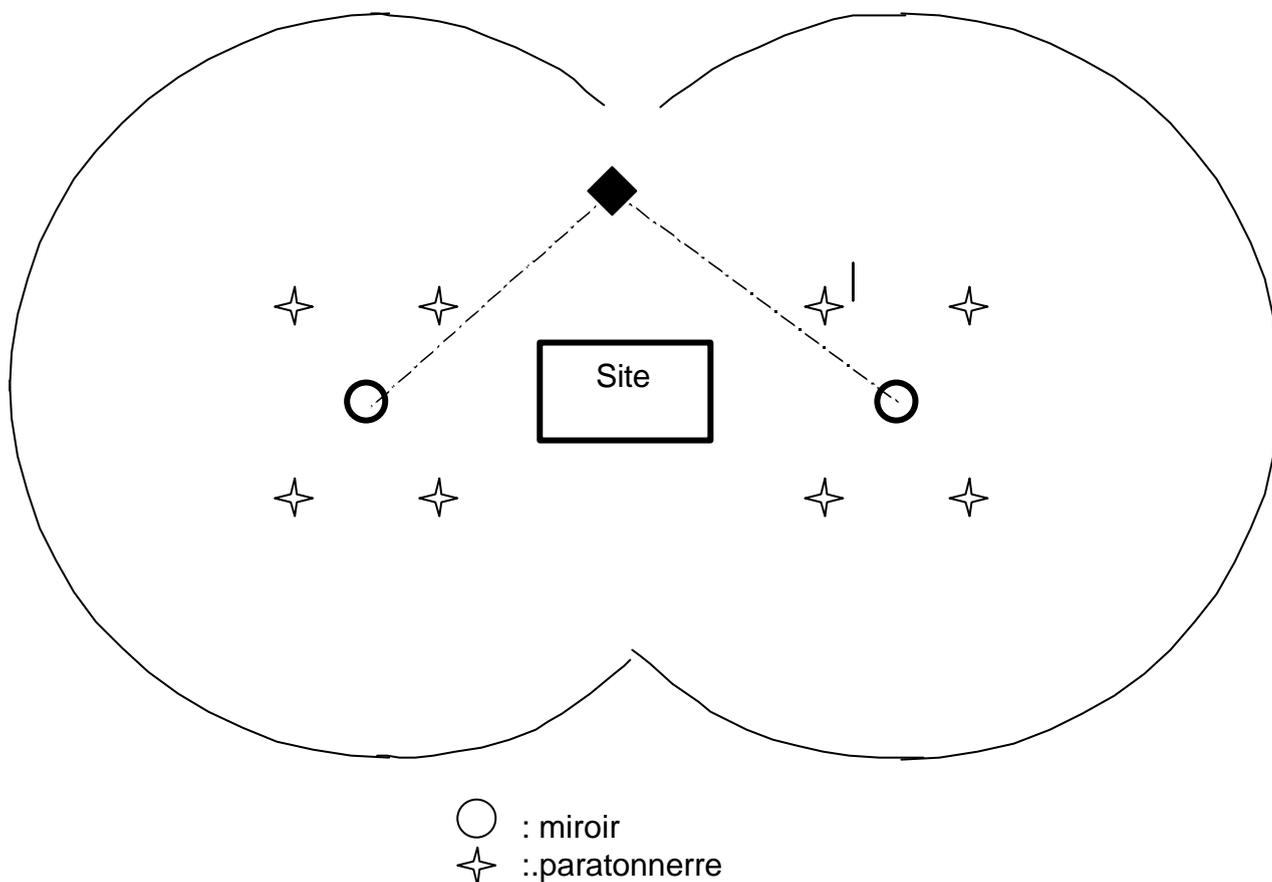
Dans notre dispositif un faisceau laser sera dirigé en direction des nuages à l'aide d'un miroir monté sur moteur (dirigeable dans toutes les directions). Nous chercherons alors à créer le lien entre un traceur issu du nuage et un paratonnerre au sol, grâce à notre filament obtenu par laser ( d'où la nécessité du contrôle du filament que l'on pourrait faire démarrer au niveau du paratonnerre ) cf. figure 20.



*figure 20 : déclenchement de la foudre*

Théoriquement, si on arrive à déclencher la foudre par un tel processus, la décharge devrait suivre le filament, puis atteindre le sol grâce au paratonnerre. Ceci éviterait la détérioration des miroirs et du laser. Il apparaît alors évident de ne pas guider une telle puissance au-dessus du site à protéger, pour éviter que la foudre ( qui cherche le moyen le plus court pour rejoindre la terre ) n'empreinte les parafoudres des bâtiments.

Chaque site serait équipé d'un laser et grâce à un système de guidage par miroir, on pourrait couvrir une surface de protection tout autour du site en question. Un réseau de paratonnerres classiques judicieusement disposés compléterait le dispositif.



La réussite et la maîtrise des expériences décrites ci-dessus, permettraient de savoir réellement s'il est possible de déclencher et guider la foudre. Les premiers résultats sont en tout cas riche d'enseignements quant à la réalisation d'un tel projet.

## CONCLUSION

La foudre est un phénomène naturel dangereux. L'énergie dégagée est à l'origine de nombreux dégâts. Les systèmes de protection actuels n'ont pas l'efficacité souhaitée, en effet il existe des phénomènes de surtension indésirable.

Dans ce projet d'étude et de recherche encadrée, nous avons fait un état des lieux des connaissances actuelles et tentons d'apporter une solution à ce problème. Il apparaît envisageable de déclencher et guider activement la foudre par un laser. Ainsi on maîtriserait son point d'impact au sol.

En résumé, l'explication météorologique de la foudre nous a permis d'apprendre l'existence de traceurs qui tentent de former un pont électrique entre les nuages chargés et la surface terrestre.

Le développement de laser haute puissance et la connaissance théorique des effets engendrés ( effet Kerr, auto-canalisation aboutissant à la filamentation), ont fait apparaître une similitude entre le filament et ces traceurs.

En maîtrisant suffisamment ce type de laser, encore à l'étude actuellement, on entrevoit la possibilité de connecter ce filament aux traceurs. Ainsi, on pourrait guider la foudre, et neutraliser les nuages menaçants.

Les études menées en France et en Allemagne par l'équipe teramobile ont permis une meilleure maîtrise du laser : le début de la filamentation a pu être repoussé à 80 mètres. Une équipe japonaise a vérifié que le guidage d'une décharge entre deux électrodes était possible grâce à un laser CO2 fournissant des impulsions nanosecondes.

Des résultats obtenus dépendront la suite du projet. Il faudra alors tester le dispositif dans les conditions réelles. Pour qu'une application industrielle puisse être développée, il faudra aussi prendre en compte le coût de fabrication d'un tel système au regard de son efficacité. La perspective est ouverte, une importante quantité de travail de recherche et de développement sont encore nécessaires à l'aboutissement d'un tel projet. L'avenir nous dira si une telle idée est viable à l'échelle industrielle.

Nous tenons à remercier vivement toutes les personnes qui nous ont aidés dans ce projet, et tout particulièrement l'équipe du LASIM et Monsieur Jin YU notre tuteur. Que le Dr. Takashi Fujii du projet Teramobile soit aussi chaleureusement remercié pour les informations fournies sur les expériences menées par ses collègues japonais.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Cours d'optique non-linéaire du DEA de physique des particules de M.Jin YU
- TERE de Cotterel Sébastien et Toussaint Gaël sur la détection de la pollution atmosphérique par technique LIDAR
- Rapport de stage d'un étudiant de maîtrise de physique effectué au sein du LASIM
- Site Internet du LASIM et du téramobile
- Self guiding of ultra fast high intensity laser pulses in the atmosphere : J.Kasparian, A .Mysyrowicz, R.Sauerbrey, J.-P. Wolf, L.Wöste
- Site Internet concernant la foudre : [www.citeweb.net/livl/foudre/essai .htm](http://www.citeweb.net/livl/foudre/essai.htm)

[www.geocities.com](http://www.geocities.com)

-  pour les images et le descriptif de l'expérience japonaise

