

# EVOLUTIONS DES MESURES DU FOUROIEMENT

## EVOLUTION OF LIGHTNING MEASUREMENTS

La première mesure du foudroiement sur un territoire a été le niveau kéraunique, « nombre de jour où l'on a entendu le tonnerre », relevé par des observateurs humains. L'apparition des réseaux de détection foudre, à partir des années 70, a permis d'obtenir une information continue sur la localisation et les caractéristiques des coups de foudre. Les informations fournies par ces réseaux permettent de calculer le nombre de jour où un orage a frappé un lieu donné. D'autres informations peuvent aussi être calculées à partir de ces réseaux comme la densité de foudroiement (Nombre d'impact par an et par km<sup>2</sup>) qui permet de comparer la violence des orages en divers points, ou le calcul de l'intensité électrique de chaque impact. Cette étude présentera ces informations, l'évolution de leur précision, et l'utilisation qui en est faite.

The first measure of lightning phenomenon over a region is the Keraunic level, « number of days for which storm was heard », as noted by human observers. The availability of lightning detection networks in the 70' allowed to obtain continuous information on the localization and characteristics of the lightning flashes. The information provided by those networks is helpful to compute the number of days where a storm hit a given site. Other information can also be computed from those networks, such as the lightning density (number of flash per year per square kilometer) that helps compare the importance of lightning over different regions or periods, and the current discharge for each flash. This study will present that information, the evolution of their accuracy and the usage they deserve.

|  |    |
|--|----|
| 1. Le niveau kéraunique .....            | 2  |
| 2. Les réseaux de détection foudre ..... | 3  |
| 3. Le réseau français .....              | 8  |
| 4. Les statistiques.....                 | 9  |
| 5. L'utilisation .....                   | 12 |
| 6. Conclusions .....                     | 12 |

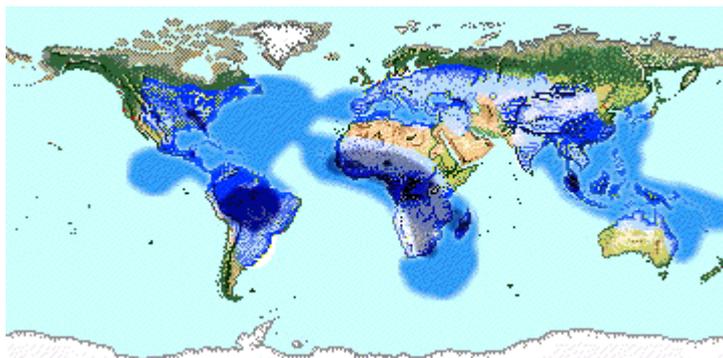
**Marc BONNET**  
**Directeur Technique**  
**Météorage**  
**Centre Hélioparc, 2 Av Pierre Angot**  
**64053 PAU cedex 9 France**  
[www.meteorage.fr](http://www.meteorage.fr)  
[marc.bonnet@meteorage.com](mailto:marc.bonnet@meteorage.com)  
**Tél. 05 59 80 77 30 Fax 05 59 80 77 31**

## 1. Le niveau kéraunique

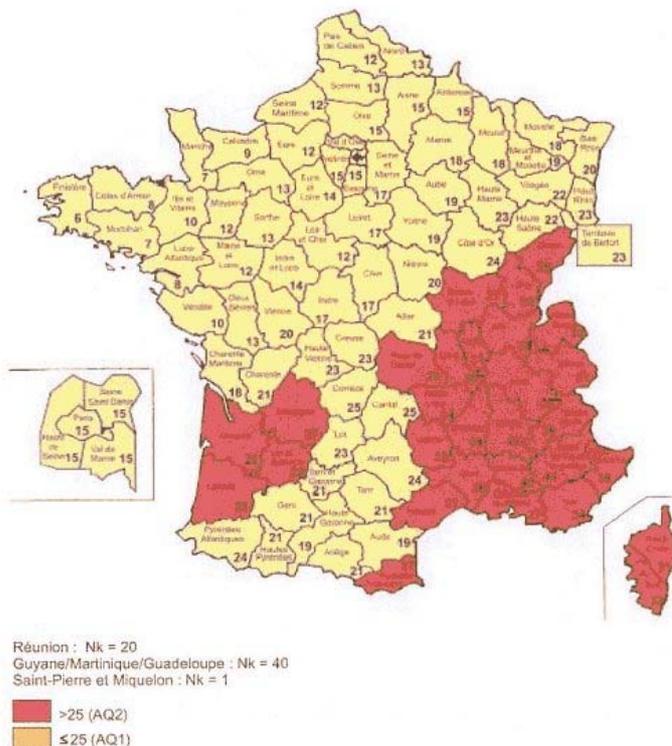
Le niveau kéraunique est défini, en un endroit donné, comme « le nombre de jour (par an) où l'on a entendu le tonnerre ». Les données collectées par des observateurs humains sont agrégées par les organisations météorologiques ou les grands exploitants de réseaux électriques qui dressent des cartes de niveau kéraunique.

La précision de la mesure réalisée dépend directement de la qualité du réseau d'observation, c'est à dire en l'occurrence du maillage du territoire, de la disponibilité et de la fiabilité des observateurs. Ces caractéristiques de l'outil de mesure sont difficilement quantifiables, l'origine et les principes de traitement de ces mesures sont mal connus.

Les cartes de niveau kéraunique ont permis de dresser une cartographie de l'activité orageuse sur la terre et de réaliser quelques études sur la saisonnalité des orages ([1]).



Une carte de niveau kéraunique a été réalisée récemment pour la France sans que la source de données soit précisée. Elle est encore utilisée dans le cadre de la normalisation de la protection contre la foudre.



Mais ces cartes ne semblent plus mises à jour depuis plusieurs années.

## **2. Les réseaux de détection foudre**

Il existe plusieurs sortes de systèmes qui permettent de détecter et de tracer les orages [2]. Les radars utilisent la réflectivité des hydrométéores (gouttes d'eau, cristaux de neige, grêlons) pour détecter et caractériser les nuages. Suivant le type de radar et la technique employée on obtient des informations précises sur les caractéristiques des systèmes nuageux en général et des cumulonimbus en particulier. L'utilisation de radar Doppler permet de mesurer le cisaillement du vent à l'intérieur d'un cumulonimbus. Les radars nécessitent généralement une haute technicité pour être mis en œuvre et maintenus, et seul les services météorologiques, militaires ou aviation en possèdent. La limitation de ces systèmes est qu'ils ne renseignent absolument pas sur la nature électrique du nuage qui traduit à coup sûr l'imminence ou l'occurrence d'un orage.

Les systèmes les plus couramment utilisés pour détecter les orages sont basés sur l'analyse des champs générés par la charge électrique d'un orage ou des éclairs qu'il génère. La mesure des caractéristiques de ces champs permet d'identifier de manière sûre les phénomènes qui les engendrent.

### **2.1. Capteurs locaux**

Ces systèmes sont généralement des stations autonomes couplées à un système d'alerte qui permettent d'anticiper l'arrivée d'un orage localement grâce à la mesure du champ électrostatique et/ou électrique générés par les charges électriques d'un nuage.

#### **Les Moulins à champ**

Ce capteur permet grâce à l'analyse du champ électrostatique au-dessus de lui, de signaler la présence d'un nuage électriquement chargé traduisant l'imminence de l'orage.

Le principe consiste à mesurer la charge induite par le champ électrique sur une électrode alternativement masquée et exposée au champ à mesurer. La zone de couverture d'un moulin à champ est limitée à un rayon de l'ordre de 15km.

#### **Les Détecteurs d'orage**

Ces systèmes détectent et mesurent les champs électrostatiques et électriques rayonnés par les éclairs nuage-sol. Le rapport des amplitudes de ces champs permet d'estimer la distance qui sépare l'éclair du capteur. Certains systèmes utilisent un détecteur optique pour éliminer les parasites et autres sources d'émissions non liées à un éclair. D'autres systèmes permettent de donner la direction de l'orage. Dans tous les cas, la portée de tels systèmes est limitée à une trentaine de kilomètres car au-delà le champ électrostatique disparaît.

#### **Les caméras vidéo**

On peut utiliser des caméras vidéo unidirectionnelles ou multidirectionnelles pour enregistrer des images d'un orage puis procéder à l'analyse de celles-ci pour comptabiliser et positionner les décharges.

## 2.2. Systèmes de localisation des éclairs

Ces systèmes permettent de localiser tout ou partie des éclairs d'un orage, en détectant les signaux électromagnétiques qu'ils produisent. Ils ont été parmi les premiers à être développés afin d'étudier les orages à grande échelle. Aujourd'hui les plus sophistiqués autorisent une détection à très longue distance (plusieurs milliers de kilomètres) des éclairs nuage-sol, ou bien la détection de la totalité des décharges électriques d'un orage. Ces systèmes peuvent être classés en fonction de la méthode de localisation et de la gamme de fréquences utilisées.

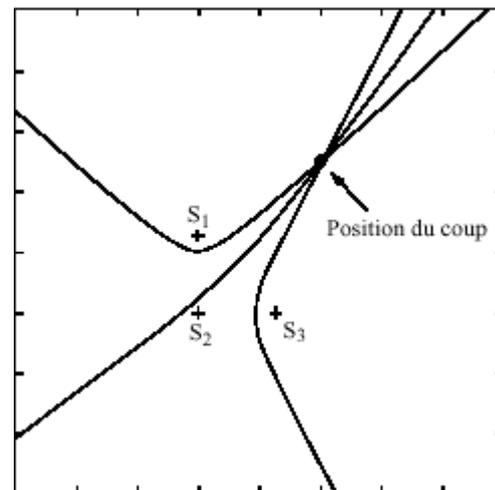
### 2.2.1. Principes de localisation

Ce paragraphe présente dans les grandes lignes les différentes techniques utilisées dans les systèmes de localisation des éclairs.

#### a) Temps d'Arrivée

La description de cette méthode appliquée à la détection des éclairs date des années 1960. L'impulsion électromagnétique générée par un éclair se propage à une vitesse comparable à la vitesse de la lumière dans le vide. Ceci implique, que chaque capteur du système détecte l'impulsion avec un retard qui est proportionnel à la distance qui le sépare de l'éclair. La vitesse de propagation de l'onde et la distance entre chaque capteur est connue et constante. Il suffit donc de calculer la différence de temps d'arrivée qui existe entre les capteurs deux à deux pour obtenir un ensemble d'équations dont chacune décrit une hyperbole qui définit l'ensemble des localisations possibles de l'éclair. Le point d'intersection des hyperboles est la solution unique qui indique la position de la source du rayonnement.

Figure 1  
*Principe de la méthode du temps d'arrivée hyperbolique (document Global Atmospheric Inc).*

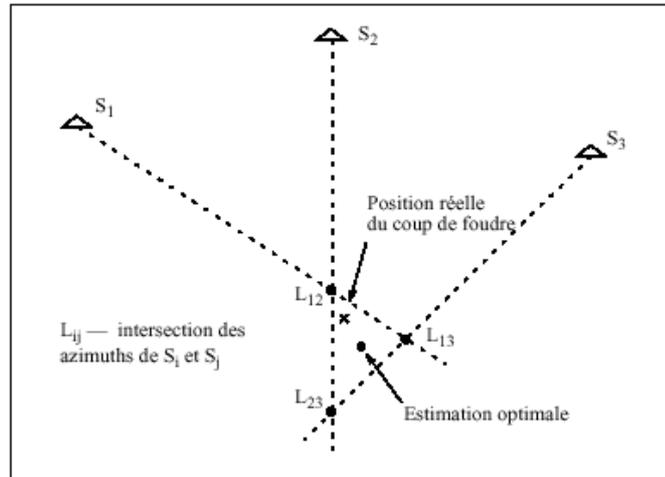


Cette méthode est appelée "temps d'arrivée hyperbolique". Cette technique nécessite une mesure extrêmement précise du temps d'arrivée du signal. De plus la base de temps des capteurs doit être synchronisée. Elle possède l'avantage de donner une bonne précision de localisation, même à de grandes distances, car la mesure est peu soumise à des erreurs. Cependant, cette méthode nécessite au minimum trois capteurs pour réaliser une localisation. A noter que dans certains cas, quatre capteurs sont nécessaires pour aboutir à une localisation.

## b) Radio Goniométrie

Cette méthode consiste à mesurer l'azimut du signal électromagnétique généré par l'arc en retour au niveau de plusieurs capteurs. En connaissant la position des capteurs, on peut par triangulation déterminer le point d'intersection des directions qui représente la localisation de la source du rayonnement, soit l'éclair. Lorsque plus de deux capteurs détectent un éclair, il est possible d'appliquer une procédure d'optimisation (méthode des moindres carrés) qui permet de minimiser les erreurs de mesures et ainsi d'augmenter la précision de localisation.

Figure 2  
*Illustration du principe de l'optimisation des directions angulaires lors d'une triangulation (document Global Atmospheric Inc).*



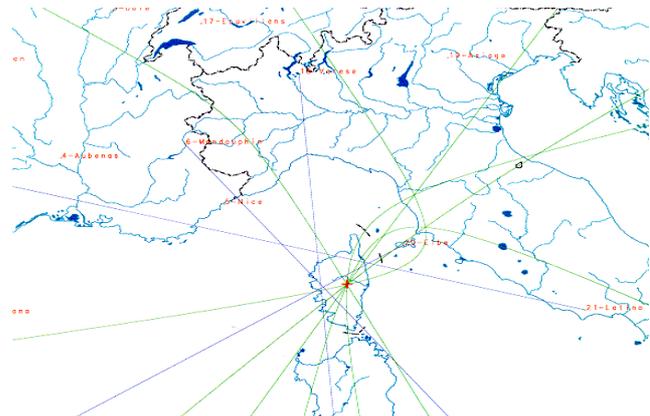
Chaque capteur possède une antenne magnétique composée de deux cadres verticaux orthogonaux. L'antenne est alignée lors de l'installation du capteur, garantissant ainsi que les cadres pointent dans les directions Nord-Sud et Est-Ouest. La direction angulaire de l'impact est calculée grâce au rapport des flux magnétiques qui traversent chaque cadre. Cette méthode est basée sur la reconnaissance de la forme de l'onde propre à un arc en retour.

Dans ce type de système, deux directions suffisent en théorie à localiser un arc par triangulation, sauf dans le cas où l'éclair se produirait juste sur la ligne de base des capteurs. La précision de localisation de cette méthode est extrêmement dépendante de la précision des mesures angulaires.

## c) Technologie IMPACT

Cette technologie a été développée au début des années 1990 par la société Global Atmospheric Inc à Tucson (USA). Elle permet de combiner les méthodes de temps d'arrivée et de radio goniométrie. Les capteurs de cette technologie mesurent le temps d'arrivée absolu et la direction angulaire du signal électromagnétique. Le calculateur utilise les deux types d'informations à la fois pour produire une localisation.

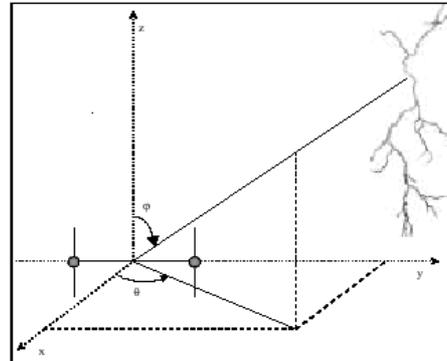
Cette méthode possède l'avantage de pouvoir combiner les mesures angulaires et temporelles, et de localiser un éclair avec seulement deux capteurs. Elle permet également de profiter de la précision des mesures temporelles pour améliorer la précision, et de la redondance des informations pour calculer la précision de la localisation.



#### d) Interférométrie

Cette technique consiste à mesurer la direction angulaire d'un signal électromagnétique VHF généré par l'éclair grâce à la mesure du déphasage qui se produit lorsqu'il se propage. Le déphasage du signal est mesuré par le capteur au moyen d'un jeu d'antennes électriques séparées. La différence de phase du signal reçu par ces antennes permet de calculer l'azimut et l'élévation de la source

Figure 3  
*Illustration de la technique de localisation radio goniométrique par interférométrie (doc. Onera/Dimensions)*



La localisation en 2D ou 3D de la source du rayonnement est obtenue par triangulation des mesures de deux capteurs ou plus.

Cette méthode présente l'avantage de fonctionner indépendamment de la forme de l'onde rayonnée par l'éclair ce qui la rend plus robuste vis à vis des déformations que peut subir le signal.

#### 2.2.2. Description des systèmes

Les systèmes de détection sont composés d'un ensemble homogène de capteurs, de moyens de télécommunication, d'un concentrateur de localisation temps réel et d'outils de traitement permettant le stockage et le traitement des données.

On peut les caractériser en fonction de leur couverture géographique ainsi que par le type et la précision des données mesurées.

##### a) Réseaux de détection "longue distance" :

Ces systèmes permettent la localisation des arcs en retour à plusieurs centaines voire milliers de kilomètres de distance. Pour cela, les capteurs détectent les signaux électromagnétiques des arcs en retour à des fréquences de l'ordre de 10kHz. Le nom donné à ces signaux est 'spherics' ou 'siffleurs' en français. A ces fréquences, les signaux utilisent le guide d'onde Terre-Atmosphère pour se propager et parcourir d'énormes distances, jusqu'à faire le tour de la Terre si le signal d'origine est suffisamment puissant.

La méthode de localisation utilisée est la différence de temps d'arrivée car elle permet de minimiser les erreurs de localisation à de grandes distances.. La précision de localisation de ce type de réseau se mesure en dizaine de kilomètres, et son efficacité de détection en dizaine de pourcent.

Le Met Office britannique utilise un tel réseau avec une couverture mondiale, Vaisala à Tucson a des projets pilotes de localisation transatlantique avec ses capteurs Impact.

### b) Réseaux de localisation VLF/LF :

Ces systèmes sont aujourd'hui les plus utilisés dans le monde. Ils analysent la partie basse fréquence du spectre du signal émis par les éclairs nuage-sol et nuage-nuage. La gamme de fréquence scrutée, entre 0 et 500kHz permet de positionner les capteurs jusqu'à une distance de 250 km les uns des autres. Ainsi, avec peu de capteurs ces systèmes arrivent à couvrir une superficie importante. On notera que cette distance est à diminuer lorsque l'on veut détecter les intra-nuage dont les signaux électromagnétiques s'atténuent plus rapidement et se propagent donc moins loin que ceux des éclairs nuage-sol.

La plupart des pays européens sont dotés de ce type de réseau dont la précision de localisation se mesure en kilomètre et l'efficacité de détection dépasse les 80-90%.

### c) Réseaux de détection d'activité totale

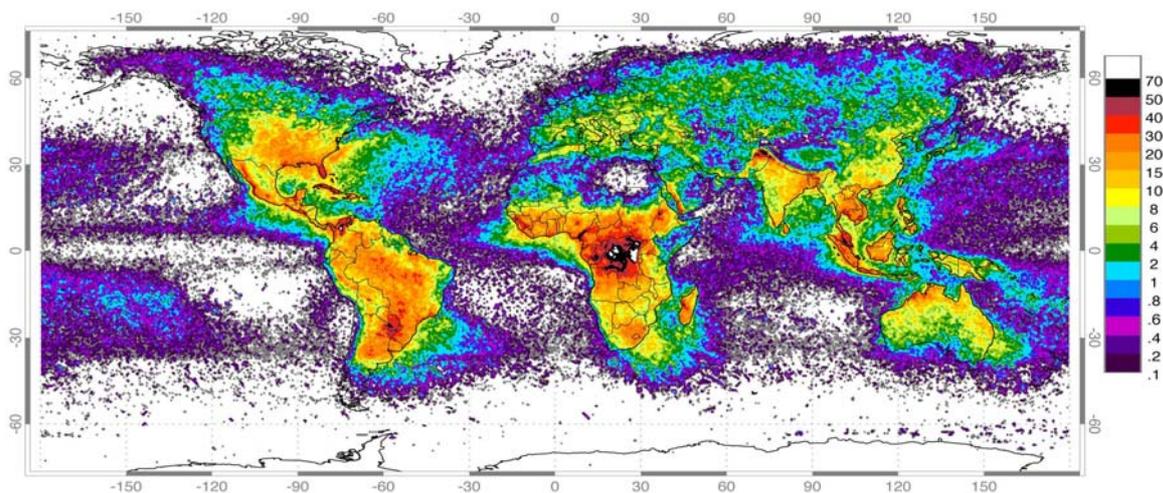
Ces systèmes permettent de détecter de façon extrêmement précise l'ensemble de l'activité électrique produite dans un orage. Ils sont parmi les plus perfectionnés qui existent aujourd'hui. Ces systèmes analysent les signaux VHF/UHF émis par chaque micro décharge qui compose le canal ionisé de l'éclair. En détectant chacune de ces décharges on peut reconstituer la progression du canal ionisé de chaque éclair avec une excellente précision spatiale et temporelle. Ces systèmes sont conçus pour fonctionner en 2D ou 3D.

Les techniques de différence de temps d'arrivée et d'interférométrie sont utilisées pour localiser les sources d'émission radioélectrique. Le chaînage de ces sources pour recomposer un arc en retour, et la différenciation des arcs nuage-sol ne sont pas immédiats.

### c) Systèmes optiques terrestres et embarqués sur satellite

Des caméras optiques permettent aussi de détecter les impacts de foudre au sol. Leurs mesures, indépendantes de celles des systèmes électro-magnétiques, ont été utilisées pour calibrer ces derniers mais nous ne connaissons pas de système opérationnel basé sur cette technologie.

Des capteurs optiques ont aussi été embarqués sur des satellites à défilement (LIS) pour réaliser une mesure et une localisation du foudroiement. Mais il faudrait un ensemble de capteurs sur des satellites géostationnaires pour assurer une détection de l'activité terrestre en temps réel, et la différenciation des décharges intra-nuage et nuage sol est délicate.



High Resolution Full Climatology Annual Flash Rate

Global distribution of lightning April 1995-February 2003 from the combined observations of the NASA OTD (4/95-3/00) and LIS (1/98-2/03) instruments

### **3. Le réseau français**

Le réseau national de détection des orages appartient à Météo-France qui en a concédé l'exploitation à Météorage. Il est composé de 18 capteurs de type IMPACT, et complété par 13 capteurs situés dans les pays limitrophes qui permettent d'assurer une couverture homogène du territoire. Les données de ces capteurs sont acheminées en temps réel vers les centres de calcul de Météo-France et de Météorage. Deux calculateurs dédiés permettent de positionner les impacts de foudre et de mesurer leurs paramètres. Les données localisées sont ensuite traitées par le logiciel CATS qui les archive dans une Base de Données Foudre puis les met en forme dans le cadre de services destinés à des utilisateurs finaux.

#### **3.1. Evolutions technologiques**

De 1987 à 1997 les capteurs du réseau français sont de type ALDF réalisant une mesure angulaire. Ils détectent les arcs, mais le calculateur de traitement se limite à localiser les flashes (premier arc) et à comptabiliser les arcs subséquents.

Depuis 1997 les capteurs sont de type IMPACT, ils mesurent l'angle et le temps d'arrivée.

Depuis 1999 le calculateur et l'algorithme de localisation ont évolué. Ils localisent chacun des arcs subséquents et regroupent ceux-ci pour identifier un « flash ».

#### **3.2. Les paramètres calculés pour chaque arc**

Les principaux paramètres calculés pour chaque arc localisé sont :

- La position

- La date

- L'amplitude de courant de décharge

- La précision de la localisation (ellipse de confiance,  $K\text{hi}^2$ )

#### **3.3. Calibration**

##### **Précision de localisation**

En 1997, sur tout le territoire français :

- 50% des localisations ont une précision comprise entre 0 et 1 km

- 60% des localisations ont une précision comprise entre 0 et 2 km

- 70% des localisations ont une précision comprise entre 0 et 4 km

Ces mesures de la précision de localisation sont issues des calculs de confiance réalisés pour chaque arc localisé. Les preuves terrains enregistrées, ainsi que diverses expériences ([3]) confirment la précision de localisation obtenue.

##### **Efficacité de détection**

L'efficacité de détection correspond au rapport entre le nombre d'impacts réellement tombés et le nombre d'impacts mesurés par le réseau (pour une région géographique et une période données).

Contrairement à la précision de localisation, l'efficacité de détection ne peut être mesurée directement.

Cette grandeur ne peut être estimée qu'à travers des modèles de fonctionnement des capteurs, ou des analyses statistiques de fonctionnement du réseau. Des expériences permettant de comparer un réseau de détection à un système indépendant (mesures optiques, enregistrements des impacts sur une tour) ont aussi permis de valider les modèles utilisés ([4]).

Ces démarches permettent de penser que l'efficacité de détection du réseau Météorage est supérieure à 90% sur la majorité du territoire, avec des zones à 70% en périphérie.

### **Amplitude du courant de décharge**

Le système national de surveillance des orages fournit pour chaque arc en retour une estimation de l'amplitude crête du courant d'arc. Pour cela il utilise une relation simple tirée d'un modèle mathématique qui suppose que l'arc en retour possède un comportement identique à une antenne filaire. Cette méthode permet de transformer les valeurs de champ électrique mesurées par les capteurs du réseau en amplitude de courant crête.

Lors de la mise en route du système de surveillance des orages en 1987, Météorage avait calibré son système sur la base de travaux réalisés par Berger en 1975. Le résultat de ces recherches avait abouti à la conclusion que la distribution des amplitudes de courant foudre pour les éclairs Nuage-Sol négatifs était centrée sur 30 kA.

Aujourd'hui de récents résultats de travaux tendent à prouver que la distribution des amplitudes de courant foudre pour les éclairs nuage-sol négatifs est de 20,23 kA.

Météorage a donc décidé de régler la calibration du calcul de l'amplitude du courant crête sur cette valeur, afin de fournir une estimation du courant foudre la plus exacte possible à ses clients mais aussi de s'aligner sur les systèmes de détection des pays voisins.

Cette modification est réalisée depuis le 8 janvier 1999 sur le flux temps réel des données Météorage et l'amplitude des données enregistrées dans la Base de Données Foudre a été corrigée avec un coefficient de 0.674

## **4. Les statistiques**

A partir des données localisées enregistrées dans la Base de Données Foudre depuis 1987, il est possible de réaliser diverses études statistiques du foudroiement en France.

### **4.1. Le nombre de jours d'orage**

Un indicateur de « nombre de jour d'orage » peut être calculé en tout point afin d'élaborer une grandeur similaire au niveau kéraunique. En pratique, on calcule cette valeur sur un maillage du territoire. La taille des mailles est ajustée pour approximer la sensibilité d'un observateur humain (carré de 20 x 20 km).

Lorsque cet indicateur est demandé pour un point unique (commune) on moyenne les valeurs de 9 mailles qui entourent ce point afin de lisser les variations locales.

Cet indicateur à l'avantage de pouvoir être comparé aux cartes de niveau kéraunique existantes, il est par ailleurs utilisé dans certaines normes sur la protection foudre.

Mais cette mesure ne quantifie que l'existence d' « orages », pas leur intensité.

### **4.2. Les densités de flashes et d'arcs**

Cette grandeur, exprimée en Nombre de flashes (ou d'arcs) par km<sup>2</sup> et par an permet de comparer le foudroiement pour des régions ou des périodes différentes. Elle peut être calculée sur une zone de forme et de taille quelconque et prend en compte la totalité des impacts détectés.

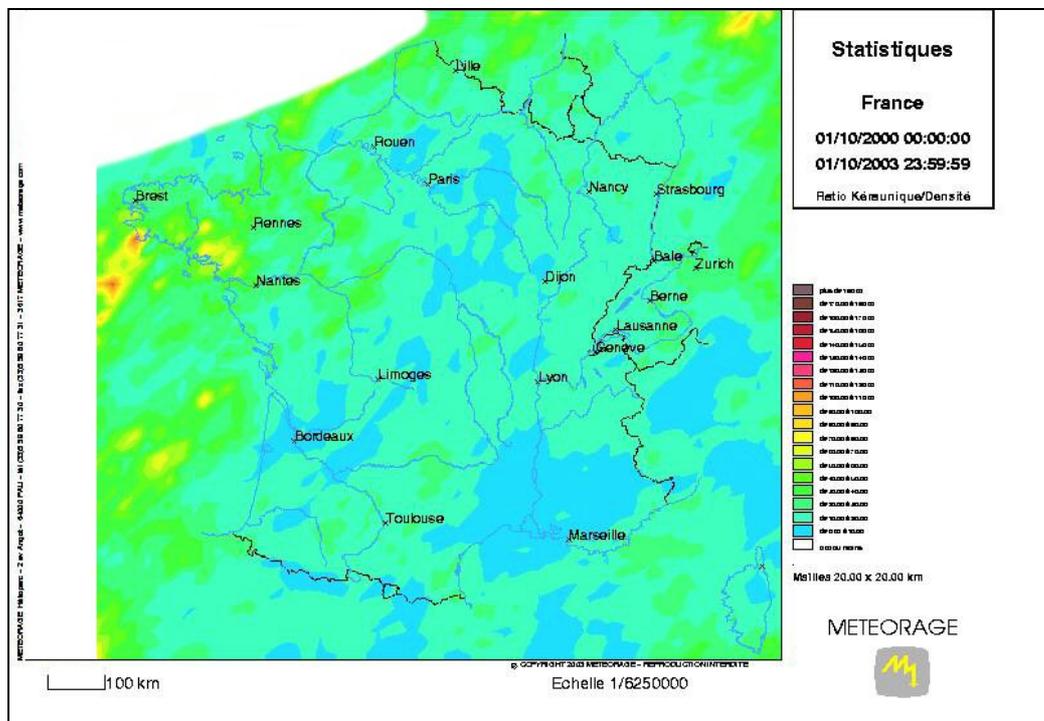
Cet indicateur donne une mesure précise de l'agression foudre d'un site, sans prendre en compte les aspects électriques.

Diverses formules ont été proposées pour convertir densité de flash et nombre de jours d'orage, mais la comparaison visuelle de ces deux grandeurs (pour des régions et des périodes identiques) montrent d'importantes variations.

La norme IEC 62306-2 « Protection against lightning », partie 2 « Risk management » indique qu'il faut utiliser une densité de flash mesurée lors de l'évaluation du risque, et que si une carte de densité de foudroiement n'est pas disponible, on peut estimer celle-ci à partir d'une carte isokéraunique par la formule Nombre de jour d'orage = 10 x Densité de foudroiement

### Comparaison du Nombre de jour d'orage et de la densité d'arcs :

La carte suivante représente, pour un maillage de 20x20km couvrant l'ensemble de la France, le ratio du nombre de jour d'orage sur la densité. Elle permet d'étudier la variation d'une grandeur par rapport à l'autre.



On constate que le rapport du nombre de jour d'orage sur la densité varie de 5 à 50

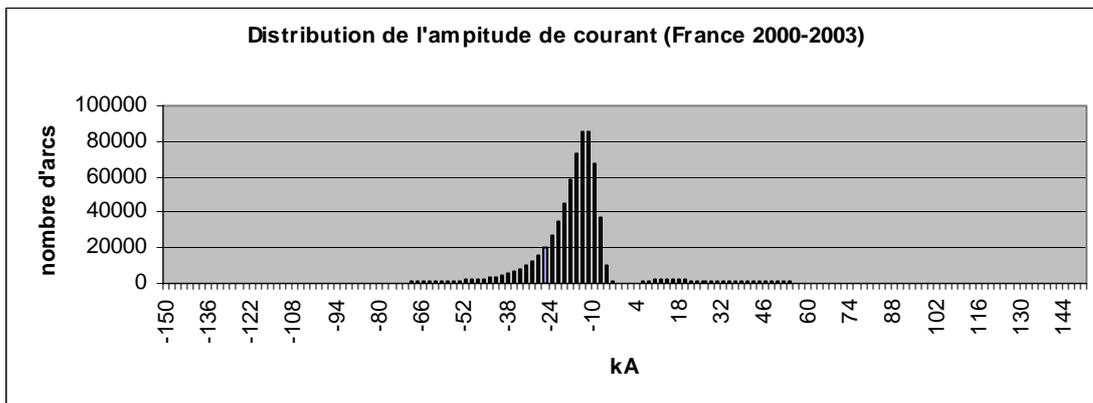
### 4.3. L'amplitude de courant

Pour toute zone, on peut calculer la moyenne du courant de décharge. Il est aussi possible de réaliser une distribution du courant, de préférence en séparant les décharges négatives et positives.

Dès que l'on s'éloigne de la zone de couverture optimale du réseau l'amplitude moyenne augmente puisque l'on ne détecte, à plus grande distance, que des impacts de plus forte intensité.

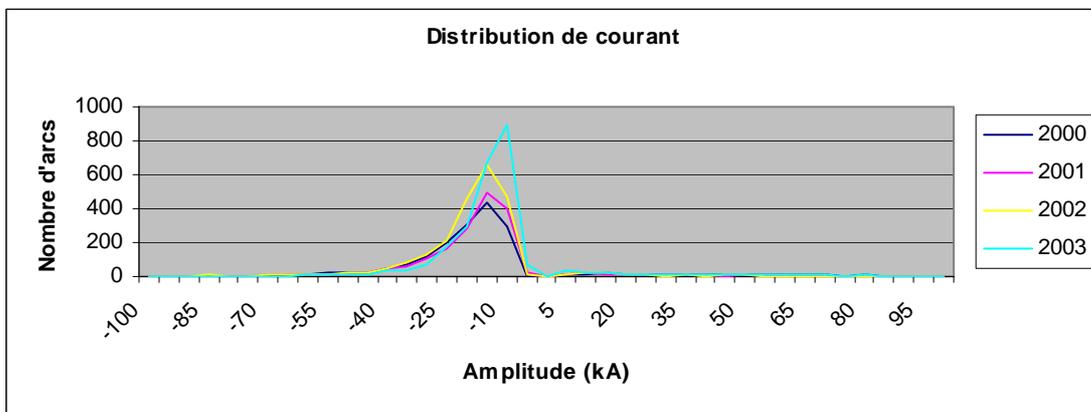
Des mesures comparatives effectuées sur une tour instrumentée donnent une erreur de mesure de l'ordre de 5% entre les 2 systèmes.

Une distribution du courant d'arc réalisée sur une zone de 200km de rayon située au centre de la France montre un maximum autour de -13 kA, et un seuil de détection d'environ 3 kA. Le pourcentage d'arcs positifs est de 6%



La médiane des flashes négatifs s'établit à  $-14,7$  kA, celle des flashes positifs à  $30,4$  kA  
 La médiane des arcs négatifs s'établit à  $-14,9$  kA, celle des arcs positifs à  $29,8$  kA  
 (calcul sur un cercle de 200km de rayon positionné au centre de la France ( $2^\circ$  est,  $46^\circ$  nord) avec les données enregistrées entre octobre 2000 et octobre 2003)

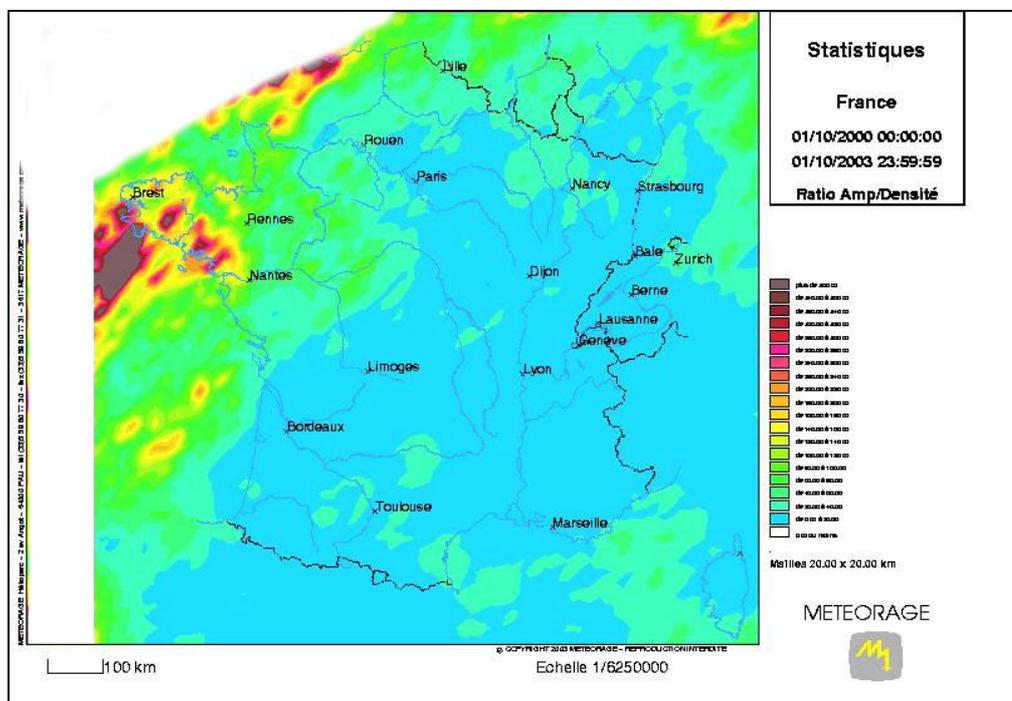
Variation annuelle de la distribution du courant



Une étude sur 4 années successives (20km autour de Pau) montre des variations importantes du nombre d'impacts. La médiane pour les arcs négatifs s'établit comme suit :  
 2000 :  $-15,9$  kA      2001 :  $-13,9$  kA      2002 :  $-14,7$  kA      2003 :  $-11,2$  kA

### Relation entre courant et densité

La carte suivante représente, pour un maillage de 20x20km couvrant l'ensemble de la France, le ratio du nombre de l'amplitude moyenne sur la densité. Elle permet d'étudier la variation d'une grandeur par rapport à l'autre.



On met en évidence une tendance générale où plus il y a d'impacts au sol et moins leur amplitude est élevée.

## **5. L'utilisation**

Au-delà de l'utilisation ponctuelle des caractéristiques d'un impact de foudre (ex : expertise d'un dégât par une compagnie d'assurance) on s'intéresse ici à l'utilisation des informations statistiques qu'un réseau de détection foudre permet de calculer et d'accumuler.

### **Etudes locales**

L'étude statistique du foudroiement sur un site particulier permet de dimensionner les protections foudre à installer en fonction des normes existantes.

La comparaison des valeurs obtenues sur un site avec des moyennes nationales permet de situer le niveau de risque.

La comparaison des valeurs sur divers sites permet d'en retenir un en particulier en fonction du risque acceptable.

### **Etudes régionales**

A cette échelle, on réalise généralement des études climatologiques qui permettent de comparer des régions entre elles, ou de préciser l'évolution du foudroiement au cours du temps sur une région donnée. On peut ainsi identifier des zones plus systématiquement foudroyées.

### **Etudes nationales**

Les exploitants de grands réseaux (transport électrique, télécoms, routiers ou ferroviaire, ...) sont amenés à définir leur politique de protection sur l'ensemble de leurs équipements. Pour cela, la connaissance précise de la réalité et de l'évolution du foudroiement est une aide indispensable à l'établissement des plans de maintenance ou d'investissement. La possibilité de corréler le foudroiement et les incidents sur le réseau offre une mesure de l'efficacité des systèmes de protection mis en œuvre.

### **Service temps réel**

La mise à disposition, pour des utilisateurs finaux, de données foudre temps réel à travers des services (Alerte, Poste d'Observation) permet la mise en œuvre de procédures de sécurité pour la prévention des risques liés à la foudre. Ces services apportent aussi une aide à la décision dans le cadre de la conduite de réseaux étendus (transport électrique en particulier) grâce à l'analyse en temps réel de l'évolution de la situation orageuse.

## **6. Conclusions**

Des technologies innovantes ont été développées, et des moyens variés existent pour mesurer le foudroiement. Ceux-ci permettent une meilleure compréhension du phénomène foudre et mettent en évidence la complexité et la variabilité de celui-ci. L'accumulation des mesures réalisées fournit une climatologie des orages mais l'information disponible ne contribue que faiblement à la réalisation de prévisions fiables. Seuls les services temps réel permettent, dans le cadre de la prévision immédiate, de mettre en œuvre une prévention active efficace.

### **Références**

- [1] Roux F., « Les orages », 1991, Documents Payot
- [2] Pedeboy S., "Détection des orages », 2001, congrès SEE - Foudre 2001 Montpellier
- [3] Diendorfer et al., « Evaluation of lightning location data employing measurements of direct strikes to a radio tower », CIGRE Paris 2002
- [4] Berger G, « Analysis of lightning data to ground in France, ILDC 2002 Tucson