

Détection des orages

Stéphane PEDEBOY

Météorage

Centre Hélioparc, 2 Ave P. Angot 64053 PAU Cedex 9

stephane.pedeboy@meteorage.com

Résumé

La détection des orages est devenue au cours des dernières années un enjeu considérable pour l'ensemble des pays industrialisés. Ainsi de nombreux systèmes ont été développés à des fins d'étude, de prévision et de protection. Bien que diverses techniques existent pour détecter les orages, les systèmes de localisation des éclairs sont les plus utilisés dans le monde. Ils reposent sur la détection des signaux électromagnétiques générés par les éclairs. Les progrès réalisés dans le domaine spatial permettent d'envisager sérieusement de surveiller les orages à grande échelle depuis l'espace.

Ce document présente les différentes techniques mises en œuvre dans les systèmes de détection des orages.

1. Introduction

Bien que l'orage soit un phénomène globalement bien compris par les scientifiques, il n'en demeure pas moins imprévisible et ses conséquences sont encore trop souvent désastreuses pour l'homme et ses biens : inondations, incendies, foudroiement, tornades sont les plus connues du grand public. De plus, depuis l'avènement de la technologie électronique dans notre civilisation moderne (vie quotidienne, industrie, militaire, transport...) les orages sont à l'origine de dégâts matériel et/ou de pertes de productivité tout aussi importants et potentiellement dramatiques pour l'environnement. Afin de se prémunir des effets de l'orage de nombreux moyens de prévention et de protection ont été mis au point au cours des dernières décennies, grâce au progrès de la recherche en électricité atmosphérique. Parmi eux, les systèmes qui permettent de détecter la présence d'un orage à distance dans le but de prévenir du danger ou à des fins d'étude et de recherche. Ces systèmes plus ou moins complexes sont composés de capteurs qui mesurent une caractéristique physique particulière de l'orage : masse nuageuse, précipitations, charge électrique, éclairs nuage-sol ou intra-nuage. Ils peuvent être classifiés en fonction du principe de mesure utilisé par les capteurs : rayonnement électromagnétique en VLF (Very Low Frequency), LF (Low Frequency), VHF/UHF (Very/Ultra High Frequency), optique ou champ électrostatique.

L'utilisation des informations fournies par un système dans un domaine particulier dépend de sa portée de détection, de son niveau de performances et des caractéristiques de l'orage qui sont mesurées. Ce document présente les principes, le fonctionnement, les performances et les applications pratiques des techniques de détection des orages les plus utilisées aujourd'hui. Les systèmes et projets en cours de développement sont aussi abordés.

2. L'orage et ses manifestations

Ce paragraphe passe en revue les divers processus qui se produisent au cours de la vie d'un système orageux. Chacun de ces processus se caractérise par la manifestation d'un phénomène physique qui lui est propre, et qui le rendra décelable à distance. Les techniques de détections sont basées sur la mesure de ces phénomènes.

2.1 - L'orage et son nuage

Bien que des éclairs aient été répertoriés dans des tempêtes de sable, de neige et dans les nuées ardentes des éruptions volcaniques, le principal générateur d'orage est le cumulonimbus. Ce nuage gigantesque peut atteindre sous nos latitudes une hauteur de 10km. Il est formé par l'élévation en altitude d'air chaud et humide qui se condense produisant lorsque les conditions d'instabilité sont réunies, d'énormes masses nuageuses remplies de vapeur d'eau, d'eau liquide, de neige et de glace.

2.2 - L'orage et le vent

Ces nuages sont comparables à d'immenses cheminées au sein desquelles règnent des vents ascendants et descendants violents, jusqu'à 150km/h. La direction des vents dépend de la phase de vie de l'orage. Lors de sa formation, le cumulonimbus aspire en altitude l'air chaud présent au niveau du sol, créant ainsi un vent ascendant. Lorsque l'eau se condense en altitude, elle forme des cristaux de glace qui grossissent au cours de leur ascension par agrégation avec d'autres cristaux, jusqu'à ce leur poids ne puisse plus être compensé par la force aérodynamique du courant ascendant. A ce stade ils chutent vers la base du nuage, créant ainsi un mouvement d'air froid

contraire dirigé vers le bas. Ce mouvement dans certains cas peut créer des rafales de vents violentes.

2.3 - L'orage et le champ électrique

Il existe en permanence entre la terre et l'atmosphère un champ électrique. Ce champ électrique résulte de l'ionisation des hautes couches de l'atmosphère par le rayonnement solaire. La terre est chargée négativement et l'atmosphère positivement. Ce champ est de l'ordre de 100V/m au niveau du sol.

Au cours de son développement, le cumulonimbus se charge électriquement. Ce phénomène, appelé "processus de séparation des charges" aboutit à l'électrisation du nuage en lui donnant une structure électrique dipolaire. Les charges positives se trouvent concentrées dans la région supérieure du nuage, tandis que les charges négatives se trouvent dans la région inférieure du nuage. Ces charges négatives vont attirer par influence des charges positives au sol directement sous le nuage et repousser les charges négatives, inversant et amplifiant ainsi la polarité du champ électrique au sol. Ce phénomène est un indicateur de l'imminence de l'orage.

2.4 - L'orage et les éclairs

Lorsqu'il est dans sa phase mature, et que le processus de séparation des charges a généré suffisamment de charges, l'orage produit d'immenses décharges électriques : les éclairs. Il en existe deux types, les intra-nuage et les nuage-sol. Les premiers, se produisent à l'intérieur du nuage ou entre deux nuages proches. Lorsque le champ électrique dépasse un seuil d'environ 26kV/cm, un canal d'air ionisé appelé le "traceur initial" s'établit entre les régions négatives et positives, donnant naissance à une décharge électrique. Les éclairs nuage-sol se produisent comme leur nom l'indique entre le nuage et le sol. Un traceur se propage généralement depuis la région négative vers le sol en effectuant des sauts et en se ramifiant. On l'appelle le "précurseur par pas". Lorsque l'extrémité de l'une des branches du précurseur arrive à proximité du sol, une décharge monte depuis le sol, le "traceur ascendant", et vient établir la connexion avec le précurseur. Le canal ionisé relie alors le nuage et le sol, agissant comme un gigantesque court-circuit dans lequel un courant électrique très intense circule : l'arc en retour. Ce courant engendre l'illumination de l'éclair et le tonnerre suite à la déflagration de l'air du canal ionisé chauffé à environ 25000°C. Cet arc en retour, peut lorsque les conditions sont réunies être suivi par d'autres arcs qui empruntent le même chemin, provoquant le scintillement de l'éclair. Dans ce cas on parle "d'arcs subséquents".

Les courants électriques produits dans les deux types d'éclairs émettent un rayonnement électromagnétique important sur un large spectre de fréquences, chaque processus possédant sa propre signature. Ainsi, les micro décharges qui donnent naissance au canal ionisé produisent des signaux électromagnétiques VHF et UHF, tandis que les arcs en retours et subséquents produisent des signaux VLF et LF.

3. Systèmes de détection

Il existe plusieurs sortes de systèmes qui permettent de détecter et de tracer les orages. 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. De même, l'utilisation de radar Doppler permet de mesurer le cisaillement du vent à l'intérieur d'un cumulonimbus. Le cisaillement résulte de la variation de l'intensité et de la direction du vent avec l'altitude. Il est engendré par les courant ascendant et descendant, et représente un danger pour les avions. Les radars nécessitent généralement une haute technicité pour être mis en œuvre et maintenus, et seul les services météorologiques, militaires ou aviation en possèdent. L'inconvénient 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. Aussi, plusieurs techniques de détection des orages ont été développées et mises en œuvre en fonction des phénomènes que l'on désire mesurer.

3.1 - Avertisseurs d'orages

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.

3.1.1 - Moulin 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 15km. On peut étendre cette couverture en connectant à un analyseur central plusieurs moulins à champ répartis de façon homogène sur la zone à surveiller.

Avantages :

- Permet d'anticiper l'arrivée d'un orage.
- Possibilité d'automatiser le déclenchement d'alertes.

Inconvénients :

- L'étalonnage du capteur est difficile et la zone de couverture est limitée.
- Le moulin à champ permet de connaître l'état électrique de l'atmosphère, mais ne permet pas de prédire où et quand l'orage va éclater.

Exemple d'application :

- Protection de sites sensibles tels que bases militaires, industries et zones de lancement de fusées et missiles.

3.1.2 - Détecteur 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 [1]. 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.

Avantages :

- Permet d'anticiper l'arrivée d'un orage déjà déclaré.
- Possibilité d'automatisation de déclenchement d'alertes.

Inconvénients :

- La précision de l'estimation de la distance de l'orage est modeste.

Exemple d'application :

- Protection de sites industriels et militaires.

3.2 - 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.

3.2.1 - Techniques de localisation

Ce paragraphe présente dans les grandes lignes les différentes techniques utilisées dans les systèmes de localisation des éclairs. Le lecteur trouvera ainsi les bases nécessaires à la compréhension du fonctionnement de ces systèmes.

a) Temps d'Arrivée

La description de cette méthode appliquée à la détection des éclairs a été réalisée par Lewis et al [2] dans les 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 (voir figure 1).

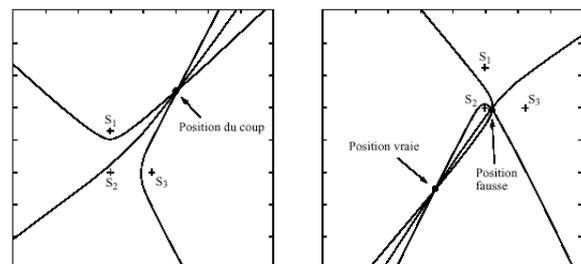


Fig-1 : La partie gauche illustre le principe de la méthode du temps d'arrivée hyperbolique. La partie droite montre que trois capteurs ne suffisent pas toujours à localiser un éclair (document Global Atmospheric Inc).

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 synchrone. 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 [3]. 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 (voir figure 2).

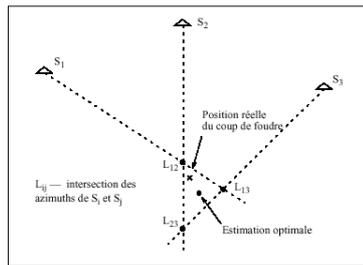


Fig 2 : Illustre le principe de l'optimisation des directions angulaires lors d'une triangulation (document Global Atmospheric Inc).

Chaque capteur possède une antenne magnétique composée de deux cadres verticaux orthogonaux. L'antenne est alignée sur le Nord géographique lors de l'installation du capteur, garantissant ainsi que les cadres pointent dans les directions Nord-Sud et Est-Ouest. La direction angulaire est fonction du 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.

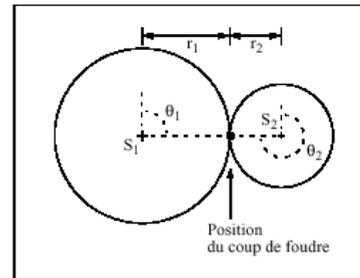
Dans ce type de système, deux directions suffisent en théorie à localiser un arc par triangulation, sauf dans le cas où l'éclair se produit juste sur la ligne de base des capteurs. La précision de localisation de cette méthode est extrêmement dépendante de la précision des mesures angulaires.

c) Technologie IMPACT

Cette technologie a été développée au début des années 1990 par la société Global Atmospheric Inc à Tucson (USA) [4]. 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.

Pour cela, la méthode de temps d'arrivée hyperbolique a été modifiée. Elle consiste désormais à calculer la différence entre la date mesurée par un capteur et la date estimée de l'éclair. Cette différence permet de calculer le rayon d'un cercle, centré sur le capteur, représentant l'ensemble des positions possibles de l'éclair. Cette

opération est réalisée pour chaque capteurs qui détecte l'éclair. Pour obtenir une localisation précise, on ajuste par itérations successives les rayons de manière à ce que les cercles concourent tous en un seul et même point. Cette méthode



s'appelle "temps d'arrivée circulaire". L'estimation de la position de départ est assurée par triangulation ou différence de temps hyperbolique (voir figure 3).
Fig 3 : Illustration de la méthode IMPACT qui combine le de temps d'arrivée circulaire et la radiogoniométrie (document Global Atmospheric Inc).

Cette méthode possède l'avantage de pouvoir combiner les mesures angulaires et temporelles, et de localiser un éclair avec seulement deux capteurs.

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 [5]. 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 les antennes permet de calculer l'azimut et l'élévation de la source (voir figure 4)

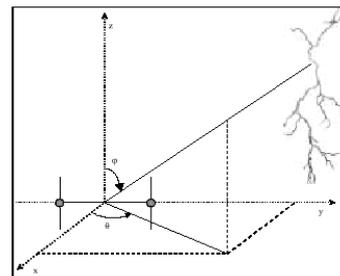


Fig 4: Illustration de la technique de localisation radio goniométrique par interférométrie (Doc Onera/Dimensions)

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.

3.2.2 - Description des systèmes

Ce paragraphe décrit les différentes technologies des systèmes de détection les plus couramment utilisées de nos jours. Ces systèmes sont classifiés en fonction de leur performances et des mesures qu'ils effectuent.

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. Chaque capteur envoie ses données à un ordinateur qui localise les éclairs en temps réel.

Avantages :

- Ces systèmes permettent de réaliser une surveillance en temps réel à très grande échelle des orages, même au dessus de régions non équipées de capteurs.

Inconvénients :

- Les performances de tels réseaux sont très modestes et varient en fonction de l'heure de la journée car les conditions de propagation des signaux sont plus favorables la nuit que le jour. De plus seul les éclairs nuage-sol les plus intenses sont détectés par suffisamment de capteurs pour être localisés. Par conséquent, l'efficacité de détection est inférieure à 50% dans les conditions les plus favorables.
- Il est impossible de caractériser précisément les éclairs.

Exemples :

- Le réseau de détection, appelé réseau ATD du Met Office (service météorologique) de Grande Bretagne, possède sept capteurs dont deux sont situés à Gibraltar et Chypre. Chaque capteur enregistre la forme de l'onde et effectue la datation avant d'envoyer ses données à un ordinateur qui réalise les localisations. La couverture de ce réseau est quasiment mondiale puisque de l'activité orageuse est détectée sur les Andes et au cœur de l'Afrique [6].
- Le réseau de détection Trans-Océanique de Global Atmospheric, permet de détecter des éclairs à 4000 km des USA sur le Pacifique et l'Atlantique. Ce réseau regroupe certains capteurs de réseaux déjà existants dans le

monde tels qu'aux USA, Canada, Japon et Europe. Les résultats sont utilisés par le NWS Aviation Center (service météo de l'aviation des Etats Unis) pour optimiser le routage des avions [7].

Applications types :

- Services de prévision météorologique, aviation.

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. Les capteurs sont connectés via un réseau de télécommunication à un ordinateur qui se charge de déterminer la date, la position, l'intensité crête, la polarité et pour certains systèmes la forme d'onde des arcs en retour et subséquents grâce aux mesures réalisées par chaque capteur.

Ces réseaux de localisation utilisent les techniques de différence de temps d'arrivée au travers des capteurs LPATS (Lightning Position And Tracking System) [8] et IMPACT. Les systèmes basés sur la radiogoniométrie pure sont en passe de disparaître au profit des systèmes de technologie IMPACT qui présentent l'avantage de donner de meilleurs résultats et de pouvoir concilier les capteurs IMPACT et LPATS au sein d'un même réseau.

Avantages :

- Ces systèmes fonctionnent en temps réel, et permettent de caractériser précisément les éclairs : polarité, intensité, forme d'onde, nombre d'arcs subséquents.
- La couverture d'un pays entier est réalisée avec un nombre limité de capteurs. L'efficacité de détection est d'environ 90% pour les éclairs nuage-sol et la précision moyenne est inférieure au kilomètre.

Inconvénients :

- La détection intra-nuageuse est moyennement efficace avec 30% dans les meilleurs cas.

Exemples :

- La majorité des pays industrialisés possède un réseau de détection de ce type. On citera à titre d'exemple le réseau national appartenant à Météo France, de technologie IMPACT, appelé réseau Météorage.

Applications types :

- Services de prévision météorologique, compagnies électriques, télécommunications, industries, assurances, recherche...

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.

Avantages :

- Ces systèmes permettent d'analyser en détail la structure électrique des orages, d'en connaître leur sévérité et de suivre leur évolution.
- L'activité est détectée en temps réel et les performances en terme d'efficacité de détection frôlent les 100% d'après les constructeurs.

Inconvénients :

- Si la gamme de fréquence utilisée permet de mesurer en détail la structure des éclairs, elle ne permet pas de connaître la polarité et l'intensité des arcs.
- Ces systèmes produisent un nombre important de données qui ne sont pas faciles à manipuler à l'échelle d'une région ou d'un pays.
- Pour obtenir de bonnes performances les capteurs ne doivent pas être éloignés de plus de 150 km les uns des autres, d'où un coût important pour de tels systèmes. Cette contrainte implique que ces systèmes sont principalement installés sur des zones stratégiques de superficie restreinte.

Exemples :

- Le système SAFIR a été développé en 1985 par l'ONERA et maintenant commercialisé par Vaisala [9]. Un réseau composé de trois capteurs de cette technologie est présent en Ile de France. Ce système est principalement utilisé par la navigation aérienne et le CNRM (Centre National de Recherche Météorologique).
- Le système LDAR de la société Global Atmospheric Inc, est installé sur le site de lancement KSC (Kennedy Space Center) de la NASA [10]. Il est composé de sept capteurs et

utilise le temps d'arrivée pour localiser en temps réel les décharges électriques.

Applications :

- Recherche en électricité atmosphérique ou météorologie, aéroports internationaux (Aéroports de Paris), centres de lancement de fusées (Kourou et Cap Kennedy).

3.3 - Satellites d'observation

Bien que des satellites aient été instrumentés depuis les années 1970, ce n'est que depuis ces dernières années que des programmes de recherche dédiés à la détection des éclairs ont vu le jour. Compte tenu des premiers résultats obtenus il semble que les techniques utilisées soient prometteuses. D'une manière générale la détection par satellite présente l'avantage d'assurer une couverture à l'échelle planétaire ou quasiment en fonction du type d'orbite utilisé. Les systèmes en orbites basses (environ 700km) couvrent une grande partie de la planète au rythme de leurs rotations. Cependant, le défilement du satellite ne permet l'observation d'une zone limitée qu'un court instant, de l'ordre de 3 minutes. Ceci est suffisant pour détecter des éclairs mais inadapté pour l'observation en continu d'un orage. De plus, les systèmes embarqués sur ces orbites doivent stocker les mesures en mémoire avant de les transmettre à une station au sol, ce qui compromet un fonctionnement en temps réel. Les satellites géostationnaires présentent l'avantage de pouvoir surveiller une grande superficie en continu. De plus ils transmettent leurs mesures grâce à une liaison permanente avec une station au sol. Par contre, du fait de leur éloignement, il leur est plus difficile de détecter les éclairs de faible intensité. Ce paragraphe présente les diverses techniques utilisées par les satellites pour détecter les orages.

3.3.1 - Détection optique :

La NASA a lancé dans les années 1980 un programme de détection des orages depuis l'espace [11]. Le principe consiste à détecter et localiser les flashes de lumière produite par les éclairs. Un télescope enregistre les signaux lumineux qui sont transmis à un réseau de cellules CCD (Coupled Charged Device) qui les transforment en signaux électriques pour être traités par un ordinateur. Un problème majeur de ces systèmes concerne la détection des éclairs dans la lumière du jour. Les signaux lumineux utiles (produits par les éclairs) sont noyés dans la réflexion de la lumière du soleil sur le sommet des nuages, diminuant ainsi l'efficacité de détection du système. Afin d'augmenter le rapport signal/bruit, un filtrage optique sélectif est réalisé par le télescope. De plus, l'analyse électronique des variations de signal pixel

par pixel permet d'identifier les éclairs parmi le bruit de fond.

Inconvénients :

- Il est impossible de différencier les éclairs nuage-sol des intra ou inter-nuage.
- Il est difficile de mesurer les caractéristiques électriques des éclairs.
- La précision de localisation est de l'ordre de 10km.

Avantages :

- Permet l'observation à très grande échelle des orages.
- Détecte l'activité électrique totale.

Exemples :

- Le système OTD (Optical Transient Detector) embarqué sur le satellite MicroLab-I en 1995 est l'un des premier système de détection développé par la NASA. Les performances de ce système sont modestes avec une efficacité de détection de 40 à 60% mais il a permis de valider le fonctionnement et de prouver l'utilité d'un tel système en matière de détection des orages [12].
- Le système LIS (Lightning Imaging Sensor) embarqué sur le satellite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) a été lancé en 1997 dans le cadre de l'étude des phénomènes convectifs tropicaux, mené par la NASA et le NASDA (National SpaceDevelopment Agency) au Japon [13]. Il couvre les régions dont la latitude est comprise entre -35 degrés Sud et +35 degrés Nord. Son efficacité de détection est de 90% et sa précision de localisation est comprise entre 4 et 7 km. Il balaye des régions de 600x600km². Son orbite lui permet d'observer pendant 90 secondes seulement un même point au sol (il parcourt 7km/s).
- Le capteur LMS (Lightning Mapper Sensor) en cours de développement. C'est un système destiné à être embarqué sur un satellite géostationnaire GOES en 2003. Il transmettra en temps réel ses observations et permettra la surveillance de l'évolution des orages au dessus des Etats-Unis.

3.3.2 - Détection VHF

Les signaux VHF générés par les éclairs d'un orage se propagent non seulement au sol mais aussi en direction de l'espace. Il est donc possible de les détecter et les analyser d'une façon similaire à ce qui se fait au sol grâce à une antenne électrique couplée à un dispositif de traitement du signal embarquée sur un satellite. A ce jour il n'existe aucun système qui permette de réaliser des localisations en VHF depuis l'espace. Seul le satellite FORTE réalise des mesures de signaux

VHF associés aux éclairs. Cependant, un projet de satellite spécialisé pour la détection VHF des éclairs est en cours de définition [14]. Ce projet est une extension d'un projet déjà existant qui concerne la surveillance des essais nucléaires dans le monde entier. Ce système consiste à utiliser les prochains satellites GPS (Global Positioning System) Block IIF, programmés pour être opérationnels en 2005, pour localiser les sources VHF grâce à la technique de différence de temps d'arrivée.

Avantage :

- Possibilité de différencier le type et de caractériser les éclairs nuage-sol ou intra-nuage.

Inconvénient :

- Nécessite l'utilisation de plusieurs satellites synchrones.

Exemple :

- Le satellite FORTE (Fast on Orbit Recording of Transient Events) lancé en 1995 embarque un système de réception VHF qui enregistre les signatures électromagnétiques des éclairs d'un orage. Ce satellite possède aussi un télescope qui permet de localiser les éclairs.

3.3.3 - Interférométrie

Cette technique est en cours de développement dans le cadre du projet ORAGES du CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) qui concerne la détection et la localisation des éclairs dans la bande inter-tropicale [15]. Les éclairs seront localisés en 2D par interférométrie dans la bande de fréquences VHF depuis un satellite en orbite basse. La précision de localisation attendue est inférieure à 7km. Ce satellite est programmé pour 2004.

4. Conclusion

La détection et la localisation des orages intéresse un grand nombre de domaines : météorologie, industries, militaires, recherche...Aussi plusieurs systèmes ont été développés, avec leur limitations et avantages propres, qui répondent aux exigences de chacun.

Les progrès de la technologie permettent d'améliorer de jour en jour les performances de ces systèmes. Au cours des dernières années, les systèmes de localisations d'éclairs sont apparus comme une solution incontournable en matière de détection des orages. Comme preuve, ils sont installés dans la majorité des pays industrialisés. Ces réseaux deviennent de plus en plus efficaces et performants et leurs données sont utilisées dans tout les domaines concernés par les orages. Aujourd'hui on assiste à une tendance qui consiste à regrouper les réseaux nationaux indépendants en vastes réseaux de dimension et couverture internationales.

Parallèlement, les technologies de détection embarquées sur satellite semblent très prometteuses et un effort particulier est actuellement réalisé par de nombreux centres de recherches pour les mettre en œuvre.

Références :

- [1] Byerley L.G., Pifer A.E., Cummins K.L., "An electro-optical lightning detection classification and ranging sensor for automatic lightning protection and human warning", 1992, 21st Conf. On Lightning Protection in Berlin.
- [2] Lewis E.A., Harvey R.B. Rasmussen J.E. "Hyperbolic direction finding with spherics of transatlantic origin, J. Geophys. Res., 1960
- [3] Krider E.P., Noggle R.C., Uman M.A., "A gated wideband magnetic direction finder for lightning return strokes", J. Appl. Meteor, 1976.
- [4] Cummins K.L., Murphy M.J., Bardo E.A., Hiscox W.L., Pyle R.B., Pifer A.E., "A combined TOA/MDF technology upgrade of the US National Lightning Detection Network", J. Geophys. Res., 1998.
- [5] Hayenga C. O., Warwick J.W., "Two dimensional interferometric positions of VHF lightning sources, J. Geophys Res, 1981.
- [6] Daly N., Nash J., Hibbett E., Callaghan G., Taylor P., "Result from the upgraded ATD Sferics lightning detection system of the Met Office (UK)", International Lightning Detection Conference, 2000
- [7] J. A. Cramer, K. L. Cummins, "Long-Range and Trans-Oceanic Lightning Detection", 11th International Conference on Atmospheric Electricity, Guntersville, Alabama, Page 376-379, June 7-11, 1999.
- [8] R. S. Bent and W. A. Lyons, Theoretical evaluations and initial operational experiences of LPATS (Lightning Position and Tracking System) to monitor lightning ground strikes using a time-of-arrival (TOA) technique, in Preprints, 7th Int. Conf. on Atmospheric Electricity, Albany, New York, (pp. 317-324), 1984.
- [9] P. Richard, A. Soulage, P. Laroche, and J. Appel, The SAFIR lightning monitoring and warning system: Application to aerospace activities, in Proc. Int. Aerospace and Ground Conf. on Lightning and Static Electricity, (pp. 383-390), Oklahoma City, OK: National Interagency Coordination Group, 1988.
- [10] L. Maier, C. Lennon, T. Britt, and S. Schaefer, Lightning Detection and Ranging (LDAR) system performance analysis, Paper 8.9 in Proc. 6th Conf. on Aviation Weather Systems, Dallas, TX, Amer. Meteorol. Soc., 1995.
- [11] Boccippio D.J., Christian H.J., Optical detection of lightning from space, 1998, ILDC.
- [12] Christian, H. J., K. T. Driscoll, S. J. Goodman, R. J. Blakeslee, D. A. Mach, and D. E. Buechler; The Optical Transient Detector (OTD), Proceedings of the 10th International Conference on Atmospheric Electricity; Osaka, Japan; June 10-14, 1996; pp 368-371.
- [13] Christian, H. J., R. J. Blakeslee, S. J. Goodman, D. A. Mach, M. F. Stewart, D. E. Buechler, W. J. Koshak, J. M. Hall, W. L. Boeck, K. T. Driscoll, and D. J. Boccippio, "The Lightning Imaging Sensor," Proceedings of the 11th International Conference on Atmospheric Electricity, Guntersville, Alabama, June 7-11, 1999, pp. 746-749.
- [14] Suszynsky D.M., Jacobson A., Fitzgerald J., Rhodes C., Satellite-based global lightning and severe storm monitoring using VHF receivers, International Lightning Detection Conference, 2000
- [15] Bondiou A., Blanchet P., Théry C., Delannoy A., Lojou J-Y., Soulage A., Richard P., Roux F., Chauzy S., "ORAGES": a project for a space-borne detection of lightning flashes using interferometry in the VHF/UHF band, 11th International Conference on Atmospheric Electricity, Guntersville, Alabama, June 7-11, 1999.