
Annexe B

Introduction à la Détection de la Foudre

La présente annexe constitue une introduction de base à la détection de la foudre et aux mesures associées. Elle présente également un résumé des performances du Réseau National de Détection de la Foudre (NLDN) depuis 1989.

B.1 La Foudre

Le terme Foudre fait référence au transfert d'une charge importante observée entre deux objets chargés. Les décharges de foudre peuvent se produire au niveau du nuage (d'un nuage à l'autre (C-C,) en inter-nuage et en intra-nuage), du nuage à l'air ambiant et du nuage au sol (C-G). Parmi ces divers types de décharges, c'est la foudre nuage au sol qui a le plus d'impact sur nos vies au quotidien.

B.1.1 Description du coup de foudre

Un *éclair* du nuage au sol est en général composé d'une séquence d'*arcs en retour* individuels du nuage au sol, qui transfèrent une charge importante du nuage vers le sol, chaque coup de foudre présentant des intensités de crête pouvant aller de quelques kiloAmpères jusqu'à 300 kA. Ces coups de foudre ont chacun une durée nominale de 20 à 50 microsecondes et sont en règle générale séparés par une durée de temps pouvant aller de 20 à 100 millisecondes. En règle générale, un éclair comprend entre 2 et 3 coups de foudre mais cela est variable, il peut en contenir un et jusqu'à 20. Le nombre de coups de foudre dans un éclair est fréquemment appelé *multiplicité*. Dans la plupart des éclairs, les *coups de foudre subséquents* (coups de foudre se produisant après le premier coup de foudre de l'éclair) touchent la terre au niveau du même *point d'impact* que le premier coup de foudre car ils se déplacent le long du même *canal* que le premier coup de foudre. Cependant, environ un tiers de l'ensemble des éclairs peut contenir des coups de foudre avec différents points d'impact au sol et séparés par une distance pouvant varier de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres. Pour des raisons de commodité, les chercheurs définissent un éclair comme un élément composé de toutes les décharges du nuage au sol qui se produisent dans un rayon de 10 km les unes par rapport aux autres et dans un laps de temps d'une (1) seconde.

B.1.2 Utilisations des Données sur la Foudre

La foudre constitue une force très puissante. Un coup de foudre peut tuer, détruire des équipements, provoquer des incendies et perturber les systèmes d'alimentation électrique. Les données sur la foudre en temps réel et sous une forme re-calculée peuvent être utilisées pour anticiper l'apparition de la foudre et aider à gérer son potentiel dévastateur.

Ci-après, quelques exemples de secteurs pouvant bénéficier de l'analyse des données sur la foudre :

- Employés du bâtiment travaillant en extérieur et employés à la maintenance qui peuvent être exposés à la foudre.
- Employés des secteurs du ravitaillement en carburant, du stockage de munitions et de fournitures pyrotechniques pour lesquels la foudre peut occasionner des explosions inopinées.
- Personnes pratiquant des activités en extérieur : golf, randonnée et qui utilisent des instruments pouvant présenter un danger.
- Personnel des installations de génération électrique travaillant à la protection contre la foudre et à la gestion des équipes de réparation.
- Amélioration des prévisions météo et des alertes en cas de mauvais temps.
- Prévision des débuts d'incendie pour l'industrie forestière.
- Gestion du trafic aérien.
- Planification de l'installation des lignes électriques et des systèmes de protection contre la foudre.
- Vérification des réclamations auprès des assurances en cas de dégâts occasionnés par la foudre.
- Corrélation d'événements (tels que des pannes sur les lignes électriques) avec les coups de foudre pour déterminer si l'événement a été provoqué par la foudre.

B.2 Méthodes de Localisation de la Foudre

Ci-dessous, un résumé des méthodes utilisées par Global Atmospheric pour détecter et pour localiser la foudre.

B.2.1 Un peu d'Histoire

La plupart des méthodes existantes servant à la détermination de la position des coups de foudre nuage au sol (C-G) sont basées sur la radiogoniométrie ou sur les méthodes liées au temps d'arrivée ou bien sont une combinaison de ces méthodes.

Les premiers travaux ayant utilisé le temps d'arrivée pour localiser la foudre furent réalisés par Lewis et al. (en 1960) et Oetzel et al. (en 1969). Les brevets nord-américains portant sur les diverses mises en oeuvre des méthodes hyperboliques pour la localisation de la foudre remontent au début des années 1950. Cette méthodologie est actuellement utilisée pour les systèmes disponibles sur le marché et brevetés par ARS (Atmospheric Research Systems), qui est une branche de Global Atmospheric.

Les travaux sur l'application de la radiogoniométrie magnétique pour localiser la foudre remontent aux années 1920 (Horner, 1957). Comme pour le temps d'arrivée, il existe plusieurs brevets nord-américains portant sur des méthodes spécifiques de localisation par radiogoniométrie. LLP (Lightning Location and Protection) qui est aussi une branche de Global Atmospheric, fabrique des systèmes utilisant cette technologie. Les principes de base de ces deux méthodes et les méthodes permettant des combinaisons sont présentés dans les paragraphes ci-après.

B.2.2 Principes de base de la Radiogoniométrie

Les systèmes de radiogoniométrie utilisent deux capteurs (ou plus) qui mesurent l'azimuth (angle à partir du nord vrai) entre le capteur et le coup de foudre. En règle générale, l'azimuth est déterminé par l'utilisation de deux cadres gonio magnétiques orthogonaux. Lorsque trois capteurs (ou plus) signalent une décharge, une procédure d'optimisation qui minimise les erreurs «d'angle» des capteurs peut être utilisée. Cette procédure est illustrée à la Figure B-1. Les trois points (L_{12} , L_{13} , et L_{23}) indiquent les localisations possibles qui seraient calculées si seulement deux capteurs devaient signaler une décharge : cette méthode de localisation est appelée «triangulation»

Il existe certaines conditions dans lesquelles les relations géométriques entre les capteurs radiogoniométriques et la décharge de la foudre produisent des résultats peu intéressants. En particulier si la décharge se produit le long d'une ligne entre deux capteurs et si ces deux capteurs sont les seuls à détecter la décharge, alors les erreurs au niveau de la mesure de l'azimuth peuvent provoquer des erreurs de localisation importantes. Dans certaines circonstances, les mesures peuvent ne produire aucune intersection. En raison de ce problème de ligne de base, les réseaux performants comportent au moins trois capteurs.

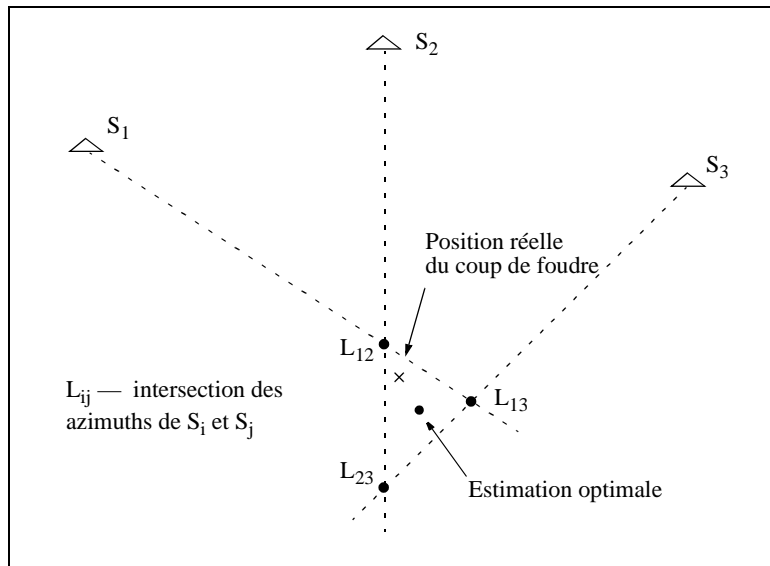


Figure B-1 Optimisation de l'algorithme de localisation pour la radiogoniométrie

B.2.3 Principes de Base des Temps d'Arrivée

Les systèmes basés sur les temps d'arrivée utilisent trois capteurs (ou plus) qui mesurent le temps d'arrivée de la décharge de la foudre. Traditionnellement, les capteurs mesurent la *différence relative de temps* entre les temps d'arrivée au niveau de capteurs multiples. Avec cette méthode, chaque paire de capteurs produit une courbe hyperbolique qui décrit l'ensemble des localisations possibles (lieu (locus) des points) qui répond à cette mesure de différence des temps d'arrivée. Avec ces deux courbes produites par trois ou quatre capteurs, il est possible de déterminer une position à partir de l'intersection de ces courbes, tel qu'illustré à la Figure B-2a. Dans certaines conditions de géométrie, les courbes produites à partir de trois capteurs seulement, donnent deux intersections, qui aboutissent à une localisation ambiguë

comme l'illustre la Figure B-2b ; ce problème est évité si quatre capteurs détectent la décharge.

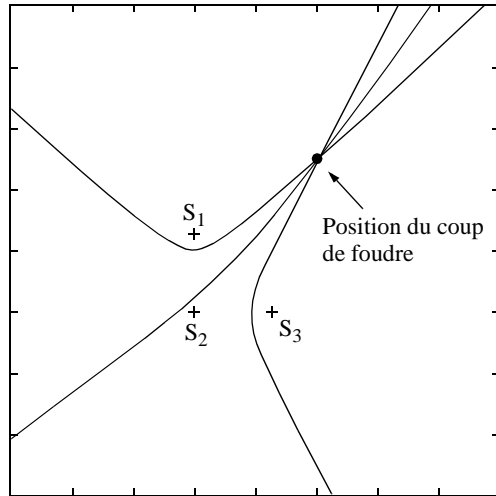


Figure B-2 a) Méthode par intersection des hyperboles produites par trois capteurs

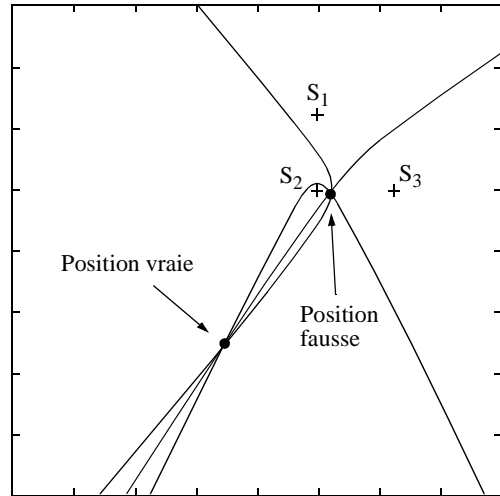


Figure B-2 b) Localisation ambiguë pour une intersection des hyperboles de trois capteurs

Autre approche possible pour localiser la foudre en utilisant le temps d'arrivée : il s'agit de mesurer le *temps d'arrivée absolu* de la décharge au niveau de chaque capteur et d'utiliser une méthode de localisation qui évalue à la fois l'emplacement et l'heure de la décharge. Dans une telle situation, chaque capteur fournit des informations qui peuvent être considérées comme définissant une distance (propagation) entre la décharge et le capteur, produisant ainsi un locus circulaire de localisations possibles pour chaque capteur. Le rayon de chaque cercle est basé sur la différence entre l'heure estimée de la décharge et l'heure mesurée de son arrivée sur le site du capteur, tel qu'indiqué en Figure B-3. La localisation est déterminée en sélectionnant la position et l'heure de la décharge qui a entraîné l'intersection de tous les cercles. Pour souligner la différence entre cette méthode par temps d'arrivée et la méthode d'intersection hyperbolique, nous l'appellerons «localisation par *intersections circulaires*». Pour les localisations à trois capteurs, les deux méthodes donnent la même localisation. Lorsque plus de trois capteurs signalent une décharge, la méthode des intersections circulaires

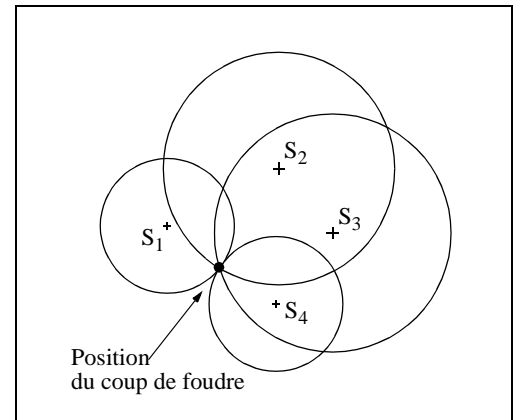


Figure B-3 Méthode d'intersection des cercles avec utilisation de quatre capteurs

peut fournir une localisation optimisée par utilisation d'un algorithme itératif identique à la méthode radiogoniométrique présentée ci-dessus. De plus, la méthode par intersections circulaires peut s'adapter facilement pour inclure les mesures d'angles (comme présenté au paragraphe suivant).

B.2.4 Amélioration de la Précision grâce à une Combinaison de Technologies Avancées

Au cours des dernières années, LLP a mis au point une méthode permettant de combiner la radiogoniométrie et le temps d'arrivée pour obtenir une autre méthode de localisation de la foudre, que nous appellerons méthode IMPACT. Dans cette approche, la radiogoniométrie fournit des informations sur l'azimut, et le temps d'arrivée absolu fournit des informations sur la propagation. Ces données sont utilisées simultanément pour généraliser la méthode des intersections circulaires et obtenir des estimations optimales de l'emplacement de la décharge du nuage au sol, en utilisant toutes les données disponibles. Cette approche n'est pas concernée par les problèmes inhérents à chacune des méthodes lorsqu'elles sont utilisées séparément, comme cela est expliqué dans les deux paragraphes précédents. A titre d'exemple, une décharge qui se produit entre deux capteurs

le long de leur ligne de base, est localisée de manière précise par l'intersection des «vecteurs» de l'azimut et des «cercles» de propagation, tel qu'indiqué à la Figure B-4. Dans cette figure, les informations sur l'azimut pour le capteur S_1 sont l'angle θ_1 et la valeur de la propagation (basée sur le temps d'arrivée absolu) est r_1 . Il est important de noter que, dans cet exemple, quatre paramètres sont mesurés : à savoir, deux angles et deux temps d'arrivée. Ces mesures fournissent trois paramètres estimés : la latitude, la longitude et l'heure de la décharge. Ainsi, la méthode IMPACT dispose d'informations redondantes qui permettent une estimation optimisée de la localisation même en cas de situation minimaliste où une décharge est détectée uniquement par deux capteurs. Les premières évaluations de cette méthode ont montré que la méthode par combinaison est plus performante que chaque méthode prise individuellement, à la fois en termes de précision de la localisation et de probabilité de détection.

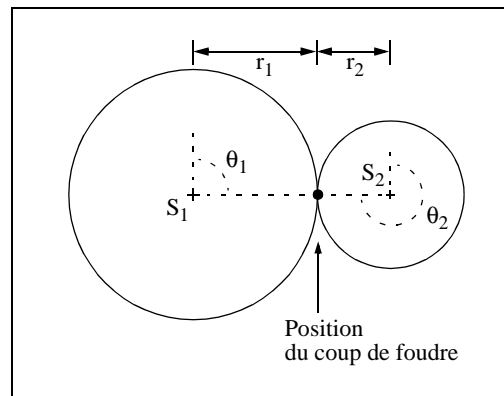


Figure B-4 Utilisation de la méthode IMPACT sur une ligne de base entre deux capteurs

B.3 Intensité du Coup de Foudre

L'intensité du signal est utilisée pour estimer l'intensité du coup de foudre. L'intensité des signaux normalisée par la distance (RNSS) correspond au signal mesuré normalisé comme si le coup de foudre s'était produit à 100 km du capteur. Le signal peut être normalisé de diverses manières (Idone et al., 1993). Pour le Réseau National de Détection de la Foudre (NLDN), les données sont normalisées en utilisant la formule ci-dessous :

$$RNSS = Signal_{mesure} \times \left(\frac{distance_{jusquaeclair}}{100km} \right)^{1,13}$$

L'intensité des signaux normalisée par la distance (RNSS) peut être convertie en kiloampères en utilisant la formule ci-dessous :

$$kiloamperes = k_1 \times RNSS$$

Où k_1 a une valeur de 0,185, obtenue de manière expérimentale.

B.4 Performances du Système de Localisation de la Foudre

Un certain nombre de facteurs affectent les performances de la détection de la foudre. Ces facteurs incluent la précision et la cohérence des données de localisation et l'efficacité de la détection.

B.4.1 Mesure de la Précision de la Localisation

Une ellipse de fiabilité de la position peut être calculée pour toutes les localisations des coups de foudre. L'ellipse entoure une région, centrée autour de la position calculée du coup de foudre, et à l'intérieur de laquelle la probabilité que le coup de foudre se soit produit est de 50%. L'ellipse de fiabilité peut être décrite en termes de demi grand axe, d'excentricité (rapport du demi grand axe sur le demi petit axe) et d'orientation du demi grand axe (en degrés par rapport au nord). Des exemples d'ellipses de fiabilité sont fournis à la Figure B-5 et à la Figure B-6, avec tous les paramètres permettant de les décrire. Si un coup de foudre n'est détecté que par deux radiogoniomètres situés à une distance importante du coup de foudre (Figure B-5), l'ellipse est assez excentrique et son grand axe est orienté sur une ligne entre les deux capteurs. Si un coup de foudre est détecté par plusieurs capteurs à des angles différents, l'ellipse sera plus petite et plus circulaire, tel qu'illustré à la Figure B-6.

L'ellipse de fiabilité peut être calculée pour des probabilités différentes de celle de 50% en cadrant correctement le demi grand axe et le demi petit axe. La longueur de chaque axe est

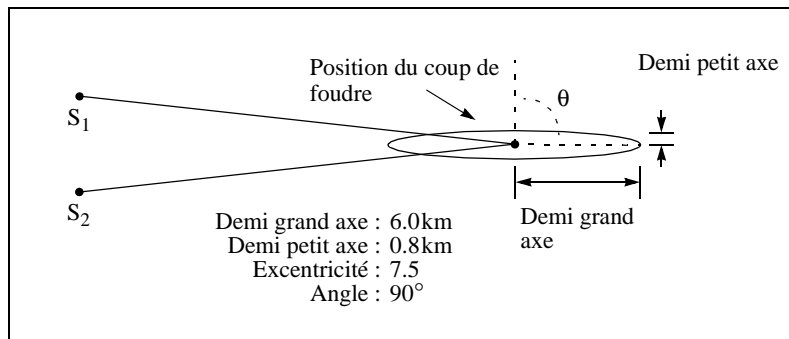


Figure B-5 Ellipse de fiabilité à partir d'une géométrie de capteur défavorable

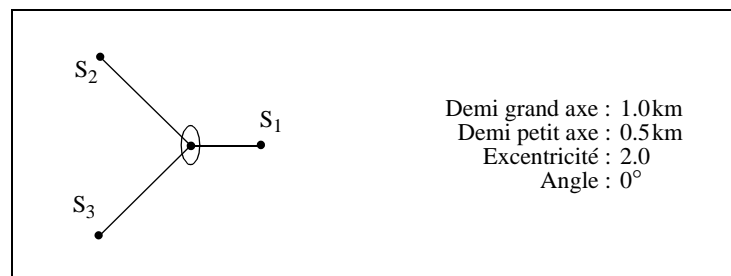


Figure B-6 Ellipse de fiabilité à partir d'une géométrie de capteur favorable

proportionnelle à la valeur de l'écart standard normalisé (sigma) correspondant à la probabilité voulue. Le Tableau B-1 indique différentes valeurs sigma et les probabilités associées. Par exemple, prenez les longueurs des axes et divisez chacune par 1,177 puis multipliez chacune par 3,03 pour convertir une ellipse à probabilité de 50% en ellipse à probabilité de 99%.

Sigma	Probabilité
1	39,3%
1,177	50%
2	86,5%
2,45	95%
3,03	99%

Tableau B-1 Relation entre la valeur sigma et la probabilité

La formule ci-dessous vous permet de calculer la valeur sigma correspondant à une probabilité voulue:

$$\sigma = \sqrt{-2 \cdot \ln(1 - \text{probabilite})}$$

B.4.2 Cohérence des Données

Le χ^2 réduit est calculé pour tous les calculs de localisations optimisées. La valeur réduite du χ^2 est une mesure permettant de savoir si les mesures des capteurs sont cohérentes et il s'obtient avec la formule ci-dessous :

$$RCS = \frac{\sum_{j=1}^n \left[\frac{(m_j - m_j^*)^2}{e_j^2} \right]}{x}$$

soit :

n	le nombre total de mesures.
j	l'indice des mesures.
m_j	la valeur mesurée.
m_j^*	la valeur calculée sur la base d'une localisation optimale.
e_j	l'erreur de mesure théorique (écart standard).
x	les degrés de liberté (nombre de mesures moins le nombre de paramètres estimés).

Les “bonnes” valeurs du χ^2 se situent dans une fourchette de 0,0 à 3,0 tandis que les valeurs acceptables se situent dans une fourchette de 3,0 à 10,0 . Des valeurs supérieures sont le résultat d'erreurs de site mal corrigées, de bruit inhabituel ou de mauvaises corrélations au niveau de l'heure. Les localisations associées à ces valeurs supérieures doivent être considérées comme des localisations “marginales”, une fois que les corrections de site ont été effectuées.

Les erreurs de mesure peuvent habituellement être limitées à moins d' 1° d'azimuth (pour les erreurs d'angles) et 1,5 µs (pour les erreurs d'heure).

B.4.3 Efficacité de la Détection

La précision des données est liée à la précision des coups de foudre signalés. Cependant, tous les coups de foudre ne sont pas détectés et signalés. Les coups de foudre ne sont pas signalés par les capteurs si leurs formes d'ondes sont incorrectes ou si le signal se situe en-dessous du seuil du capteur. Les localisations des coups de foudre ne sont pas calculées si les coups de foudre signalés par les capteurs ne peuvent pas être corrélés ou fournissent des localisations erronées. La capacité d'un réseau à détecter et à signaler des coups de foudre est appelée efficacité de détection, cette efficacité étant calculée sous la forme d'un pourcentage des coups de foudre nuage au sol (C-G) réels signalés par le réseau.

L'efficacité de la détection du réseau varie d'une région à une autre. Elle dépend de la configuration et de la géométrie du capteur.

B.4.4 Performances du Réseau National de Détection de la foudre NLDN

La précision des données du réseau NLDN et l'efficacité du réseau ont évolué au fil du temps et sont indiquées dans le tableau ci-dessous (Tableau B-2). La précision et l'efficacité continueront de progresser au fur et à mesure des évolutions des capteurs et des logiciels utilisés. Une efficacité de détection des coups de foudre de 75% signifie qu'il existe une chance équivalente à moins de 2% pour qu'un orage accompagné de deux coups de foudre (ou plus) ne soit pas détecté.

Année	50%	95%	99%	Efficacité
1989	4–8 km	8–16 km	10–20 km	70% ^a
1990	4–8 km	8–16 km	10–20 km	70% ^a
1991	4–8 km	8–16 km	10–20 km	70% ^a
1992	2–4 km	4–8 km	5–10 km	65–80%
1993	2–4 km	4–8 km	5–10 km	65–80%
1994	2–4 km	4–8 km	5–10 km	65–80%
1995	0,5–1,0 km	1–2 km	1,3–2,6 km	80–90%

Tableau B-2 Estimation de la Précision des données et de l'efficacité de détection du réseau

- a. L'efficacité de détection du réseau n'a pas été caractérisée de manière correcte au cours de cette période, Orville (1994).

B.5 Utilisation des Mesures de la Qualité du Coup de Foudre

Les “mesures de la qualité du coup de foudre”, présentées dans le paragraphe suivant, peuvent être utilisées afin de mieux comprendre la précision de la localisation des coups de foudre, comme indiqué ci-après. Tout d'abord, il faut vérifier que la valeur du khi^2 se situe dans la plage acceptable (normalement 10,0 ou moins). Si cette valeur est supérieure à 10,0, alors les paramètres de l'ellipse sous-estimeront l'erreur réelle de localisation. Si la valeur du khi^2 est acceptable, alors les paramètres de l'ellipse pourront être utilisés pour évaluer l'incertitude au niveau de la localisation du coup de foudre. Lors de l'étude d'un incident, la question se pose de savoir si un coup de foudre bien particulier aurait pu toucher un objet spécifique, l'orientation et la forme de l'ellipse peuvent alors être utilisées pour répondre à cette question, tel qu'illustré à la Figure B-7.

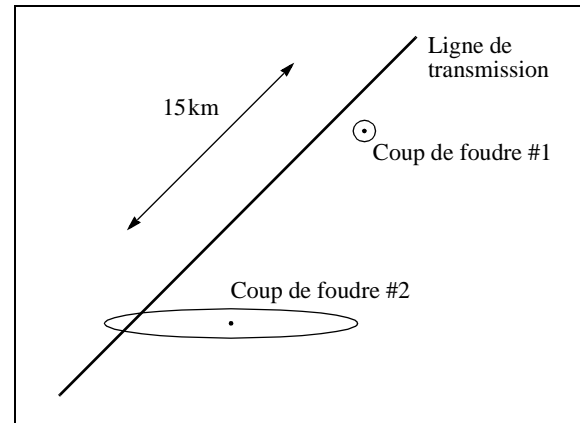


Figure B-7 Utilisation de l'ellipse de fiabilité pour identifier les coups de foudre les plus probables

Autre utilisation des informations fournies par l'ellipse de fiabilité : lorsque la précision locale est en jeu. Dans ce cas, seul le demi grand axe est important car c'est ce paramètre qui reflète l'erreur correspondant au pire des cas.

B.6 Bibliographie

Horner, F. (1957) Very-Low-Frequency Propagation and Direction Finding, *Proceedings of the IEEE*, 101B, 73-80.

Lewis, E.A., Harvey, R.B., Rasmussen, J.E. (1960) Hyperbolic Direction Finding with Sferics of Transatlantic Origin, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 63, No. 7, 1879-1905.

Lewis, E.A. (1964) Geometry and First-Order Error Statistics for Three- and Four-Station Hyperbolic Fixes on a Spherical Earth, *Physical Sciences Research Papers*, No. 29.

Oetzel, G.N., Pierce, E.T. (1969) VHF Techniques for Locating Lightning, *Radio Science*, 4, 199-201.

Idone, V.P., Saljoughy, A.B., Henderson, R.W., Moore, P.K., Pyle, R.B. (1993) A Reexamination of the Peak Current Calibration of the National Lightning Detection Network, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 98, No. 10, 18,323-18,332.

Orville, R.E. (1994) Cloud-to-Ground Lightning Flash Characteristics in the Contiguous United States: 1989-1991, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 4, No. D5, 10,833-10,841.