

ETUDE SUR LA DETECTION DES PHENOMENES AEROSPATIAUX RARES

Volume n° 5

IV. SOLUTIONS PROPOSEES.

oooooooooooooooooooooooooooo

IV.1. Utilisation de systèmes existants.

Le thème de réflexion n° 5 de l'étude (cf. para. I.2.) conduisait à examiner les possibilités techniques d'adaptation des systèmes existants ou en cours de développement. D'une façon plus générale, il convenait d'identifier les systèmes susceptibles de fournir systématiquement des données utiles sur les phénomènes aérospatiaux rares, ainsi que les modifications techniques et les procédures d'échange d'information éventuellement requises.

A l'issue de cette étude, il s'avère que les possibilités dans ce domaine sont très limitées, ce qui contribue à justifier le recours à un développement original. Les systèmes concernés sont regroupés en trois catégories : systèmes français existants, projets français, systèmes étrangers.

IV.1.1. Systèmes français existants.

L'étude a montré que les grands réseaux de couverture radar ne pouvaient pas assurer une détection à caractère systématique des phénomènes rares : en effet, le système CAUTRA de l'Aviation Civile et son homologue militaire STRIDA offrent aux opérateurs des outils très sophistiqués pour contrôler l'espace aérien; cependant, s'il existe des options qui permettraient la détection d'objets ou de phénomènes imprévus (échos bruts de radars primaires, par exemple), celles-ci ne sont généralement pas utilisées en mode routine, et seuls les aéronefs sont systématiquement contrôlés (dans certaines plages prédéfinies d'altitude et de vitesse).

Il est à noter, en ce qui concerne les observations occasionnelles de phénomènes rares, que les procédures en vigueur pour informer le GEPAN sont tout-à-fait appropriées.

Dans le domaine de la détection systématique, objet de l'étude, le seul réseau français susceptible de fournir des données est celui du LDG (Laboratoire de Détection et de Géophysique, du Commissariat à l'Energie Atomique), particulièrement en ce qui concerne l'électricité atmosphérique (cf. CR 51/0782). Pour cela, il serait nécessaire de mettre en place une procédure de transmission d'information au GEPAN (systématiquement ou sur demandes particulières). Le LDG a déjà collaboré avec le CNET en 1978 à Saint-Privat d'Allier, dans le cadre d'études sur la foudre.

On peut rappeler pour mémoire l'observatoire de Chambon-la-Forêt de l'Institut de Physique du Globe de Paris, qui peut fournir en permanence la valeur du champ magnétique terrestre à 1γ près, à raison d'un point de mesure par minute.

Enfin, sur un plan beaucoup plus local et temporaire, les campagnes de prises de vues du ciel nocturne récemment entreprises par le CESR (Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements de Toulouse) fournissent des données intéressantes pour cette étude. En effet le CESR, qui essaie de mettre en évidence des éclairs optiques associés aux sursauts gamma de certaines étoiles, a mis au point et utilisé une caméra spéciale TELEPHOT (cf. CR 36/0582, 60/0982, 68/1082). Le rapprochement évident entre cette recherche et les préoccupations du GEPAN en matière de détection donne un intérêt particulier aux résultats stockés sur cassettes vidéo, notamment pour l'étude d'un système optique original (cf. para. IV.2.).

IV.1.2. Projets français.

Certains systèmes en cours de développement ou encore à l'état de projets présentent un intérêt potentiel pour la détection de phénomènes aérospatiaux rares.

.La prochaine version EMIR 2 du sous-système informatique d'extraction de données du système militaire STRIDA comportera de nouvelles fonctions prenant en compte les "anomalies" de l'en-

vironnement électromagnétique (cf. CR 40/0682). Il paraît donc intéressant de suivre de près le développement et l'expérimentation de ce nouveau produit, en tenant compte de son caractère classifié.

.La Météorologie Nationale prévoit d'équiper tout un réseau de radars RODIN (5 cm) interconnectés, dans le but de réaliser des animations avec les "vues radar" du ciel français. Des données de ce type, produites dans un mode opérationnel, seraient évidemment précieuses pour la détection des phénomènes rares.

.En ce qui concerne la détection à distance de la foudre, l'ONERA a évoqué la possibilité de s'équiper de matériel standard américain LLP (portée de 300 Km). Si cette acquisition doit se réaliser, les données fournies seront utiles, au moins à titre de compléments, pour la détection du GEPAN (voir plus loin le cas du Benelux).

.Le LSEET (Laboratoire de Sondages Electromagnétiques de l'Environnement Terrestre), qui utilise à Toulon un radar ST (Stratosphère-Troposphère) pour sonder verticalement l'atmosphère en air clair, a étudié avec le CRPE et le CEPHAG différents types de sondeurs (radars ST, MST). Dans ses projets à long terme figure la création d'un observatoire de l'environnement, équipé d'un sondeur HF-VHF. Il semble utile de se tenir informés de l'évolution de ce projet, qui pourrait peut-être fournir des données systématiques intéressantes.

.Une utilisation systématique des images fournies par des satellites d'observation de la terre peut être envisagée pour l'avenir, au moins en tant que source d'informations complémentaires. En ce qui concerne les satellites météorologiques (METEOSAT), la localisation des foyers orageux est possible (voir R.F.A. au para. III.2.3.).

La possibilité d'extraire des informations utiles des images transmises par des satellites de télédétection (LANDSAT, et surtout SPOT) devrait être étudiée. En particulier, l'intérêt potentiel de "récupérer" les images brutes éliminées au premier examen ("Quick-Look") en raison de la couverture nuageuse pour-

rait être examiné, en tenant compte des caractéristiques des capteurs (seuils de saturation, d'éblouissement,...) et des scènes nuageuses (albedo,...).

IV.1.3. Systèmes étrangers.

Les prises de contact avec divers organismes ou laboratoires étrangers, qui font l'objet du chapitre III, ont permis de découvrir des idées intéressantes et des expériences acquises dont il faudra tenir compte pour la définition d'un système original de détection (cf. para. IV.2.). En outre, certaines réalisations étrangères sont susceptibles de fournir des données concernant directement l'apparition éventuelle de phénomènes rares au-dessus du sol français; elles font l'objet de ce paragraphe.

.Au Benelux, il existe des réseaux de détecteurs de foudre à distance ("sferics" à 10 KHz), et il se peut que leur couverture déborde sur le territoire français (à vérifier). Il serait intéressant qu'un contact soit établi, si ce n'est déjà fait, pour évaluer l'intérêt qu'il pourrait éventuellement y avoir à étendre ces réseaux vers l'ouest, ne fût-ce qu'avec un détecteur à titre expérimental.

.Le système de localisation à très grande distance des centres orageux installé à Berlin (R.F.A.), Tel-Aviv et Pretoria couvre entre autres la totalité de l'Europe. Les résultats du traitement concernant le sol français sont donc disponibles quelque part et seraient certainement "bons à prendre", en dépit des incertitudes de localisation. Il faudrait pour cela établir un contact avec l'Institut Astronomique de l'Université de Bonn et convenir d'un mode d'approvisionnement des résultats graphiques concernant la France, voire d'une participation plus active au fonctionnement du réseau (pouvant aller jusqu'à l'approvisionnement d'une station : voir para. III.2.3.).

.Aux Etats-Unis, plusieurs programmes d'observation et de localisation des orages à partir de satellites sont opérationnels. Par principe-même, les données recueillies par des satellites à défilement concernent la quasi-totalité du globe, et donc entre autres la France. Il semble cependant illusoire d'espérer obtenir systématiquement ce type de données, dans la mesure où il s'agit de programmes militaires (satellites DMSP : Defense Meteorological Satellite Program).

Il est sans doute plus réaliste de s'intéresser aux résultats du projet NOSL (Nighttime/daylight Optical Survey of Lightning) qui concerne une caméra spécialisée manoeuvrée par un astronaute de la navette spatiale, bien que par principe il ne s'agisse pas d'un système de surveillance systématique.

Enfin la réalisation éventuelle de deux projets de la NASA mérite d'être suivie de près :

- le satellite à défilement UARS (Upper Atmosphere Research Satellite), muni de senseurs optiques,
- le satellite géosynchrone STORMSAT, stabilisé sur 3 axes au-dessus des Etats-Unis, et équipé de deux barrettes de photo-diodes échantillonnées à 1 MHz.

Le projet GEODSS n'est pas mentionné dans ce paragraphe, en dépit du grand intérêt qu'il présente sur le plan technique, parce qu'il est conçu pour travailler de façon programmée et n'a pas pour vocation une surveillance du ciel (champs angulaires des instruments très étroits).

.Dans le domaine de la détection des météores, il convient de rappeler que le réseau européen de stations photographiques s'étend depuis l'est de la Tchécoslovaquie jusqu'à la frontière franco-allemande. Son champ d'observation déborde sur le territoire français, et une chute de météorite(s) en Haute-Savoie dans la nuit du 12 au 13 Juin 1977 a été calculée et signalée (sans que l'on puisse retrouver ces objets dans la zone montagneuse désignée).

L'équipement standard mis au point en Tchécoslovaquie (objectif "fish-eye") et sa mise en oeuvre sont d'une grande simplicité, et le système optique et informatique de réduction des données opérationnel à Prague est bien au point. Pour ces raisons, et compte tenu de l'absence totale de moyens de détection dans notre pays, il paraît tout-à-fait souhaitable et justifié de prolonger dans le nord-est de la France le réseau européen, ne serait-ce qu'avec une ou deux stations.

En effet, même si par ailleurs un système plus élaboré devait être développé (ce qui prendra du temps), un tel investissement resterait justifié en tant que point de comparaison bien établi par une longue expérience. On notera les encouragements formulés dans ce sens par Monsieur Pellas (cf. CR 57/0882), Monsieur Kiko (cf. para. III.5.1., R.F.A.) et Monsieur Ceplecha (cf. CR 59/0982); ce dernier, responsable du réseau européen, s'est déclaré prêt à soutenir et à favoriser toute initiative dans ce sens.

IV.2. Etude d'un système original de détection optique.

En premier lieu, cette étude a permis de confirmer l'impression initiale sur le sujet : il n'existe actuellement en France aucun système de détection capable d'enregistrer systématiquement la présence d'un phénomène aérospatial rare, alors qu'il existe un besoin pour des données de ce type (plus ou moins pressant) dans des organismes ou laboratoires très divers :

- Météores : laboratoires d'astronomie et de minéralogie.
- Foudre : organismes ayant des équipements à protéger, laboratoires de recherche sur l'électricité atmosphérique.
- Satellites : défense nationale.
- Tous phénomènes rares : CNES/GEPAN.

Le recensement de moyens techniques existant en France et à l'étranger, susceptibles d'être mis en oeuvre, a permis de mieux cerner les qualités et les limitations des différentes classes

de capteurs envisageables pour une station de détection. Les conclusions générales qui se dégagent sont les suivantes :

- Détection sismique : sans grand intérêt pour la classe de phénomènes concernée par l'étude.
- Détection acoustique : mettant en jeu des microphones, voire des micro-barographes, elle peut apporter des informations complémentaires utiles, mais ne peut pas constituer la base d'un système de surveillance (météores, satellites,...).
- Détection électromagnétique : la détection et la localisation à distance de la foudre par triangulation à l'aide de récepteurs radio accordés entre quelques KHz et quelques dizaines de KHz est très efficace. Par ailleurs, la datation d'une rentrée de météore dans l'atmosphère à l'aide d'un simple récepteur à modulation de fréquence du commerce est pratiquée par des astronomes amateurs. On ne peut cependant considérer ce mode de détection que comme complémentaire d'un autre, ne serait-ce qu'en raison des imprécisions sur les évaluations de distances et d'angles obtenues avec ces basses fréquences.
- Détection radar : les radars de surveillance comme ceux des aviations civile et militaire, et les systèmes informatiques associés, sont extrêmement complexes et coûteux. De plus, leur utilisation pour détecter des cibles par définition imprévues poserait de sérieux problèmes techniques (pas de critères d'extraction, etc..).
Les sondeurs travaillant entre 30 et 50 MHz, comme le radar ST du LSEET et le radar transhorizon du laboratoire de physique de l'exosphère, sont bien adaptés à la détection de phénomènes quelconques dans l'atmosphère, mais ont un encombrement tellement important qu'il est difficilement pensable d'en équiper un réseau de stations.

Enfin certains radars, comme les radars météorologiques ou les radars météoriques, présentent un certain intérêt pour la détection des phénomènes rares, mais ne sont pas faits pour la surveillance du ciel en raison de leur directivité. Ils ne pourraient par conséquent contribuer à fournir des données utiles que d'une façon complémentaire, par exemple en étant asservis à un autre dispositif de surveillance (mode poursuite).

- Détection optique : bien que leurs performances dépendent fortement de la position du soleil et de la couverture nuageuse, les systèmes optiques sont les mieux adaptés à une détection systématique des phénomènes aérospatiaux rares. En effet, ils peuvent à la fois surveiller en permanence un champ angulaire important et fournir des données riches en information sur les phénomènes détectés (bonnes résolutions angulaires et radiométriques).

On remarquera, dans les volumes précédents, que seule la détection optique a donné lieu à la réalisation concrète de systèmes de surveillance pour chacun des phénomènes évoqués, et que les moyens techniques mis en jeu peuvent être très simples (réseau européen de détection des météores).

Il en ressort que, même s'il est envisageable de développer un jour une station de détection complexe avec plusieurs capteurs de natures différentes dont les données seraient combinées, l'élément central de la surveillance, à mettre au point en premier lieu, doit être un dispositif de détection optique.

En fait, cette priorité est apparue très tôt au cours de l'étude, ainsi que l'intérêt potentiel d'un système optique qui serait capable de stocker sélectivement les séquences d'images comportant des phénomènes rares. Ces idées s'étant confirmées, c'est la réalisation d'un système de ce type qui est proposée, et les paragraphes suivants en présentent des éléments de justification et de spécification.

IV.2.1. Principe de l'archivage sélectif.

Quel que soit le capteur, une station de détection des phénomènes aérospatiaux rares doit être capable d'enregistrer les données reçues au cours des périodes de surveillance. Dans le cas de la détection optique se pose le problème du choix du mode de stockage des données images. Les différentes solutions possibles, qui ont été successivement envisagées, sont les suivantes :

- Photographie : c'est la solution simple adoptée pour les trois réseaux de détection des météores présentés précédemment (cf. para. III.3.). Elle consiste à effectuer de longues poses (plusieurs heures) sur des plaques ou des films sensibles. Les phénomènes rares se distinguent nettement des sources lumineuses fixes (étoiles), et leurs évolutions dans le temps peuvent être reconstituées grâce à un système d'obturation périodique qui fait apparaître la trajectoire d'une source lumineuse comme un pointillé sur la photo.

Si l'enregistrement photographique est encore à l'heure actuelle celui qui offre les meilleures performances en résolution spatiale, il est extrêmement limité quant aux mesures radiométriques, car sa réponse est essentiellement non linéaire. De plus, en raison du principe-même de la pose, le problème de la datation des événements enregistrés n'est pas simple à résoudre (voir les différentes solutions adoptées pour le réseau européen et le réseau canadien).

Même si la numérisation de ces clichés avec un pas très fin (de l'ordre du micron) était réalisable, l'apport de leur traitement par un ordinateur ne serait probablement pas déterminant, car les bancs optiques existants (cf. Ondrejov) permettent d'extraire toute l'information présente.

- Cinéma : en admettant que l'on sache résoudre le problème de la sensibilité, ce support permettrait seulement

de faciliter la datation des événements. En effet, les sévères limitations en qualité radiométrique, qui sont inhérentes à la photographie, seraient conservées.

De plus, l'alimentation des films pour les prises de vues et l'exploitation des stocks de données poseraient des problèmes de gestion insurmontables.

- Video : l'utilisation d'un tube de télévision approprié, ou d'autres capteurs opto-électroniques, et l'enregistrement des données sous forme de séquences video ouvrent des perspectives intéressantes au-delà des limitations liées aux procédés photographiques. D'une part la qualité des réponses, en particulier sur le plan radiométrique, peut être considérablement améliorée par un bon "design" et grâce à des procédures souples de calibration; d'autre part, le support video se prête bien à la numérisation des images en ligne pour un traitement sur un système informatique spécialisé.

Les campagnes de prise de vues effectuées par le CESR au Pic du Midi avec une caméra TELEPHOT, et les stocks de video-cassettes qui en sont issus, constituent un bon exemple de ce type d'approche (cf. para. II.1.7.).

S'il est clair que ce type de technique, avec en particulier l'utilisation de capteurs opto-électroniques CCD, est appelé à succéder aux dispositifs photographiques actuellement en opération dans les réseaux de détection des météores, il pose néanmoins un nouveau problème qu'il serait dangereux de sous-estimer : la gestion des données brutes enregistrées. En effet, en matière d'imagerie, les quantités d'information manipulées deviennent très rapidement énormes. Or il est illusoire d'accumuler des données en vue d'un éventuel traitement ultérieur si elles sont trop volumineuses (c'est l'expérience qu'a acquise l'auteur pendant de nombreuses années à l'ESA avec les données de satellites). La fatigue provoquée par la visualisation de quelques video-cassettes du stock accumulé par le CESR a contribué à renforcer ce point de vue (cf. CR 68/1082).

Sachant que la numérisation et le traitement sur ordinateur d'un signal vidéo sont aujourd'hui techniquement réalisables, l'idée est venue d'effectuer en aval du dispositif de prise de vue un prétraitement en ligne, pour identifier les séquences vidéo où "il se passe probablement quelque chose" et les stocker de façon sélective.

Etant donnée la nature imprévue des événements à détecter, il est évident que les algorithmes de sélection devront admettre un certain taux de fausse alarme, mais l'objectif est seulement de réduire dans un rapport important (estimé a priori entre 10 et 100) le volume des enregistrements. Afin de justifier cette idée d'une manière quantitative, un travail a été entrepris dans les locaux du CESR à Toulouse : le stock de vidéo-cassettes enregistrées l'été dernier est visualisé par des étudiants pour établir des statistiques sur la fraction du temps correspondant à des événements dans le ciel nocturne, les fréquences d'apparition des avions, satellites, etc... A partir des résultats obtenus, il sera possible d'estimer le rapport de réduction du volume des données qu'on pourrait espérer avec tel ou tel algorithme de prétraitement.

L'intérêt de ce type de solution étant apparu dès le début de l'étude, et compte tenu de l'apparition très récente des matériels à mettre en oeuvre (capteurs opto-électroniques, système de traitement d'images en temps réel), plusieurs actions ont été prises "en avance de phase" :

- Visites de laboratoires spécialisés en opto-électronique ou ayant à résoudre des problèmes voisins (cf. para. II.1.12). Ces visites avaient principalement pour buts de se familiariser avec les techniques modernes de détection optique et de rassembler une documentation initiale sur les matériels offerts sur le marché.
- Stage sur ce sujet pour deux élèves de troisième année de l'ENSTA. Pour des raisons pratiques, et à la suite d'un accord entre le GEPAN et le CTME, la première partie de ce stage s'est déroulée en Septembre 1982 à l'ETCA. Messieurs Cathala et Flament ont rassemblé des documen-

tations techniques sur les différents composants possibles de la chaîne optique d'une station de détection, et étudié sur le papier l'esquisse d'une solution pour un cahier des charges (simplifié) donné. Ces travaux ont fait l'objet d'un rapport préliminaire (réf.(41)).

La suite de ce stage, de Février à Juin 1983, sera consacrée d'une part à l'approfondissement de ce thème, et d'autre part à une réflexion sur les algorithmes de prétraitement en temps réel envisageables pour le tri des séquences à mémoriser. Ces travaux s'appuieront principalement sur les trois sources d'information suivantes :

- le présent rapport, et notamment les paragraphes qui suivent,
- le rapport de Septembre mentionné précédemment (réf. (41)),
- les résultats du dépouillement des video-cassettes du CESR, attendus pour fin Janvier.

IV.2.2. Spécification Technique de Besoins.

Pour le système de détection envisagé, les spécifications de besoins se classent en deux grandes catégories :

- caractéristiques apparentes des phénomènes que l'on veut pouvoir détecter et de leurs mouvements,
- couverture que l'on veut réaliser avec le système (angle solide pour une station, surface du territoire couvert pour un réseau de stations).

La nature-même du problème posé rend un peu arbitraires les valeurs choisies pour ces différents paramètres, et il faut s'attendre de toute façon à devoir faire des compromis tenant

compte de la faisabilité (limite de technologie). Dans cet esprit, les spécifications proposées ci-dessous reflètent l'état des réflexions à la fin de cette étude, mais seront certainement appelées à évoluer dans l'avenir si le développement d'une maquette doit être entrepris.

Caractéristiques apparentes des phénomènes :

Il s'agit des caractéristiques observées au sol à l'entrée du dispositif optique d'une station, indépendamment des contributions respectives des phénomènes eux-mêmes, de la transmission atmosphérique, de l'éclairement du fond du ciel, etc... On caractérisera d'abord chacun des paramètres dimensionnants pris séparément, puis on décrira un phénomène-modèle représentatif des problèmes de bilans énergétiques à résoudre.

Taille angulaire des phénomènes : il n'existe pas réellement de limite supérieure, car on peut imaginer un feu de Saint-Elme ou un flash lumineux très proche qui illumine la quasi-totalité du demi-espace entourant la station.

Un grand coup de foudre peut atteindre une dimension importante dans une direction.

Cependant la majorité des phénomènes détectés à grande distance (météores, satellites) se présentent comme des sources lumineuses ponctuelles, car seul un télescope permet d'en apprécier les dimensions angulaires. Cette limite inférieure étant le cas le plus défavorable au point de vue énergétique (le pixel illuminé à un instant ne l'est que partiellement), on la retiendra pour définir le phénomène-modèle.

Spectre lumineux : les phénomènes lumineux les plus ténus émettent une lumière assez blanche (lumière solaire réfléchie par les satellites, par exemple) dont on pourra, pour les calculs, rapprocher le spectre visible du standard utilisé pour la mesure des magnitudes (Tungstène à 2854 °K).

Flux instantané : ce paramètre, essentiel pour la définition du matériel requis, peut varier dans une très large fourchette. Mesuré en W/m^2 , il est directement lié à la magnitude visuelle qu'utilisent les astronomes.

En ce qui concerne les flux importants, la station peut se trouver exposée de nuit à la pleine lune (magnitude ≈ -15) ou de jour au soleil (magnitude $\approx -26,7$), ou encore à un violent éclair, et elle doit donc être protégée en conséquence.

En revanche, il n'y a pas de limite naturelle vers le bas, car il existe probablement des phénomènes lumineux rares aussi ténus que l'on veut (satellites très lointains, météores minuscules ou bas sur l'horizon, novae,...); plus le système sera sensible, plus le nombre d'observations sera élevé.

On peut cependant noter quelques valeurs significatives :

- . Le réseau européen de détection des météorites permet actuellement d'atteindre la magnitude 0, et même parfois de la dépasser (+1, +2,...).
- . De nuit, la magnitude apparente d'un satellite à défilement standard est de l'ordre de 2 à 3.
- . Le système militaire américain GEODSS, qui n'est pas directement comparable, est sensible à des magnitudes de l'ordre de 18,5 (satellites géosynchrones, à 36000 Km d'altitude).

Vitesse angulaire : indépendamment des phénomènes qui, comme la foudre, apparaissent et disparaissent pratiquement sur place, on peut retenir quelques valeurs typiques pour les sources ponctuelles classiques :

- . Les étoiles ont une vitesse angulaire apparente de $15^\circ/h$ (rotation de la terre).
- . La vitesse angulaire apparente des météores peut varier de 0 (cas du météore radial) à $60^\circ/s$. D'une façon typique, elle est de l'ordre d'une dizaine de degrés par seconde, sur une trajectoire de quelques dizaines de degrés dans le ciel.
- . Un satellite à défilement en orbite basse (télé-détection) a généralement une vitesse angulaire de l'

ordre de 0,5 °/s au zénith (altitude entre 800 et 1000 Km, durée de l'orbite d'environ 90 mn).

Variation de flux : en dehors de l'apparition et de la disparition des phénomènes détectés, l'image qu'on en reçoit peut présenter des fluctuations radiométriques. En ce qui concerne les sources ponctuelles lointaines (satellites, météores, étoiles) il existe une variation lente proportionnelle à l'inverse du sinus de l'élévation angulaire, due à l'absorption atmosphérique. Pour les variations rapides, on peut noter les points suivants :

- . Certains satellites semblent clignoter, en raison des variations de réflexion de la lumière solaire provoquées par leur rotation sur eux-mêmes. La fréquence de ce phénomène est de l'ordre du Hertz en général (tout comme les feux de position des avions).
- . La variation de flux la plus rapide enregistrée sur un météore par le réseau européen était de l'ordre de 100 magnitudes/s.

Phénomène-modèle : à l'aide d'un calcul simple, on peut justifier le choix d'un phénomène-modèle représentatif à la fois d'un météore-type et d'un satellite :

- . En supposant suffisamment basse la fréquence d'échantillonnage de l'image (réf.(41), page 1), on constate que l'énergie reçue par un pixel (point élémentaire) est proportionnelle à P/v , où P est la puissance reçue et v la vitesse angulaire apparente.
- . La magnitude M varie comme $-\log(P)$ par définition.
- . 2 sources ponctuelles ayant respectivement pour magnitudes M_1 et M_2 , et pour vitesses angulaires apparentes v_1 et v_2 , apportent la même énergie à un pixel si l'on vérifie :

$$M_1 - M_2 = \log(v_2/v_1)$$

- . Cette égalité est vérifiée pour les 2 phénomènes suivants :

$$\begin{array}{ll} M_1 = 2,5 & \text{et } v_1 = 0,4 \text{ °/s (satellite)} \\ M_2 = 1 & \text{et } v_2 = 10 \text{ °/s (météore)} \end{array}$$

Comme on le verra plus loin, à bilan énergétique égal, le cas d'une grande vitesse angulaire est plus contraignant pour la définition des matériels (problèmes de choix de la fréquence video, de rémanence,...). C'est donc celui-là qui est proposé comme modèle de travail :

Phénomène-modèle = source ponctuelle de magnitude +1 parcourant de nuit la voûte céleste à la vitesse apparente de 10 °/s.

Couverture à réaliser :

Le but final est de réaliser un réseau de détection fournissant des données à partir desquelles on puisse calculer, par triangulation, la position et la trajectoire éventuelle des phénomènes observés dans une certaine zone de couverture. Celle-ci correspond au volume d'un demi-cylindre vertical ouvert vers le haut, défini par une surface (intersection de son prolongement avec le sol) et une altitude minimale. Par principe, tout phénomène détectable situé dans cette zone devrait être enregistré par au moins deux stations distinctes.

Idéalement, il serait souhaitable de couvrir les 551500 Km² du territoire métropolitain, en abaissant le plus près possible de 0 la valeur de l'altitude minimale. Il faut cependant tenir compte du relief et des difficultés pratiques de mise en oeuvre des stations si elles sont trop nombreuses.

Dans la pratique, avec l'expérience acquise sur les réseaux de détection existants, il est raisonnable de se limiter aux spécifications et contraintes d'implantation suivantes :

- Surface couverte par au moins 2. stations : $\approx 100000 \text{ Km}^2$
- Altitude minimale pour la triangulation : 20 Km
- Nombre de stations à implanter : < 10 .

Un tel réseau permettrait en effet de couvrir la zone nord-nord-est de la France en prolongement du réseau européen.

Par ailleurs, si l'implantation de stations isolées devait être envisagée (repoussant beaucoup plus haut l'altitude minimale de couverture par au moins deux stations), il faudrait imposer comme spécification de besoin une valeur minimale pour l'angle solide de couverture d'une station.

Compte tenu des expériences respectives des réseaux de détection des météores et du CESR de Toulouse, un bon compromis serait réalisé avec un champ angulaire minimal de l'ordre de 120° dans chaque direction (soit π stéradians).

En marge de ces spécifications générales sur la couverture à réaliser, il faut souligner dès le début des travaux de définition l'intérêt des optiques "plein ciel" qui couvrent effectivement 2π stér. (dans les limites imposées par le relief). En effet, ce sont les seules dont on puisse espérer une bonne efficacité vis-à-vis de la foudre, et en particulier des éclairs nuage-sol qui se trouvent fréquemment au-dessous de 10 Km d'altitude.

IV.2.3. Eléments de définition préliminaire.

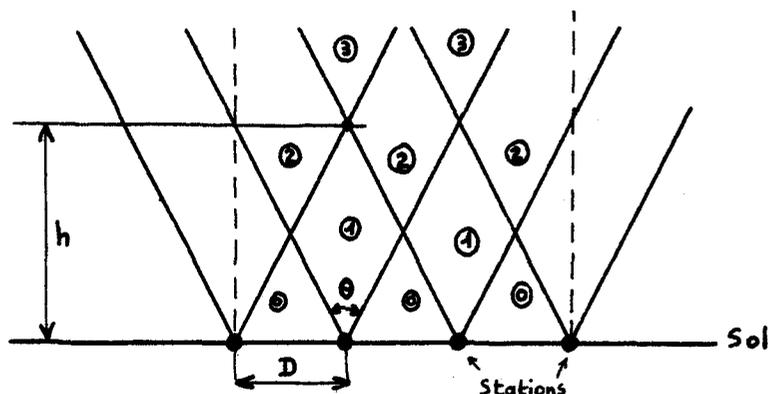
Une station de détection du type envisagé se présente comme une chaîne de sous-ensembles implantés en série, mettant en jeu des équipements optiques, opto-électroniques et micro-informatiques. A partir des spécifications techniques de besoins préliminaires présentées au paragraphe précédent, et sur la base des informations recueillies par les stagiaires et au cours des visites de laboratoires, il est possible de donner des éléments de définition pour chacun des sous-ensembles.

Sous-ensemble optique :

Il s'agit de l'objectif placé à l'entrée de la chaîne optique de la station, et dont les deux paramètres fondamentaux sont l'ouverture et le champ angulaire.

L'ouverture conditionne directement l'éclairage derrière l'objectif et, dans la mesure où les diverses aberrations restent tolérables, une ouverture aussi grande que possible favorisera un bon bilan énergétique. Cependant, si l'on doit utiliser un objectif du commerce, le choix pour ce paramètre restera limité, en particulier s'il s'agit d'un très grand angle.

En ce qui concerne le champ angulaire (qu'on supposera défini par un cône d'angle au sommet θ), la limite inférieure est déterminée par les spécifications de besoins en couverture pour le réseau. La figure ci-dessous illustre le principe du calcul à effectuer, en négligeant le relief et la rotondité de la terre, et en se ramenant à une seule dimension (réseau linéaire).

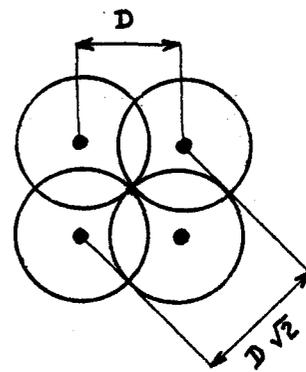


D est la distance entre stations, h l'altitude minimale à partir de laquelle tout point situé au-dessus du réseau (entre les verticales en pointillés) est vu par au moins 2 stations. On remarque qu'au-dessus de l'altitude $h/2$ tout point est vu par au moins 1 station (les chiffres cerclés indiquent pour chaque petite zone le nombre de stations qui la couvrent). On vérifie la relation :

$$D = h \operatorname{tg}(\theta/2)$$

Si on étend le problème à un réseau bidimensionnel à mailles carrées, la forme conique des champs angulaires introduit un facteur correctif égal à $\sqrt{2}$ (voir figure ci-contre), et on vérifie :

$$D = h/\sqrt{2} \operatorname{tg}(\theta/2)$$



(coupe horizontale à h)

A titre indicatif, le tableau suivant fournit les valeurs prises par la distance entre stations D pour quelques valeurs significatives de h et θ , exprimée en Km :

$\theta^\circ =$ \ / h (Km) =	10	20	30	40
120	12,2	24,5	36,7	49,0
140	19,4	38,9	58,3	77,7
160	40,1	80,2	120,3	160,4
170	80,6	161,2	241,9	322,5

Pour satisfaire les besoins exprimés au paragraphe précédent ($h=20$ Km, moins de 10 stations pour couvrir 100000 Km^2), on voit qu'il faut une ouverture d'au moins 170°, correspondant à une distance entre stations adjacentes d'environ 160 Km.

Les objectifs du commerce de type "fish-eye", dont le champ angulaire est d'environ 180° , sont suffisamment performants du point de vue géométrique pour être envisagés pour la station de détection (exemple : fish-eye 8 mm f/2.8 de Nikkon).

Capteur / Amplificateur :

L'utilisation de capteurs opto-électroniques directement derrière l'optique est impossible en raison de la faiblesse des flux lumineux spécifiés. En effet, aucun tube de type télévision n'est envisageable (Vidicon, Nocticon, Super-nocticon,..) compte tenu de leur forte rémanence incompatible avec la détection de phénomènes sporadiques, et aucun des dispositifs de type CCD, CID ou diodes commutées ne serait assez sensible.

L'étude de définition consistera donc, pour ce sous-ensemble, à trouver un montage approprié comportant un amplificateur de brillance suivi d'un dispositif de détection opto-électronique.

L'amplification de la lumière incidente pourra probablement être réalisée par une ou plusieurs galettes de micro-canaux, ou encore à l'aide d'un amplificateur à "focalisation de proximité" (cf. CR 63/1082). C'est le calcul final du gain global de la chaîne d'acquisition, tenant compte des pertes, du bruit et des interfaces, qui permettra de déterminer le gain requis pour l'amplification de brillance.

En ce qui concerne les capteurs qu'il faudra coupler (probablement par fibres optiques) derrière l'amplificateur, il semble que la meilleure solution consiste en une matrice de CCD ou de commutés. Il n'est, en effet, pas envisageable de recourir à une barrette monodimensionnelle qui balayerait la surface utile, comme cela est réalisé dans plusieurs caméras CCD : l'énergie reçue par un pixel se trouverait alors divisée par le nombre de lignes d'une image, ce qui serait en contradiction avec la recherche d'une sensibilité acceptable pour la station (et probablement difficile à atteindre !).

Les commutés (Reticon par exemple) semblent plus performants que les CCD sur plusieurs points (conditions d'éclairage moins critiques, plus grande dynamique, meilleure précision, meilleur rapport signal/bruit), mais sont plus lents. De nombreuses références techniques sont citées dans le rapport des stagiaires (réf.(41)). On retiendra que les matrices actuellement disponibles sur le marché ont une taille maximale d'environ 500x400 pixels, et que leur sensibilité peut être considérablement améliorée si on les refroidit (diminution exponentielle du courant d'obscurité avec la température pour les CCD).

Deux paramètres sont particulièrement importants à calculer en prenant en compte la totalité de la chaîne optique et opto-électronique :

- l'angle solide associé à un pixel : l'énergie reçue par ce pixel lors de l'apparition d'un "phénomène-modèle" en dépend (bilan énergétique), ainsi que la précision de localisation et de trajectographie (sur ces points, aucun besoin quantitatif n'a été formulé, car de toute évidence il faudra faire "le mieux possible").

En particulier, un compromis devra peut-être être trouvé entre le champ angulaire de l'objectif et la taille en pixels de la matrice retenue.

- la fréquence de lecture des images : pas trop haute pour ne pas dégrader le bilan énergétique de chaque pixel (cf. réf.(41) page 4), elle doit être suffisante pour suivre les variations et les mouvements éventuels des phénomènes détectés.

Comme il est hors de question d'envisager une fréquence assez haute pour décomposer les étapes de formation des éclairs, il semble, au vu du réseau canadien MORP de détection des météores (cf. para. III.3.3.), qu'une valeur de quelques Hertz pourrait convenir.

Ce paramètre conditionne directement, en aval, le volume des données stockées, pour une séquence d'une durée totale donnée.

Bien que peu d'informations aient été recueillies jusqu'ici sur ce point, il sera intéressant de chercher si une solution technique ne nécessitant pas une double conversion photons/électrons est envisageable. Il en résulterait certainement une amélioration notable de la FTM (Fonction de Transfert de Modulation) du système.

Prétraitement en temps réel :

Ce sous-ensemble est à la fois le plus critique et le plus original du système. Il comporte principalement une conversion numérique des images, leur soumission à des algorithmes de décision et un dispositif de stockage sélectif de séquences porteuses d'informations utiles.

Le fait de numériser et de faire lire à un ordinateur en temps réel un signal vidéo n'a rien d'utopique à l'heure actuelle, surtout si la fréquence vidéo choisie est nettement inférieure

au standard de 25 Hz. Une étude du marché mondial des consoles de traitement d'images effectuée par l'auteur a permis de vérifier que plusieurs constructeurs offrent en standard des couplages d'entrée video, et des processeurs de traitement en temps réel des séquences d'images numérisées (par exemple, la console américaine VICOM sur laquelle se connecte la caméra CCD développée par l'INRIA : cf. CR 61/0982).

Les algorithmes qui devront déterminer le début et la fin des séquences "probablement intéressantes" effectueront des comparaisons entre trames successives, et pourront donc déterminer a posteriori qu'une séquence à stocker a commencé ou s'est terminée quelques trames plus tôt. Ce type de stratégie implique nécessairement que toutes les images reçues soient mémorisées temporairement sur une mémoire-tampon circulaire dont il faudra déterminer la nature et la taille. A priori, il pourrait s'agir typiquement de 4 mémoires vives d'images au format standard de 512 x 512 pixels (un peu plus grand que la taille d'une matrice CCD courante de type Fairchild 221).

Le point de départ du prétraitement consiste en un calcul de la différence entre chaque trame et celle qui la précède. L'étude pourra s'inspirer dans une certaine mesure de la méthode utilisée pour le système militaire américain GEODSS (cf. para. II.4.), et de la logique de décision implantée dans les stations du réseau MORP (cf. para. III.3.3.).

Le développement et la mise au point des logiciels devront être effectués sur un système interactif de traitement d'images, mais l'implantation du sous-ensemble opérationnel sera réalisée sur un ou plusieurs micro-processeur(s). L'opportunité de câbler, par exemple, l'opération de soustraction de trames consécutives devra être étudiée.

En ce qui concerne le support à choisir pour enregistrer les séquences intéressantes, l'étude de définition devra tenir compte des volumes de données attendus. Le choix se fera entre un support informatique magnétique (bande CCT à 6250 bpi par exemple) et un support video classique (moyennant une reconversion en ligne).

Procédures de calibration :

Pour permettre aux utilisateurs de ce système de tirer le meilleur parti des données images enregistrées, il faut pouvoir leur fournir des données auxiliaires de calibration. Celles-ci sont **nécessaires** pour effectuer des corrections de deux catégories :

- Corrections géométriques : le premier problème consiste à calibrer les déformations géométriques introduites par le sous-ensemble optique. Pour cela, on produit l'image d'une figure géométrique simple (réseau de points équidistants, par exemple), et on déduit des déformations observées et mesurées sur l'image un modèle mathématique dont on se sert ensuite pour "redresser" les images.

Le second problème concerne la FTM de la chaîne optique globale, que l'on peut évaluer en observant des mires, et grâce à laquelle on peut améliorer le contraste des images par déconvolution.

Bien qu'elles ne doivent pas varier beaucoup avec le temps, les données de calibration de cette catégorie devront être vérifiées de temps en temps, car certaines évolutions d'origine thermique ne sont pas exclues.

- Corrections radiométriques : elles sont de deux natures. D'abord, des corrections relatives peuvent être appliquées à chaque pixel sous la forme d'une FTL (fonction de transfert de luminance) obtenue par calibration et codée sous forme de quelques points. Ensuite, des corrections globales peuvent être apportées à l'ensemble des pixels d'une image. Les données de calibration de cette nature sont obtenues en observant des sources lumineuses calibrées (ou l'obscurité). Elles doivent être remises à jour périodiquement.

Des procédures de calibration devront donc être mises au point, ainsi que des sources calibrées, mires, etc... Les données correspondantes seront stockées comme des images particulières.

Réduction des données :

Le traitement en temps différé des données stockées dans les stations ne fait pas partie du sujet de l'étude. Il est seulement évoqué ici pour mémoire.

Les données prétraitées consistant en séquences d'images brutes comportant, avec une certaine probabilité, des phénomènes aérospatiaux rares, il faudra fournir aux spécialistes des différentes classes de phénomènes concernées les moyens d'exploiter ces images. Sans entrer dans les détails, on peut identifier 3 catégories d'outils informatiques à prévoir :

- Outils interactifs classiques de manipulation et de traitement d'images numériques (écran, clavier, outil de désignation sur image, logiciel interactif) pour étudier qualitativement les phénomènes.
- Logiciels de correction à l'aide de données de calibration en vue de mesures fines sur des images.
- Logiciel de réduction des données de trajectographie : désignation et positionnement dans l'espace et dans le temps des phénomènes, triangulation entre vues issues de stations différentes, etc...

IV.2.4. Calendrier et coûts.

Il est clair qu'à ce stade, les propositions de calendrier et les estimations des coûts ne peuvent être que très approximatives. Compte tenu des idées et des projets au moment de la rédaction de ce rapport, le schéma à envisager pourrait être le suivant :

- Février à Juin 1983 : 4 mois de fin de stage pour les 2 stagiaires de l'ENSTA comportant une première approche du prétraitement (algorithmique), et la préparation d'une spécification technique de besoins plus

précise et d'un premier dossier justificatif (sur la base des données du CESR).

- Eté 83 à été 85 : thèse de Docteur-Ingénieur portant sur l'étude et la réalisation (plus ou moins complète en fonction de la main-d'oeuvre technique disponible) d'une maquette. A ce stade, la partie informatique pourrait être implantée en logiciel sur un système à usage général.

Prix du matériel requis : de l'ordre de 200 à 300 KF.

- Eté 85 à été 86 : réalisation d'un prototype 1 câblé.
- Eté 86 à fin 86 : expérimentation du prototype 1 (au Pic du Midi ou au CERGA).
- Fin 86 à été 87 : mise à jour du prototype 1 et réalisation du prototype 2.
- Eté 87 à fin 87 : expérimentation simultanée des prototypes 1 et 2 (sur 2 sites éloignés l'un de l'autre).
(.....)

IV.2.5. Recommandations finales.

D'une façon très générale, au vu des résultats de cette étude, il est recommandé de prendre des actions concrètes et si possible rapides dans les 3 axes suivants :

- Prendre contact avec le LDG et les responsables des réseaux de détection électromagnétique de la foudre en Europe (Benelux et surtout R.F.A.), pour définir des procédures d'échange d'information, voire de participation, et acquérir un savoir-faire sur ce mode de détection.
- Encourager par tous les moyens des universitaires à se charger de la gestion d'une ou deux stations de détection

photographique de météores du type "Cepolecha", qu'il faudrait installer dans le nord-est pour les rattacher au réseau européen et utiliser, au moins dans un premier temps, le système de réduction des données Tchéque ou celui des Allemands.

- Lancer l'étude d'une station de détection optique à stockage sélectif de données, au minimum jusqu'à la réalisation d'une maquette. Son intérêt potentiel pour la détection des satellites pourra éventuellement justifier une participation de la DGA aux coûts de développement.

oooooooooooo

R E F E R E N C E S

oooooooooooooooooooo

- (1) "L'étude des phénomènes aérospatiaux non-identifiés - 1977-81 : Résultats et perspectives", Doc. de travail n°4.
- (2) Plaquette de présentation du GEPAN (1982).
- (3) "2ème série d'avis et recommandations du Conseil scientifique du GEPAN" (07/06/78).
- (4) "Avis et recommandations du Conseil scientifique du GEPAN" (21/01/82).
- (5) Annuaire du CNRS : Sciences de la terre, de l'océan, de l'atmosphère et de l'espace (1980).
- (6) Plaquette de présentation du système CAUTRA IV, éditée par le STNA (Ministère des transports).
- (7) "Comment prévoit-on le temps ?", brochure d'information de la Météorologie Nationale (Mars 75).
- (8) "L'armement", bulletin d'information et de liaison, n° 68 (Décembre 81).
- (9) "La foudre : effets à distance", J. Hamelin et C. Leteinturier, L'écho des recherches n° 109 (Juillet 82), p. 15 à 22.
- (10) Rapport d'activité CRPE pour 1980 (Note technique CRPE/105).
- (11) "Etude expérimentale de la répartition des traînées météoriques dans la haute atmosphère", thèse de 3ème cycle de P. Robert, Université de Paris VI (10/06/74).
- (12) "A very-wide-field, high luminosity and high spectral resolution camera", G. Courtès, J.P. Sivan et M. Saisse, Astronomy and Physics 97, p. 334-341 (1981).

- (13) "Optical systems for UV space researches", G. Courtès, IAU symposium n° 41 in Munich (Août 70) : New Techniques in space Astronomy, p. 273-301.
- (14) "Caméra TELEPHOT" - CNRS, Observatoire de Haute-Provence - M. Fehrenbach et J.L. Chevassut - LA-032 (Novembre 81).
- (15) "Le CERGA", brochure de présentation (1981).
- (16) "La scintillation des étoiles comme diagnostic à distance de la turbulence atmosphérique", thèse d'Etat de J. Vernin, Université de Nice (21/02/79).
- (17) "Les météorites", P. Nolot, Mondes et minéraux n° 23 (Mai-Juin 78), p. 512-520.
- (18) "Radarmétéorologie-Téledétection active de l'atmosphère", H. Sauvageot, Ed. Eyrolles et CNET-ENST 1982.
- (19) "International directory of amateur astronomical societies", A. Heck et J. Manfroid (auteurs et éditeurs).
- (20) "Dossier Perséïdes 1980", Ciel et Espace n° 182 (Juillet-Août 81).
- (21) "L'observation des Perséïdes", P. Kohler, Ciel et Espace n° 188 (Juillet-Août 82).
- (22) "La foudre en boule", document interne de synthèse du GEPAN.
- (23) "NASA Proceedings : Workshop on the need for lightning observations from space" (NASA CP-2095), L.S.Christensen, W. Frost, W.W. Vaughan (Février 79).
- (24) "NASA/MSFC FY-81 Atmospheric Processes Research Review" (NASA Conference publication 2204), R.E. Turner (Septembre 81).
- (25) "Meteorological satellites - Past, present and future" (NASA Conference Publication 2227), Proceedings of the

session on meteorological satellites at AIAA, 20th Aerospace Sciences meeting (Janvier 82).

- (26) "Simultaneous observations of lightning radiations from above and below clouds", M. Brook, R. Tennis, C. Rhodes, P. Krehbiel, B. Vonnegut et O.H. Vaughan Jr., Geophysical Research Letters, vol. 7, n° 4, p. 267-270 (Avril 80).
- (27) "80-1934-CP Thunderstorm overflight program", O.H. Vaughan Jr., B. Vonnegut, R. Orville, M. Brook, R. Tennis, C. Rhodes et D. Rust, AIAA Sensor systems for the 80's conference (2 au 4/12/80).
- (28) "Detection of lightning Superbolts", B.N. Turman, Journal of Geophysical Research, vol. 82, n° 18, p. 2566-2568 (Juin 77).
- (29) "Analysis of lightning data from the DMSP satellite", B. N. Turman, Journal of Geophysical Research, vol. 83, n° C10, p. 5019-5024 (Octobre 78).
- (30) "Global lightning flash frequency", R.E. Orville et D.W. Spencer, Monthly Weather Review, vol. 107, p. 934-943 (Juillet 79).
- (31) "Global distribution of midnight lightning - September to November 1977", R.E. Orville, Monthly Weather Review, vol. 109, p. 391-395 (Février 81).
- (32) "Tape recorder photocell instrument for detecting and recording lightning strokes", R.F. Griffiths et B. Vonnegut, Weather, p. 254-257 (Août 75).
- (33) "Modified cine sound camera for photographing thunderstorms and recording lightning", B. Vonnegut et R.E. Passarelli Jr., Journal of Applied Meteorology, vol. 17, n° 7, p. 1079-1081 (Juillet 78).
- (34) "Nighttime/daytime optical survey of lightning and convective phenomena experiment (NOSL)", B. Vonnegut, O.H. Vaughan Jr. et M. Brook, NASA Technical memorandum 78261 (Février 80).

- (35) "Multiple fall of Pribram meteorites photographed", C. Bagolia, N. Bhandari, N. Sinha, J.N. Goswami, D. Lal, J.C. Lorin, P. Pellas, Bull. Astron. Inst. Czechosl. 31, p. 51-58 (1980).
- (36) "Lost City meteorite - Its recovery and a comparison with other fireballs", R.E. Mc Crosky, A. Posen, G. Schwartz et C.Y. Shao, Journal of Geophysical Research, vol. 76, n° 17, p. 4090-4108 (1971).
- (37) "Fireballs and heights : a diagnostic for the structure of meteoric material", Z. Ceplecha et R.E. Mc Crosky, Journal of Geophysics, vol. 81, n° 35, p. 6257-6275 (1976).
- (38) "Prairie network fireball data - Trajectories and light curves", R.E. Mc Crosky, C.Y. Shao et A. Posen, Center for Astrophysics, Preprint series n° 721 (for Meteoritika, USSR), Avril 77.
- (39) "The GEODSS difference", J.K. Beatty, Sky and Telescope, p. 469-473 (Mai 82).
- (40) "GEODSS astronomical data system demonstration", B.H. Margon, Notice of research project, University of Washington.
- (41) "Système de détection de phénomènes aérospatiaux rares (Résumé du mois de Septembre)", rapport de MM. Cathala et Flament (30/09/82).
-

SOMMAIRE DU VOLUME N° 5

oooooooooooooooooooooooooooo

	<u>PAGE</u>
IV. SOLUTIONS PROPOSEES	1
IV.1. <u>Utilisation de systèmes existants</u>	1
IV.1.1. Systèmes français existants	1
IV.1.2. Projets français	2
IV.1.3. Systèmes étrangers	4
IV.2. <u>Etude d'un système original de détection optique</u>	6
IV.2.1. Principe de l'archivage sélectif	9
IV.2.2. Spécification Technique de Besoins	12
- Caractéristiques apparentes des phénomènes	13
- Couverture à réaliser	16
IV.2.3. Eléments de définition préliminaire	17
- Sous-ensemble optique	17
- Capteur / Amplificateur	19
- Prétraitement en temps réel	21
- Procédures de calibration	23
- Réduction des données	24
IV.2.4. Calendrier et coûts	24
IV.2.5. Recommandations finales	25
REFERENCES	27