

ETUDE SUR LA DETECTION DES PHENOMENES AEROSPATIAUX RARES

---

Volume n° 1

**ETUDE SUR LA DETECTION DES PHENOMENES AEROSPATIAUX RARES**

oo

Contrât n° 82/CNES/0758

Rapport Final (5 volumes)

Préparé par : F. Louange

**Volume n°**

I.	PRESENTATION DU PROBLEME	1
1.1	■ Les phénomènes aérospatiaux rares	
I.2.	Thèmes de réflexion	
I.3.	Organisation pratique de l'étude	
II.	LA SITUATION EN FRANCE	
1 1 1	■ Organismes contactés	
II.2.	Techniques de détection	
II.3.	Phénomènes concernés	
II.4.	ANNEXE : comptes-rendus de visites en France	2
III.	LA SITUATION DANS LE MONDE	3
111.1.	Prises de contact	
III.2.	Détection de la foudre	
III.3.	Détection des météores	
III.4.	Détection des satellites	
III.5.	ANNEXE : correspondances et visites à l'étranger	4
IV.	SOLUTIONS PROPOSEES	5
IV. 1.	Utilisation de systèmes existants	
IV.2.	Etude d'un système original de détection optique	

Références

Décembre 1982

## I. PRESENTATION DU PROBLEME.

oooooooooooooooooooooooooooooooo

### 1.1. Les phénomènes Aérospatiaux Rares.

Depuis sa création en 1977, le GEPAN a développé et mis au point des méthodes originales de collecte et de traitement des informations contenues dans les témoignages sur les "Phénomènes Aérospatiaux Non-identifiés". Le caractère éminemment pluridisciplinaire de cette démarche est parfaitement illustré par le modèle tétraédrique introduit en 1981 (réf.(1) p.8, réf.(2) p.10). Les données ainsi élaborées se sont révélées tout-à-fait exploitables pour une recherche scientifique, non seulement dans le cas de phénomènes difficiles ou impossibles à identifier, mais aussi lorsque les événements relatés par les témoins concernaient des effets méconnus de phénomènes "classiques" (par exemple, l'action d'un coup de foudre au sol sur l'environnement végétal).

En fait, le champ d'application de la méthodologie mise au point par le GEPAN permet de définir une classe de phénomènes plus vaste que les seuls non-identifiés, et très diversifiée quant à leur nature physique : les Phénomènes Aérospatiaux Rares. Il s'agit de phénomènes aérospatiaux fugitifs, imprévisibles et généralement non reproductibles, dont certains sont déjà connus et étudiés (foudre, météores), d'autres restant probablement à expliquer.

La communauté d'intérêts entre les chercheurs concernés par certains phénomènes rares et le GEPAN, déjà pressentie par le Conseil Scientifique du GEPAN en 1978 (réf.(3) para.2.1), a naturellement conduit à reposer le problème de la détection instrumentale. En effet, si l'idée de réaliser une station de détection des phénomènes non-identifiés (permettant de s'affranchir de l'aspect subjectif des témoignages) n'est pas nouvelle, elle s'est toujours heurtée au problème insoluble que pose la justification d'investissements non négligeables en l'absence d'une stratégie de recherche bien définie et d'une évaluation de la probabilité de réussite. En revanche,

dans la mesure où un tel **système** serait conçu pour fournir des données utiles à un ensemble d'utilisateurs, dont certains savent définir exactement leurs besoins, **il** pourrait **faire l'objet** de spécifications précises et justifiées. A l'appui de cette idée, **il** faut rappeler **la** constatation faite **par** le GEPAN **au** cours de plusieurs **enquêtes qu'il n'** existe actuellement en **France** aucun moyen de surveillance **systématique** du ciel (en dehors des radars), **contrairement** à plusieurs **pays** de l'est et de l'ouest.

Le GEPAN, encouragé par son Conseil Scientifique (réf,(4)), **s'est** donc **engagé** en 1982 **dans** cette nouvelle voie. La **première** étape, qui **fait** l'objet du **présent** rapport, consistait à évaluer la situation actuelle en France et à l'**étranger** en matière de détection de **phénomènes** aérospatiaux rares, **puis** à formuler des propositions **concrètes** tenant **compte** à la fois de l'**ensemble** des besoins et des **réalisations existantes** ou déjà **envisagées** pour l'**avenir**.

## I.2. Thèmes de réflexion.

Les travaux prévus **au** titre du contrat (lots 1 et 2) s'**organisaient** **autour** des six thèmes de réflexion suivants :

Thème 1 : Recensement des organismes français concernés et de leurs moyens de détection, avec leurs caractéristiques de fonctionnement,

Thème 2 : Prospection des idées et des projets de systèmes de détection susceptibles **d'être** mis en jeu **dans** l'avenir.

Thème 3 : Prise de **contact** avec **des** organismes étrangers **faisant** de la détection de phénomènes rares (réseaux de détection de la foudre, des météores).

Thème 4 : Recensement des organismes français susceptibles

de bénéficier des données issues **d'un** système de détection.

Thème 5 : **Examen** des possibilités techniques **d'adaptation** des systèmes **existants** ou en cours de développement.

Thème 6 : Proposition **technique** pour développer des moyens nouveaux **compétitifs** avec les réalisations étrangères.

L'**étude** des thèmes 1, 2 et 4 impliquait des prises de contact avec tous les organismes français susceptibles **d'être** concernés, **tandis** que le thème 3 **conduisait** à une recherche des **pays** où des systèmes de détection systématique fonctionnaient ou **avaient** fonctionné,

Les thèmes 5 et 6, abordés ultérieurement, correspondaient à un travail de spécification technique de besoins et de définition préliminaire pour un dispositif de détection. La nécessité d'envisager un recours à des technologies de pointe (thème 6) a conduit à **organiser** des rencontres avec certains **spécialistes**.

### I.3. Organisation pratique de l'étude.

En **raison** du nombre **important** de **contacts** à prendre, le travail a été **partagé** entre M. **Esterle**, chef du GEPAN, et M. Louange, auteur de ce rapport. Sur le territoire **français**, M. **Esterle s'est** chargé de la région de Toulouse, tandis **que** sur le plan international, **il a mis** à profit une mission aux Etats-Unis pour rencontrer les interlocuteurs américains. Ces **visites** se sont déroulées **jusqu'en** Octobre 1982.

Pour effectuer une prospection des laboratoires et organismes français, deux sources principales d'information ont **été** utilisées :

- les contacts déjà **existants** avec le GEPAN, que ce soit **par** l'intermédiaire du Conseil Scientifique, d'accords sur des procédures **d'échange** d'information, ou **d'au-**tres motifs.
- **l'annuaire** du CNRS, édité par **l'ANVAR (réf.(5))**.

Le premier contact était généralement pris **par** téléphone, et en cas **d'intérêt** réciproque à approfondir les échanges **d'in-**formation, une rencontre **était** organisée. En dehors de la région de Toulouse, la plupart des interlocuteurs se trou-  
vaient **dans** le **bassin** parisien, Cependant, un ensemble de laboratoires intéressants installés le long de la **côte médi-**  
**terrannée** a **fait** l'objet d'une mission groupée au début **d'** Octobre.

Les contacts **pris** avec **l'étranger** sont généralement **restés** **sur** le **plan épistolaire**, et, en dehors du **voyage** de M. **Esterle** aux Etats-Unis, une seule mission a été **organisée**, en Tchéco-  
slovaquie, pour rencontrer le plus grand **spécialiste** mondial de la détection optique des météores.

Chaque conversation téléphonique et chaque visite a donné lieu à la rédaction **d'un compte-rendu**, qui s'inscrivait avec un nu-  
méro et sous le thème "**détection**" dans le **système** général de gestion des comptes-rendus de visites du GEPAN. Les rapports concernant la détection en **France** et à **l'étranger** sont four-  
**nis** respectivement dans les volumes n° 2 et 4. Certains **d'en-**tre eux comportent des **annexes** classifiées "Confidentiel Dé-  
fense", qui sont regroupées dans le volume n° 2'.

L'étude du thème 6 a été entreprise un peu en avance de pha-  
se, en raison de l'intérêt potentiel évident d'une solution faisant **appel** à des technologies récentes **d'opto-électronique** et de traitement de séquences **d'images** en temps réel, Le su-  
jet a pu être abordé **grâce** à la visite de quelques laboratoi-  
res spécialisés et à la période initiale de stage **qu'ont** ef-  
fectuée en Septembre, **dans** les locaux de **l'ETCA**, deux **élèves**  
ingénieurs de dernière année de **l'ENSTA**.

## II. LA SITUATION EN FRANCE

oooooooooooooooooooooooooooooooooooo

Ce chapitre présente la synthèse des informations recueillies en France sur les thèmes de réflexion 1, 2 et 4. Ces **informations** sont **classées** successivement selon trois critères **distincts** : les **organismes** contactés, les différentes techniques de détection, et les types de phénomènes auxquels s'applique la détection ou auxquels s'intéressent **les organismes**. L'annexe (volume n° 2) contient tous les comptes-rendus de visite du GEPAN concernant le thème "**détection**" en France (47 en tout, dont 11 de M. **Esterle**).

### 11.1 ■ Organismes contactés.

#### II.1.1 ■ L'aviation civile.

L'**aviation** civile est **évidemment** très concernée par l'espace aérien et sa **surveillance**, et les radars qu'elle utilise semblaient a priori pouvoir constituer un bon moyen de détection systématique des phénomènes **aérospatiaux** rares. **Plusieurs** contacts ont donc été pris pour approfondir cette question (cf. CR 12/0482, 18/0582, 44/0682).

En premier lieu, les matériels embarqués ont été **rapidement** éliminés, pour la **raison** suivante : **s'il** est vrai que les avions et les hélicoptères civils sont équipés de radars météorologiques pour détecter les orages (**cumulo-nimbus**), ceux-ci ne sont utilisés **qu'épisodiquement** et **d'une façon** facultative par les pilotes, et ils ne font l'objet **d'aucun** enregistrement (**sauf** sur quelques prototypes). Ces **instruments**, qui par **ailleurs** peuvent être utiles **dans** le cas de témoignages fortuits de pilotes, ne présentent donc pas **d'intérêt dans l'optique d'une** détection systématique.

En ce qui concerne le réseau de couverture radar au sol, **il faut** distinguer deux modes **d'exploitation** correspondant respectivement à deux types de radars :

- **Contrôle des zones terminales** (aéroports), avec des radars "**primaires**" (échos **passifs**).
- **Contrôle en route**, à l'**aide** de radars "**secondaires**"<sup>N</sup> interrogeant les avions et recevant les codes **d'identification** et les données techniques **émises par** les **transpondeurs** embarqués.

L'**aviation** civile dispose de 5 Centres Régionaux de **Naviga-**tion Aérienne (Bordeaux, Paris, Brest, Aix-en-Provence, Reims), **équipés** de radars primaires et **secondaires**. Ces centres sont étroitement interconnectés et reliés à leurs homologues militaires, **mais** uniquement au niveau des données synthétiques **issues** des radars secondaires (pistes), **l'en-**semble étant géré par un système informatique appelé CAUTRA (réf.(6)) qui coordonne tout le trafic aérien civil, Les données des radars primaires ne sont réellement prises en compte par les opérateurs civils **qu'en** cas de conflit, **d'en-**quête a posteriori, etc...

**Etant** donné que seuls les **radars** primaires sont **par** nature susceptibles de détecter la présence de phénomènes ou **d'ob-**jets inattendus dans l'espace aérien, on voit que le réseau de couverture radar de l'aviation civile et son système informatique associé CAUTRA IV ne sont pas du tout adaptés à une détection à caractère systématique des phénomènes rares.

**On** peut noter par ailleurs que des expérimentations sont en cours pour doter les futurs radars d'une "**voie nuages**" fournissant des données météorologiques auxiliaires, dans le but d'améliorer le confort des pilotes (la France semble en retard dans ce domaine). La foudre est une source de **problèmes** pour la navigation aérienne, en particulier à **cause** des foudroiements **d'antennes** radar; cependant, **l'exploitation opéra-**tionnelle 24 heures sur 24 en toutes circonstances rend pratiquement **sans** intérêt la prédiction des orages, et les seuls



**progrès attendus** dans le **domaine** concernant la protection des **équipements**.

## II.1.2. L'aviation militaire.

Plus encore que l'**aviation** civile, l'**armée** de l'air doit se tenir **constamment** prête à réagir à l'**apparition d'un** objet quelconque **dans** l'espace aérien **national**. Elle dispose à cet effet **d'un réseau** de couverture radar et **d'un** système informatique associé **appelé** STRIDA, qui ont **fait l'objet** de plusieurs rencontres et de la visite **d'un** centre opérationnel (cf. CR 34/0582, 40/0682, 47/0682).

Le système **STRIDA** permet de **localiser** et de poursuivre toute cible dont les principales caractéristiques (taille, altitude, vitesse,...) sont comprises **dans** certaines fourchettes **pré-établies**. Il met en jeu des **radars** spécialisés fonctionnant dans plusieurs **bandes** de fréquence, et utilise **également** les données fournies par les radars **d'aérodromes** et par le réseau de l'aviation civile (système **CAUTRA**). Fortement redondant, ce système **s'appuie** largement sur des outils **informatiques**, en particulier pour la fonction **d'extraction** des "**pistes** synthétiques" (vecteur associé à toute cible détectée) et pour la poursuite. La description du système complet, qui fait l'objet **d'une** classification de niveau "**Confidentiel Défense**", est donnée **dans les** comptes-rendus du volume **n° 2'**.

**D'une** façon synthétique, **il** faut retenir que le fonctionnement de routine (24 heures sur 24) de ce système repose **presqu'uniquement** sur la gestion de **pistes** synthétiques, qui ne concernent par définition **qu'une** classe de cibles particulière. La détection **d'un** phénomène rare ou **d'un** objet **très** différent **d'un** avion est donc possible (les outils existent, à la disposition des opérateurs), **mais** serait plus aléatoire que **systématique**.

En revanche, la prochaine génération de **moyens informatiques** pour STRIDA, actuellement en cours de développement, **permettra** une détection beaucoup plus large et **systématique** de l'environnement électromagnétique. **Il paraît** donc particulièrement intéressant pour le GEPAN de suivre ces développements (**thèmes 2 et 5, cf. para. IV.1.**).

### II.1.3. La Météorologie Nationale.

L'application principale de la **météorologie** est la prévision du temps (**réf.(7)**). En partant **d'une connaissance aussi** précise et récente que possible de **l'état** de **l'atmosphère, il s'agit** d'appliquer une **bonne** extrapolation à **l'aide d'un** modèle suivant les lois de **la** thermodynamique et de **la** mécanique des fluides. La **masse atmosphérique représente**  $5 \times 10^{18}$  Kg **d'air** en mouvement autour de la terre, et fait **l'objet** de **mesures** en surface et en altitude.

Les stations **d'observation au** sol effectuent des mesures "classiques" (température, humidité, ensoleillement, précipitations, vitesse du vent, ..) qui sont acheminées par un **réseau de transmissions, et sont échangées** entre **pays** selon des standards bien établis. Les **mesures** en altitude comportent les radiosondages (**lâchers** réguliers de ballons **emportant** des capteurs et des émetteurs) et les mesures radar. **Il faut** également **mentionner** les images obtenues pour différentes longueurs d'ondes **par** les **satellites** météorologiques.

En dehors de toutes ses activités opérationnelles, **la Météorologie** Nationale effectue des recherches variées dans le **cadre** de **l'EERM (Etablissement d'Etudes et de Recherche de la Météo)**. Pour **mieux** connaître les activités de la Météo, en particulier dans le **domaine** de la télédétection, plusieurs visites ont été organisées (cf, CR 01/1181, 03/1181, 31/0582).

De toutes les informations recueillies, **il** ressort un certain nombre de points **d'un** intérêt direct pour la présente étude :

- plusieurs types de radars sont utilisés, **mais** uniquement sur **un plan** local. Il **s'agit** principalement des équipements **suivants** :

- **Radar 10 cm (MELODI)** de type panoramique, pour la localisation et la mesure **d'intensité** des précipitations,
- **Radar 3 cm panoramique** pour la localisation des **précipitations**.
- **Radar 5 cm (RODIN)** panoramique, pour la détection, la localisation et la **quantification** des zones de **précipitation**.
- **Radar mobile 3 cm (RAMO)**, pour la détection et **l'évaluation** de **l'intensité** des précipitations, et pour la **mesure** du vent en altitude (poursuite **d'un ballon** libre muni **d'un réflecteur**),
- **Radar 3 cm (RAFIX)**, pour la détermination des vents en altitude (**ballon libre**),
- **Radar mobile 3 cm (ZEPHYR)**, pour la poursuite de **ballons-sondes** dans les basses couches de **l'atmosphère**.

Il est prévu d'équiper toutes les stations d'un **radar** RODIN, de façon à couvrir toute la France, et de regrouper les données à **l'aide d'un réseau** de transmission. Une des applications consistera à réaliser des **animations** du **même** type que celles fabriquées à partir **d'images satellitaires**.

- **l'EERM** est en cours de **réorganisation**, avec la création d'un centre important à Toulouse. Les activités liées à la télédétection resteront à Magny-les-Hameau, **avec** en particulier les **radars** et les **LIDARs** (éclairage de la base des **nuages** par un faisceau **laser** et mesures au télescope).

- un réseau expérimental **PATAC** de stations météorologiques **automatiques** au sol est **en** cours de mise en place dans le sud-ouest. Le but est **d'améliorer** la prévision locale en resserrant le **maillage** des stations (tous les 10 Km). Ce réseau peut présenter un **intérêt** indirect **pour** le GEPAN en **tant qu'infrastructure** régionale.
- aucun **réseau** de localisation des coups de foudre **n'est** implanté en **France** par la Météo.
- **jusqu'à** présent, les images issues de METEOSAT **n'ont** fait l'objet **d'aucune** exploitation systématique en France. La Météo ne dispose que d'un laboratoire de traitement **d'images** à Boulogne.

#### II.14. La Défense Nationale.

Indépendamment de l'armée de l'air, citée précédemment, plusieurs **organismes** travaillant pour la Défense Nationale ont été contactés. Le point d'entrée **principal** a été le SGDN (Secrétariat Général de la Défense Nationale), organisme interministériel dépendant du Premier Ministre dont la vocation est la protection civile. Une visite **au** Bureau des Affaires Scientifiques et Technique (cf, CR 15/0482), qui **assure** une veille technique **dans** tous les domaines susceptibles de concerner la Défense, a permis dans un premier temps de **s'intéresser** au LDG et à l'ETCA sur le thème de la détection nucléaire. Une seconde visite (cf, CR 41/0682) a permis de savoir ce qui pouvait le cas échéant intéresser la DRET.

Une **visite** au LDG (Laboratoire de Détection et de Géophysique du Commissariat à l'Energie Atomique) a été l'**occasion** **d'une** présentation des réseaux de détection dont dispose la Division des Applications **Militaires** du CEA. Les **performances** et les modes **d'exploitation** des équipements sont décrits dans l'**annexe** classifiée du CR 51/0782 (cf. vol. 2'). En tout état de cause, **il** semble que seule l'expérience acquise en détection électromagnétique puisse présenter un **intérêt**

**direct** pour le projet du GEPAN (application à la foudre).

Un entretien avec une personne de l'**ETCA** (**Etablissement** Technique Central de l'**Armement**) travaillant en relation avec la **DTE**n (**Direction** Technique des Engins) a eu pour thème central les satellites artificiels. Ceux-ci **pouvant** en effet **être assimilés**, par continuité, à des phénomènes spatiaux rares, **il s'agissait** de savoir quel **intérêt** présentait pour la Défense la surveillance des satellites, quelles **étaient** les réalisations connues **dans** ce **domaine**, etc... Le compte-rendu **classifié** correspondant (cf. CR 48/0682) figure dans le volume 2', et la conclusion générale est qu'un **système** de surveillance des satellites pourrait **être** jugé **intéressant** par les **militaires**.

#### II.1.5. L'O.N.E.R.A.

-----

L'**Office** National d'**Etudes** et de Recherches **Aérospatiales** effectue de nombreux **travaux** de recherche au profit des **établissements** de la Défense. En particulier, **il** existe à Meudon un groupe de chercheurs qui étudie la foudre (contrats avec la **DRET** sur le foudroiment des avions), et dont le responsable, M. **Boulay**, est un spécialiste reconnu **dans** ce domaine. Deux visites ont donc été organisées à l'**ONERA** (cf. CR 08/1281 et 45/0682) dans le but de faire le **point** sur la détection de la foudre.

De plus en plus **d'organismes** ont besoin de détecter la foudre, compte tenu des **dégâts** qu'elle cause sur les équipements (**antennes**, **pylônes**, aéronefs, stations de **mesure**,...). L'objectif est de pouvoir mettre en service à temps des dispositifs de protection (au minimum : mise hors tension). La détection peut **être** faite à deux échelles :

- détection à distance (**jusqu'à** 300 Km) de systèmes actifs ("**fronts**" parfois immenses qui se déplacent à des vitesses pouvant atteindre 100 Km/h).

Dans ce domaine, un matériel **américain s'est** imposé sur le **marché** : le LLP (Lightning Location and Protection, inc.), vendu "**clé en main**" pour environ 300 KF. Ce système **comporte** deux antennes et un calculateur, et **il** permet de **localiser** un orage tout en **suisvant** ses phases d'évolution. L'ONERA compte **s'en équiper**.

- détection locale (**jusqu'à 20 Km**) de systèmes en formation. **C'est** sur ce **domaine**, qui nécessite une bonne **connaissance** du processus de déclenchement **d'un** coup de foudre, que portent les travaux de l'ONERA.

Une présentation des études menées sur les phénomènes **d'é-**lectricité atmosphérique pour le compte de la Défense (**par l'intermédiaire** de la DRET et de la DTCA) fait l'objet **d'un** numéro de la revue "**L'armement**" (réf. (8)). En dehors des études fondamentales sur les **mécanismes** des **phénomènes** et des **expérimentations** pratiques de dispositifs destinés à la protection contre le foudroiement, on y trouve une présentation des campagnes de mesures effectuées à **Saint-Privat d'Allier avec** le CEA, l'EDF et le CNET, à Socorro (Nouveau-Mexique) dans le cadre du **programme TRIP (Thunderstorm Research International Program)**, et en Côte d'Ivoire dans le **cadre** du programme COPT (**CO**vection **P**rofonde **T**ropicale), auquel participent de nombreux laboratoires **français**.

Ce sont ces campagnes de mesures qui concernent le plus directement **l'étude** du GEPAN sur la détection, dans la mesure où elles visent à **mieux connaître** la "**signature**" du **phénomène** foudre dans divers domaines (rayonnements **électromagnétiques**, champs électriques **au sol**, optique, acoustique, ..). Le programme TRIP associe **l'USAF, la NASA** et des universités **américaines** avec l'ONERA. Le **programme COPT** associe **d'une** part le CRPE, l'EERM, le LAMP, l'IOPG, le LMD pour la modélisation des **phénomènes** thermodynamiques et dynamiques, et **d'autre part** le LPA de Toulouse, l'université **d'Abidjan**, le CNET et l'ONERA pour l'étude des problèmes électriques. Les **travaux** du CNET sur les effets à distance de **la** foudre font l'objet **d'un** récent **article** (réf. (9)).

Bien que des études soient **menées** à l'étranger sur **d'autres** voies (par exemple acoustique au Texas), **il apparaît que les modes** de détection les plus **prometteurs** en France sont les rayonnements électromagnétiques et l'optique. L'ONERA doit publier vers la fin de 1982 les résultats de travaux mettant **simultanément** en jeu une **caméra** céleste à grand **champ** et des moyens de détection **électromagnétique** et **d'analyse** spectrale, l'ensemble permettant une **localisation** de la source à **1  $\mu$ s** **près**. On peut noter par ailleurs que les projets spatiaux soviétiques **VENERA** permettent d'étudier par voie optique les éclairs sur **la planète** Vénus.

Quel que soit le mode (ou les modes) de détection retenu, la question que doit se poser le GEPAN est la suivante : **"Que pourrait apporter** une station ou un réseau de stations de détection de phénomènes aérospatiaux rares en **matière d'électricité atmosphérique ?"**. A l'issue des entretiens tenus avec les spécialistes de l'ONERA, une réponse en deux points se **dégage** :

- Il **n'est pas envisageable** de faire d'une telle station un outil **d'analyse compétitif**, fournissant aux spécialistes toutes les données **nécessaires** à une meilleure compréhension des **mécanismes** de formation de la foudre.

En effet, **la** complexité et **la** rapidité des phénomènes **mis** en jeu (**l'analyse** des précurseurs nécessite une résolution temporelle de l'ordre de quelques nanosecondes) fait que les appareillages spécifiques et coûteux qui répondent **aux** besoins ne peuvent être **installés** que sur des sites expérimentaux très spécialisés. **C'est** cette notion de rentabilité qui a conduit l'ONERA à **délaisser** le site de Saint-Privat d'Allier au profit du Nouveau-Mexique, **où** l'activité orageuse est bien supérieure.

- Il semble **tout-à-fait** opportun d'envisager un système de détection original (à composante optique) **permettant** de comptabiliser et de **localiser** les **activités** orageuses au niveau du **"coup de foudre"** (succession de phénomènes **d'une** durée globale de l'ordre de la seconde).

Un réseau de stations munies **d'un** tel système pourrait permettre à la fois une détection à but préventif, et une connaissance plus fine du **niveau d'activité** orageuse sur le territoire couvert. En effet, la seule mesure **existante dans ce domaine** est le "**niveau kéronique**", qui représente le nombre de jours **par an au** cours desquels on entend au moins une fois le tonnerre depuis le lieu **considéré** (1).

Quelques grandeurs physiques caractérisant le phénomène "**coup de foudre**"<sup>w</sup> seront présentées au paragraphe II.3.

#### II.1.6. Le C.R.P.E.

Le Centre de Recherches en Physique de l'**Environnement** terrestre et **planétaire** est un laboratoire commun au CNET et au CNRS, implanté à Saint-Maur et à Issy-les-Moulineaux. Il a pour vocation l'**étude** de l'**atmosphère** neutre et ionisée, décomposée en trois zones :

- l'**atmosphère dense**, siège des phénomènes météorologiques,
- la **haute atmosphère**, neutre et ionisée,
- la magnétosphère, entièrement ionisée.

L'**équipe "basse atmosphère"** travaille avec des radars Doppler météorologiques (RONSARD) pour étudier les mouvements des **nuages** (programme COPT en Côte d'Ivoire), et avec des SODARS (sondeurs acoustiques) destinés à l'**étude** des turbulences **nuageuses**.

Deux prises de contact avec le CRPE d'Issy-les-Moulineaux (cf. CR 14/0482 et 23/0582) ont permis de passer en revue ces activités (réf. (10)), et surtout de prendre contact avec des spécialistes d'une technique très particulière et **potentiellement** intéressante pour la détection **qu'envisage** le GEPAN : le radar météorique.



Les radars **météoriques** (**monostatiques** ou **bistatiques**) ont pour **particularité** d'utiliser **comme** cibles les **traînés** ionisées créées **par** les météores qui rentrent dans l'**atmosphère**. En effet, **il** rentre en permanence dans la haute atmosphère (80 à 110 Km) des objets météoriques dont le nombre varie en raison inverse de la taille. Un météore "**type**" a un **diamètre** de l'**ordre** du millimètre, et **crée** une **traînée** de plusieurs dizaines de kilomètres de long, essentiellement composée de molécules qui lui ont été arrachées. **Il** existe un fond continu, à caractère isotrope, auquel se **superposent** des "averses" en provenance de directions particulières.

Un **radar météorique** utilise donc les météores **comme** traceurs : de type Doppler, **il mesure** la vitesse radiale des **traînés** qui se trouvent **dans** un plan perpendiculaire à son axe de visée (**cas** monostatique), ce qui permet, à l'**aide** d'**une** mesure de distance complémentaire, de reconstituer les **mouvements** des vents à haute altitude, les ondes de gravité, etc... De même, dans le cas bistatique, les **traînés** dont la **géométrie** permet une réflexion spéculaire permettent la communication. Les militaires se sont intéressés à cette technique **il** y a une trentaine d'années, pour établir des liaisons protégées par impulsions courtes, chacune correspondant à la détection d'**une traînée favorable**.

Le CRPE a disposé pendant **plusieurs années** des deux seuls radars météoriques existant en **France**. **Emettant** en continu à 30 MHz, **avec** une ouverture de 20°, ils **avaient** une puissance de l'ordre de 4 KW qui leur permettait de détecter entre 200 et 400 événements **par** heure (critères de rejet d'**échos** assez sévères appliqués systématiquement par **mini-ordinateur** couplé).

Destinés principalement à l'étude de l'atmosphère (les météores ne jouant qu'un **rôle** de **traceurs**), ces **radars** ont cependant servi à certains chercheurs du CRPE, et en particulier à M. Delcourt, **pour faire** des études sur les trajectoires des météores (réf. (11)).

## II.1.7. Le CNRS - Section VII.

La Section VII du Comité National de la Recherche Scientifique a pour thème d'études : Astronomie et Environnement planétaire. Sept des laboratoires (ou équipes) qui la composent ont été contactés à divers titres, et une mission groupée a permis de visiter les quatre qui sont installés le long de la côte méditerranéenne.

- Une rencontre avec un chercheur du Service d'Aéronomie de Verrières-le-Buisson (cf. CR 30/0582) a permis de passer en revue les activités de ce laboratoire propre du CNRS, On retiendra en particulier, pour la détection, les compétences en photographie infra-rouge et en spectrométrie (participation à de nombreux projets spatiaux).
- Le Laboratoire d'Astronomie Spatiale de Marseille est spécialisé dans les systèmes optiques à très grand champ, ce qui le distingue des autres laboratoires astronomiques contactés. Un premier appel téléphonique et une visite approfondie (cf. CR 53/0782 et 66/1082) ont permis de faire le tour des laboratoires et de la bibliothèque (réf. (12) et (13)), et de constater que le LAS possède toutes les compétences qui seront requises si le GEPAN décide l'étude d'un système de détection optique : optiques grand angle dans toutes les gammes de fréquences (de l'IR à l'UV), composants opto-électroniques (capteurs CCD, etc., ■), design de systèmes compacts.
- Un troisième laboratoire propre du CNRS a été contacté à plusieurs reprises : le Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements de Toulouse (cf. CR 36/0582, 60/0982, 68/1082). En effet, une expérimentation très proche des préoccupations du GEPAN y a été réalisée, dans le but de mettre en évidence une corrélation entre les sursauts gamma de certaines étoiles et des éclairs optiques (dont l'existence n'a jamais été démontrée). Les sursauts gamma étant enregistrés par la sonde soviétique VENERA, M. Hurley a effectué pendant l'été une campagne de prises de vues à l'aide d'une caméra de type video à grand champ (tube WOCTICON, ouverture de 105°), au Pic du Midi,

Cette **caméra TELEPHOT** (réf.(14)), qui permet de détecter toute source lumineuse **jusqu'à la magnitude 6**, a donc permis d'accumuler 180 heures d'enregistrement sous forme de vidéo-cassettes, qui seront consultées au coup **par** coup en fonction des sursauts **gamma** identifiés **par** ailleurs,

Les relations **établies** avec le CESR **par** le GEPAN ont **au** moins quatre conséquences dans le **domaine** de la détection des phénomènes rares :

- les **éclairs** optiques recherchés, **s'ils** existent, constituent un phénomène aérospatial rare de plus à prendre en **compte**.
  - l'expérience acquise **par** le CESR **au** cours de cette **campagne** de prise de vues est utile pour le futur design **d'un** système; par exemple, les très mauvaises performances **dynamiques** du tube NOCTICOR dues à sa forte rémanence sont apparues **clairement**.
  - le stock de **vidéo-cassettes** recueilli par le CESR peut **être** utilisé pour **valider** le **concept** de **tri** en temps réel des séquences où "il se passe quelque chose". L'impression initiale **qu'il n'est** pas réaliste d'accumuler beaucoup **d'images** pour une exploitation en **différé** **s'est** trouvée vérifiée en **visionnant** quelques séquences (sensation de **fatigue**). Une étude statistique portant **sur** le contenu des 180 heures disponibles **permettra** de **quantifier** le bénéfice **attendu** du **prétraitement**,
  - si le GEPAN décide de commencer l'étude **d'un** système optique à prétraitement en temps réel, le CESR sera **particulièrement** intéressé **par** son utilisation possible pour le lancement de ISPM (prévu en 1986).
- Le **CERGA** (Centre d'Etudes et de Recherches **Géodynamiques** et Astronomiques) est un laboratoire associé **installé** à **Grasse** et sur le **plateau** de **Calern**. Après un premier contact **par** téléphone, une visite a été organisée (cf. CR 33/0582 et 64/1082). Les différents instruments spécialisés **qu'utilise**

Le CERGA (interféromètres optique et infra-rouge, **télémétrie LASER-satellites** géodésiques et LASER-lune,...) ne **présentent pas d'intérêt** direct pour la détection **des** phénomènes rares, **sauf peut-être** le télescope de **Schmidt**, qui représente **une** solution classique au **problème** que pose la conciliation d'un **grand** diamètre d'ouverture **avec** un **champ angulaire** assez important (**jusqu'à 20°**)(réf.(15)).

Il faut cependant retenir **certaines** compétences particulières présentes au CERGA (composants opto-électroniques, **astro-**nomie des **météores**,...), **ainsi** que l'**expérience** de la gestion d'instruments complexes **dans** un environnement naturel hostile.

- L'**équipe** de recherche **associée** da CEPHAG (Centre d'**Etudes** des **PHénomènes** Aléatoires de **Grenoble**) a été contactée **par** téléphone (cf. CR 28/0582), et a fourni les coordonnées de certains autres laboratoires intéressants à consulter.
- Le LSEET (Laboratoire de Sondages **Electromagnétiques** de l'**En-**vironnement Terrestre) de Toulon constitue une équipe de recherche **associée** qui **étudie** les interactions des ondes électromagnétiques **avec** les milieux naturels **inhomogènes** (atmosphère, ionosphère, **océans**). Au cours des entretiens avec les dirigeants du LSEET (cf. CR 54/0782 et 65/1082), **il** est **appa-**ru que cette **équipe** possédait une **grande** expérience de toutes les "**anomalies**" de propagation liées à des phénomènes **ionos-**phériques ou **au** guidage **troposphérique**.

Le radar ST (Stratosphère-Troposphère) dont **s'occupe** M. Crochet **permet** d'**effectuer** des **radiosondages** verticaux rapides et **pré-**cis (par rapport **aux** lâchers de ballons-sondes), à l'**aide** d'une "**forêt**" d'**antennes** disposées au sol émettant à 50 MHz par impulsions de quelques  $\mu$ s à 100 KW (réurrence à 1 KHz). Par opposition à d'**autres** procédés, **il** fonctionne en "**air clair**"<sup>E1</sup> en mesurant directement les mouvements des vents et des **tur-**bulences (**traitement** numérique en temps réel au pied de l'**an-**tenne, **par** transformation de Fourier du **signal** reçu).

- Le département **d'astrophysique** de **l'IMSP** de Nice (Institut de Mathématiques et de Sciences Physiques) est une équipe de recherche associée qui a pour vocation **l'étude** optique de **phénomènes aléatoires** en astrophysique et en physique atmosphérique. Un **contact** particulièrement utile y a été établi **avec M. Vernin** (cf. CR 55/0782 et 63/1082), qui étudie **la** turbulence et les vents **dans** la troposphère et la stratosphère **par analyse** statistique de la scintillation stellaire.

Le principe des mesures, qui constitue le sujet de la thèse **d'état** de M. Vernin (réf.(16)), repose sur le fait que la scintillation **apparente d'une** étoile est le reflet **au** sol des turbulences qui, en **altitude**, déforment le front d'onde issu de **l'étoile**. Ces turbulences se déplaçant typiquement à 20 **mm/ms** et **ayant** un temps de cohérence de **l'ordre** de 20 **ms**, on effectue des corrélations **bidimensionnelles** entre des clichés **instantanés** de l'étoile (**pose** de 1 **ms**) **décalés** de quelques **ms** pour **évaluer** le vecteur **vitesse** du vent. En appliquant la méthode à des étoiles doubles, on **peut** calculer **les** altitudes respectives des couches turbulentes (**entre** 2 et 20 **Km**), **grâce** au dédoublement des pics de corrélation (cf. **annexe** du CR 55/0782).

Indépendamment de son application, le **système mis** au point à Nice présente un **grand intérêt** pour le projet de détection du GEPAN en **raison** des problèmes technologiques **qu'a** posé sa réalisation : détection **opto-électronique** très sensible et très rapide (sans **rémanence**), **traitement** numérique en temps réel (FFT). Une étude systématique de toutes les solutions possibles a apporté à M. Vernin une expérience **assez** unique (cf. thème 6, **para.** IV.2.).

#### II.1.8. Le C.N.R.S. : Section XIV.

La Section XIV du CNRS se consacre à la Géophysique, la **Géologie** interne et la Minéralogie. Au Museum National **d'Histoire** Naturelle de Paris, le laboratoire associé de Minéralogie

des Roches Profondes et des Météorites est particulièrement concerné **par l'étude** des **matériaux** extraterrestres (météorites). M. **Pellas**, qui dirige cette activité, est un spécialiste renommé et donc un interlocuteur très **qualifié** pour les questions se rapportant **aux météores** et aux météorites. Au cours des deux visites à son laboratoire (cf. CR 11/0182 et 57/0882), **il** a insisté sur la **rareté** des météorites authentiques (62 répertoriées en France à ce jour) et donc sur **la valeur** qu'a à ses yeux toute tentative de détection systématique et de **localisation** (réf.(17)).

M. **Pellas** a **confirmé** qu'il **n'existait absolument** aucun moyen en France pour surveiller le ciel et **calculer** des trajectoires de météores. **Il** a fourni de nombreux renseignements sur les réseaux de détection existant ou **ayant existé à l'étranger** (U.S.A., Canada, **Royaume-Uni**, Tchécoslovaquie), qui font **l'objet** du **paragraphe III.3**. A propos du "Réseau Européen", que gère le **grand spécialiste Ceplecha**, M. **Pellas** a **souligné l'intérêt** tout particulier qu'il y aurait pour la France à s'y "raccrocher" à **l'aide** de stations dans le nord-est qui **assureraient** la continuité avec **l'Allemagne** Fédérale et la Tchécoslovaquie.

Enfin, M. **Pellas** insiste **beaucoup** sur le **fait** que **la** localisation et la récupération des météorites (qui **l'intéressent** particulièrement) ne sont **qu'un aspect** du problème, et qu'il faudrait intéresser des chercheurs à **l'ensemble** des phénomènes lumineux qui accompagnent les météores et sont bien **plus** fréquents que les chutes de météorites au sol.

#### II.1.9. L'I.N.A.G.

-----

L'Institut National d'Astronomie et de Géophysique est rattaché au CMS, et a pour **tâche** de coordonner les recherches, d'étudier et de mettre en place les équipements lourds collectifs et de gérer les gros contrats de recherche **liés** aux activités **spatiales**.

Trois des laboratoires associés qui le composent ont été visités au cours de l'étude.

- , L'Institut de Physique du Globe de Paris étudie plusieurs disciplines, dont deux **pouvaient** a priori avoir un rapport avec la détection des phénomènes rares : la **sismologie** et le **géomagnétisme**. Ces deux **domaines** ont donc été abordés avec des **spécialistes**, au cours de deux visites à l'IPG de Paris (cf. CR 35/0582 et 56/0782).

De même que l'IPG de Strasbourg gère trois **réseaux** de stations **sismologiques** (Nice, Fossé Rhéna, Aix), l'IPG de Paris contrôle un réseau à Arette (Pyrénées). Sur 1000 Km<sup>2</sup>, 8 stations à peu près **équidistantes** sont reliées à un site central où sont enregistrés les "événements" (réception simultanée depuis plusieurs stations de signaux significatifs). Ces données déjà triées sont acheminées et stockées à Paris, **ainsi** que les enregistrements bruts sur papier que peuvent produire 5 des 8 stations. Par ailleurs, l'existence de phénomènes **lumineux mal** expliqués associés **aux** séismes **dans** certains pays à forte activité a été évoquée.

En ce qui concerne le géomagnétisme, les activités de l'IPG de Paris se décomposent en trois points :

- A l'**observatoire** de Chambon-la-Forêt, le **champ** magnétique terrestre est enregistré en continu (une mesure par minute), avec une précision de 1 nano-Tesla (= 1 **gamma**).
- Un réseau de 30 stations réparties sur toute la France fait l'**objet** de mesures du **champ** magnétique une fois tous les cinq **ans**, ce qui permet de suivre les variations lentes (cycles solaires de 11 **ans**) et de remettre à jour la carte **magnétique** de la France.
- Sur le réseau d'Arette (voir plus haut), l'**activité** sismique se traduit par des phénomènes piézoélectriques liés **aux** contraintes des roches. **Dans** le but de décrire un **signal** magnétique associé à une activité sismique,

on procède tous les 15 jours à des mesures **locales** en une vingtaine de points distincts pour "**traquer**" et mesurer des phénomènes magnétiques locaux.

L'IPG dispose de compétences et de matériels uniques pour les **mesures** fines de magnétisme, et pourrait éventuellement envisager diverses formes de collaboration. Par ailleurs, la localisation de météorites intéresse son laboratoire de cosmochimie.

- Un contact a été établi avec l'Observatoire du Pic du Midi et de Toulouse (cf, CR 32/0582), et le directeur M. Zahn s'est déclaré favorable à l'implantation d'un système de détection au Pic si le GEPAN le souhaite,
- Le Centre de Recherches Atmosphériques Campistrous, près de Lannemezan, dépend de l'Institut et Observatoire de Physique du Globe du Puy-de-Dôme (Clermont-Ferrand). Les différentes recherches sur les **nuages** et les précipitations qui y sont menées ont conduit l'équipe chargée de la **photogrammétrie** à développer des **caméras "plein ciel"** permettant d'effectuer des prises de vues avec une ouverture de  $2\pi$  stéradians. Cet **instrument** inhabituel **présentant** un **intérêt** potentiel évident **pour** une surveillance du ciel, des contacts ont été pris avec M. Dessens à Campistrous (cf, CR 46/0682 et 49/0782).

La caméra plein ciel consiste en un montage **dans** lequel une **caméra classique** est suspendue verticalement en visant le **bas** en direction **d'un miroir** hémisphérique (finition optique). Parmi les phénomènes observés, on notera les nuages "**noctilucents**" dus à la condensation créée par les tirs de fusées, et les feux de Saint-Elme **parfois** présents après un orage au-dessus **d'une** proéminence (**mât, tronc d'arbre,...**) -

D'autre part, un **spécialiste** de la télédétection active de l'atmosphère, M. Sauvageot (réf, (18)), travaille à Campistrous avec un radar météorologique Doppler 8 mm (développé sous contrat DRET).



### II.1.10. Laboratoires universitaires.

Trois laboratoires universitaires ont fait l'objet de visites au cours de l'étude.

- Le Laboratoire de Physique de l'Atmosphère de Toulouse (cf. CR 20/0582) est **spécialisé dans l'étude** de la physique des nuages et de l'électricité atmosphérique. En **particulier**, en ce qui concerne la foudre, **il** collabore avec l'ONERA dans le programme COPT (cf. para. II.1.5.).
- Dans le Laboratoire de Physique de l'Exosphère de l'Université de Paris VI qu'il dirige, M. Delloue s'occupe principalement de radars "transhorizon" à rétrodiffusion ionosphérique (cf. CR 52/0782). Installés à Valensole, près de Manosque, ils assurent deux zones de couverture : la mer du Nord et l'Atlantique. **Emettant** entre 1 et 30 MHz avec un faisceau **très** directif en **azimut**, ces radars permettent d'observer la **surface** du globe à plusieurs milliers de kilomètres de distance. L'application **principale** est l'étude de l'état de surface de la mer, qui nécessite une **analyse** spectrale fine et des **calculs numériques** complexes.

D'autres installations du laboratoire (au CESTA, près de Bordeaux) servent à **étudier** les irrégularités du champ magnétique terrestre et à détecter les modifications de l'**ionisation** dans l'atmosphère.

- A l'Université de Paris-Sud (Orsay), le Laboratoire de Physique des Solides comporte un Groupe Pluridisciplinaire d'Analyse Ionique, dirigé par M. Lorin (cf. CR 29/0582). Spécialiste des effets isotopiques **dans** les météorites (son groupe dispose d'appareillages très sophistiqués), M. Lorin est, à l'instar de M. Pellas (cf. para. II.1.8.), un "client potentiel" très **motivé** pour un système qui permettrait la localisation des météorites. Bien au courant des réseaux existant dans d'autres pays, **il** a fourni une liste d'adresses utiles **pour** la suite de l'étude.

### II.1.11. Les astronomes amateurs.

-----

Il y a dans le monde de très nombreux astronomes amateurs qui représentent une **capacité d'observation considérable**. Deux **astronomes professionnels belges** maintiennent à jour **chaque année** un répertoire des sociétés d'**astronomes amateurs** : l'IDAAS (réf.(19)). Sur le **plan national**, les deux sociétés les plus importantes sont l'**Association Française d'Astronomie (AFA)** et la **Société Astronomique de France (SAF)**. L'**une** des activités de ces **amateurs** est l'**observation** des météores, qui ne nécessite **pas** de moyens **considérables**.

Une rencontre avec un représentant de la SAF (cf. CR 13/0482) a **permis** de savoir **qu'il ne serait pas** du tout **impossible** de **mobiliser** les **amateurs** pour une **campagne d'observation**, à condition que l'**idée** soit introduite par un **astronome professionnel**.

Au cours de la visite du CERGA (cf. CR 64/1082), il est apparu que les **membres** de l'**AFA organisaient** des campagnes d'observation des **étoiles filantes** (réf.(20) et (21)), et même que des systèmes de datation **mettant** en jeu des récepteurs radio du commerce (**modulation** de fréquence) avaient été **utilisés**.

### II.1.12. Spécialistes d'opto-électronique.

.....

Les **réflexions** sur le thème n° 6 (voir para. IV.2.) ont conduit rapidement à **s'intéresser aux performances** des systèmes de détection **opto-électroniques** du type CCD. **Plusieurs** visites ont été organisées pour rencontrer des chercheurs qui, pour diverses raisons, avaient eu à étudier les **possibilités** offertes sur le marché **dans** ce domaine.

En dehors des contacts déjà mentionnés (en particulier, voir CR 63/1082), **certains** services du CNES ont été visités (cf. CR 58/0882 et 67/1082), **ainsi** qu'un spécialiste de l'INRIA (cf. CR 61/0982).

## II.2. Techniques de détection.

Les **paragraphes** qui suivent présentent une revue des différentes techniques de détection mises en jeu **dans** les laboratoires et organismes français contactés **au** cours de **l'étude** (thèmes 1 et 2).

### II.2.1. Les radars.

Le RADAR est un instrument qui permet d'effectuer une télé-détection active de cibles, **l'exploration du volume sondé pouvant** se faire **dans** les trois dimensions et en fonction du temps. Ses **caractéristiques** principales de fonctionnement sont les suivantes :

- fréquence de l'onde porteuse,
- durée et fréquence de récurrence des impulsions (lorsqu'il y en a),
- **puissance** émise (moyenne ou de crête),
- directivité de **l'antenne** (liée à son **diagramme** de rayonnement),
- section efficace de **la** cible (fonction de **la** fréquence).

On distingue les radars incohérents, **dans** lesquels **l'information de phase n'est** pas prise en compte et qui ne permettent que des mesures de distance, et les radars cohérents avec lesquels on peut **mesurer** la vitesse **radiale** des cibles grâce à **l'effet** Doppler. En fait, de nombreuses **variantes** existent, **mettant** en jeu différentes techniques plus ou moins sophistiquées (comme la compression **d'impulsions**, qui **améliore** sensiblement le rapport signal sur bruit), et sont abondamment décrites **dans** les **ouvrages** spécialisés (voir par exemple la **réf.(18)**).

**Par** ailleurs, dans l'optique de cette étude, **il** est utile de **classer** d'un **côté** les radars directifs (faisceau étroit), utilisés pour la poursuite ou les sondages atmosphériques, et

de **l'autre** les radars de surveillance, conçus pour couvrir un espace important (faisceau large, au moins en site). En effet, si **l'utilisation** des seconds pour la surveillance du ciel est naturellement envisageable, le recours **aux premiers n'aurait** de sens que **s'ils** devaient être asservis (pointage) à un autre système de **surveillance**.

Un dernier point important **qu'il** convient de rappeler sur le **plan** des généralités est qu'un radar moderne comporte deux **grandes composantes** :

- le **partie** électronique (HF) qui assure **l'émission**, la réception, la **modulation/démodulation** des **signaux** électromagnétiques,
- la **partie informatique** qui effectue en temps réel tous les traitements : identification d'échos sur différents critères, **traitement dynamique** de successions **d'échos** (radar à impulsions), génération **d'informations** synthétiques, etc...

Pour une réalisation donnée, l'ensemble de ces deux **composantes** est très spécifique d'une application, et ne permet en **général** de prendre en compte que les événements recherchés. Il faut cependant souligner que si les performances électroniques (et de propagation) sont relativement gelées pour un équipement donné, le traitement informatique reste par essence assez souple, et ceci **d'autant** plus **qu'il** est effectué sur une unité plus confortable au niveau de la **programmation** (micro ou **mini**).

Les différents types de **radars** rencontrés **au** cours de l'étude et les commentaires **qu'ils** suscitent du point de vue de la détection des phénomènes aérospatiaux rares sont les suivants :

- Les radars météorologiques, conventionnels ou Doppler, sont utilisés opérationnellement pour détecter, localiser et quantifier les précipitations, **ainsi** que pour déterminer la vitesse des vents en **altitude** en poursuivant des **ballons** libres.

Dans le domaine de la recherche, ils **alimentent** les **modèles** de prévision avec les mesures de diverses quantités **physiques** : **champs** tridimensionnels de vitesse, de **réflectivité**, d'indice de réfraction, etc., ■

Les **modèles** de **radars** rencontrés (MELODI, RODIN, RONSARD,...) utilisent des longueurs **d'onde** comprises entre 1 cm et 10 cm, avec des impulsions de 0,4 à 4  $\mu$ s et des puissances **crête** de 7 à 700 KW. La largeur de leur faisceau (à -3 dB) est **toujours** de l'ordre de 1° à 2° ■

Ce type de radars présente a priori peu **d'intérêt** pour la détection systématique de phénomènes rares **dans** l'atmosphère, **d'une** part **parce** que les fréquences porteuses traversent relativement **mal** les basses couches de **l'atmosphère**, et d'autre part en **raison** de la **directivité** des aériens (surveillance impossible, poursuite possible avec certains modèles **mais** avec de sévères limitations en vitesse **angulaire**),

- Les radars de **poursuite** de satellites sont essentiellement de type secondaire (cible coopérative) et donc sans **intérêt** pour l'étude. Cependant les militaires disposent également de radars **primaires** (à échos de peau) à impulsions, travaillant vers 5 GHz avec compression **d'impulsions**. Leur portée **atteint** plusieurs centaines de kilomètres.
- Les seuls réseaux de radars de surveillance fonctionnant en permanence sont ceux des aviations civile et **militaire**. Prévus pour détecter des aéronefs (section efficace de l'ordre de 2 m<sup>2</sup>) dans une **certaine** fourchette **d'altitudes** ne dépassant **pas** 40 Km, ces radars à impulsions plus ou moins sophistiqués travaillent en bande S (10 cm) ou en bande L (23 cm), avec des **diagrammes** de rayonnement directifs seulement en azimut. La spécificité des critères de prise en compte de cibles rend ces réseaux inopérants pour la détection de phénomènes **rares**. **Seuls** certains développements à venir du **côté** militaire présentent un intérêt potentiel dans le cadre de la présente étude (cf. para.IV, 1 ■).

- Le radar ST dont s'occupe M. Crochet, chef du LSEET de Toulon (cf. CR 65/1082), présente un **grand intérêt** pour le sondage **vertical** de l'atmosphère. Un réseau de **dipôles répartis** sur un hectare émet à 50 MHz **par** impulsions de 100 KW et de quelques millisecondes de durée (récurrence à 1 **KHz**). Ce radar mesure directement les **mouvements** des vents et des turbulences **dans l'atmosphère**, à l'aide d'un système de traitement en temps réel des données reçues (FFT) qui fournit les **paramètres** principaux (puissance, Doppler, bruit,, ..).

Il faut rappeler ici l'intérêt que présente pour les **préoccupations** du GEPAN l'expérience du LSEET en **matière d' "anomalies"** de propagation (réflexions ionosphériques, guidage troposphérique,,..).

- Le radar météorique utilisé pendant plusieurs **années par** le CRPE utilise comme cibles les **traînée**s ionisées créées par la rentrée **dans la haute** mésosphère (80 à 110 Km) des météores. **Emettant** en continu à 30 MHz, avec une **puissance** de 4 KW et une ouverture de 20°, ce système met en jeu un **mini-calculateur couplé** qui sélectionne les échos selon des critères de forme et de **distance** bien définis.

Utilisés en mono-statique ou en bi-statique, ces radars ont **principalement** permis l'étude des vents en haute **altitude**, en **n'utilisant** les **traînée**s ionisées que comme des traceurs. **Cependant certains** chercheurs, comme M. Delcourt, **s'en** sont servis pour effectuer des études sur la **trajectographie** des **météores** (cf. CR 23/0582). Ne serait-ce que pour cette raison, le **radar** météorique est une des réalisations les plus directement utilisables pour la détection qui intéresse le GEPAN.

- Le radar "**transhorizon**" (à rétrodiffusion **ionosphérique**) du laboratoire de physique de l'**exosphère** de M. Delloue (Université de Paris VI : cf. CR 52/0782) fonctionne entre 1 **MHz** et 30 **MHz** avec des impulsions de 100 à 500 ps et 100 KW de puissance de **crête**. Deux réseaux d'antennes de plusieurs centaines de mètres de long permettent d'effectuer la couverture de plusieurs millions de **Km<sup>2</sup>** sur l'**Atlantique** et la Mer du Nord, **grâce** à la réflexion des ondes sur les couches **ionosphériques**.

Ce type de radar permet la télédétection de **phénomènes** et d'objets aussi variés que les bateaux, les avions, les villes, les **traînés** ionisées des météores,... Le **traitement** des données brutes nécessite cependant une excellente **compréhension** de la structure de l'ionosphère, en **raison** des effets complexes sur le **signal** du **transit** à travers les différentes couches (dynamique du **plasma** ionosphérique).

Une autre **installation**, près de Bordeaux, **permet** l'étude de certaines irrégularités du champ magnétique terrestre. Sa capacité de détecter les modifications de l'ionisation **dans** l'**atmosphère** la rend potentiellement **intéressante** **dans** l'optique des phénomènes **rares**.

En conclusion sur les radars, on retiendra l'**intérêt** des **dispositifs** **travaillant** en ondes **décamétriques** (voire **hectométriques**), qui traversent bien l'**atmosphère**, pour assurer la **surveillance** de zones **importantes** en superficie et en altitude. Dans **tous** les cas, le radar pose le problème du compromis entre l'**accumulation** d'un **nombre** prohibitif d'**échos** "**bruts**" de toutes **natures** et la sélection en temps réel selon des critères prédéfinis, qui est incompatible avec la surveillance de phénomènes **inattendus**.

### II.2.2. Détecteurs électromagnétiques.

Par opposition avec la détection active **qu'effectue** le radar, ce paragraphe traite de la détection de type passif, **dans** les **domaines** électromagnétique, magnétique et électrostatique.

La **campagne** de mesures effectuée en 1977 à Saint-Privat d'Allier par l'ONERA (entre autres) a été axée sur les points suivants :

- localisation des décharges d'électricité statique à l'aide d'un réseau de moulins à **champ** (mesure de la **composante** verticale du **champ**, avec une portée **maximale** de 20 à 25 Km),
- mesure des **champs** magnétiques induits par le **courant** de la décharge (10 à 100 KA),
- caractérisation des rayonnements électromagnétiques (maximum vers 100 MHz).

Depuis cette campagne, aucun autre réseau de détection des décharges d'électricité atmosphérique **n'a** été mis en place en France.

La portée des détecteurs électrostatiques et **magnétiques** est trop faible pour **qu'ils** soient **intéressants** autrement que de façon très **locale**. En ce qui concerne la détection électromagnétique à moyenne et grande distance, on **considère** comme **parfaitement adéquat** le matériel américain **standard** LLP, mais **il n'est pas** utilisé de manière opérationnelle en dépit du besoin exprimé par de nombreux organismes de détecter la foudre. Le LLP permet de suivre les différentes **phases d'évolution** d'un orage à 200 Km de distance.

Bien qu'il **ait** été mis en place pour détecter d'**autres** phénomènes (non naturels), **il** faut mentionner le **réseau** de stations que gère le LDG, et qui pourrait fournir des indications précieuses si une détection électromagnétique de la foudre devait effectivement être envisagée (voir **annexe** classifiée du CR 51/0782, **vol.2'**).

Les différentes **mesures** du **champ** magnétique terrestre dont est chargé l'**Institut** de Physique du Globe de Paris (cf. CR 56/0782) **n'ont pas** d'intérêt direct pour la détection des phénomènes rares, car elles concernent des variations sur des périodes longues (5 **ans** sur la France, 10 minutes à **Arette**). Il en va de même pour l'**observatoire** rapide de **Garchy** (fréquences de l'ordre du Hertz). On retiendra cependant les compétences **tout-**



à-fait uniques de l'IPG en matière de mesures très fines du champ magnétique terrestre.

### II.2.3. Détecteurs sismiques.

Les principaux organismes concernés par les mesures sismiques sont les Instituts de Physique du Globe et le LDG.

En France métropolitaine, il existe 4 réseaux de stations sismologiques gérés par le CNRS : ceux de Nice, du Fossé Rhénan et d'Aix relèvent de l'IPG de Strasbourg, tandis que l'IPG de Paris possède celui d'Arette (Pyrénées) (cf. CR 35/0582). Celui-ci, composé de 8 stations réparties sur environ 1000 Km<sup>2</sup>, fournit des données prétraitées ("événements" correspondant à des enregistrements concomitants dans plusieurs stations), et certaines données brutes sur papier.

Le LDG, dont une mission secondaire consiste à surveiller la sismicité en France, opère un réseau qui lui est propre et met en jeu des équipements distincts de ceux des IPG (cf. CR 51/0782).

En tout état de cause, ce type de capteur présente peu d'intérêt pour la détection des phénomènes aérospatiaux rares en raison des deux constatations suivantes :

- Le couplage entre l'air et la terre étant extrêmement faible, les coups de foudre au sol ne sont pas du tout détectables à l'aide de sismographes.

Une recherche en archives faite par le LDG a montré que la chute d'une grosse météorite (113 Kg) n'avait pas été "vue" par des stations moyennement éloignées (150 Km). Les espoirs qui avaient été formulés dans ce domaine d'application semblent donc peu fondés (voir fin du vol.2').

#### II.2.4. Détecteurs acoustiques.

Les ondes acoustiques et les ondes de gravité qui se **propa-**gent dans l'atmosphère sont pratiquement indétectables par des moyens sismiques, en raison du très faible couplage air-terre évoqué au paragraphe précédent.

La détection de ces ondes peut **être** effectuée directement à l'aide de **micro-barographes** (baromètres différentiels très sensibles), ou indirectement en **utilisant** les perturbations créées **dans** les couches ionosphériques (**modulations** des densités électroniques) : on met alors en jeu un sondeur **ionosphérique** (radar Doppler **travaillant** entre 3 et 5 MHz). Le LDG **a acquis** l'expérience de ces techniques (cf, annexe classifiée du CR 51/0782).

A propos de détection acoustique, on peut retenir l'utilité **d'un** simple **microphone** pour les mesures de niveau kéronique (nombre de jours par an où l'on entend au moins une fois le tonnerre). De plus, certains articles sur les météorites mentionnent des sons caractéristiques qui pourraient **également être** enregistrés à l'aide **d'un** microphone de qualité.

Enfin, dans la catégorie des détecteurs actifs, on peut noter le SODAR (sondeur acoustique Doppler) **qu'utilise** l'équipe "basse **atmosphère**" du CRPE pour étudier la dynamique de la couche limite atmosphérique. En coopération avec l'EERM (Météorologie Nationale) et le Laboratoire de Météorologie Physique de Clermont-Ferrand, le CRPE établit des profils de vent à l'aide d'un SODAR triple.

#### II.2.5. Détecteurs optiques.

Les instruments optiques les plus utilisés pour surveiller le ciel nocturne sont les télescopes des astronomes professionnels et amateurs, Ils ont généralement une ouverture **angulaire** très faible qui les rend inadéquats pour la détection

de phénomènes rares et fortuits, Seuls les télescopes de Schmidt (**miroir primaire** sphérique et correction **par** une lame **asphérique**) **ont** un **champ** important, qui peut atteindre  $20^\circ$  ou  $30^\circ$ . Un exemple très significatif est donné **par** le grand télescope de Schmidt du CERGÀ à Grasse (cf. CR 64/1082) qui sert à l'**étude** des **astéroïdes** et des comètes.

La construction **d'optiques** à très grand angle et à hautes performances, que ce soit dans le spectre visible ou **dans** l'ultraviolet, constitue la **spécialité** du Laboratoire d'Astronomie Spatiale de Marseille (cf. CR 53/0782). Les réalisations les plus **spectaculaires** de ce laboratoire sont des instruments **embarqués** sur satellites (projet franco-soviétique PIRAMIG à bord de **SALIOUT 7**, caméra pour SPACELAB). Il **s'a-**git d'équipements très sophistiqués et **coûteux**.

Différents **capteurs** optiques à très grand angle, de qualité plus modeste, **ont** été réalisés en France pour des études particulières :

- Des caméras à **grand angle** sont utilisées **par** l'ONERA pour corrélérer des observations optiques de la foudre avec **d'autres signaux** (électromagnétiques). Ceci est à **rapprocher** de l'**étude** par voie optique **des éclairs** sur Vénus dans le cadre des projets russes **VENERA**.

Le LDG a **également** l'**expérience** de systèmes **mixtes** comportant une surveillance optique à très **grand angle d'ouverture**.

- Le Centre de Recherches **Atmosphériques Campistrous**, où l'on étudie la couverture nuageuse, est doté **d'une** caméra "**ciel total**" pour la **photogrammétrie**. Elle est constituée d'une caméra **Beaulieu** de 16 mm suspendue à 2 m du sol et pointant vers un **miroir** hémisphérique posé au sol. Ce dispositif permet l'observation de  $2\pi$  stéradians.

Quelle que soit la finition du miroir, un tel dispositif ne permet pas de **mesures géométriques** précises en site.

- **Au Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements** de Toulouse,

M. Hurley tente de mettre en évidence une corrélation entre les sursauts **gamma** enregistrés sur certaines étoiles (par la sonde soviétique VENERA) et des éclairs optiques dont la durée est de l'ordre de la seconde, Il utilise pour cela une **caméra TELEPHOT** de 105° d'ouverture avec laquelle sont enregistrées des **vidéo-cassettes**. Une première **campagne** d'acquisition a eu lieu cet été au Pic du Midi.

L'**observation** des cassettes enregistrées **permet** de formuler deux critiques à l'**égard** de ce dispositif dont les objectifs sont très proches de ceux du GEPAN : **d'une part**, l'accumulation **d'images** sous forme **d'enregistrement continu** est ingérable, et **d'autre part** le tube NOCICON a une **rémanence** beaucoup trop **importante** pour permettre de bien suivre l'**évolution** de phénomènes sporadiques.

- La détection à réaliser en **aval** d'un dispositif optique peut mettre en jeu des composants opto-électroniques **d'apparition** récente. **Certains laboratoires** ont déjà acquis une solide expérience **dans** ce domaine, et de nombreux systèmes **d'imagerie** à base de **détecteurs** CCD existent ou sont en cours **d'élaboration** (cf. CR 58/0882, 61/0982, 63/1082 et 67/1082). C'est en **particulier** le cas de l'IMSP de Nice, où M. Vernin mesure des vitesses de **vent** en altitude par observation de la scintillation des étoiles : son système de détection doit avoir des performances très poussées à la fois en sensibilité et en absence de **rémanence**, ce qui l'a conduit à étudier très en détail le **marché** des capteurs optro-électroniques et des **amplificateurs** de brillance.

**Dans** le domaine de la télédétection active, on peut mentionner le LIDAR (émission **LASER** et mesure **au** télescope), **utilisé** en météorologie. Cet instrument a peu **d'intérêt** pour le sujet de la présente étude.

### II.3. Phénomènes concernés.

Sans que la liste soit exhaustive, un certain nombre de phénomènes aérospatiaux rares (susceptibles d'être détectés par un moyen ou par un autre) ont été identifiés au cours de l'étude. Les paragraphes suivants présentent ces phénomènes et la situation actuelle en France en ce qui concerne leur détection,

#### II.3.1. Météores et météorites.

Contrairement à ce qui se passe dans plusieurs pays voisins (voir para. III.3.), il n'existe actuellement en France aucun dispositif de surveillance systématique des rentrées dans l'atmosphère de météores ou autres bolides. Seules quelques campagnes d'observation isolées sont organisées par certaines associations d'astronomes amateurs, à l'occasion de la traversée par la Terre d'essaims de météores. Le principe de ces observations consiste à faire de longues poses photographiques à l'aide d'un appareil à grand angle (type Fish-eye).

Dans les milieux astronomiques professionnels, il existe peu d'intérêt pour étudier les bolides et leurs trajectoires, et aucun enregistrement n'est gardé lorsque l'un d'eux est observé fortuitement.

En revanche, il y a en France plusieurs spécialistes de l'analyse des matériaux extraterrestres de grand renom qui sont des clients potentiels très motivés pour un sous-produit de la détection des météores : le calcul des points de chute au sol des météorites, permettant leur localisation et leur collecte sur le terrain. Cette activité de trajectographie qui, comme nous le verrons plus loin, existe dans d'autres pays, prend toute sa valeur si l'on sait que jusqu'à présent le nombre total de météorites recueillies sur le sol français s'élève à 62, le rythme actuel étant de l'ordre d'une météorite tous les cinq ans.

Comme le souligne M. Pellas (cf. CR 57/0882), il est important et urgent de doter la France d'un système de détection de ces phénomènes, fût-il modeste, non seulement pour le bénéfice des **minéralogistes spécialisés comme lui-même** ou M. Lorin, **mais** aussi pour susciter des études originales sur les phénomènes lumineux **associés** aux rentrées de bolides **dans** l'atmosphère et sur les trajectoires de ces objets (voir à ce sujet les **résolutions** de la 18ème assemblée **générale** de l'IAU, **Commission 22, au para. III.3.**).

Enfin il faut rappeler les **travaux** de trajectographie, à caractère nécessairement statistique, effectués au CRPE lorsqu'il disposait de deux radars météoriques, **notamment** par M. Delcourt (cf. CR 14/0482 et 23/0582).

### II.3.2. Electricité atmosphérique.

La foudre constitue une &ne très importante pour de nombreux organismes qui ont à gérer des équipements répartis sur le territoire (antennes, **pylônes**, stations météorologiques, détecteur sismologiques, etc...). Il existe sur le marché **des matériels** inégalement efficaces pour assurer une protection contre le foudroiement et les **dégâts causés** par les **courants** de **décharge**.

En **collaboration** avec le CNET, le LMD, l'EERM, le LPA et le CEA, l'ONERA effectue depuis plusieurs années des recherches sur les caractéristiques de la foudre (**réf.(8)**). D'**abord** sur le site de Saint-Privat d'Allier, puis dans le cadre du programme COPT en Côte-d'Ivoire, ces travaux se poursuivent au Nouveau-Mexique avec le programme TRIP, dans lequel participent l'USAF et des universités **américaines**.

Le but essentiel de l'ONERA est de bien **caractériser** les différentes "**signatures**" de la foudre en vue d'une détection rapprochée fine. En effet, sur le plan de la détection à distance, il est admis que le dispositif **américain** LLP (**Lightning**

Location and protection) vendu pour environ 300 KF "clé en main" est devenu un standard très satisfaisant : composé de deux antennes et d'un matériel informatique programmé, le LLP permet de suivre les phases successives d'un orage jusqu'à 200 Km de distance.

Le phénomène "coup de foudre", qui peut sembler ponctuel à l'observateur, est en fait extrêmement complexe, mettant en jeu plusieurs millions d'évènements élémentaires successifs (cf. CR 45/0682 para.II.). Après toute une phase de propagation par "bonds" de précurseurs, pendant laquelle est émis un signal électromagnétique H<sub>1</sub> dont le spectre atteint 1 GHz, le "return stroke" (éclair visible constitué d'un canal de plasma de quelques centimètres de diamètre entouré de décharge corona) est accompagné d'une émission vers 100 KHz ainsi que du tonnerre. Le tout dure environ une seconde.

Sur le plan de la détection systématique de la foudre, rien n'existe actuellement en France, contrairement à d'autres pays. La détection locale peut mettre en jeu l'électromagnétisme, l'électrostatique, l'optique, l'acoustique; la détection à distance, au niveau du coup de foudre, ne peut utiliser que des moyens électromagnétiques ou optiques. Le repérage d'éclairs à très grande distance par goniométrie est possible dans les fréquences de quelques dizaines de KHz, en raison des effets de guidage troposphérique.

La détection active des éclairs par radar est rendue possible par le fait que le plasma dense ( $10^{18}$  ions/cm<sup>3</sup>) du return stroke se comporte comme un réflecteur parfait (réf.(18) p. 102-105).

En France, l'altitude des éclairs ne dépasse jamais 12 Km, et leur longueur 6 Km. Dans d'autres contrées, l'altitude atteint parfois 20 Km et la longueur 10 Km.

Enfin, il faut noter certains aspects très particuliers de la foudre :

- les "super-bolts", observés à Socorro, se présentent

comme des éclairs **horizontaux d'environ** 100 Km de long.

- dans certains pays (Suède, Japon) on observe des "**orages d'hiver**" dans lesquels les polarités entre nuage et sol sont inversées.
- La foudre en boule, qui fait l'objet d'innombrables témoignages, et qui semble pouvoir s'expliquer sur le plan théorique par un **plasma** confiné, **n'a jamais** pu être provoquée artificiellement, en dépit des installations spécifiques qui ont été faites à Saint-Privat d'Allier initialement dans ce **but**.

Les **comptes-rendus** de visites du volume n° 2 comportent plusieurs témoignages de scientifiques contactés au cours de l'**étude**. Le SGDN a transmis au GEPAN des **éléments d'information** sur la foudre en boule, qui ont permis de rédiger un document de travail (réf.(22)).

Personne en France **n'utilise** ni n'envisage d'utiliser des images de satellite (METEOSAT) pour **localiser** les **zones d'activité orageuse**.

### II.3.3. Autres phénomènes rares.

Au cours de cette étude, quatre autres phénomènes lumineux **rare**s ont été mentionnés :

- Dans les régions de forte activité sismique (**Grèce**, Turquie, Japon, Chine), on observe parfois juste **avant** ou pendant les séismes des phénomènes lumineux qui se présentent comme de petites aurores (provoqués **par** des aérosols ?).
- Depuis 1928, des chercheurs pensent qu'aux sursauts **gamma** enregistrés sur certaines étoiles se superposent des éclairs optiques **d'une** durée de quelques secondes et d'une intensité correspondant à une magnitude comprise entre 2 et 0 (travaux du CESR).



- Les "nuages **noctilucents**" sont des nuages artificiels qu'on observe à l'**occasion** de tirs de fusées, et qui correspondent à la présence de vapeur d'eau à une altitude de 70 Km : ces nuages de **glace** sont **éclairés** par le soleil, même **tard** dans la nuit, et ils peuvent **s'étaler** dans le ciel sur des **milliers** de Km<sup>2</sup>.
- Les feux de Saint-Elme, qu'on observe **parfois** après un orage au dessus d'une proéminence (**mât**, tronc d'**arbre**), se présentent comme des lueurs énormes et durables. Il **s'agit** en fait d'une décharge lente par effet **corona** (comme dans une **lampe** au néon) le long d'un **champ** électrique existant entre un **cumulo-nimbus** et le sol.

Par extension, on peut assimiler à un phénomène rare l'apparition dans le ciel d'un satellite artificiel. La situation passée et présente en France dans le domaine de leur **détection** et de leur poursuite (en dehors des systèmes coopératifs) fait l'objet du CR 48/0682 (annexe classifiée, vol.2').

---

SOMMAIRE DU VOLUME N° 1

oooooooooooooooooooooooooooo

	<u>PAGE</u>
I. PRESENTATION DU PROBLEME	2
11 ■ <u>Les phénomènes aérospatiaux rares</u>	2
12. <u>Thèmes de réflexion</u>	3
13. <u>Organisation pratique de l'étude</u>	4
II. LA SITUATION EN FRANCE	6
II. 1. <u>Organismes contactés</u>	6
II. 1.1. L'Aviation Civile	6
II. 1.2. L'Aviation Militaire	8
II.1.3. La Météorologie Nationale	9
II. 1.4. La Défense Nationale	11
II.1 .5. LONERA	12
II.1.6. Le CRPE	15
II.1.7. Le CNRS : Section VII	17
II.1.8. Le CNRS : Section XIV	20
II.1.9. L'INAG	21
II.1.10. Laboratoires universitaires	24
II.1.11. Les astronomes amateurs	25
II.1.12. Spécialistes d'opto-électronique	25
11.2. <u>Techniques de détection</u>	26
II.2.1. Les radars	26
II.2.2. Détecteurs électromagnétiques	30
II.2.3. Détecteurs sismiques	32
II.2.4. Détecteurs acoustiques	33
II.2.5. Détecteurs optiques	33
11.3. <u>Phénomènes concernés</u>	36
II.3.1. Météores et météorites	36
I I.2. Electricité atmosphérique	37
II.3.3. Autres phénomènes rares	39