

N° d'ordre : 2053

# THESE

présentée à

# L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

pour obtenir le grade de

## **DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ**

Label Européen

Spécialité : Electronique



par

PIERRE GUILMAIN

# APPLICATION DES MÉTHODES FLUXMÉTRIQUES DANS LE DOMAINE DES GARANTIES NUCLÉAIRES

Soutenue en Juillet 1997 devant la commission d'examen

Membres du Jury MM.

D. FLORY G. CAJA F. FRAZZOLI P. THERY M. CUYPERS M. CHIVE C. KORN E. CONSTANT L. RACZY J-M. DOERLER Rapporteur Rapporteur Directeur de thèse Directeur de thèse



2

50376

1997

187

A Maria, à David, à toute ma famille,

...et à tous ceux qui vont jusqu'au bout des choses auxquelles ils croient.

# **AVANT - PROPOS**

Ce travail s'est déroulé dans le cadre de l'unité SaVeTech de l'Institut ISIS (*Institut des Systèmes, de l'Informatique et de la Sûreté*) et a été effectué au sein du programme "Safeguards and Fissile Materials Management" du Centre Commun de Recherche d'Ispra (Italie).

Monsieur M. CUYPERS, directeur de l'unité "Garanties et Techniques de Vérification" m'a accueilli au Centre Commun de Recherche d'Ispra et m'a fait l'honneur de participer au jury de cette thèse. Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour l'aide qu'il m'a prodiguée tout au long de ce travail.

Je suis particulièrement reconnaissant à Monsieur C. KORN, responsable du laboratoire TEMPEST (étude des contraintes applicables à l'équipement thermique, électromagnétique et physique). Il m'a accueilli et confié le thème de cette recherche. Qu'il trouve ici mes remerciements les plus sincères et l'expression de ma profonde reconnaissance pour les conseils et l'aide qu'il m'a apporté durant cette étude.

Dans le cadre d'une étroite collaboration avec Monsieur le Professeur P. THERY, directeur de la société CAPTEC, j'ai effectué toute ma recherche en Italie. Je lui en suis particulièrement reconnaissant ainsi que pour les conseils et les encouragements qu'il m'a prodiguée tout au long de cette étude.

Je remercie Monsieur le Professeur G. CAJA de l'unité de reproduction animales du département de pathologie et de reproduction animales de l'Université Vétérinaire Autonome de Barcelone, qui a montré beaucoup d'intérêt pour ces recherches et a accepté d'en être Rapporteur.

Je remercie Monsieur le Professeur F. FRAZZOLI du département énergie de l'Université La Sapienza de Rome pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'analyser les travaux de cette thèse.

Je tiens à remercier vivement Monsieur D. FLORY, chef du département Sécurité Matériaux Radioactifs de l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire du CEA Fontenayaux-Roses, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de juger mon travail.

Je remercie Monsieur G. LANDRESSE, chef d'unité à la direction du Contrôle de Sécurité d'Euratom qui s'est intéressé à mes travaux et m'a permis une première installation de prototypes dans un site de stockage de matières fissiles. Je remercie également toute l'unité n° 2, secteur C et plus particulièrement Messieurs C. MORTON, A. TERRASI, R.FLUIT, E. BLANCO, P SEVELLEC, E. MOHS qui m'ont encadré sur le site et qui assurent le suivi des essais permanent.

Je remercie également Messieurs A. ANDERSON et G. FALCON responsables des salles de stockage choisies.

Je suis particulièrement reconnaissant à Monsieur D. VAN DER EECKEN, coordinnateur entre le CCR et l'Euratom, qui s'est toujours intéressé au système.

J'adresse mes remerciements à l'atelier central du centre d'Ispra et plus spécialement à Messieurs E. DIAZ VIZOSO, A. SCHAACK, J. CORNELISSEN, M.GALPAROLI, L. DI PIAZZA, H. FATTORI.

Je tiens à remercier la Société Doerler-Mesures (Nancy) et plus particulièrement Messieurs DOERLER Jean-Marie, Olivier, Thierry, Rémy pour la réalisation de la partie soft des systèmes de surveillance.

Je remercie la N.O.S. (Rome) pour la réalisation du premier logiciel prototype de surveillance.

Je suis reconnaissant à Monsieur E. GORTS pour la réalisation des clichés photographiques figurant dans ce rapport.

Je tiens à remercier vivement Monsieur F. ENGELS qui s'est intéressé à mes travaux et qui m'a fait profiter de ses compétences dans le domaine de l'innovation et de la valorisation technologique.

Je remercie Monsieur S. GUARDINI, responsable de Perla à Ispra pour sa gentillesse et pour avoir accepté d'exposer du matériel dans le laboratoire.

Je remercie Monsieur le Professeur L. RACZY de l'Université de LilleI et Monsieur le Professeur M. CHIVE, Directeur de l'Ecole Doctorale SPI (Sciences pour l'Ingénieur), qui m'ont fait l'honneur de participer et de présider le Jury de cette thèse. Je remercie également les membres du troisième cycle ainsi que tous les collègues du L.C.I. de l'Université des Sciences et Techniques de Lille.

Je remercie Messieurs R. NEHRING, B. FARRIOL et Mademoiselle C. CONILL de l'accueil et de l'aide qu'il m'ont fournis lors de mes séjours à l'Université Vétérinaire Autonome de Barcelone.

Je tiens à exprimer ma grande gratitude à Monsieur S. GUTHS de l'Université de Florianópolis (Brésil) pour les conseils et l'amitié qu'il m'a prodiguée tout au long de ces années d'études.

Je voudrais citer ici la Commission des Communautés Européennes qui a permis par son soutien financier le développement de mes travaux. Que tous ceux qui ont contribué dans ce sens soient assurés de ma profonde gratitude.

Enfin il m'est agréable de remercier Messieurs G. AZZALIN, A.BESI, L. GUIDUCCI, F.VAN PAEMEL du laboratoire Tempest et tous les autres collègues que j'aurais oubliés qui ont fait plus que m'accompagner dans ma recherche, puisqu'ils m'ont donné aussi leur amitié.

Je voudrais remercier particulièrement Monsieur P.LEY qui m'a toujours montré sa bonne volonté à m'aider dans les travaux les plus divers, ainsi que Mesdemoiselles L.MARCALETTI, F. CRISCUOLO et E. MAGGIONI pour leur gentillesse et leur disponibilité. A toutes les personnes dont j'ai fait connaissance au long de mon séjour en Italie, j'adresse mes remerciements pour leur accueil amical.

#### **GUILMAIN Pierre**

## APPLICATION DE LA FLUXMÉTRIE DANS LE DOMAINE DES GARANTIES NUCLÉAIRES

Thèse de doctorat présentée à l'Université des Sciences et Technologies de Lille

Le travail de thèse qui nous a été confié a pour thème "<u>Application des méthodes</u> <u>fluxmétriques au domaine des Garanties Nucléaires</u>" et a été établi au sein du programme "Safeguards and Fissile Materials Management" du Centre Commun de Recherche d'Ispra (Italie) de la Commission des Communautés Européennes.

L'énergie nucléaire a été développée dans les années quarante avec des objectifs militaires. Après Hiroshima, les Etats-Unis d'Amérique ont proposé aux Nations Unies, tout juste nées, l'instauration d'une Commission afin d'établir une autorité internationale ayant le contrôle sur tout le matériel et les activités nucléaires à travers le monde.

Plusieurs initiatives ont été prises pour réduire le danger de la prolifération de l'arme nucléaire telles que le plan Baruch au niveau des Nations Unies en 1946, basé sur le renoncement total au nucléaire, ou la loi Mac Mahon aux USA interdisant la divulgation de secrets sur l'énergie atomique pour conserver le monopole et éviter la prolifération. Même si certaines grandes nations telles que la Russie en 1949, suivie de la Grande-Bretagne en 1952, la France en 1960 et plus tard, en 1964, la Chine, se sont dotées d'armes nucléaires, le principe de non-prolifération fut accepté par l'opinion commune internationale. Au lieu de continuer à développer cette nouvelle énergie à des fins militaires, il s'est dégagé une volonté d'utiliser "cette source d'énergie" incroyablement puissante dans une utilisation pacifique pour la production d'électricité.

Cela comportait le passage obligé de certaines connaissances et technologies du domaine militaire vers le civil et de pays dotés d'armes nucléaires vers des pays qui ne l'avaient pas.

Pour assurer ce passage avec la garantie d'utilisation pacifique de ces technologies et matières exportées, il a été nécessaire d'établir un contrôle et des vérifications grâce à des accords internationaux et stipulés dans le traité de Non-Prolifération. Les premiers Accords Bilatéraux entre les USA et les pays importateurs ont permis le contrôle par des inspecteurs américains dès 1954. Puis la transition du contrôle des vérifications s'est faite au niveau mondial par la création de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (A.I.E.A.) installée à Vienne depuis 1957. Au niveau européen, le système des garanties est accepté par les Etats membres avec la signature du Traité EURATOM en 1957.

La France et son industrie civile, pour ses opérations commerciales aussi bien que pour ses exportations, se sou mettent au contrôle d'Euratom. La France se classe dans les premiers au rang mondial en ce qui concerne la part du nucléaire (77% au moins) dans le bilan électrique national. Elle a été ainsi amenée à se doter d'un cycle du combustible complet allant de la mine au retraitement des combustibles irradiés utilisé à la fois pour ses besoins nationaux et pour la fourniture de services aux autres pays. Compte tenu de cette situation et conscient de ses responsabilités particulières, tant au plan national pour la sécurité du public qu'au plan international dans le domaine de la non-prolifération nucléaire, le gouvernement français a mis en place un dispositif de contrôle national placé sous l'autorité du Haut Fonctionnaire de Défense du ministère chargé de l'industrie et sous le contrôle du C.E.A. (Commissariat à l'Energie Atomique) pour assurer toutes les protections entrant dans le système des Garanties Nucléaires.

#### Le concept des Garanties (Safeguards) est basé sur :

- <u>la déclaration</u> faite par un détenteur de matières nucléaires (laboratoires, industries...) sur ses flux de matières utilisées et stockées dans un site, et sur des inventaires au système national du contrôle de matières puis aux autorités internationales (EURATOM et A.I.E.A.).
- <u>la vérification</u> de ces déclarations et de bilans expertisés de matière par les autorités de contrôle nationales et internationales.

Cette vérification est fondée sur le contrôle de ces déclarations et du bilan matière, tenant compte de l'incertitude sur la quantité de la matière due à l'imprécision des mesures et des calculs faits par l'opérateur, et à la déperdition naturelle dans l'installation.

La vérification s'appuie sur des mesures indépendantes de l'opérateur obligeant les inspecteurs à se munir fréquemment de systèmes de mesures par échantillonnage.

Les mesures, quant à elles, sont basées sur l'établissement de la quantité de matière présente dans un échantillon, soit à l'aide de méthodes analytiques du type analyses chimiques (méthode destructive), soit généralement grâce à des mesures nucléaires pouvant être une spectrométrie gamma, des méthodes de comptage de neutrons, ou encore par calorimétrie (mesure non destructive de la matière par la détermination de la chaleur produite par une masse de plutonium en connaissance de sa composition isotopique).

De nombreuses mesures sont établies aussi pour s'assurer de la connaissance permanente d'une quantité de matière définie au préalable. Cela s'effectue à l'aide de systèmes de scellés, de surveillance physique (assurée par des gardes) ou encore par du "monitoring" grâce à des caméras et à un éventail de capteurs classiques et bien connus.

Dans ce contexte, le sujet de thèse s'oriente sur l'application de la fluxmétrie dans le domaine des Garanties Nucléaires en particulier pour la surveillance grâce à des systèmes paraboliques associés à des capteurs radiatifs. L'association "fluxmètre radiatifconcentrateur de rayonnement thermique" fait l'objet du travail présenté. Un système de traitement électronique a été associé en vue de proposer un nouveau système de surveillance passive basé sur la détection des vertations en fonction du temps des échanges radiatifs. Au niveau des usines de retraitement de produits nucléaires ainsi que dans le cas des stockages de ces mêmes produits, de nombreuses techniques en partie évoquées précédemment sont utilisées à des fins de contrôle.

Utiliser la technologie "fluxmètres thermiques" c'est pouvoir détecter et mesurer directement tout échange d'énergie thermique par conduction convection rayonnement entre milieux à température différente. C'est-à-dire mesurer directement et sans inertie tout échauffement indépendemment de son origine à partir des échanges thermiques induits dans le milieu environnant. Cette technologie introduit une façon nouvelle d'aborder les problèmes de calorimétrie ou de détecter les échauffements à distance basés sur la mesure de la densité de rayonnement thermique échangé. Le sujet est très vaste et notre travail a été limité à une application de la technologie : <u>la surveillance passive basée sur la</u> <u>détection des échanges radiatifs.</u>

Mesurer un flux thermique ou radiatif échangé entre un milieu solide et son environnement c'est caractériser l'état de déséquilibre énergétique ou radiatif entre le milieu et son environnement par la mesure des échanges thermiques ou radiatifs.

Le flux thermique est positif lorsque le milieu reçoit de l'énergie au milieu solide et négatif dans le cas inverse. L'énergie est échangée à travers toute la surface de séparation entre les milieux et le résultat de la mesure est <u>une densité de flux qui s'exprime en</u>  $W/m^2$ . Un "fluxmètre" a la <u>propriété</u> unique de détecter avec le même coefficient de sensibilité la densité d'énergie échangée qu'elle soit absorbée ou émise à travers la surface du capteur et ceci <u>indépendemment du niveau de température auquel s'effectue</u> <u>l'échange</u>. La sensibilité étant par définition indépendante de la température du capteur toute compensation de température est superflue.

Le <u>fluxmètre radiatif</u> est un capteur nouveau introduit pour détecter sans contact les seuls échanges par rayonnement thermique entre surfaces à température différente. Il se colle sur un support à la manière d'une jauge de contrainte et détecte tout échange radiatif entre sa surface sensible et le milieu environnant. Le coefficient de sensibilité étant le même qu'il y ait absorption ou émission de rayonnement thermique, un tel capteur détecte en même temps le rayonnement incident en provenance du milieu environnant et l'émission propre du support, c'est un capteur de bilan radiatif. <u>La tension détectée est positive</u> lorsque la densité d'énergie absorbée est supérieure à l'émission propre et négative dans le cas inverse.

C'est un capteur de <u>déséquilibre radiatif</u> puisque la tension de sortie est nulle uniquement à l'équilibre radiatif. Sa faible constante de temps, inférieure à 50 millisecondes permet de détecter sans contact toute modification de l'état de déséquilibre radiatif entre la surface du capteur et son environnement.

Le bilan des échanges radiatifs étant détecté sur la surface du capteur, le capteur peut être associé à des systèmes concentrateurs de rayonnement thermique permettant d'amener sur la surface sensible le rayonnement en provenance de cibles ou portions d'espace plus ou moins éloignées. La tension détectée est alors proportionnelle à l'écart entre la densité de rayonnement incident en provenance d'une portion d'espace et la densité de rayonnement émis par la surface active (émission propri) c'est-à-dire à l'écart entre la température du capteur et la température moyenne "vue" par le concentrateur de rayonnement thermique.

Dans la première partie de notre travail nous avons réalisé une étude bibliographique ayant pour objet de présenter la technologie des capteurs fluxmétriques et de la comparer avec les détecteurs du type à semi-conducteurs, pyroélectriques ou à ultrasons généralement emploiés dans les systèmes traditionnels de surveillance passive.

Quelle que soit la technologie traditionnelle utilisée (capteur photonique ou capteur thermique traditionnel), la grandeur détectée est représentative de son rayonnement thermique incident émis par l'objet à détecter et le milieu environnant et ne dépend que de **la température absolue du milieu émettant le rayonnement**. Les éléments détecteurs utilisés en pratique sont ponctuels et sont caractérisés par une détectivité caractérisant **la puissance minimale de rayonnement détectable par le dispositif** (Ils mesurent la quantité de rayonnement infrarouge incident émise par une source chaude en mouvement). Leur principe s'applique mal au problème qui nous a été confié puisqu'il s'agissait de surveiller une zone de dimensions finies (type couloir, local ou objet), avec toutefois possibilité de circuler et de travailler dans une zone non surveillée du même local. La nécessité de surveiller un volume bien défini ne permettait pas d'utiliser les capteurs actuels associés à des dispositifs de focalisation traditionnelle.

Le fluxmètre radiatif n'est pas un capteur ponctuel c'est un capteur ayant une surface active bien définie (qui peut cependant être miniaturisée et réduite à quelques millimètres carrés). La surface sensible est recouverte de thermoéléments <u>uniformément distribués</u> <u>sur la surface sensible</u>. La différence avec les détecteurs traditionnels est que chacun des thermoéléments fournit une information représentative d'un échange radiatif instantané (c'est-à-dire de la différence entre la densité de rayonnement incident et l'émission propre) et non de l'augmentation de température de l'élément de surface utilisé pour absorber le rayonnement (qui résulte de l'intégration d'un bilan énergétique).

Dans ces conditions, toute perturbation des échanges radiatifs peut être détectée sans retard et appliquée à la surveillance passive de l'espace "vu" par le concentrateur de rayonnement.

Fixer le fluxmètre radiatif sur un support de forte inertie permet de limiter les variations en fonction du temps de l'émission propre du capteur et par suite de détecter sans contact et sans inertie toute perturbation des échanges radiatifs même rapide en fonction du temps.

Le fluxmètre radiatif n'est pas un composant optimisé une fois pour toutes et encapsulé dans un boîtier standardisé. Il a l'avantage de pouvoir être adapté à toute configuration expérimentale particulière.

A l'origine même du projet, en début d'année 1995, les dimensions minimales des fluxmètres qui nous étaient proposés par le laboratoire L.C.I. et donc imposées pour notre étude ne pouvaient pas être inférieures au centimètre carré. Cette condition, qui apparaissait comme un handicap, nous a été favorable pour surveiller des surfaces importantes et

apporter une solution en disposant ces capteurs à surface non nulle dans des réflecteurs du type parabolique.

Rappelons que notre travail de thèse n'a pas été d'analyser un capteur de flux radiatif ni de réaliser le meilleur système de détection possible, mais plutôt de valider un nouveau principe de détection en vue de réaliser un transfert de technologie dans les conditions normales d'utilisation.

Puis nous avons décrit dans une seconde partie la conception et la réalisation de deux prototypes de systèmes paraboliques. En pratique, pour des raisons de coût, pour ne pas atténuer le rayonnement à détecter nous avons choisi de réaliser un réflecteur en métal recouvert d'une microcouche d'or pour réaliser notre premier prototype de système de détection. Dans ce chapitre nous avons expliqué pourquoi et comment le concentrateur de rayonnement infrarouge circulaire ou rectangulaire adéquat doit être choisi en fonction de l'importance du volume à surveiller / allant du simple objet à de très grandes zones de dimensions finies /, de la distance de détection et du degré de sensibilité des alarmes désirées. Dans la plupart des applications, la mobilité et la défocalisation du capteur par rapport au réflecteur permettent que celui-ci soit entièrement éclairé par le flux radiatif incident.

Grâce à l'association fluxmètre planaire et concentrateur de rayonnement thermique, il nous a été possible de détecter toute modification de l'équilibre thermique d'un volume bien défini causée, par exemple, par une intrusion humaine dans une zone surveillée.

A partir de caractérisations, de nombreux essais et résultats expérimentaux présentés dans une troisième partie, nous avons constaté que la précision et la linéarité des capteurs et de l'électronique utilisés ne sont pas astreignantes étant donné que *nous ne devons pas faire une mesure de flux* mais une *détection de déséquilibre thermique*. C'est-àdire que nous ne mesurons pas un niveau de flux pour le comparer à un seuil afin de déclencher une alarme, mais nous regardons l'évolution de la pente du signal délivré par le système pour l'assimiler ou non à une intrusion dans une zone surveillée.

Il a été constaté que, en fonction de l'angle de regard et de l'éloignement entre la source infrarouge intrus et le détecteur, le diagramme de sensibilité des concentrateurs paraboliques est défini différemment et qu'il faut tenir compte de ces caractéristiques avant toute installation.

Nous avons remarqué que plus la détection se fait à une distance importante plus l'énergie est concentrée, c'est-à-dire qu'elle se disperse moins angulairement, ce qui est tout à fait logique puisque la source infrarouge devient de plus en plus ponctuelle avec son éloignement. Le niveau de détection dépend, bien sûr, de la distance d'intrusion mais aussi du nombre de capteurs installés ainsi que de la vitesse de déplacement de l'intrus. Il a été constaté qu'à une distance au moins 4m les pics (niveaux) de détection sont plus élevés lorsque la vitesse d'intrusion est plus lente: ceci s'explique par le rayonnement radiatif ou le déséquilibre thermique plus important provoqué par la présence plus longue de l'intrus dans la zone surveillée.

L'application consistait à pouvoir détecter une intrusion dans un milieu éventuellement soumis à des perturbations (déplacement humain, climatisation, ouverture de porte, éclairage...).

Etant donné que notre système est toujours en déséquilibre thermique, que celui-ci évolue constamment en fonction des variations de température du milieu, et que le capteur surveille toute la bande de l'infrarouge moyen, nous avons basé <u>la détection sur une</u> variation absolue du signal délivré par le capteur en temps réel et non sur un franchissement de seuil.

Lors d'une intrusion par une présence humaine ou un objet matériel, on obtient un pic positif ou négatif de forte amplitude causé par une variation de flux importante. Nous avons alors établi *une détection sur la mesure de cette variation de flux* et non pas sur le franchissement d'un niveau de flux.

Le fluxmètre thermique qui fournit une information représentative du déséquilibre énergétique entre un système et son environnement est idéal pour prendre en compte les variations de charge thermique importantes provoquées par des intrusions et traduites par des alarmes. Toute variation de température causée par des apports ou déperditions d'énergie lors d'une intrusion est détectée par notre système.

En théorie on pense pouvoir remplacer un objet à une certaine température par un autre. En pratique il est impossible d'avoir une même surface homogène en température capable de s'introduire dans une zone surveillée à distance.

Une série d'expériences a été menée pour tenter de frauder notre système de surveillance, celles-ci sont restées vaines. Nous avons essayé de pénétrer dans la zone surveillée en entrant très rapidemment, normalement, lentement, habillé de noir ou de blanc, peu ou fortement vêtu, isolé avec des cartons ; mais le système a détecté chacune des tentatives d'intrusion.

Etant donné qu'il est quasi impossible de connaître la température de chaque point de la surface occultée par l'intrus, et que la température de l'intrus doit être égale à cette température moyenne de la surface qu'il cache afin que le bilan thermique reste stable, il est extrêmement difficile de frauder notre dispositif.

Toutes les caractéristiques spécifiques et les avantages que présente notre solution nous permettent de constater qu'en fait notre nouveau système de surveillance à distance apporte une solution nouvelle au problème de la surveillance passive et répond pleinement au problème posé initialement. Mais il est important de savoir que notre système ne réalise pas une détection dans le sens d'une analyse des infrarouges, mais seulement par une modification de l'équilibre thermique dans la zone surveillée.

Après le dépôt de brevet début 1996 au nom de la Commission des Communautés Européennes du système de surveillance à distance par voie thermique, une application concrète a été proposée par l'agence de contrôle européenne (EURATOM) et une première installation de prototypes a été réalisée dans un site de stockage de matières fiscilles.

-

Les problèmes rencontrés lors des réglages in situ étaient dus à l'influence de l'illumination et du système de ventilation des salles à contrôler. En effet, la forte chaleur dégagée par les spots lumineux et le faible éloignement de certains de ceux-ci avec quelques paraboles perturbent considérablement la surveillance. Malgré cela, les niveaux d'alarme ont été réglés mais n'ont pas pu être qualifiés dans le temps. Le contrôle des données et une évaluation des résultats nous permettra de valider ces réglages.

Nous pensons donc que nous avons réussi à appliquer la fluxmétrie dans le domaine des Garanties Nucléaires mais aussi que, grâce à la continuation du développement technique et à partir d'installations sur sites réels de prototypes expérimentaux, nous devrions arriver à satisfaire les utilisateurs dans le domaine du contrôle nucléaire et étendre l'emploi de cette technologie vers d'autres domaines telles que industrielle, bancaire, agricole ou culturelle.

D'ailleurs un projet de valorisation de cette technologie soutenue par la DGXIII à Luxembourg est en cours de réalisation. Une collaboration a été établie avec le département de pathologie et de reproduction animales de l'Université Vétérinaire Autonome de Barcelone afin de continuer et faire " des essais d'orientation " dans une ferme expérimentale. Il est envisagé d'installer des prototypes dans un musée afin de faire de la surveillance ponctuelle et de tester notre dispositif comme moyen de surveillance innovatif.

## APPLICAZIONE DELLA FLUSSOMETRIA NEL CAMPO DELLE SALVAGUARDIE NUCLEARI (Safeguards)

### Tesi di Dottorato di Ricerca presentata all'Università delle Scienze e Tecnologie di Lilla (Francia)

Il lavoro di tesi che ci è stato affidato ha come argomento <u>"l'applicazione delle</u> tecniche di flussometria nel campo delle salvaguardie nucleari" e si è svolto in seno al programma "Safeguards and Fissile Materials Management" del Centro Comune di Ricerca di Ispra (VA) della Commissione Europea.

L'energia nucleare venne sviluppata negli anni quaranta a scopi militari. Dopo Hiroshima, gli Stati Uniti d'America proposero alle Nazioni Unite, appena istituite, la creazione di una commissione per l'istituzione di una autorità internazionale di controllo di tutto il materiale e delle attività nucleari nel mondo.

Diverse iniziative furono adottate per ridurre il pericolo della proliferazione delle armi nucleari. Tra queste il piano Baruch del 1946, a livello di Nazioni Unite, basato sulla rinuncia totale al nucleare, e la legge Mc Mahon negli Stati Uniti, che vietava la divulgazione di segreti attinenti all'energia nucleare al fine di conservare il monopolio ed evitare la proliferazione. Anche se alcune grandi potenze, come l'Unione Sovietica nel 1949, seguita dalla Gran Bretagna nel 1952, dalla Francia nel 1960, e più tardi, nel 1964, dalla Cina, si sono dotate di armi nucleari, il principio della non proliferazione fu accettato dall'opinione pubblica internazionale. Anzichè continuare a sviluppare questa nuova forma di energia a fini militari, si è affermata la volontà di usare questa "nuova fonte di energia", incredibilmente potente, a scopi pacifici di produzione di elettricitá.

Ciò comportava il passaggio obbligato di certe conoscenze e tecnologie dal campo militare al campo civile e da paesi dotati di armi atomiche a paesi che ne erano sprovvisti.

Per assicurarsi che tale passaggio avvenisse con le dovute garanzie di utilizzo pacifico dei materiali e delle tecnologie esportate, fu necessario istituire un sistema di controlli e di verifiche. Questi controlli e verifiche furono oggetto di discussione in accordi internazionali e furono sanciti nel trattato di non proliferazione.I primi accordi bilaterali tra Stati Uniti e paesi importatori permisero il controllo da parte di ispettori americani già dal 1954. Vi fu poi il trasferimento della responsabilità di tale controlli a livello mondiale alla Agenzia Internazionale dell'Energia Atomica (AIEA) dopo la sua costituzione a Vienna nel 1957. A livello Europeo, il sistema delle salvaguardie nucleari viene istituito nel 1957 con il trattato EURATOM.

In Francia l'industria civile sia, per le sue operazioni commerciali che per le sue esportazioni, è sottoposta al controllo EURATOM. La Francia è uno dei paesi che maggiormente utilizzano energia nucleare, coprendo con questa oltre il 77% del fabbisogno elettrico nazionale. E' stata così portata a dotarsi di un ciclo combustibile completo -dalle miniere al riciclaggio dei combustibili irradiati- sia per il proprio fabbisogno che per la fornitura di servizi a paesi terzi. Il governo francese, tenendo conto di questa situazione e cosciente delle sue peculiari responsabilità -sia per la sicurezza della popolazione che a livello di non proliferazione- ha istituito un dispositivo nazionale di controllo posto sotto l'autorità congiunta dell'Alto Funzionario alla Difesa e del Commissariato all'Energia Atomica (CEA), al fine di fornire tutte le garanzie relative alle salvaguardie nucleari.

#### Il concetto delle salvaguardie (Safeguards) si basa su:

- <u>La dichiarazione</u> fatta dal detentore di materiali nucleari (laboratori, industrie..) sui flussi di materiali utilizzati ed immagazzinati in un determinato impianto, che viene consegnata agli organi nazionali di controllo e a quelli internazionali (EURATOM, AIEA)
- <u>La verifica</u> di tali dichiarazioni e degli inventari da parte delle autorità di controllo nazionali ed internazionali.

Questa verifica si basa sul controllo della contabilità rispetto alle reali quantità, tenendo conto dell'imprecisione delle misure e della perdita naturale all'interno dell'impianto.

La verifica si basa su misure indipendenti da parte dell'operatore. Ciò rende necessario dotare gli ispettori di sistemi di misurazione e di campionamento.

Dal canto loro, queste misurazioni si basano sul computo della quantità di materia presente in un campione, sia con l'ausilio di metodi analitici di tipo chimico (metodi distruttivi), sia con misure nucleari come spettrometria gamma, conteggio di neutroni, o ancora con la calorimetria (misura non distruttiva della quantita di materia attraverso la determinazione del calore prodotto da una massa di U o Pu di cui si conosca la composizione isotopica).

Sono state inoltre adottate numerose misure per assicurarsi dell'integrità nel tempo di una quantità di materia stabilita in precedenza. Queste riguardano l'uso di sigilli, la protezione e sorveglianza fisica (da parte di guardie), e il "monitoring" attraverso telecamere e una serie di sensori classici e ben conosciuti.

In questo contesto il lavoro di tesi si è focalizzato sull'applicazione delle tecniche di flussometria nel settore delle salvaguardie, in particolare sulla sorveglianza tramite sistemi parabolici associati a sensori radiativi. L'associazione tra flussometro radiativo e concentratore di irraggiamento termico è l'oggetto del lavoro presentato. L'aggiunta di un sistema di elaborazione elettronica consente di proporre un nuovo sistema di sorveglianza passiva basato sulla rilevazione delle variazioni, nel tempo, degli scambi radiativi. A livello degli impianti di riprocessamento di prodotti nucleari come in quelli di stoccaggio, numerose tecniche, in parte richiamate precedentemente vengono regolarmente utilizzate a fini di controllo.

L'utilizzo delle tecniche di flussometria termica consente di rilevare e misurare direttamente qualsiasi scambio di energia termica per conduzione, converzione o irraggiamento tra ambienti di diversa temperatura. Si può quindi misurare direttamente, e senza inerzia, qualsiasi riscaldamento indipendentemente dalla sua origine, a partire degli scambi termici indotti nell'ambiente circostante. Questa tecnologia rappresenta un modo nuovo di affrontare i problemi di calorimetria e di rilevare a distanza i riscaldamenti basandosi sulla misura della densità dell'irraggiamento termico scambiato. L'argomento è molto vasto e il nostro lavoro si è limitato ad una applicazione di questa tecnologia: la sorveglianza passiva basata sul rilevamento degli scambi radiativi.

Misurare un flusso termico o radiativo scambiato tra un solido e l'ambiente circostante equivale a caratterizzare lo stato di squilibrio energetico o radiativo tra il solido e il suo ambiente con la misurazione degli scambi termici o radiativi.

Il flusso termico è positivo quando l'ambiente riceve energia dal solido. E' negativo nel caso contrario. L'energia viene scambiata attraverso tutta la superficie di separazione e il risultato della misurazione è **una densità di flusso che si esprime in W/m**<sup>2</sup>. Un "flussometro" possiede la **proprietà** unica di rilevare con lo stesso coefficiente di sensibilità la densità di energia scambiata, sia che essa venga assorbita sia che venga trasmessa attraverso la superficie del sensore, e questo **indipendentemente dal livello di temperatura al quale avviene lo scambio**. Essendo la sensibilità per definizione indipendente dalla temperatura del sensore, ogni compensazione di temperatura risulta superflua.

Il <u>flussometro radiativo</u> è un nuovo sensore studiato per rilevare senza contatto i soli scambi per irraggiamento termico tra superfici a diversa temperatura. Viene incollato su un supporto come avviene per un estensimetro e rileva ogni scambio radiativo tra la superficie sensibile e l'ambiente circostante. Il coefficiente di sensibilità rimane lo stesso, siacheche vi sia assorbimento o emissione di irraggiamento termico. Un tale sensore rileva allo stesso tempo l'irraggiamento incidente proveniente dall'ambiente circostante e l'emissione propria del supporto; è un sensore di bilancio radiativo. <u>La tensione rilevata è positiva quando la densità di energia assorbita supera l'emissione propria. E' negativa nel caso contrario</u>.

E' un sensore di <u>squilibrio radiativo</u> poichè la tensione in uscita è nulla unicamente allo stato di equilibrio radiativo. La sua debole costante di tempo, inferiore a 50 millisecondi, permette di rilevare senza contatto ogni modifica dello stato di squilibrio radiativo tra la superficie del sensore e il suo ambiente.

Il bilancio degli scambi radiativi viene rilevato sulla superficie del sensore. Questo può perciò essere abbinato a dei sistemi di concentrazione dell'irraggiamento termico per poter portare sulla superficie sensibile l'irraggiamento proveniente da 'bersagli' o porzioni di spazio più o meno distanti. La tensione rilevata è allora proporzionale allo scarto tra la densità dell'irraggiamento incidente proveniente da una porzione di spazio e la densità dell'irraggiamento emesso dalla superficie attiva (emissione propria)- Vale a dire lo scarto tra la temperatura del sensore e la temperatura media "vista" dal concentratore di irraggiamento termico. Nella prima parte del nostro lavoro abbiamo condotto uno studio bibliografico con lo scopo di presentare la tecnologia dei sensori flussometrici e di raffrontarla a quella dei sensori del tipo semi-conduttori, piroelettrici o a ultrasuoni generalmente utilizzati nei sistemi tradizionali di sorveglianza passiva.

Quale che sia la tecnologia tradizionale utilizzata (sensore fotonico o sensore termico tradizionale), la grandezza rivelata è rappresentativa dell'irraggiamento termico incidente emesso dall'oggetto "osservato" e dal suo ambiente circostante, e non dipende che <u>dalla temperatura assoluta dell'ambiente che emette l'irraggiamento</u>. Questi sensori tradizionali sono puntuali e sono caratterizzati da una capacità di rilevamento caratterizzante <u>la potenza minima di irraggiamento rilevabile dal dispositivo</u> (misurano la quantità di irraggiamento infrarosso incidente emessa da una sorgente calda in movimento). Il loro principio si applica male al problema che ci è stato affidato, che consiste nel sorvegliare un'area di dimensioni finite (corridoio, locale o oggetto), con tuttavia la possibilità di muoversi e lavorare in una zona non sorvegliata nello stesso locale. La necessità di sorvegliare un volume ben definito non permette di utilizzare i sensori attuali associati a dispositivi tradizionali di focalizzazione.

Il flussometro radiativo in vece non è un sensore puntuale. E' un sensore che possiede una superficie attiva ben definita (che può tuttavia essere miniaturizzata e ridotta a qualche millimetro quadrato). La superficie sensibile è ricoperta da termoelementi **uniformemente distribuiti sulla superficie sensibile**. La differenza con i sensori tradizionali è che ognuno dei termoelementi fornisce una informazione rappesentativa di uno scambio radiativo istantaneo (la differenza tra la densità dell'irraggiamento incidente e l'emissione propria) e non dell'aumento della temperatura dell'elemento di superficie utilizzato per asorbire l'irraggiamento (che risulta dall'integrazione di un bilancio energetico).

In queste condizioni, ogni perturbazione degli scambi radiativi può essere rilevata senza ritardi e applicata alla sorveglianza passiva dello spazio "visto" dal concentratore di irraggiamento.

Fissare il flussometro radiativo su di un supporto dotato di forte inerzia permette di limitare le variazioni, in funzione del tempo, dell'emissione propria del sensore e successivamente di rilevare senza contatto e senza inerzia qualsiasi perturbazione degli scambi radiativi, anche rapidi, in funzione del tempo.

Il flussometro radiativo non è un elemento ottimizzato una volta per tutte e poi incapsulato in un involucro standardizzato. Possiede il vantaggio di poter essere adattato a qualsiasi configurazione sperimentale particolare.

All'origine stessa del progetto, all'inizio del 1995, le dimensioni minime dei flussometri messi a nostra disposizione dal laboratorio L.C.I., e quindi imposti per la nostra ricerca, non erano inferiori al centimetro quadrato. Questa condizione, che appariva come un handicap, ci è stata invece favorevole per sorvegliare delle superfici considerevali. La soluzione tecnica fu di disporre questi sensori a superficie non nulla all'interno di riflettori di tipo parabolico.

Ricordiamo che il nostro lavoro di tesi non è stato quello di analizzare un sensore di flusso radiativo, né di realizzare il miglior sensore possibile, ma piuttosto di convalidare un nuovo principio di rilevazione con lo scopo di svolgere una azione di dimostrazione in condizioni normali di utilizzo.

In una seconda parte abbiamo poi descritto la concezione e la realizzazione di due prototipi di sistemi parabolici. In pratica, per ragioni di costo, per non attenuare l'irraggiamento da rilevare abbiamo scelto di realizzare un riflettore metallico ricoperto da un microstrato d'oro per la realizzazione del primo prototipo di sistema di rilevamento. In questo capitolo abbiamo spiegato perché e come l'adeguato concentratore di irraggiamento infrarosso circolare o rettangolare adeguato debba essere scelto in funzione della grandezza del volume da sorvegliare (che va dall'oggetto singolo ad ampie zone di dimensioni finite), della distanza di rilevamento e del grado di sensibilità degli allarmi desiderati. Nella maggior parte delle applicazioni, la mobilità e la defocalizzazione del sensore rispetto al riflettore permettono che quest'ultimo venga interamente illuminato dal flusso radiativo incidente.

Grazie all'associazione tra flussometro planare e concentratore di irraggiamento termico ci è stato possibile rilevare qualsiasi modificazione dell'equilibrio termico di un volume ben definito, causata per esempio da un'intrusione umana in una zona sorvegliata.

Partendo da caratterizzazioni, numerose prove e risultati sperimentali presentati in una terza parte, abbiamo constatato che la precisione e la linearità dei sensori e dell'elettronica utilizzati non sono un intralcio dato che *non dobbiamo fare una misura di flusso*, ma effettuare *un rilevamento dello squilibrio termico*. Ciò significa che non viene misurato un livello di flusso per poi raffrontarlo ad una soglia di allarme, ma che sorvegliamo l'evoluzione della curva del segnale inviato dal sistema per assimilarlo ad una eventualmente intrusione in una zona controllata.

È stato constatato che, in funzione dell'angolo di puntamento e della distanza tra la sorgente infrarossa intrusa ed il sensore, il diagramma di sensibilità dei concentratori parabolici è definito diversamente e che occorre tener conto di queste caratteristiche prima di procedere qualsiasi installazione.

Abbiamo notato che maggiore è la distanza a cui deve avvenire il rilevamento, più l'energia è concentrata, vale a dire che questa si disperde meno angolarmente, cosa del tutto logica poiché la sorgente infrarossa diventa sempre più puntuale con il suo allontanamento. Il livello di rilevazione dipende certo dalla distanza dell'intrusione, ma anche dal numero di sensori e dalla velocità di spostamento dell'intruso. È stato constatato che a una distanza di almeno 4m i picchi (livelli) di rilevazione sono tanto più elevati quanto piu la velocità di intrusione è più lenta; questo si spiega con l'irraggiamento termico o lo squilibrio termico più elevato provocato dalla presenza più lunga dell'intruso nella zona sorvegliata.

L'applicazione consisteva nel poter rilevare una intrusione in un ambiente eventualmente sottomesso a perturbazioni (spostamenti umani, aria condizionata, apertura di porte, illuminazione...) Dato che il nostro sistema è costantemente in stato di squilibrio termico, che quest'ultimo si evolve costantemente in funzione delle variazioni di temperatura dell'ambiente, e che il sensore percepisce tutta la banda degli infrarossi medi, abbiamo basato il rilevamento <u>sulla variazione assoluta</u> del segnale fornito dal sensore in tempo reale e non su di un superamento di soglia.

Al momento di una intrusione, dovuta a una presenza umana o ad un oggetto materiale, si ottiene un picco positivo o negativo di forte ampiezza causato da una elevata variazione di flusso. Abbiamo allora stabilita *la rilevazione sulla base della misura di questa variazione di flusso* e non sulla base del superamento di un livello di flusso.

Il flussometro termico, che fornisce una informazione rappresentativa dello squilibrio energetico tra un sistema e il suo ambiente, è l'ideale per prendere in conto le elevate variazioni di carico termico provocate da intrusioni e tradurle in allarmi. Ogni variazione di temperatura causata da apporti o perdite di energia nel corso di una intrusione viene rilevata dal nostro sistema.

In teoria si pensa di poter rimpiazzare un oggetto, ad una certa temperatura, con un altro a temperatura uguale. In pratica è impossibile avere una stessa superficie omogenea in temperatura capace di introdursi in una zona sorvegliata a distanza.

E' stata condotta una serie di esperimenti per tentare di "ingannare" il nostro sistema di sorveglianza, ma senza successo. Abbiamo tentato di penetrare nella zona sorvegliata entrando molo rapidamente, a velocita normale, molto lentamente, con vestiti chiari o con vestiti scuri, con vestiti leggeri o pesanti, isolati con cartoni; il sistema ha rilevato ciascun tentativo di intrusione.

Dato che è praticamente impossibile conoscere la temperatura di ciascun punto della superficie occultata dall'intruso, e che la temperatura dell'intruso deve a essere uguale alla temperatura media della superficie che egli nasconde perchè il bilancio resti stabile, risulta estremamente difficile ingannare il nostro sistema.

Tutte le caratteristiche specifiche e i vantaggi che la nostra soluzione presenta ci permettono di dimostrare che il nostro sistema realmente rappresenta una soluzione nuova al problema della sorveglianza passiva e che risponde pienamente al problema postop inizialmente. Ma é importante sottolineare che il nostro sistema non individua un intrusione in base all'analisi degli infrarossi, ma solamente in base alla modifica dell'equilibrio termico nella zona controllata.

Dopo la registrazione del brevetto, al'inizio del 1996, a nome della Commissione della Comunitá Europee di questo sistema di sorveglianza a distanza per via termica, una applicazione concreta è stata proposta all'agenzia di controllo europea (EURATOM) e una prima installazione di prototipi è stata effettuata in un sito di stoccaggio di materie fissili.

I problemi riscontrati durante la regolazione *in situ* erano dovuti alle perturbazioni provocate dall'impianto di illuminazione e dal sistema di ventilazione dei locali da controllare. In effetti, il forte calore provocato dai faretti luminosi e la loro vicinanza alle parabole perturbavano considerevolmente la sorveglianza. Malgrado ciò, si è arrivati ad una regolazione delle soglie di allarme anche se queste non hanno potuto ancora essere qualificate nel tempo. Il controllo dei dati e la valutazione dei risultati ci permetterano di convalidare queste regolazioni.

Pensiamo dunque di essere riusciti ad applicare la flussometria al campo delle salvaguardie nucleari e che inoltre, grazie al continuo sviluppo tecnico ed alle prove realizzate in impianti reali con prototipi sperimentali, dovremmo riuscire a soddisfare le esigenze degli utilizzatori nel campo del controllo nucleare ed estendere l'utilizzo di questa tecnologia ad altri settori, come quello industriale, bancario, agricolo o dei beni culturali.

In effetti un progetto di valorizzazione di questa tecnologia, sostenuto dalla DGXIII a Lussemburgo, è in corso di realizzazione. Una collaborazione è stata stabilita con il Dipartimento di Patologia e di Riproduzione Animale della facoltà di Veterinaria dell' Università Autonoma di Barcellona, con lo scopo di effettuare degli "esperimenti orientativi" in un allevamento sperimentale. Si profila inoltre la possibilità di installare alcuni prototipi in un museo per provare le capacità di sorverglianza puntuale e di sperimentare il nostro dispositivo come sistema innovativo di sorveglianza.

## APPLICACIÓN DE LA FLUXIMETRÍA EN EL CAMPO DE LAS GARANTIAS NUCLEARES (Safeguards)

#### Tesis doctoral presentada en la Universidad de Ciencias y Technología de Lille

El tema de la tesis que se nos ha confiado es "<u>Applicación de los métodos</u> <u>fluximétricos en el campo de las Garantias Nucleares</u>" y se ha establecido dentro del programa "Gatantias y Manejo de materiales fisibles" del Centro Comunitario de Investigación de Ispra (Italia) de la Comisión de las Comunidades Europeas.

La energía nuclear se desarrolló en los años cuarenta con objetivos militares. Después de Hiroshima, los E.E. U.U. propusieron a las Naciones Unidas, recien creadas, la instauración de una comisión con el fin de establecer una autoridad internacional que controlara todo el material y actividades nucleares en el mundo.

Ha habido muchas iniciativas para reducir la proliferación de las armas nucleares, como el plan Baruch de las Naciones Unidas en 1946 basado en la total renuncia a lo nuclear, o la ley MacMahon, en los E.E. U.U., que prohibe la divulgación de secretos relativos a la energía atómica para conservar el monopolio y evitar la prolifaración. Aunque ciertas naciones como, Rusia en 1949 seguida de Gran Bretaña en 1952, Francia en 1960 y China en 1964 se hayan provisto de armas nucleares, el principio de no proliferación fue aceptado por la opinión comunitaria internacional. En vez de continuar desarollando esta energía con fines militares, se quiere utilizar esta "fuente de energía" increiblemente poderosa con fines pacíficos para la producción de electricidad.

Esto supuso, el traspaso obligado de ciertos conocimientos y tecnologías del ámbito militar al civil y de países dotados de armas nucleares a países que no las tenian.

Para asegurar este aporte con la garantía de un uso pacifico de estas tecnologías y materias exportadas, es necesario establecer un control y unas verificaciones gracias a unos acuerdos internacionales estipulados en el tratado de No Proliferación. Los primeros Acuerdos Bilaterales entre E.E.U.U. y los paises importadores, han permitido a los inspectores americanos realizar este control desde 1954. Más tarde en 1957 la transición del control de verificaciones se realizó a nivel mundial con la creación de la Agencia Internacional de Energía Atómica (A.I.E.A.) instalada en Viena. A nivel europeo, el sistema de garantias fué aceptado par los estados miembros con la firma del tratado EURATOM en 1957.

Francia y su industria civil, tanto por sus operaciones comerciales como por sus exportaciones, se somete al control de EURATOM. Francia esta clasificada como uno de los primeros países a nivel chundial en 10 concerniente a las posesiones nucleares (77% al menos) en la cuota cléctrica nacional. Esto le ha llevado a realizar un ciclo completo de

combustible que va desde la mina a la disminución de combustibles irradiados utilizados para cubrir sus propias necesidades nacionales y para el suministro a otros paises. Francia es consciente de sus responsabilidades particulares, tanto a nivel nacional para la seguridad pública como a nivel internacional en el ámbito de la proliferation nuclear, de ahi que el gobierno francés haya establecido un dispositivo de control nacional cuya autoridad es el "Haut Fonctionnaire de Défense" del Ministero de Industria y bajo el control del C.E.A. (Commissariat à l'Energie Atomique) para asegurar todas las protecciones que contempla el Sistema de Garantias Nucleares.

#### El concepto de Garantias (Safeguards) se basa en:

- <u>la declaración</u> hecha por un poseedor de materias nucleares (laboratorios, industria...) sobre los flujos de materias utilizadas y almacenadas y sobre inventarios, al sistema nacional de control de materias y a las autoridades internacionales (EURATOM y A.I.E.A.).
- <u>la verificación</u> de estas declaraciones y del informe pericial de materias por parte de las autoridades de control nacional e internacional.

Esta verificación se basa en el control de la contabilidad y la incertidumbre de la cantidad de materia debido a la imprecisión de medidos y cálculos hechos por el operador, y la disminución natural en las instalaciones.

La verificación se apoya en las medidas independientes del operador obligando frecuentemente a los inspectores a procurarse sistemas de medidas mediante muestras.

En cuanto a las medidas, se basan en el cálculo de la cantidad de materia, ya sea presente en una muestra, con la ayuda de métodos analíticos de tipo análisis químicos (medida destructiva), ya sea gracias a medidas nucleares, pudiendo ser una espectrometria gama, métodos de cálculo de neutrones, o incluso por calorimetria (medida no destructiva de la materia por la determinación del calor producido por una masa de plutonio conociendo su composición isotópica).

Se han tomado numerosas medidas para asegurarse del conocimiento permanente de una cantidad de materia establecida previamente. Esto se efectua con la ayuda de sistemas de celdas, de vigilancia fisica (asegurado por guardias) o monitorizando gracias a la utilización de cámaras y un abanico de sensores clásicos y conocidos.

En este contexto, el tema de la tesis se orienta hacia la aplicación de la fluximetría en al ámbito de Garantias Nucleares, particularmente para la vigilancia gracias a sistemas parabólicos asociados a sensores radiactivos. La asociación del sensor fluximétrico con un concentrador de radiación térmica es el objetivo de este trabajo. Un sistema de tratamiento electrónico ha sido asociado con el fin de crear un nuevo sistema de vigilancia pasiva basado en la detección de las variaciones de los intercambios radiactivos en función del tiempo. En cuanto a las fábricas de retirada y almacenamiento de productos nucleares han sido utilizadas numerosas técnicas, algunas de las cuales han sido citadas anteriormente con fines de control. Utilizar la técnologia "Fluximetría térmica" significa poder detectar y medir directamente todo intercambio de energía térmica por conducción, convección, radiación entre distintos medios a diferente temperatura. Es decir medir directamente y sin inercia todo calentamiento independientemente de su origen a partir de intercambios térmicos inducidos en el medio circundante. Esta tecnología introduce un nuevo modo de abordar los problemas de calorimetría y de detectar los calentamientos a distancia basados en las medidas de la densidad, de la radiación termica intercambiada. El tema es muy amplio y nuestro trabajo se ha limitado a una aplicación de la tecnología : la vigilancia pasiva basada en la detección de intercambios radiactivos.

Medir un flujo termico o radiactivo intercambiado entre un medio solido y su entorno significa caracterizar el estado de desequilibrio energético o radiactivo entre el medio y su entorno mediante la medida de intercambios térmicos o radiactivos.

El flujo térmico es positivo cuando el medio recibe energia y negativo en el caso contrario. La energia se intercambia a través de la superficie de separación entre los medios y el resultado de la medida es una densidad de flujo que se expresa en  $W/m^2$ . Un "fluxímetro" tiene la propiedad única de detectar con el mismo coeficiente de sensibilidad la densidad de energia intercambiada ya sea absorbida o eliminada a través de la superficie del sensor y esto independientemente del nivel de temperatura al que se efectue el intercambio. Siendo la sensibilidad, por definición, independiente de la temperatura del sensor, toda compensación de temperatura es superfua.

El fluxímetro radiactivo es un nuevo sensor introducido para detectar sin contacto los intercambios por radiación térmica entre superficies con diferentes temperaturas. Este fluxímetro se pega sobre un soporte al modo de galga extensiométrica y detecta todo intercambio radiactivo entre la superficie y el medio circundante. Este sensor detecta, al mismo tiempo, la radiación incidente y proveniente del medio circundante y la emisión propia del soporte, siendo el coeficiente de sensibilidad el mismo, ya haya absorción o emisión de irradiación térmica. Es un sensor de balance radiactivo. La tensión detectada, es positiva cuando la densidad de energia es superior a la propia emisión y negativa en caso contrario.

Es un sensor de **desequilibrio radiactivo** ya que la tensión de salida es nula unicamente en el equilibrio radiactivo. Su débil constancia de tiempo, inferior a 50 milisegundos permite detectar sin contacto toda modificación del estado de desequilibrio radiactivo entre la superficie del sensor y su entorno.

Siendo detectado el balance de los intercambios radiactivos en la superficie del sensor, este sensor puede asociarse a sistemas concentradores de radiación térmica permitiendo recoger en la superficie sensible la radiación que proviene de puntos o partes del espacio más o menos lejanos. La tensión detectada es, entonces, proporcional a la diferencia entre la intensidad de la radiación incidente proveniente de una parte del espacio y la densidad de la radiación emitida por la superficie activa (propia emisión) es decir, la diferencia entre la temperatura del sensor y la temperatura media "vista" por el concentrador de radiación térmica.

En la primera parte de nuestro trabajo hemos realizado un estudio bibliografico que tiene por objeto presentar la tecnologia de sensores fluximétricos y compararlos con detectores semi-conductores, piroelectricos o ultrasonidos utilizados, generalmente, en los sistemas tradicionales de vigilancia pasiva.

Cualquiera que sea la tecnología tradicional utilizada, (sensor fotonico o sensor térmico tradicional), la magnitud detectada es representativa de su radiación térmica incidente, emitida por el objeto que se quiere detectar y el entorno, y sólo depende **de la temperatura absoluta del medio que emite la radiación**. Los elementos detectores utilizados en la practica son puntuales y se caracterizan por una sensibilidad que **define la potencia mínima de radiación detectada por el dispositivo** (Miden la cantidad de radiación infrarroja incidente emitida por una fuente caliente en movimiento). Este principio se aplica mal al problema propuesto ya que se trata de vigilar una zona de dimensiones definidas (tipo pasillo, local u objeto) con la posibilidad, no obstante, de trabajar y circular en una zona no vigilada del mismo local. La necesidad de vigilar un volumen bien definido no permite utilizar los actuales sensores asociados a dispositivos de focalización tradicionales.

El fluxímetro radiactivo no es un sensor puntual, es un sensor con una superficie activa bien definida (que puede ser miniaturizada y reducida a pocos milimetros cuadrados). La superficie sensible se recubre de **termoelementos uniformemente distribuidos sobre esta superficie**. La diferiencia con los sensores tradicionales es que cada uno de estos termoelementos proporciona una información representativa de un intercambio radiactivo instantáneo (es decir, la diferencia entre la densidad de radiación incidente y la propia emisión) y no del aumento de temperatura de la parte de la superficie utilizada para absorber la radiación (que resulta de la integración de un balance energético).

En estas condiciones toda pertubación de los intercambios radiactivos puede ser detectada sin retraso y aplicada a la vigilancia pasiva del espacio "visto" por el concentrador de radiación.

Fijar el fluxímetro radiactivo a un soporte de fuerte inercia permite limitar las variaciones en función del tiempo de emisión propio del sensor y, como consecuencia detectar, sin contacto y sin inercia, toda perturbación de los intercambios radiactivos, incluso rápidos, en función del tiempo.

El fluxímetro radiactivo no es un componente llevado a su punto óptimo sin posibilidades de cambio y encapsulado en una caja estandardizada. Tiene la ventaja de poder adaptarse a cualquier configuración experimental particular.

Al inicio del proyecto, es decir, a principios del año 1995, las dimensiones mínimas de los fluxímetros propuestos por el laboratorio L.C.I. y, por lo tanto, impuestos para nuestro estudio, no podían ser inferiores a un centimetro cuadrado. Esta condición, que parecía una desventaja, ha resultado ser favorable para la vigilancia de grandes superficies y para aportar una solución al disponer estos sensores de superficie considerable, en los reflectores de tipo parabólico.

Recordemos que nuestro trabajo no es analizar un sensor de flujo radiactivo ni realizar el mejor sistema posible de detección, sino más bien validar un nuevo principio de detección para realizar una operación de demostración en condiciones normales de utilización.

Después, en una segunda parte, hemos descrito la concepción y la realización de dos prototipos de sistemas parabólicos. En la práctica, por razones de coste, para no atenuar la radiación que debemos detectar, hemos realizado un reflector metálico recubierto por una microcapa de oro para obtener nuestro primer prototipo de sistema de detección. En este capítulo se explica por qué y cómo el concentrador de radiacción infrarroja circular o rectangular adecuado, debe ser elegido en función de la magnitud de volumen que se quiere vigilar (desde un simple objeto a grandes zonas de dimensiones definidas), de la distancia de detección y del grado de sensibilidad de las alarmas deseadas. En la mayor parte de las aplicaciones, la movilidad y la desfocalización del sensor, con respecto al reflector, permite que éste sea completamente iluminado por el flujo radiactivo incidente.

Gracias a la asociación fluxímetro plano y concentrador de radiacción térmica, nos ha sido posible detectar toda modificación del desequilibrio térmico de un volumen bien definido causado, por ejemplo, por una intrusión humana en una zona vigilada.

Tras las caracterizaciones, las numerosas pruebas y los resultados experimentales, que se presentan en la tercera parte, hemos podido constatar que la precisión y la situacion lineal de los sensores y la electronica utilizados no son obligatorios ya que *no tenemos que medir el flujo* sino *detectar el desequilibrio térmico*. Es decir, que no vamos a medir el nivel de flujo para compararlo con la intensidad mínima necesaria con el fin de disparar una alarma sino que vamos a ver la evolución de la pendiente de la señal dada por el sistema para asimilar o no una intrusión en una zona vigilada.

Se ha constatado que, en función del angulo visual y la distancia entre la fuente infrarroja intrusa y el detector, el diagrama de sensibilidad de los concentradores parabólicos se define de forma diferente y que hay que tener en cuenta estas caracteristicas antes de realizar cualquier instalación.

Hemos observado que cuanto mayor es la distancia a la que se realiza una detección más se concentra la energia, es decir, que ésta se dispersa menos angularmente, lo cual es completamente lógico ya que la fuente infrarroja se hace cada vez más puntual con la distancia. El nivel de detección depende, ciertamente, de la distancia de intrusión pero también del número de sensores instalados, así como de la velocidad de desplazamiento del intruso. Hemos podido constatar que a una distancia de al menos 4m, los picos (niveles) de detección son mayores cuanto más lenta es la velocidad de intrusión: esto se explica por la radiación radiactiva o el desequilibrio térmico más importante provocado por una presencia más larga del intruso en la zona de vigilancia.

La aplicación consiste en poder detectar un intruso en un ambiente sometido eventualmente a perturbaciones (desplazamiento humano, aire acondicionado, puerta abierta, iluminación..). Dado que nuestro sistema se encuentra siempre en desequilibrio térmico, que evoluciona constantemente en funcion de las variaciones de temperatura del medio, y que el sensor vigila toda la banda de infrarrojo medio, hemos basado la detección en una variación absoluta de la señal emitida por el sensor en un tiempo real y no en un franqueamiento del umbral.

Cuando se produce una intrusión de una presencia humana o un objeto material, obtenemos un pico positivo o negativo de gran amplitud causado por una variación importante de flujo. Entonces, hemos establecido *una detección sobre lo medido de esta variación de flujo* y no sobre el franqueamiento de nivel de flujo.

El fluxímetro térmico que proporciona una información representativa del desequilibrio energético entre un sistema y su entorno es ideal para tener en cuenta las importantes variaciones de carga térmica provocadas por intrusiones y traducidas en alarmas. Toda variación de temperatura causada por el aporte o perdida de energia cuando se produce una intrusión, es detectado por nuestro sistema.

En teoria, pensamos poder remplazar un objeto por otro a una cierta temperatura. En la práctica es imposible tener una misma superficie de temperatura homogénea capaz de introducirse en una zona vigilada a distancia.

Una serie de experiencias han sido realizadas para intentar eludir nuestro sistema de vigilancia, pero han sido en vano. Hemos intentado penetrar en la zona de vigilancia entrando muy rápidamente, normalmente, lentamente, vestidos de negro o blanco, con más o menos ropa, isolados con cartones, pero el sistema ha detectado todos los tentativos de intrusión.

Dado que es casi imposible conocer la temperatura de cada punto de la superficie ocupada por el instruso y que la temperatura del intruso debe ser igual a esta temperatura media de la superficie que esconde con el fin de que el equilibrio térmico continue estable, es muy dificil eludir nuestro dispositivo.

Todas las caracteristicas especificas y las ventajas que presenta nuestra solución nos permiten constatar que, en efecto, nuestro nuevo sistema de vigilancia a distancia aporta una nueva solución al problema de la vigilancia pasiva y responde plenamente al problema propuesto inicialmente. Pero, es importante saber que nuestro sistema no realiza una detección por medio de un análisis de infrarrojos, sino solamente por una modificación del equilibrio térmico en la zona vigilada.

Después de haber depositado la patente, a principios de 1996 en nombre de la Comisión de Comunidades Europeas, del sistema de vigilancia a distancia por via térmica, la agencia de control europea (EURATOM) ha propuesto una aplicación concreta y se ha realizado una primera instalación de prototipos en un emplazamiento de almacenamiento de materias fisibles.

Los problemas que hemos encontrado realizando los ajustes "in situ" fueron debidos a la influencia de la iluminación y del sistema de ventilación de las solas que debiamos vigilar. En efecto, el calor fuerte emitido por los puntos luminoso y la débil distancia entre algunos de ellos y algunas parábolas perturban considerablemente la vigilancia. A pesar de esto, los niveles de las alarmas se han ajustado pero no han podido ser calificados en el tiempo. El control de los datos y una evaluación de los resultados nos permitira validar los ajustes.

Pensamos, entonces, que hemos conseguido aplicar la fluxímetría en el ámbito de las Garantias Nucleares, pero también que gracias a la continuación del desarrollo técnico y a partir de instalaciones en emplazamientos reales de prototipos experimentales, deberiamos lograr satisfacer a los utilitarios en el campo del control nuclear y extender el empleo de esta tecnología hacia otros campos como la industria, la banca, la agricultura o la cultura.

Por otra parte, está en curso de realización un proyecto de valorización de esta tecnología apoyado por la DG XIII de Luxemburgo. Se ha establecido una colaboración entre el Departamento de Patología y de Reproducción Animal de la Universidad Veterinaria Autonoma de Barcelona con el fin de seguir realizando "pruebas de orientación" en una granja experimental. Hemos proyectado instalar algunos prototipos en un museo para llevar a cabo la vigilancia puntual y probar nuestro dispositivo como medio innovador de vigilancia.

#### **GUILMAIN Pierre**

### APPLICATION OF HEAT FLUX TECHNOLOGY IN THE FIELD OF NUCLEAR SAFEGUARDS

Doctoral thesis presented at the Université des Sciences et Technologies of Lille (France)

The research work for this thesis has been aimed at the <u>"Application of heat flux</u> <u>methods to the field of nuclear safeguards"</u>. It has been conducted within the framework of the "Safeguards and Fissile Materials Management" programme at the Joint Research Centre of he European Commission in Ispra, Italy.

Nuclear energy was developed in the 1940's for military purposes. After Hiroshima, the United States of America submitted a plan to establish a "nuclear Committee" to the newly-born United Nations. Such Commission would have had the control of all the nuclear material and activities throughout the world.

Several initiatives have been taken in order to reduce the danger of proliferation of nuclear weapons. Among them the Baruch plan of 1946, at the United Nations level, which was based on the total renunciation to nuclear weapons, and the Mac Mahon Act in the US which denied the divulgation of nuclear secrets in order to maintain a monopoly and avoid proliferation. Although several countries have acquired nuclear weapons -the USSR in 1949, the UK in 1952, France in 1960 and later China in 1964 - the principle of non-proliferation has been accepted by the international public opinion. Instead of developing this 'new' kind of energy for military purposes, it would be used pacifically to produce electric power.

This involved the necessary transfer of know-how and technologies from the military sphere to the civilian industry and from 'nuclear weapon countries' to 'non-nuclear weapon countries'.

To make sure that such transfers occurred with the guarantee of the pacific intentions of those involved, it was necessary to establish a verification system stipulated by international agreements. The first bilateral agreements between the US and importer countries allowed American inspectors to carry-out such controls in 1954. These have then shifted to an international body, the International Atomic Energy Agency, created in 1957 and based in Vienna. On a global level, the Non proliferation Treaty of 1968 requires that nuclear activities be submitted to the control of the IAEA. At the European level, the safeguards system has been established by the signing of the EURATOM treaty of 1957.

In France, the civilian industry is submitted to the EURATOM system for its commercial operations and its exports. France is among the countries with the highest rate of nuclear produced electricity : 77% at least of total consumption. For this reason it has

developed a complete nuclear fuel cycle, from mining to the reprocessing of irradiated fuels, both for its internal needs and for the supply to third countries. Well conscious of this particular situation, and both for the security of the general public and for non proliferation concerns, the French government has established a national control system. It has been placed under the joint authority of the *Haut fonctionnaire de Défense* and the CEA (Commissariat à l'Energie Atomique).

#### The concept of Safeguards is based on:

• <u>The declaration</u> by the holder of nuclear materials (laboratories, industrial plants...) concerning flows and stocks of such materials on a given site, to national and international authorities (IAEA, EURATOM)

• The verification of the declarations and of the inventories by national and international control authorities.

This verification is based on the control of the material accounting, taking into consideration measurement errors and natural decay.

It is also based on independent verification, which means that inspectors need to carry sampling and measurement equipment.

The measurement themselves are based on the determination of the quantity of material present in a sample, either by classical chemical analysis (destructive assay) or by the combination of gamma-spectrometry and neutron counting or calorimetry (non-destructive assay).

Several means are used to ensure the *continuity of knowledge* about a given quantity of material. These range from seals, to physical surveillance (guards), to monitoring through cameras and sets of well-known sensors.

In this context, the subject of the thesis is about the application of heat-flux technology in the field of nuclear safeguards, and in particular surveillance through a radiative sensor associated to a parabolic reflector. <u>The association of a parabolic</u> thermal radiation concentrator to a heat-flux radiative sensor is the object of the work presented. An electronic signal processing system has been added to provide a new passive surveillance system based on the detection of the time-variations of radiative exchanges. Reprocessing plants and storage sites already use many of the surveillance techniques previously presented.

Using the technology of heat-flux sensors for the same purposes would allow the direct detection and measurement of any thermal exchange by conduction, convection or radiation, between environments at different temperatures. This means the possibility to measure directly and without inertia any warming process from the thermal exchange caused in the surrounding environment, independently form its origin. This technology introduces a new way to address calorimetry problems and to remotely detect any temperature change through the measurement of the density of the thermal radiation exchanged. The subject is vast and the work has been limited to one application of the technology: **Passive surveillance through detection of radiant exchanges.** 

To measure a thermal or radiant flux between an object and it surrounding environment means characterising the state of radiant or energetic disequilibrium between that object and the environment. This is done through the measurement of the thermal or radiant exchanges.

The EMF generated by a heat-flux sensor fixed to a wall represents the radiant and convective exchanges with the surrounding environment. The separation of these exchanges is interesting because the convective component depends on the radiant temperature of the wall to which the sensor is applied. The EMF is positive whenever the wall absorbs thermal radiation and negative when it emits. The great advantage consists in having a calibration coefficient which is independent of the sensor temperature. The detected EMF is zero only when the sensor temperature is the same as the radiant temperature on the wall. The sensor's small time constant, less than 50 milliseconds, allows the detection without contact of any modification of the state of thermal disequilibrium between the surface of the sensor and the surrounding environment.

The balance of the radiant exchanges being detected **at the surface** of the sensor, the latter can be associated to a system which concentrates the thermal radiation. This allows to bring to the sensor's surface the radiation coming from more or less remote targets or portions of space. The EMF detected is proportional to the gap between the density of the incident radiation coming from a portion of space and the density of the radiation emitted by the active surface (own emission): i.e. the difference between the sensor's temperature and the average temperature 'seen' by the parabolic thermal radiation concentrator.

A bibliographic study is presented in the first part of the work. Its aim is to introduce the technology of heat-flux sensors and to compare it to that of semi-conductor, pyroelectric or ultrasonic sensors traditionally used for passive surveillance purposes.

Whatever the traditional technology used (photonic or thermal sensor), the EMF measured is representative of the incident thermal radiation emitted by the object to be detected and by its environment. It depends exclusively on <u>the absolute temperature of the environment that emits the radiation</u>. The sensor elements used in practice are punctual and will only detect <u>the minimum radiation power detectable by the system</u>. (i.e. they measure the quantity of the incident infrared radiation emitted by a moving hot source). Their principle is ill-suited to the problem at issue, for the objective is to monitor a finite dimensions area (like a corridor or a room) with the possibility to move and work within an unmonitored portion of that same room. The necessity to monitor a well defined volume does not allow the use of traditional sensors associated to traditional focusing systems.

The radiant heat-flux sensor is not punctual. It has a well defined active surface (which can however be miniaturised and reduced to a few square millimetres). The sensor's surface is coated with thermoelements **evenly distributed**. The difference with traditional sensors is that each of the thermoelements will supply data representing an instant radiant exchange (i.e. the difference between the density of the incident radiation and its own emission), and not a rise of the temperature of the surface element used to absorb radiation.

In these conditions, any disruption of the radiant exchanges can be immediately detected and applied to the passive surveillance of the area 'seen' by the parabolic radiation concentrator.

Fixing the heat-flux sensor to a surface with a high inertia allows to limit the variations -over time- of its own emission and subsequently detect without contact nor inertia any disruption of radiant exchanges -even quick ones- over time.

The heat-flux sensor is not to be calibrated once and for all and then encapsulated in a standardised sealed casing. It has the advantage of flexibility: it can be adapted to whatever experimental configuration.

At the onset of the project, at the beginning of 1995, the minimum dimensions of the heat-flux sensors that could be supplied by the L.C.I. laboratory -and thus imposed for our study- could not be less than one square centimetre. This condition, which at first appeared as a handicap, was in fact an advantage to monitor large areas with the idea of placing them inside parabolic reflectors.

The aim of our study is not to analyse a heat-flux sensor nor to design the best monitoring system: it is to validate a new detection principle, having in mind an eventual demonstration in real operating conditions.

The second part of the thesis describes the design and the building of two prototypes of parabolic systems. In practice, to avoid the attenuation of the radiation, the parabolic reflector has been covered with a microcoating of gold for the first prototype. In that chapter we have explained why and how the infrared concentrator, circular or rectangular, had to be chosen according to the size of the volume to be monitored -from a simple object to very large areas of finite dimensions-, to the distance from the sensor and to the desired degree of sensitivity of the alarms. In most applications, the mobility and the defocalisation of the sensor with respect to the reflector allow it to be entirely *illuminated* by the incident radiative flux.

Thanks to the combination of a flat heat-flux sensor and a thermal radiation concentrator, it has been possible to detect any modification of the thermal equilibrium of a well defined volume caused, for instance, by a human intrusion.

From the numerous tests and experimental results presented in the third part of the thesis, we have noticed that the precision and the linearity of the sensors and the electronics used are not constraining. The reason is that we are not to measure a flux but we are detecting a thermal disequilibrium. In other words we are not measuring a level of flux to compare it to a threshold to trigger an alarm: we are instead looking at the evolution of the slope of the signal delivered by the system and decide whether it can be assimilated to an intrusion in a monitored area.

It has been noticed that the diagram of sensitivity of the parabolic concentrator varies in function of the width of the *angle of vision* of the detector and the distance of the

intruding infrared source. These characteristics need to be taken into account before any installation.

We have further noticed that the more distant the intrusion occurs the more concentrated the energy is, i.e. it is less angularly dispersed, which is entirely logical for the infrared source becomes more punctual when the distance increases. The level of detection depends on the distance at which the intrusion occurs, but also on the number of sensors and the speed at which the intruding source moves. It has been noticed that at a distance of at least 4 metres the peaks (levels) of detection are higher when the speed of the intruder is low: this is explained by a larger thermal disequilibrium caused by the prolonged presence of the intruder in the monitored area.

Our application aimed at detecting an intrusion in an environment subject to perturbations (human movement, air conditioning, opening of doors, lights switched on and off..)

Our system is always in a state of disequilibrium. Given that this state constantly evolves in function of the temperature of the surrounding environment, and that the sensor *sees* the entire infrared middle band, we have based the detection <u>on the absolute variation</u> of the signal delivered by the sensor in real time, and not on the crossing of a threshold.

During an intrusion by a human or an object, we obtain a peak, positive or negative, caused by an important variation of flux. The detection of the intrusion has been based *on that variation of flux* and not on the crossing of a threshold.

The heat-flux sensor which provides a representative information of the energetic disequilibrium between a system and its environment, is ideal to take into account the important variations of the thermal charge when an intrusion occurs and translate them into the triggering of an alarm. Any variation of temperature caused by the gain or loss of energy in the event of an intrusion, is detected by our system.

In theory one would think it possible to replace an object at a certain temperature with another one. In practice it is impossible to have a surface with a homogeneous temperature intruding into a monitored area.

A number of experiments has been carried-out, with the intent of frauding our system. None has succeeded. We have tried to penetrate the monitored area in different fashions: quickly, slowly, casually, with dark clothes, with light clothes, with thermal isolation. The system has detected every intrusion attempt.

Given that it is almost impossible to know the exact temperature of each and every point of the surface *hidden* by the intruder, and that he should have the same average temperature as the surface he hides to maintain the thermal balance, it is very hard to fraud our system.

The specific characteristics and the advantages of our solution make our new system of passive surveillance a good answer to the problem posed initially. It is important to keep in mind that the detection capacity of our system is not based on infrared analysis, but on the modification of the thermal balance in the monitored area.

After the registration of a patent in the name of the European Commission, at the beginning of 1996, a concrete application of our system has been invited by the European Safeguards Directorate and the installation of prototypes in a fissile materials storage site has been carried-out.

The problems encountered during the installation were mainly due to the lighting system and the air ventilation of the rooms to be monitored. The intense heat of the spot lights and their closeness to our sensors could cause some serious disruption of the surveillance. Nonetheless the alarm levels have been calibrated, though there has not been an opportunity to time-test them so far. The review of data and an evaluation of the first results will give us that opportunity and validate the settings.

We think we have succeeded in applying heat-flux technology in the field of nuclear safeguards, and that thanks to the continuation of tests and the further development of the techniques we shall manage to satisfy users in the area of nuclear control. Such technology could also be applied to other fields like the general industry, the banking sector or agriculture.

A valorisation project concerning this technology is being supported by the DGXIII in Luxembourg. Contacts have been established with the Animal Production and Pathology Department of the Universitat Autonoma de Barcelona and field tests are being conducted in an experimental farm. It has also been envisaged to install some prototypes in a museum to carry-out punctual monitoring and to test our device as an innovative surveillance system.

# SOMMAIRE

# INTRODUCTION

## **CHAPITRE 1: RAPPELS THEORIQUES**

| 1.1. | LES ECHANGES THERMIOUES                          |  |      |  |  |
|------|--|--|------|--|--|
|      | 1.1.1.   | La conduction thermique  | 41   |  |  |
|      | 1.1.2.   | Le fluxmètre à paroi auxiliaire                                    | 42   |  |  |
|      | 1.1.3.   | Caractéristique essentielle d'un fluxmètre thermique               | 44   |  |  |
|      | 1.1.4.   | Fluxmètres thermiques à gradient tangentiel                        | 45   |  |  |
|      | 1.1.5.   | Les échanges d'énergie détectés par un fluxmètre thermique         | 48   |  |  |
| 1.2. | RAYONNEMENT THERMIQUE INFRAROUGE                 |  |      |  |  |
|      | 1.2.1.   | Les lois physiques du rayonnement                                  | - 50 |  |  |
|      |  | 1.2.1.1. La loi de Stefan-Boltzmann                                | 51   |  |  |
|      |  | 1.2.1.2. La loi de Planck  | 52   |  |  |
|      |  | <b>1.2.1.3.</b> La loi de Wien                                     | 53   |  |  |
|      | 1.2.2.   | Echanges radiatifs   | 53   |  |  |
|      | 1.2.3.   | Mesure des échanges radiatifs                                      | 54   |  |  |
|      | 1.2.4.   | Rappels sur les capteurs d'échange radiatif                        | 56   |  |  |
|      | 1.2.5.   | Les capteurs de rayonnement basés sur la mesure de flux thermique  | 58   |  |  |
|      | 1.2.6.   | La détection au rayonnement infrarouge                             |      |  |  |
|      |  | 1.2.6.1. La source de radiation                                    | 62   |  |  |
|      |  | <b>1.2.6.2.</b> Domaine de propagation                             | 64   |  |  |
|      |  | <b>1.2.6.3.</b> Systèmes de concentration infrarouge               | 64   |  |  |
| 1.3. | LES CARACTERISTIQUES ET TYPES DE DETECTEURS I.R. |  |      |  |  |
|      | 1.3.1.   | Caractéristiques des détecteurs                                    | 71   |  |  |
|      |  | 1.3.1.1. Le temps de réponse                                       | 72   |  |  |
|      |  | 1.3.1.2. La réponse spectrale                                      | 72   |  |  |
|      |  | 1.3.1.3. La sensibilité  | 74   |  |  |
|      |  | 1.3.1.4. La responsivité   | 74   |  |  |
|      |  | <b>1.3.1.5.</b> N.E.P.   | 74   |  |  |
|      |  | 1.3.1.6. Détectivité normalisée D*                                 | 74   |  |  |
|      | 1.3.2.   | Types de détecteurs I.R.   |      |  |  |
|      |  | 1.3.2.1. Les détecteurs quantiques ou "quanta"                     | 76   |  |  |
|      |  | 1.3.2.1.1. Généralités   | 76   |  |  |
|      |  | <b>1.3.2.1.2.</b> Les détecteurs photoélectriques ou photoémissifs | 77   |  |  |
|      |  | <b>1.3.2.1.3.</b> Les détecteurs photoconductifs                   | 77   |  |  |
|      |  | 1.3.2.1.4. Les détecteurs photovoltaïques                          | 79   |  |  |
|      |  | 1.3.2.1.5. Les détecteurs photoélectromagnétiques                  | 81   |  |  |
|      |  | 1.3.2.2 Les détecteurs thermiques                                  | 81   |  |  |
|      |  | 1 3.2.2.1. Généralités   | 81   |  |  |

|      | 1.3.2.2.2. Le bolomètre  | 84  |
|------|--|-----|
|      | 1.3.2.2.3. Le détecteur "pneumatique"  | 85  |
|      | 1.3.2.2.4. Le détecteur pyroélectrique   | 85  |
|      | 1.3.2.2.5. La thermopile   | 88  |
|      | 1.3.2.2.6. Le fluxmètre thermique  | 89  |
|      | 1.3.2.3. Le détecteur hyperfréquence   | 91  |
|      |  | 1.  |
|      | <b>1.3.3.</b> Le choix du fluxmetre radiatif et son positionnement dans les systèmes ( | 1e  |
|      | suivemance.  | 92  |
| СНА  | PITRE 2:CONCEPTION ET REALISATION DU SYSTEME PARABOLI                                  | QUE |
|      | <b>DE DETECTION " SYCLOP "</b>   |     |
| 2.1. | INTRODUCTION   | 93  |
|      | 2.1.1. Présentation du problème  | 93  |
|      | 2.1.2. Evocation des solutions aujourd'hui disponibles                                 | 93  |
|      | 2.1.3. Solution proposée   | 94  |
| 22   | SOURCE LAMBERTIENNE ET SYSTEMES D'INTEGRATION  | 95  |
| 2.2. | SUGNEL ENVIDENTIENNE ET STSTEMES D'INTEGNATION.  | ) j |
| 2.3. | CHOIX DU MIROIR  | 96  |
| 2.4. | BILANS RADIATIFS   | 98  |
|      | 2.4.1. Facteur d'angle   | 99  |
|      | 2.4.2. Evaluation des facteurs de forme pour notre dispositif                          |     |
|      | installé   | 101 |
| 2.5. | PRINCIPE DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL  | 105 |
|      | <b>2.5.1.</b> Première application: détection d'intrusion humaine dans des zones       |     |
|      | protégées  |     |
|      | <b>2.5.1.1.</b> Etude du concentrateur de type parabolique                             | 105 |
|      | 2.5.1.1.1. Principe du dispositif expérimental   | 105 |
|      | 2.5.1.1.2. Etude du réflecteur   | 106 |
|      | 2.5.1.1.2.1. Parabolisation d'un miroir sphérique                                      | 106 |
|      | 2.5.1.1.2.2. Optimisation d'un miroir circulaire                                       | 108 |
|      | 2.5.1.1.3. Exemple de réglages pour la parabole rectangulaire                          |     |
|      | polyvalente  | 112 |
|      | <b>2.5.2</b> Seconde application: surveillance de conteneur de Plutonium individuel    |     |
|      | 2.5.2.1 Etude du concentrateur parabolique   | 114 |
|      |  |     |
| 2.6. | CARACTERISATION DU REFLECTEUR  |     |
|      | <b>2.6.1.</b> Choix du matériau utilisé  | 119 |
|      | 2.6.2. Procédé de fabrication du concentrateur   | 126 |
|      | <b>2.6.2.1.</b> Fabrication du concentrateur rectangulaire de type parabolique         | 126 |
|      | <b>2.6.2.2.</b> Fabrication du concentrateur parabolique                               | 126 |
|      | 2.6.3. Influence de la rugosité d'une surface sur la réflexion des infrarouges         |     |
|      | 2.6.3.1. Introduction  | 127 |
|      | 2.6.3.2. Rappel de notions théoriques  | 127 |
|      | 2.6.3.3. Principe de mesure  | 129 |
|      | 2.6.3.3.1. Echantillons "Rugotest"   | 129 |
|      | 2.6.3.3.2. Le eser Monopoint   | 130 |
|      |  |     |

|                   | <ul><li>2.6.3.3.3. Le Perthometer</li><li>2.6.3.3.4. Types de surfaces étudiées et essais obtenus par le Perthometer</li></ul>           | 130<br>132 |
|-------------------|--|------------|
| 2.7.              | CARACTERISATIONS ELECTRIQUES DU MONTAGE CAPTEUR-<br>AMPLIFICATEUR<br>2.7.1. Gain et linéarité de l'amplificateur                         | 135<br>136 |
|                   | 2.7.2. Temps de reponse et tension de bruit de l'amplificateu<br>différentiel<br>2.7.3. Tension de bruit du centour (tension de bruit de | r<br>136   |
|                   | l'amplificateur  | 137        |
|                   | 2.7.4. Temps de réponse  | 140        |
| 2.8.              | N.E.P.   | 141        |
| 2.9.              | CONCLUSION   | 143        |
| CITAT             |  |            |
| CHAI              | SURVEILLANCE "SYCLOP"  |            |
| 3.1.              | RÉGLAGE DU GAIN  | 144        |
| 3.2.              | TEMPS DE REPONSE DU SYSTEME  | 147        |
| 3.3.              | CARACTERISATION EN FREQUENCE DU SYSTEME  |            |
|                   | 3.3.1. Caractérisation spectrale du capteur radiatif seul  | 149        |
|                   | 3.3.2. Caractérisation spectrale du détecteur muni du réflecteur parabolique   | 150        |
| 3.4.              | DIAGRAMME DE DISPERSION  | 151        |
| 3.5.              | DESCRIPTION DES INSTALLATIONS EXPERIMENTALES   |            |
|                   | <b>3.5.1.</b> Relevé d'un signal fourni par une parabole en mesure directe   | 160        |
|                   | 3.5.1.1. Etalonnage et linearite des Newports Infinity   | 161        |
|                   | 3.5.1.2. Influence de la longueur de cable   | 163        |
| 26                | <b>5.5.2.</b> Lecture et enregistrement de plusieurs signaux   | 107        |
| <b>J.0.</b><br>27 | STADILITÉ EN TEMDÉDATUDE   | 109        |
| 3.7.              | STABILITÉ DANS LE TEMPS  | 182        |
| 3.0.              | RELEVÉS DE DÉTECTION DANS DES VOI UMES IMPORTANTS AVEC   | 102        |
| J./.              | LE CONCENTRATEUR RECTANGULAIRE   | ,          |
|                   | <b>3.9.1.</b> Corps noir en référence  | 185        |
|                   | <b>3.9.2.</b> Détection de différents types d'intrusion  | 188        |
|                   | <b>3.9.3.</b> Surveillance d'un couloir dans le laboratoire de simulation  | 190        |
| 3.10.             | SURVEILLANCE PONCTUELLE D'UN POT DE PLUTONIUM AVEC LE  |            |
|                   | CONCENTRATEUR CIRCULAIRE   |            |
|                   | 3.10.1. Simulation des pots de Plutonium   | 194        |
|                   | <b>3.10.2.</b> Surveillance d'un pot   | 196        |
| 3.11.             | NIVEAU D'ALARME ET POSSIBILITÉ DE FRAUDER LE SYSTÈME   |            |
|                   | 3.11.1. Niveau d'alarme (principe de détection sur une pente de signal)  | 204        |
|                   | 3.11.2. Frauder la surveillance  | 207        |
| 3.12.             | RESISTANCE AUX RADIATIONS  | 208        |
| 3.13.             | PRE-QUALIFICATIONS DU SYSTEME SOUS CONTRAINTES DE  |            |
|                   | L'ENVIRONNEMENT  | 210        |

| 3.14.                              | INSTALLATION DANS UN SITE DE STOCKAGE DE MATIERES F                                    | ISSILES |  |  |
|------------------------------------|--|---------|--|--|
|                                    | POUR LES INSPECTEURS DE L'EURATOM  | 213     |  |  |
|                                    | 3.14.1. Introduction   | 213     |  |  |
|                                    | <b>3.14.2.</b> Principe du réglage des alarmes pour les détections d'intrusion humaine |         |  |  |
|                                    | dans une zone surveillée   | 213     |  |  |
|                                    | 3.14.3. Résultats expérimentaux  | 227     |  |  |
| 3.15.                              | INSTALLATION DANS UNE FERME EXPERIMENTALE  |         |  |  |
|                                    | 3.15.1. Introduction   | 229     |  |  |
|                                    | <b>3.15.2.</b> Objectif de l'essai   | 229     |  |  |
|                                    | 3.15.3. Relevés de température corporelle  | 231     |  |  |
|                                    | 3.15.4. Installation dans une ferme expérimentale                                      | 233     |  |  |
| CONCLUSION                         |  | 238     |  |  |
| BIBLIOGRAPHIE<br>LISTE DES FIGURES |  | 241     |  |  |
|                                    |  | 244     |  |  |
| ANNEXES                            |  |         |  |  |

•

-

# **INTRODUCTION**

L'énergie nucléaire a été développée dans les années quarante avec des objectifs militaires. Après Hiroshima, les Etats-Unis d'Amérique ont proposé aux Nations Unies, tout juste nées, l'instauration d'une Commission afin d'établir une autorité internationale ayant le contrôle sur tout le matériel et les activités nucléaires à travers le monde.

Plusieurs initiatives ont été prises pour réduire le danger de la prolifération de l'arme nucléaire telles que le plan Baruch au niveau des Nations Unies en 1946, basé sur le renoncement total au nucléaire, ou la loi Mac Mahon aux USA interdisant la divulgation de secrets sur l'énergie atomique pour conserver le monopole et éviter la prolifération. Même si certaines grandes nations telles que la Russie en 1949, suivie de la Grande-Bretagne en 1952, la France en 1960 et plus tard, en 1964, la Chine, se sont dotées d'armes nucléaires, le principe de non-prolifération fut accepté par l'opinion commune internationale. Au lieu de continuer à développer cette nouvelle énergie à des fins militaires, il s'est dégagé une volonté d'utiliser "cette source d'énergie" incroyablement puissante dans une utilisation pacifique pour la production d'électricité.

Cela comportait le passage obligé de certaines connaissances et technologies du domaine militaire vers le civil et de pays dotés d'armes nucléaires vers des pays qui ne l'avaient pas.

Pour assurer ce passage avec la garantie d'utilisation pacifique de ces technologies et matières exportées, il a été nécessaire d'établir un contrôle et des vérifications grâce à des accords internationaux et stipulés dans le traité de Non-Prolifération. Les premiers Accords Bilatéraux entre les USA et les pays importateurs ont permis le contrôle par des inspecteurs américains dès 1954. Puis la transition du contrôle des vérifications s'est faite au niveau mondial par la création de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (A.I.E.A.) installée à Vienne depuis 1957. Au niveau européen, le système des garanties est accepté par les Etats membres avec la signature du Traité EURATOM en 1957.

La France et son industrie civile, pour ses opérations commerciales aussi bien que pour ses exportations, se soumettent au contrôle d'Euratom. La France se classe dans les premiers au rang mondial en ce qui concerne la part du nucléaire (77% au moins) dans le bilan électrique national. Elle a été ainsi amenée à se doter d'un cycle du combustible complet allant de la mine au retraitement des combustibles irradiés utilisé à la fois pour ses besoins nationaux et pour la fourniture de services aux autres pays. Compte tenu de cette situation et conscient de ses responsabilités particulières, tant au plan national pour la sécurité du public qu'au plan international dans le domaine de la non-prolifération nucléaire, le gouvernement français a mis en place un dispositif de contrôle national placé sous l'autorité du Haut Fonctionnaire de Défense du ministère chargé de l'industrie et sous le contrôle du C.E.A.(Commissariat à l'Energie Atomique) pour assurer toutes les protections entrant dans le système des Garanties Nucléaires.
# Le concept des Garanties (Safeguards) est basé sur :

- <u>la déclaration</u> faite par un détenteur de matières nucléaires (laboratoires, industries...) sur ses flux de matières utilisées et stockées dans un site, et sur des inventaires au système national du contrôle de matières puis aux autorités internationales (EURATOM et A.I.E.A.).
- <u>la vérification</u> de ces déclarations et de bilans expertisés de matière par les autorités de contrôle nationales et internationales.

Cette vérification est fondée sur le contrôle de ces déclarations et du bilan matière, tenant compte de l'incertitude sur la quantité de la matière due à l'imprécision des mesures et des calculs faits par l'opérateur, et à la dépendition naturelle dans l'installation.

La vérification s'appuie sur des mesures indépendantes de l'opérateur obligeant les inspecteurs à se munir fréquemment de systèmes de mesures par échantillonnage.

Les mesures, quant à elles, sont basées sur l'établissement de la quantité de matière présente dans un échantillon, soit à l'aide de méthodes analytiques du type analyses chimiques (méthode destructive), soit généralement grâce à des mesures nucléaires pouvant être une spectrométrie gamma, des méthodes de comptage de neutrons, ou encore par calorimétrie (mesure non destructive de la matière par la détermination de la chaleur produite par une masse de plutonium en connaissance de sa composition isotopique).

De nombreuses mesures sont établies aussi pour s'assurer de la connaissance permanente d'une quantité de matière définie au préalable. Cela s'effectue à l'aide de systèmes de scellés, de surveillance physique (assurée par des gardes) ou encore par du "monitoring" grâce à des caméras et à un éventail de capteurs classiques et bien connus.

Le travail de thèse qui nous a été confié se situe dans ce contexte et a pour thème "<u>Application des méthodes fluxmétriques au domaine des Garanties Nucléaires</u>".

Utiliser la technologie "fluxmètres thermiques" c'est pouvoir détecter et mesurer directement tout échange d'énergie thermique par conduction convection rayonnement entre milieux à température différente. C'est-à-dire mesurer directement et sans inertie tout échauffement indépendemment de son origine à partir des échanges thermiques induits dans le milieu environnant. Cette technologie introduit une façon nouvelle d'aborder les problèmes de calorimétrie ou de détecter les échauffements à distance basés sur la mesure de la densité de rayonnement thermique échangé. Le sujet est très vaste et notre travail a été limité à une application de la technologie : <u>la surveillance passive basée sur la</u> <u>détection des échanges radiatifs.</u>

Mesurer un flux thermique ou radiatif échangé entre un milieu solide et son environnement c'est caractériser l'état de déséquilibre énergétique ou radiatif entre le milieu et son environnement par la mesure des échanges thermiques ou radiatifs.

Le flux thermique est positif lorsque le milieu reçoit de l'énergie au milieu solide et négatif dans le cas inverse. L'énergie est échangée à travers toute la surface de séparation entre les milieux et le résultat de la mesure est <u>une densité de flux qui s'exprime en</u>  $W/m^2$ . Un "fluxmètre" a la <u>propriété</u> unique de détector avec le même coefficient de sensibilité la densité d'énergie échangée qu'elle soit absorbée ou émise à travers la surface

du capteur et ceci <u>indépendemment du niveau de température auquel s'effectue</u> <u>l'échange</u>. La sensibilité étant par définition indépendante de la température du capteur toute compensation de température est superflue.

Le <u>fluxmètre radiatif</u> est un capteur nouveau introduit pour détecter sans contact les seuls échanges par rayonnement thermique entre surfaces à température différente. Il se colle sur un support à la manière d'une jauge de contrainte et détecte tout échange radiatif entre sa surface sensible et le milieu environnant. Le coefficient de sensibilité étant le même qu'il y ait absorption ou émission de rayonnement thermique, un tel capteur détecte en même temps le rayonnement incident en provenance du milieu environnant et l'émission propre du support, c'est un capteur de bilan radiatif. <u>La tension détectée est positive</u> lorsque la densité d'énergie absorbée est supérieure à l'émission propre et négative dans le cas inverse.

C'est un capteur de <u>déséquilibre radiatif</u> puisque la tension de sortie est nulle uniquement à l'équilibre radiatif. Sa faible constante de temps, inférieure à 50 millisecondes permet de détecter sans contact toute modification de l'état de déséquilibre radiatif entre la surface du capteur et son environnement.

Le bilan des échanges radiatifs étant détecté **sur la surface du capteur**, le capteur peut être associé à des systèmes concentrateurs de rayonnement thermique permettant d'amener sur la surface sensible le rayonnement en provenance de cibles ou portions d'espace plus ou moins éloignées. La tension détectée est alors proportionnelle à l'écart entre la densité de rayonnement incident en provenance d'une portion d'espace et la densité de rayonnement émis par la surface active (émission propre) c'est-à-dire à l'écart entre la température du capteur et la température moyenne "vue" par le concentrateur de rayonnement thermique.

<u>L'association "fluxmètre radiatif-concentrateur de rayonnement thermique"</u> fait l'objet du travail présenté. Un système de traitement électronique a été associé en vue de proposer un nouveau système de surveillance passive basé sur la détection des variations en fonction du temps des échanges radiatifs.

Dans la première partie, nous présentons une étude bibliographique ayant pour objet de présenter la technologie fluxmètre thermique et radiatif et de la comparer avec les détecteurs utilisables pour la surveillance passive.

Quelle que soit la technologie traditionnelle utilisée (capteur photonique ou capteur thermique traditionnel), la grandeur détectée est représentative de son rayonnement thermique incident émis par l'objet à détecter et le milieu environnant et ne dépend que de <u>la température absolue du milieu émettant le rayonnement</u>. Les éléments détecteurs utilisés en pratique sont ponctuels et sont caractérisés par une détectivité caractérisant <u>la puissance minimale de rayonnement détectable par le dispositif</u>.

Le fluxmètre radiatif n'est pas un capteur ponctuel c'est un capteur ayant une surface active bien définie (qui peut cependant être miniaturisée et réduite à quelques millimètres carrés). La surface sensible est recouverte de thermoéléments <u>uniformément distribués</u> <u>sur la surface sensible</u>. La différence avec les détecteurs traditionnels est que chacun des thermoéléments fournit une information représentative d'un échange radiatif instantané (c'est-à-dire de la différence entre la densité de rayonnement incident et l'émission propre) et non de l'augmentation de température de l'élément de surface utilisé pour absorber le rayonnement (qui résulte de l'intégration d'un bilan énergétique). Dans ces conditions, toute perturbation des échanges radiatifs peut être détectée sans retard et appliquée à la surveillance passive de l'espace "vu" par le concentrateur de rayonnement.

Fixer le fluxmètre radiatif sur un support de forte inertie permet de limiter les variations en fonction du temps de l'émission propre du capteur et par suite de détecter sans contact et sans inertie toute perturbation des échanges radiatifs même rapide en fonction du temps.

Le fluxmètre radiatif n'est pas un composant optimisé une fois pour toutes et encapsulé dans un boîtier standardisé. Il a l'avantage de pouvoir être adapté à toute configuration expérimentale particulière.

Le signal obtenu peut être analysé en utilisant les techniques de traitement du signal. Une technique de filtrage et de dérivation numérique a été développée afin d'obtenir un système de surveillance passive de grande sensibilité. Les performances de l'ensemble du système ont été caractérisées in situ. La fiabilité du dispositif réalisé permettant d'envisager des applications dans le domaine de la surveillance des matières fissiles. L'ensemble des résultats obtenus a conduit au dépôt d'un brevet d'invention. La technologie fait actuellement l'objet d'un suivi sous le contrôle de l'EURATOM dans un site de stockage de matières fissiles.

# **CHAPITRE 1**

# **RAPPELS THEORIQUES : Etude bibliographique**

Mettre en oeuvre la technologie "fluxmètres thermiques" c'est permettre à tout expérimentateur de mesurer les échanges thermiques par conduction, convection ou rayonnement, c'est-à-dire :

- introduire des capteurs pour détecter quantitativement tout apport énergétique à partir des transferts thermiques induits dans le milieu environnant,

- introduire la capacité de réagir sans retard puisque les limitations dues à l'inertie thermique des détecteurs de température traditionnels sont éliminés permettant d'éliminer l'inertie thermique, il n'est plus utile d'utiliser des capteurs ponctuels d'inertie thermique réduite au maximum.

Tout apport ou génération d'énergie (matière fissile) provoque un échange thermique des régions à température élevée où est localisé l'apport vers les régions à température plus faible. Le transfert d'énergie thermique est un processus autorégulant naturel qui tend à provoquer le retour à l'équilibre thermique. Détecter un échange thermique c'est obtenir une information énergétique **représentative de l'évolution globale d'un système** vers son équilibre énergétique. Nous allons dans une première partie introduire la technologie fluxmètres thermique et radiatif en relation avec la description traditionnelle des échanges de chaleur.

Les principaux modes de transmission de chaleur sont : (Réf. 1)

- La conduction

- La convection

- Les changements d'état

- Le rayonnement

#### **1.1. LES ECHANGES THERMIQUES**

#### 1.1.1. La conduction thermique

Dans ce mode de transmission, la chaleur se transmet de proche en proche dans tout le milieu des parties chaudes vers les parties les plus froides. L'énergie se propage par contact direct sans déplacement de molécules, on dit que la chaleur progresse sans mouvement de matière. Ce mode de transfert est le seul qui permette à la chaleur de s'écouler dans les corps solides opaques au rayonnement. Les échanges d'énergie par conduction thermique sont décrits par la loi de Fourier:

$$\varphi = -\lambda \cdot \nabla \theta \qquad (\text{Réf.1}) \qquad (1)$$

avec  $\phi$ : densité de flux de chaleur en W/m<sup>2</sup>  $\lambda$ : conductivité thermique en W/K.m  $\nabla \theta$ : le gradiant de température en °/m

Cette relation montre clairement que l'échange d'énergie dans un milieu ou entre deux milieux est décrit par un échange d'énergie par unité de surface, c'est-à-dire par une **densité d'énergie**. Suivant la loi de Fourier, densité de flux et gradient de température sont des grandeurs proportionnelles. Tout échange d'énergie provoque un gradient de température et **mesurer une densité de flux revient à détecter un gradient de température**, c'est-à-dire une différence de température par unité de longueur dans la direction des lignes de flux thermique.

#### 1.1.2. Fluxmètre à paroi auxiliaire

La façon la plus simple de mesurer une densité de flux thermique consiste à mesurer la différence de température moyenne suivant l'épaisseur d'une paroi auxiliaire de faible épaisseur puisque dans ce cas particulier la relation précédente s'écrit sous la forme :

$$\phi = -\lambda \frac{\Delta T}{e}$$
 (Réf.1) (2)

 $\phi$ : densité de flux en W/m<sup>2</sup>

 $\lambda$  : conductivité thermique de la paroi auxiliaire,W/mK

 $\Delta T$ : différence de température suivant l'épaisseur de la paroi auxiliaire (K),

e : épaisseur de la paroi auxiliaire (m).

Mesurer la densité de flux moyenne sur la surface du capteur revient à mesurer la différence de température moyenne  $\Delta T$  induite par le passage de la chaleur suivant l'épaisseur de la paroi auxiliaire.



Figure 1 - Fluxmètre à paroi auxiliaire (Réf. 18)

ः

On utilise pour cela une thermopile c'est-à-dire une suite de thermocouples connectés en série. Les jonctions chaudes sont toutes situées sur la face supérieure de la paroi auxiliaire les jonctions froides sur la face inférieure de la paroi. Chacun des thermocouples délivre une différence de potentiel proportionnelle à la différence locale de température. Pour obtenir une information représentative de la différence de température moyenne les thermocouples sont répartis uniformément sur la surface de mesure du capteur. La tension détectée représentative de la différence de température moyenne entre les faces de la paroi auxiliaire est alors également représentative de la valeur moyenne de la densité de flux sur toute la surface sensible du capteur.

Connaissant la différence de température moyenne, le coefficient de sensibilité du dispositif pourrait théoriquement être déterminé en utilisant la relation précédente. En fait, la structure du capteur ne peut être assimilée à une paroi auxiliaire homogène à cause des thermocouples traversant la paroi de part en part et provoquant des zones privilégiées pour le passage de la chaleur.

En pratique la sensibilité est déterminée par étalonnage. Le principe de l'étalonnage consiste à faire passer à travers la surface active du fluxmètre un flux thermique dont la densité est parfaitement connue sur toute la surface de mesure. Le coefficient de sensibilité s'exprime en  $\mu V/W/m^2$ . Il caractérise la performance d'un fluxmètre thermique.

Le dispositif utilisé pour évaluer la sensibilité est schématisé par le banc d'étalonnage suivant :



Figure 2 - Banc d'étalonnage (Réf.18)

Le fluxmètre à étalonner est placé sur la plaque échangeuse inférieure. On lui superpose une résistance électrique plane de même dimension, un fluxmètre auxiliaire de sensibilité connue et une plaque isolante en polystyrène. L'ensemble est légèrement comprimé par une plaque échangeuse mobile grâce à un vérin pneumatique.

Une résistance chauffante plane connectée sur une alimentation stabilisée fournit une puissance Pa. Cette puissance se répartit de manière inégale dans le dispositif. La plaque isolante limite le flux thermique ascendant  $\phi_2$ , mesuré par le fluxmètre auxiliaire à quelques pour-cents de la puissance totale dissipée. La quantité (P<sub>f</sub> -  $\phi_2$ ) constitue le flux imposé dans le fluxmètre à tester, la sensibilité du capteur s'obtient alors par :

$$k = \frac{U.s}{P_f - \phi_2} \text{ en } \mu V/(W/m^2)$$
 (Réf.18) (3)

U : tension aux bornes du fluxmètre ( $\mu V$ )

s : surface du capteur  $(m^2)$ 

P<sub>f</sub> : puissance fournie à la résistance chauffante (W)

 $\phi_2$ : flux ascendant mesuré avec le fluxmètre auxiliaire (W)

La sensibilité k est donnée alors par la pente de la caractéristique de la force électromotrice U en fonction de la puissance injectée  $P_f$ .

Pour une densité de flux thermique imposée, la densité de flux est d'autant plus importante que le capteur comporte un nombre important de thermoéléments distribués sur sa surface de mesure.

Le coefficient de sensibilité augmente :

- avec la surface du capteur,
- avec le nombre de thermoéléments distribués sur la surface de mesure.

La technologie traditionnelle permet d'intégrer une quarantaine de thermocouples sur une surface de quelques cm<sup>2</sup> et la sensibilité est de l'ordre de quelques  $\mu V/W/m^2$  pour une épaisseur e de l'ordre de 0,2 mm et une surface active de 1 cm<sup>2</sup>.

La réalisation d'un fluxmètre à paroi auxiliaire nécessite un grand nombre de soudures lorsque la surface active est supérieure au  $cm^2$ . Cette technologie est difficile à industrialiser.

# 1.1.3. Caractéristique essentielle d'un fluxmètre thermique

La fonction naturelle d'un fluxmètre thermique est de détecter et de mesurer les échanges par conduction thermique à l'intérieur d'un milieu solide ou les échanges entre un milieu solide et le milieu environnant. Le coefficient de sensibilité est indépendant de la <u>température</u>. Un fluxmètre placé sur une paroi soumis à un flux de densité 1 W/m<sup>2</sup> génère la même tension que la paroi soit à la température ambiante ou à température élevée (500°C par exemple).

La mesure de la densité de flux <u>doit être indépendante des fluctuations de la</u> <u>température du support même lorsque ces variations de température sont rapides en</u> <u>fonction du temps.</u> Pour obtenir une sensibilité indépendante des fluctuations de température il faut nécessairement que <u>l'épaisseur du capteur soit réduite au maximum</u> de façon à ce que les jonctions chaudes et les jonctions froides soient influencées de la même façon par les variations de température du milieu support. <u>Les fluxmètres thermiques de forte</u> <u>épaisseur ne sont pas utilisables en pratique puisqu'ils fournissent une tension de</u> <u>sortie influencée par la température de surface du matériau support</u> et non uniquement par le gradient thermique de température suivant la direction perpendiculaire à la surface. L'épaisseur d'un fluxmètre thermique doit toujours être réduite au maximum.

Un autre avantage de réaliser un fluxmètre de faible épaisseur est de minimiser l'influence de la résistance thermique du capteur sur la densité de flux à mesurer (la résistance thermique du capteur s'oppose au passage de la chaleur).

C'est également de diminuer la capacité thermique et permettre l'utilisation du capteur en régime variable puisque l'énergie à fournir ou à prélever pour modifier la température du capteur est minimisée lorsque sa capacité thermique a été réduite au maximum.

# 1.1.4. Fluxmètres thermiques à gradient tangentiel

Ce type de fluxmètre thermique a été conçu pour réaliser un compromis difficile à obtenir avec les fluxmètres traditionnels à paroi auxiliaire : <u>obtenir une sensibilité élevée</u> <u>avec un composant d'épaisseur réduite au maximum.</u>

Un autre avantage essentiel de la méthode de mesure à gradient tangentiel décrite ci-dessous pour la diffusion industrielle de la technologie est la possibilité de réaliser les capteurs en série en utilisant les techniques de la microélectronique telle la photolitographie et les techniques de gravure fine.

L'élément sensible est une thermopile planaire représentée figure 3. Cette thermopile est constituée par un ruban métallique (chromel ou constantan) de faible épaisseur (25 µm) gravé en forme de grecque sur support isolant souple (kapton ou mylar).



Figure 3 - Thermopile planaire (Réf. 18)

Pour obtenir une thermopile planaire, le ruban métallique est recouvert par un grand nombre de dépôts électrolytiques (cuivre ou or) régulièrement espacés sur le ruban de constantan. Dans les régions recouvertes par les électrodes plaquées les propriétés des circuits sont celles du matériau de placage et le circuit se comporte comme un grand nombre de thermocouples connectés électriquement en série, les jonctions thermoélectriques étant localisées sur les lignes frontières des dépôts électrolytiques. La mise en oeuvre des techniques de photolitographie et de gravure chimique est utilisée pour la fabrication des jauges de contraintes (Réf. 10,16,17).



Figure 4 - Schéma d'un fluxmètre à gradient thermique tangentiel (Réf. 18)

Une partie supérieure est utilisée pour générer des différences de température proportionnelles à la densité de flux à mesurer sur la surface de chacun des thermoéléments.

Cette fonction est réalisée en établissant un contact thermique localisé entre l'une des jonctions de chacun des thermocouples et la face supérieure du capteur (feuille de cuivre de 35 mm d'épaisseur). Le schéma d'une cellule fluxmétrique est représenté figure 4. Lorsque la chaleur traverse le capteur en partant de la face supérieure, il y a constriction des lignes de flux thermique vers les régions où il y a contact thermique et la différence de température entre jonctions thermoélectriques dépend de l'épanouissement des lignes de flux dans l'épaisseur de la thermopile et de son support.

En pratique, le plot de constriction est gravé sur une surface cuivrée représentée figure 5 et les contacts thermiques sont réalisés en collant après positionnement correct la partie supérieure du capteur sur la surface de la thermopile planaire.

Les différences de température sont mesurées par des thermocouples planaires à électrodes plaquées reliés en série. Chacun des thermocouples plaqués convertit la différence de température en force électromotrice (f.e.m) Seebeck (Réf. 15). La f.e.m. produite par la thermopile est directement proportionnelle au nombre de thermoéléments distribués sur la surface utile du capteur. Le principe de fonctionnement permet de réaliser des fluxmètres d'épaisseur très réduite (0,3 mm), tout en conservant une grande sensibilité de mesure (10 mV/Watt traversant la surface sensible).



La figure 5 représente une série de thermocouples plaqués et les cales qui assurent la déviation des lignes de flux.

Figure 5 - Schéma des deux parties du circuit avant assemblage (Réf. 18)

Lorsque le fluxmètre est appliqué sur la surface d'une paroi ou d'un support, le capteur détecte un <u>flux conductif représentatif de l'ensemble des échanges par</u> <u>conduction, convection, rayonnement avec le milieu environnant</u>. De façon plus générale, tout apport ou dépertition énergétique dans le milieu vu par le capteur donne naissance à un transfert thermique avec le support du capteur et peut être détecté en temps réel sans avoir à attendre une élévation de température du milieu support.

#### Caractéristiques :

La sensibilité est déterminée par étalonnage en faisant passer un flux thermique de  $1 \text{ W/m}^2$  à travers la surface active du capteur placé sur une plaque à température constante. La densité surfacique de thermoéléments étant uniforme, la sensibilité est directement proportionnelle à la surface du capteur. Elle est voisine de 50  $\mu$ V/W/m<sup>2</sup> pour un fluxmètre de surface égale à 1 dm<sup>2</sup>. Pour pouvoir comparer les fluxmètres indépendemment de leur surface, on utilise la densité de sensibilité (sensibilité par unité de surface) qui représente en fait la tension de sortie réduite par un flux de 1 W injecté à travers la surface active du capteur. La densité de sensibilité est égale à 5 mV/W et ne dépend pas de la surface active du capteur.

Les fluxmètres thermiques ayant l'avantage d'avoir une résistance électrique relativement fiable, de l'ordre de 200  $\Omega/dm^2$  de surface active, la tension de sortie minimale détectable dépend de la résolution de l'amplificateur ou du microvoltmètre utilisé pour effectuer la mesure.

Le principe de mesure à gradient tangentiel permet la miniaturisation des capteurs et la réalisation de microcapteurs en couches minces déposées directement sur la surface de la paroi à instrumenter.

L'avantage essentiel de la technologie à gradient tangentiel est liée à la faible épaisseur, non seulement les perturbations dues à la présence du capteur sont réduites au maximum, mais ils sont souples et peuvent être appliqués sur des surfaces courbes (tuyaux...) ce qui permet d'étendre leur domaine d'utilisation.

# <u>Citons pour compléter d'autres types de fluxmètres thermiques à gradient utilisés en</u> <u>pratique:</u>

- Le fluxmètre de Gardon (Réf. 10) qui est une variante du fluxmètre à gradient, est destiné plus particulièrement à mesurer des flux reçus par rayonnement. Un disque en cuivrenickel (constantan) repose sur un cylindre de cuivre. Un fil de cuivre est soudé au centre du disque à l'intérieur du cylindre et ferme ainsi le circuit thermoélectrique. Le cylindre est maintenu à température constante. Le rayonnement reçu par le disque est dissipé du centre vers la périphérie, créant ainsi une f.e.m. proportionnelle.



Figure 6 - Fluxmètre de Gardon

- Le fluxmètre sans paroi auxiliaire, dont le principe repose sur une jonction continue de deux métaux de pouvoirs thermoélectriques différents (exemple : cuivre et constantan). Un gradient de température tangentiel à cette jonction fait apparaître une force électromotrice aux extrémités d'un des métaux. Ce type de jonction est reproduit en série et un artifice en surface crée des dissymétries provoquant le gradient tangentiel de température (Réf. 10).

# 1.1.5. Les échanges d'énergie détectés par un fluxmètre thermique

#### - Echanges entretenus par convection thermique :

Ce mode de transmission se rencontre essentiellement dans les échanges de chaleur entre un fluide en mouvement (gaz ou liquide) et une paroi solide ou entre deux fluides ou deux solides. Dans la convection, certaines parties du système sont en mouvement et transportent avec elles la chaleur qu'elles ont reçue par conduction au contact des parties les plus chaudes. La convection peut être forcée dans le cas où le mouvement du fluide est dû à une action mécanique extérieure. Elle peut être libre ou naturelle dans le cas où le mouvement du fluide est dû à la différence de masse volumique entre les particules chauffées et les particules froides.

Toute différence de température entre une paroi et le milieu fluide environnant donne naissance à un échange par convection thermique <u>directement détecté par le</u> <u>fluxmètre thermique placé sur la surface de la paroi.</u>

#### - Les changements d'état :

Tout changement d'état provoque un apport ou une perte d'énergie (ébullition, fusion, sublimation, allotropie) provoque un apport ou une perte d'énergie. C'est un des modes de transmission de la chaleur des plus intenses. Il est souvent classé dans la convection (chaleur latente) qui ne reste pas localisé et se transmet de proche en proche. Il joue un rôle très important dans de nombreuses applications industrielles, mais ce mode, utilisé dès qu'il y a changement physique du corps, n'intervient pas pour nos applications.

Toute condensation ou évaporation sur la surface d'un fluxmètre thermique génère un échange thermique avec la paroi support <u>détectée par le fluxmètre thermique</u>.

# - le rayonnement thermique :

Tout rayonnement incident sur la surface d'une paroi opaque est en partie absorbée et en partie réfléchi. Le rayonnement absorbé est source de chaleur localisée par suite de flux thermique directement mesurable par un fluxmètre thermique. L'absorption du rayonnement par une paroi dépend de la longueur d'onde du rayonnement. Sur la figure 7 sont représentés les rayonnements rencontrés dans la nature.



Figure 7 - Spectre des ondes électromagnétiques (Réf. 2)

Le rayonnement émis par les corps, du fait de leur température, ne représente qu'une très faible partie du rayonnement total  $(0,1 \text{ à } 100 \text{ } \mu\text{m})$ .

Dans cette gamme, nos sens sont capables de détecter le rayonnement sous forme d'une sensation de chaleur. Dans une bande très étroite (de 0,38 à 0,76  $\mu$ m) appelée spectre visible, ce rayonnement excite le nerf optique sous forme de lumière.

Pour les rayonements thermiques, la partie non visible du spectre constitue l'ultra violet (U.V.) pour les longueurs d'onde de 0,1 à 0,38  $\mu$ m et infra-rouge (I.R.) pour les grandes longueurs d'onde (de 0,76 à 100  $\mu$ m).

Pour les températures inférieures à 500°C, le rayonnement thermique est du type infrarouge. C'est le domaine de travail dans lequel nous nous situons puisque les salles de stockage et les pots de matières fissiles telles que le plutonium n'atteignent pas les 100°C.

# **1.2. RAYONNEMENT THERMIQUE INFRAROUGE**

L'objectif de notre travail étant la conception d'un système de surveillance passive basé sur la détection d'échanges radiatifs, nous allons dans cette partie rappeler plus en détail les lois du rayonnement infrarouge.

Le rayonnement infrarouge est émis par tout objet dont la température dépasse le zéro absolu. La détection de radiation infrarouge permet la détection sans contact et a l'avantage de permettre la surveillance de nuit comme de jour.

#### 1.2.1. Les lois physiques du rayonnement

L'énergie rayonnée en infrarouge est déterminée par la température et les conditions de surface des objets.

Le maximum d'énergie calorifique pouvant être rayonnée par la matière à chaque température et longueur d'onde peut être évalué à partir de considérations thermodynamiques. L'émetteur idéal qui rayonnerait cette énergie est appelé corps noir et sert d'étalon de rayonnement. Les lois physiques du rayonnement thermique décriventl'émission du corps noir (Réf. 1).

Le corps noir est un corps idéal qui, à toute température, absorbe toute radiation incidente, quelle que soit sa longueur d'onde ou son incidence. Pour le corps noir, l'absorptivité monochromatique directionnelle est donc égale à l'unité, et la réflectivité  $\pi$  et la transmittivité  $\tau$  sont nulles.

Un tel corps est effectivement noir (à température modérée), car il absorbe toutes les radiations du spectre visible.

A une températue élevée, le rayonnement (phénomène d'émission) est visible et pourra apparaître rouge, orange, jaune, vert, etc... (mais on continuera à l'appeler "corps noir").

Pratiquement, aucune substance se comporte comme un corps noir mais beaucoup de corps s'en approchent (le noir de fumée sous une épaisseur suffisante).

En pratique, le corps noir est une référence de rayonnement utilisable pour comparer les caractéristiques de rayonnement des autres corps.

Nous avons utilisé une résistance planaire ayant un demi-mètre carré de surface (78cm par 63 cm) pour simuler un corps humain assimilable à un corps noir, et nous l'avons recouverte d'une épaisseur suffisante de noir de charbon, substance équivalente au noir de fumée. Par le contrôle d'une alimentation en puissance nous avons pu réguler en température ce tableau noir entre 20 et 40°C afin de simuler une intrusion humaine.



Figure 8 - Corps noir de référence réalisé au C.C.R. d'Ispra

En observant le corps noir, les formules et lois suivantes sont établies:

# 1.2.1.1. La loi de Stefan-Boltzmann (Réf. 1)

Cette loi donne l'émittance totale du rayonnement du corps noir dans le vide en fonction de sa température absolue. Elle exprime que le flux énergétique total émis par un corps noir à une température donnée T dans un demi-espace et pour toutes les longueurs d'onde du spectre est proportionnel à la quatrième puissance de la température.

$$\mathbf{W} = \mathbf{\sigma} * \mathbf{T}^4 \tag{4}$$

W: densité de puissance rayonnée en W/m<sup>2</sup>

T : température absolue en Kelvin

 $\sigma$  : constante de Stefan-Boltzmann = 5,674.10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>

En réalité, le corps noir est un corps idéal, c'est pourquoi on rajoute un coefficient Epsilon (ɛ), fonction des qualités en émission.

Soit: 
$$\mathbf{W} = \boldsymbol{\sigma} \ast \boldsymbol{\varepsilon} \ast \mathbf{T}^4$$
 (5)

ε : émissivité (sans dimension)

L'émissivité  $\varepsilon$  varie avec la condition de surface de l'objet. Elle varie aussi avec la longueur d'onde et la température de l'objet en général. Il est nécessaire d'introduire le facteur d'émissivité  $\varepsilon$ .



**Figure 9** - Facteurs d'émissivité  $\varepsilon$  de différents objets (Réf. 3)

# 1.2.1.2. Loi de Planck (Réf. 1)

La loi de Planck donne une description exacte de la distribution spectrale de puissance dans l'hypothèse du corps noir.

$$\mathbf{W} = \mathbf{C}_1 * \lambda^{-5} \left[ \exp(\mathbf{C}_2 / \lambda \mathbf{T}) - \mathbf{I} \right]^{-1}$$
(6)

#### 1.2.1.3. Loi de Wien (Réf. 1)

Cette loi, obtenue par le calcul de l'extrêmum de la relation de Planck, permet le calcul de la longueur d'onde la plus représentative de l'émission radiative pour une température donnée.

$$\lambda \mathbf{T} = \mathbf{2898} \ \mu \mathbf{m}.^{\circ} \mathbf{K} \tag{7}$$

#### (par exemple, à 300° Kelvin, $\lambda = 9,66 \ \mu m$ )

Quand la température de l'objet est connue, la distribution de l'énergie radiative en fonction de  $\lambda$  est donnée par la loi de la radiation du corps noir (Planck).



Figure 10 - Loi de Planck (Réf. 2)

#### 1.2.2. Echanges radiatifs

Les lois au rayonnement rappelé dans les paragraphes précédents concernent l'émission du rayonnement par une surface matérielle en fonction de sa température. En fait, cette configuration ne se rencontre jamais en pratique puisque toute surface matérielle :

- regoli du rayonnement en provenance des surfaces voisines,

- émet du rayonnement dont la densité dépend de sa température de surface.

#### Echanges radiatifs entre surfaces à températures différentes.

Dans le cas général, le rayonnement échangé entre deux surfaces matérielles portées à une température différente dépend :

- des dimensions géométriques des surfaces en intéraction,
- des positions relatives de ces surfaces puisque tout le rayonnement émis par l'une des surfaces n'est pas intercepté par l'autre surface et inversement.

#### 1.2.3. Mesure des échanges radiatifs

Lorsqu'un rayonnement thermique est absorbé (ou émis) par la surface d'un milieu opaque, la température de surface s'élève ou diminue suivant une loi de type exponentiel dont la constante de temps dépend des propriétés thermiques du milieu absorbant ou émettant le rayonnement thermique.

A partir d'un calcul de géométrie classique on trouve pour l'échange entre deux surfaces élémentaires représentées figure 45 dans le paragraphe 2.4.1.:

$$d\Phi = \sigma (T_1^4 - T_2^4) \frac{\cos\beta_1 \cdot \cos\beta_2}{\pi r^2} dS_1 dS_2$$
 (Réf.1) (8)

Cette expression permet de calculer l'échange entre deux surfaces finies "noires" de surface  $S_1$  et  $S_2$ . Pour simplifier l'expression du résultat et le rendre utilisable en pratique, on introduit le facteur d'angle :

$$f_{21} = \frac{1}{S_2} \int_{S_1 S_2} \frac{\cos\beta_{2.} \cos\beta_1}{\pi r^2} dS_1 dS_2$$
 (Réf.1) (9)

vérifiant la relation bien connue :

$$f_{12} S_1 = f_{21} S_2$$
 (Réf.1) (10)

à partir duquel l'échange radiatif s'écrit sous la forme :

$$\Phi = \sigma((T_1^4 - T_2^4)f_{12}S_1 = \sigma(T_1^4 - T_2^4)f_{21}S_2$$
 (Réf.1) (11)

Dans le cas où les surfaces en intéraction ont la forme de plans suffisamment rapprochés pour que les pertes latérales soient négligeables, l'échange par rayonnement thermique est décrit par la rolation bien connue :

$$\phi_{W_{1}a2} = \sigma(T_1^4 - T_2^4)$$
 (Réf.1) (12)

Lorsque les surfaces en intéraction se comportent comme des "corps gris", il faut tenir compte des phénomènes de réflexion et la densité de rayonnement échangée devient :

$$\phi_{W/m^2} = \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$
 (Réf. 1) (13)

La densité de rayonnement est <u>émise</u> par la surface à température <u>élevée et absorbée</u> par la surface à la température la plus <u>faible</u>.

Ainsi deux surfaces grises  $S_1$  et  $S_2$ , diffusantes en émission et en réflexion, échangent une densité de flux net (radiatif) représenté par :

$$\frac{(S_1)}{\oint_{(S_2)} T_1} T_1 \qquad \qquad \oint_{1,2} net = F_{1,2} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (Réf. 1) \qquad (14)$$

$$avec \quad \oint_{1,2} : en W/m^2$$

où  $F_{1,2}$  est un facteur de forme gris qui dépend de la géométrie du système étudié et des propriétés radiatives des surfaces (émissivités  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ).

$$F_{1,2} = \underbrace{1}_{\substack{1-\varepsilon_1 + 1 + 1-\varepsilon_2 \\ \varepsilon_1 \quad f_{1,2} \quad \varepsilon_2}} (S_1 / S_2)$$
(Réf. 1) (15)  
avec f\_{1,2} facteur d'angle

Ce facteur de forme traduit le fait que l'énergie radiante est distribuée par une source émettrice de surface  $S_1$  à la température  $T_1$  et qu'une fraction de cette énergie est reçue par un système de surface  $S_2$  à la température  $T_2$  pouvant être concentrateur d'énergie (une parabole dans notre cas).

Pour décrire l'échange radiatif, on introduit un facteur d'angle  $f_{1,2}$  dépendant de l'angle solide sous lequel l'une des surfaces voit l'autre surface. Les facteurs d'angle peuvent être calculés numériquement ou déterminés à partir d'abaques.

Il faut rappeler que le facteur de forme est fonction des surfaces en regard et de leur position les unes par rapport aux autres ainsi que de leurs émissivités respectives. Généralement il est admis qu'un capteur suffisamment petit devant les éléments qui l'entourent permet de négliger ce problème (voir chapitre 2).

Pour notre application de détection d'intrusion provenant d'un déséquilibre thermique, cette quantité d'énergie incidente calculée arrivant sur le capteur nous est inutilisable. En effet, ne connaissant pas les formes, les températures et le positionnement des sources formant partie de la zone à surveiller, il est impossible d'établir exactement à l'avance le rapport signal sur bruit d'un milieu, et donc de prévoir le seuil de détection d'intrusion, surtout à gradie distance (> 1m).

# 1.2.4. Rappels sur les capteurs d'échange radiatif

Ayant montré que la mesure de la densité de rayonnement échangé pouvait être ramenée à une mesure différentielle de flux thermique, nous allons montrer comment modifier la structure du fluxmètre thermique pour obtenir un capteur générant une tension représentative du bilan des échanges radiatifs sur la surface du capteur (densité de rayonnement incident moins densité de rayonnement par émission propre).

Lorsqu'un rayonnement thermique est absorbé (ou émis) par la surface d'un <u>corps</u> <u>opaque</u>, la température de surface s'élève ou diminue suivant une loi de type exponentiel. La variation de température dans la masse du matériau dépend des propriétés thermiques du matériau soumis au rayonnement

Dans le cas d'une surface métallique absorbante (cuivre, aluminium; ...), la température de surface reste relativement proche de la température dans la masse, puisque la conductivité thermique élevée permet l'uniformisation du champ de température. Le rayonnement absorbé est converti en variation de la température moyenne du volume occupé par le métal. Cette <u>variation</u> de <u>température</u> est détectée par son influence sur les propriétés électriques (sur la résistance par exemple) ou sur les propriétés thermoélectriques.

<u>Un capteur de rayonnement traditionnel</u> convertit les rayonnements à mesurer en une augmentation de température lorsque le rayonnement est reçu et en une diminution lorsque le rayonnement est émis. De plus, nous <u>allons montrer rapidement qu'il doit être</u> <u>miniaturisé et encapsulé</u>.

La surface, absorbant ou émettant le rayonnement, échange de l'énergie par <u>convection</u> avec le milieu environnant.

La température varie lorsque le bilan des échanges énergétiques <u>varie</u>. On peut utiliser le schéma suivant pour représenter les échanges :



Figure 11 - Schéma représentatif des échanges par rayonnement

dans laquelle :

 $\epsilon P$ : puissance absorbée ou émise par unité de surface en W/m<sup>2</sup>

- h: conductance surfacique en W/m<sup>2</sup>
- $\theta_a$ : température d'air en °C
- $\theta$ : température de l'élément sensible en °C

C: capacité thermique par unite de surface en J/Kg.°C

La quantité de chaleur accumulée par unité de surface dans la capacité thermique de l'élément sensible est égale au bilan des échanges.

$$C.d\theta/dt = \varepsilon P - h(\theta - \theta_a)$$
(16)  
[ W/m<sup>2</sup>] [ W/m<sup>2</sup>] [ W/m<sup>2</sup>]

Introduisons l'écart  $\delta \theta = \theta - \theta_a$  entre la température mesurée et la température de l'air environnante.

$$\mathbf{C}.\mathbf{d}\boldsymbol{\delta}\boldsymbol{\theta}/\mathbf{d}\mathbf{t} = \boldsymbol{\varepsilon}\mathbf{P} \cdot \mathbf{h}\boldsymbol{\delta}\boldsymbol{\theta} \tag{17}$$

Tout apport ou dépendition radiatif  $\epsilon P$  est converti en variation de température  $\delta \theta$ . Pour une variation en échelon, la valeur asymptotique  $\delta \theta_{\infty} = \epsilon P/h$  est proportionnelle à  $\epsilon P$ .

La constante de temps  $\tau = C/h$  est influencée par le coefficient d'échange convectif avec le milieu environnant qui n'est pas <u>une constante en réalité</u>.



Figure 12 - Variation de température du milieu soumis à une variation en échelon de rayonnement absorbé.

<u>Un capteur traditionnel s'utilise en régime établi</u>. Ce résultat montre que la variation de  $\delta\theta$  est <u>représentative du rayonnement à détecter</u> uniquement si la surface est encapsulée de façon à maintenir  $\theta_a$  et le temps d'intégration  $\tau = C/h$ 

Pour obtenir EP à partir de la variation de température mesurée

$$\delta \theta(\mathbf{t}) = (\delta \theta_{\infty} - \delta \theta_{0}) \times (1 - e^{-t/t})$$
(18)

Il faut dériver

$$\mathbf{d}\,\delta\theta(\mathbf{t})/\mathbf{d}\mathbf{t} = 1/\tau.\delta\theta_{\infty} \times \mathbf{e}^{-t/\tau} = \mathbf{h}/\mathbf{C}.\delta\theta_{\infty} \times \mathbf{e}^{-t/\tau} \tag{19}$$

$$C.d \,\delta\theta(t)/dt = h.\delta\theta_{\infty} \times e^{-t/\tau}$$
<sup>(20)</sup>

$$\dot{a} t = 0$$
,  $\epsilon P - h(\theta_0 - \theta_a) = h \cdot \delta \theta_{\infty} = h(\theta_{\infty} - \theta_a)$  (21)

La grandeur à mesurer est l'amplitude à l'instant initial et la dérivation ne peut être effectuée que si  $\tau = C/h$  garde une valeur constante.

En régime asymptotique  $\delta \theta_{\infty}$  proportionnelle à P permet théoriquement de mesurer la densité moyenne absorbée. La capacité thermique des systèmes réels étant élevée il est difficile de ramener en pratique la mesure de la pulssance absorbée à la mesure de

-

l'élévation de température du matériau absorbant le rayonnement thermique. Pour justifier, introduisons les valeurs numériques suivantes.

# Valeurs numériques

Donnons au coefficient d'échange h une valeur voisine de 5 W/m<sup>2</sup>°C correpondant à des échanges convectifs naturels.

Pour  $\varepsilon P = 1 \text{ W/m}^2$ ,  $\delta \Theta_{\infty} = 0.2 \text{ °C}$ 

Pour obtenir un détecteur de constante de temps 10ms il faut par unité de surface une capacité thermique de :  $C = 10.10^{-3}.5 = 50 \text{ mJ/m}^{20}C$ 

En prenant comme matériau absorbant le cuivre noirci de chaleur massique:

nous obtenons une masse par unité de surface égale à  $500.10^4/376=1.33.10^{-4} \text{ Kg/m}^2$  puisque la chaleur massique est  $376J/Kg.^{\circ}C$ 

Soit avec une masse volumique de 8930 Kg/m<sup>2</sup>, nous obtenons pour épaisseur 0,015  $\mu$ m.

Une telle épaisseur bien inférieure à  $1\mu m$  n'est réalisable qu'en utilisant les microtechnologies.

<u>Un capteur de rayonnement thermique traditionnel est nécessairement miniaturisé et encapsulé</u>. Il s'utilisera en régime établi.

# 1.2.5. Les capteurs de rayonnement basés sur la mesure de flux thermique

Le flux thermique absorbé (ou émis) par la capacité thermique du capteur précédent s'exprime par la relation:

$$\phi_{[W/m2]} = \mathbf{C}.\mathbf{d}\,\delta\theta(\mathbf{t})/\mathbf{d}\mathbf{t} = \mathbf{h}.\delta\theta_{\infty} \times \mathbf{e}^{\mathbf{t}\tau}$$
(22)

Ce flux a l'avantage de pouvoir être mesuré sur la surface d'échange du capteur. D'autre part, sa valeur initiale s'obtient par:

$$\phi_{(t=0)} = h(\theta_{\infty} - \theta_{a}) = \varepsilon P - h(\theta_{0} - \theta_{a})$$
(23)

Le fluxmètre thermique qui fournit directement le bilan des échanges d'énergie (sans avoir à dériver) fournit une grandeur en avance de phase. C'est un capteur de régime transitoire.

<u>Quelle que soit la capacité thermique du solide</u>, la valeur initiale du flux thermique est directement proportionnelle:

- à la densité de puissance P incidente ou émise par la surface du capteur;
- à l'écart entre la valeur initiale de la température de la surface juste avant l'instant où elle a été soumise au rayonnement et la température ambiante.

Pour éliminer la dépendance en fonction de la température initiale on utilisera un fluxmètre radiatif comportant <u>deux capteurs de flux</u> (de température  $\theta_1$  et  $\theta_1$ ') <u>montés en différentiel</u> sur un support dont les températures sous capteur valent  $\theta_2$  et  $\theta_2$ '.

Ces capteurs de flux ont pour seul différence un écart entre leur émissivité de surface  $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_2$  (réalisées avec des bandes métallisées brillantes) de façon à générer une variation différentielle de flux:

$$\Delta \phi_{(t=0)} = \phi_{1(t=0)} - \phi_{1'(t=0)}$$
(24)

$$= C.d \,\delta\theta_1(t)/dt - C.d \,\delta\theta_1'(t)/dt \tag{25}$$

$$= \varepsilon_1 P - h(\theta_1 - \theta_a) - (\varepsilon_2 P - h(\theta_1' - \theta_a))$$
(26)

En pratique  $\theta_1 \# \theta_2$  puisque le flux dans l'élément brillant est nul,  $\theta_1$ '#  $\theta_2$ ' puisque le fluxmètre thermique a une très faible épaisseur.

Il en résulte  $\theta_1' - \theta_2$  faible et  $\theta_1 \# \theta_1' \# \theta_2$  et en première approximation la différence

$$\Delta \phi_{(t=0)} = \phi_{1(t=0)} - \phi_{1'(t=0)} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2).\mathbf{P}$$
(27)

La différence des flux ne dépend plus de la température initiale  $\theta_o$  mais de la seule puissance P absorbée (ou émise) par la surface du solide.  $\Delta \phi$  est positif lorsque la puissance est absorbée, négatif lorsque le rayonnement est émis; c'est une différence essentielle avec les capteurs de rayonnement traditionnels.

Mesurer un flux ne consiste pas à estimer une élévation de température, mais à mesurer la différence de température entre deux surfaces  $S_1$  et  $S_2$  puisque l'absorption de la puissance P génère un flux thermique.

Figure 13 - Mesure de flux sur un élément

Les températures  $\theta_1$  et  $\theta_2$  varient en fonction du temps mais seule la différence  $\theta_1 - \theta_2$ est représentative du flux thermique. Pour obtenir une bonne sensibilité il faut recouvrir le solide d'une couche de faible épaisseur et de faible conductivité thermique de façon à générer un gradient de température important entre la surface du capteur et la surface inférieure.

Pour un capteur comportant deux fluxmètres thermiques montés en différentiel, les températures des faces inférieures sont <u>rendues égales</u> par une couche métallique de grande conductivité thermique.



Figure 14 - Schéma synoptique des échanges par rayonnement pour un capteur à deux fluxmètres thermiques

Une thermopile intégrée dans l'épaisseur du capteur génère une tension proportionnelle à la différence de température  $\theta_1 - \theta_1^{\circ}$ , c'est-à-dire à la différence ( $\theta_1 - \theta$ ) - ( $\theta_1^{\circ} - \theta$ ) puisque  $\theta_2 = \theta_2^{\circ} = \theta$ , c'est-à-dire à la différence de flux  $\Delta \phi = \phi_1 - \phi_1$ ' puisque ces flux sont proportionnels aux différences de températures  $\theta_1 - \theta$  et  $\theta_1^{\circ} - \theta$ .

Le temps d'établissement des écarts de température  $\theta_1 - \theta$  et  $\theta'_1 - \theta$  étant très faible, <u>il suffira pour obtenir un capteur de faible constante de temps d'utiliser des fluxmètres de faible épaisseur</u>. Le grand avantage des capteurs basés sur la mesure de flux thermique est d'obtenir une faible constante de temps même si le capteur est disposé sur un support de faible inertie thermique.

<u>Il n'est pas nécessaire de compenser les variations de la température du boîtier</u> comme dans les dispositifs traditionnels ou de maintenir constante la température d'air et le coefficient d'échange en encapsulant l'élément sensible.

Un capteur d'épaisseur 50  $\mu$ m permet d'obtenir une constante de temps de 10 ms. La mesure de l'écart de température entre une cible et le capteur se fait donc pratiquement sans inertie.

Compte tenu de l'importance des échanges radiatifs dans une application telle qu'une détection de présence humaine, la structure de base du fluxmètre a été modifiée de façon à obtenir un capteur générant une force électromotrice proportionelle aux seuls échanges par rayonnement.



Figure 15 - Coupe transversale d'une cellule de fluxmètre radiatif

La face supérieure du CAPTEUR DE RAYONNEMENT contient une première couche de forte émissivité, absorbant les radiations incidentes. Sur cette couche sont déposées, à intervalles réguliers, des bandes métallisées brillantes, de faible émissivité. On obtient ainsi une alternance de bandes "noires" absorbantes, et de bandes "brillantes" réfléchissantes.

La partie inférieure du capteur se comporte comme une thermopile planaire réalisée sur une feuille de constantan constituée de nombreuses jonctions thermoélectriques en cuivre.

Les radiations pénètrent les bandes absorbantes de la couche supérieure du capteur et sont réfléchies sur les bandes brillantes. Une différence de température induite au niveau des jonctions de la thermopile est convertie en une tension par cette dernière. Cette tension en sortie du capteur est directement proportionnelle au flux radiatif à mesurer. Un grand nombre de ces jonctions thermoélectriques permet d'obtenir une sensibilité maximale.

Bien sûr, l'idée n'a pas été de s'arrêter à l'utilisation d'un fluxmètre thermique pour détecter un rayonnement I.R. émis par un corps humain se présentant devant le capteur à une faible distance.

# En revanche, elle a été de détecter à l'aide d'un capteur et d'un concentrateur de rayonnement thermique toute modification de l'équilibre thermique d'un volume bien défini causée par exemple par une intrusion humaine dans une zone surveillée.

Il faut rappeler que l'objectif du projet n'est pas d'inventer un nouveau capteur et de le caractériser mais de voir si la fluxmétrie peut être appliquée dans le domaine des "Garanties". C'est-à-dire à partir d'un nouveau capteur radiatif déjà existant, et dont les caractéristiques techniques sont tout à fait intéressantes pour certaines applications, de l'associer à un réflecteur de type parabolique afin d'inventer un nouveau système de surveillance.

Pour notre application de détection dans la gamme de fréquences infrarouge moyen, les critères de choix du fluxmètre radiatif correspondent à ce que tout fabriquant de système de surveillance exige de ses détecteurs:

- La reproductibilité de la mesure (puisque le capteur est étalonné)
- La stabilité (le capteur ne dépend pas de la convection)
- La sensibilité (quelques µm/W/mm)
- Le temps de réponse, qui suffit amplement pour faire de la surveillance (< 200ms)
- Sa durée de vie (le capteur est encore jeune puisqu'il n'a que quelques années d'existence et que, placé dans un milieu dit non agressif, il devrait continuer à fonctionner sans problème)
- Le prix d'achat et de maintenance, considéré comme faible sur le marché industriel
- L'interchangeabilité fonctionnelle (le remplacement du détecteur est considéré comme facile)
- La possibilité d'enregistrement ou de contrôle automatique, qui ne pose aucun problème puisqu'il suffit de se connecter aux bornes de sortie du capteur
- La facilité de lecture (la lecture est immédiate)
- La mise en œuvre (tout détecteur électronique a une certaine fragilité dans la mesure de sa manipulation. Toute personne informée peut installer le capteur sans suivre une formation spécialisée poussée)
- La possibilité de dépassement du domaine nominal de températures, laissée à la responsabilité de l'utilisateur, sachant que le capteur résiste à une température de 200 °C par contact. Pour une application telle que la surveillance à distance de sources infrarouge moyen cette limite en température est largement suffisante.

#### 1.2.6. La détection au rayonnement infrarouge

#### 1.2.6.1. La source de radiation

Les infrarouges trouvent leur place dans de nombreuses applications dont les systèmes de détection I.R. construits généralement sur le synoptique suivant: (Réf. 3)



Bien sûr, certains systèmes comme les chauffages I.R. utilisent seulement la source I.R., mais pour la détection, système nécessitant toute la synoptique présentée ci-dessus, il est utile de bien connaître la source I.R. que l'on va surveiller pour arriver jusqu'au traitement du signal.

Par exemple, le corps humain qui a une température de  $310^{\circ}$ K ( $37^{\circ}$ C), émet de l'infrarouge ayant un pic de longueur d'onde proche de  $10\mu$ m. La température du corps humain peut changer avec les habits portés et avec les saisons, mais elle reste dans une plage comprise entre  $20^{\circ}$ C et  $30^{\circ}$ C comme l'indique la table suivante:

|                       | En habits d'hiver | En habits d'été |  |
|-----------------------|-------------------|-----------------|--|
| Visage                | 31.2°C            | 32.0°C          |  |
| Crâne                 | 23.4°C            | 30.9°C          |  |
| Thorax                | _20.9°C           | 29.3°C          |  |
| Dos                   | _20.9°C           | 29.0°C          |  |
| Estomac               | _22.2°C           | 30.5°C          |  |
| Hanche                | 20.4°C            | 31.0°C          |  |
| Cuisse                | 21.3°C            | 28.6°C          |  |
| Tibia                 | 21.3°C            | 28.4°C          |  |
| T moyenne             | 22.7°C            | 29.96°C         |  |
| $\lambda(\mu m)$ moy. | 9.8               | 9.56            |  |
| λmoy.géné.            | 9.7µm             |                 |  |

 Tableau 1 - Température du corps humain (Réf. 4)

Les résultats de Nishi Y., Gonzalez R.R. et Gagge A.P. (1975) (Réf. 5) ont expliqué comment l'environnement thermique affecte l'homme au travers de transferts thermiques entre son corps et son entourage.

Cet environnement thermique, commençant au niveau de la surface de la peau et s'étendant bien au delà au niveau ambiant, se compose de l'air que nous respirons, des vêtements que nous portons, de sources chaudes ou froides que nous utilisons pour notre santé et notre confort, de la chaleur, du froid, de l'humidité causés par le temps, ainsi que les expositions aux radiations solaires. Tous ces facteurs sont caractérisés par la température, ou affectent d'une certaine façon le transfert de chaleur au niveau de la peau par radiation, convection, conduction ou par évaporation.

D'après les travaux de K.CENA et J.A.CLARK (1980) (Réf. 6), les transferts qui s'établissent entre un homme et son milieu extérieur peuvent être comparés à une balance s'autorégulant et cherchant toujours à s'équilibrer grâce à ses capacités d'émission et d'absorption.

L'émissivité de la peau et de pratiquement tout ce qui est vestimentaire est très proche de l'unité au point de vue absorption de la radiation thermique, aussi la surface d'un corps humain peut être assimilée à un "corps noir" pour la radiation dans cette bande.

Pour tous les systèmes de détection humaine, on fait correspondre le corps humain à un "corps noir" dont le pic de radiation I.R. est proche de  $9,5\mu m$ .

Lorsque l'on étudie une source de radiation, comme dans notre cas une présence humaine, il est nécessaire lors de l'utilisation de détecteurs photoélectriques, de prêter attention aux autres sources environnantes pouvant créer des radiations de fond et d'autant plus lorsque celles-ci ont une température proche de 300°K.

En effet, les phénomènes photoélectriques font appel à une relation directe photonélectron: ils n'ont lieu que si l'énergie "u" du photon est supérieure à l'énergie de transition "u<sub>0</sub>" demandée par l'électron, il y a donc un seuil photoélectrique. Au fur et à mesure que l'on cherche à déceler des photons dont l'énergie est plus faible (donc la longueur d'onde  $\lambda$ plus grande), ce seuil "u<sub>0</sub>" doit être plus bas. Mais la probabilité pour que ces électrons photosensibles soient ainsi excités par le rayonnement ambiant, particulièrement intense dans l'infrarouge, et/ou par l'agitation thermique des particules du corps photosensible est plus grande, donnant naissance à un courant d'obscurité dont les fluctuations engendrent du bruit.

Ainsi, si l'on ne considère que les photons dont la longueur d'onde est inférieure à  $3\mu m$ , le rayonnement thermique à la température ordinaire (300°K) donne une luminance de  $2.10^{17}$  photons par mètre carré.stéradian.seconde.

Avec un détecteur de 1mm<sup>2</sup> d'aire sensible et d'efficacité quantique  $\eta = 1$  (rapport entre le nombre d'électrons observés et le nombre de photons incidents) en deçà de  $\lambda_0$ = 3µm, ce rayonnement produit un courant d'obscurité de 32 nA, un bruit d'intensité  $i^2 = 10^{-26} A^2/Hz$ .

Avec les détecteurs infrarouges, le rayonnement et l'agitation thermique à la température ordinaire n'ont pas un effet négligeable: aussi pour tirer le meilleur rapport signal / bruit de la plupart d'entre eux, il faut les refroidir à une température T d'autant plus basse que l'énergie "u<sub>0</sub>" du seuil est plus faible: on peut admettre la règle empirique T(K) # 400 u<sub>0</sub> (eV)# 500/  $\lambda_0$  (µm); il faut, en outre, protéger au mieux le détecteur contre le rayonnement parasite ambiant par des diaphragmes et éventuellement des filtres spectraux refroidis.

#### 1.2.6.2. Domaine de propagation

Comme milieu de propagation pour la radiation, le vide, l'atmosphère ou encore la fibre optique peuvent être considérés, et, comme le montre la figure 16 ci-dessous, l'absorption occupe dans l'atmosphère des longueurs d'onde spécifiques avec l' $H_2O$ , le  $CO_2$ , etc..

Les bandes de fréquences [ $3-5\mu m$ ] et [ $8-12\mu m$ ] sont des bandes où l'absorption est faible et celles-ci sont considérées comme des "fenêtres atmosphériques" fréquemment utilisées pour la détection lointaine.



Figure 16 - Absorption atmosphérique au dessus du niveau de la mer (Réf. 7)

Etant donné que notre système de détection humaine à moyenne distance se situe dans la bande [ $8-12 \mu m$ ] soit [ $-31^{\circ}C$  /  $+90^{\circ}C$ ], nous n'avons pas à nous inquiéter de l'absorption atmosphérique.

# 1.2.6.3. Systèmes de concentration infrarouge

Pour concentrer le rayonnement I.R. on utilise généralement en fonction de la longueur d'onde, des lentilles en Quartz, en  $CaF_2$ , en Ge, en Si ou une lentille de Fresnel en polyéthylène ou encore un miroir en Aluminium ou en Or. La figure 10 ci-dessous montre la transmittance pour des matériaux typiquement utilisés en optique I.R.



Figure 17 - Transmittance des systèmes optiques (Réf. 4)

Il est parfois utile d'employer un filtre passe-bande pour sélectionner une longueur d'onde dont il est nécessaire de considérer le maximum (centre ou pic), la demi-largeur de transmittance (FWHM) et la largeur à 5% de transmittance.



Figure 18 - Exemple de transmittance caractéristique pour un filtre passe-bande (Réf. 4)

Nous allons faire référence ici au concentrateur type des détecteurs à infrarouge passif. Le détecteur à infrarouge passif (ils sont dits "passifs" car ils n'émettent aucun rayonnement, ils se contentent de travailler en réception) est actuellement l'un des meilleurs choix possibles en matière de protection volumétrique (car ils surveillent des volumes), même s'il ne peut prétendre remplacer une bonne protection périmétrique (détecteurs d'ouverture pour fenêtres, portes,...de chocs, barrière infrarouge,etc...car ils sont en général situés à la périphérie du local à surveiller).

Les très petites dimensions de ces types de détecteurs pourraient permettre d'installer des "traquenards" fort discrets dans toutes sortes de lieux, mais une solution est de faire appel aux ressources de l'optique pour protéger une zone importante avec un seul capteur.

Ces détecteurs, improprement appelés radars dans certaines documentations, n'ont rien à voir avec le principe de ces appareils. Ils détectent en effet toute variation (rapide) de température dans la zone qu'ils surveillent. (Réf. 8)

Ils réagissent à l'arrivée de tout être humain mais aussi de tout animal à sang chaud (*chien, chat, etc..*) dans leur zone de détection, alors qu'ils restent insensibles aux variations lentes de température provoquées par les cycles jours-nuit par exemple. D'usage quasiuniversel en intérieur, ces détecteurs prennent en compte le rayonnement calorifique émis par les personnes, mais ne se déclenche qu'en cas de mouvement. Ainsi une paroi chaude (soleil) ne sera pas détectée. Par contre un convecteur électrique puissant pourra être détecté (passage du froid au chaud)

Bien sûr, de tels appareils ne peuvent absolument pas détecter quoi que ce soit au travers d'une paroi, fut-elle en matériau mince. Ils doivent impérativement avoir une visibilité optique de l'intégralité de la zone à surveiller.

Cette zone justement est définie par une lentille, généralement de couleur laiteuse et finement striée qui occupe la majorité de la surface de leur boîtier.

Cette lentille, qui n'est autre qu'une **lentille de Fresnel**, définit de façon précise les zones que le capteur va "voir" ou non.





Le choix de la lentille de Fresnel est très important pour tout système car elle permet d'accroître sensiblement les performances de la détection. Les passionnés d'optique apprécieront à leur juste valeur ces composants qui pourtant "ne payent pas de mine": on les croirait découpés dans une simple feuille de plastique translucide! (polyéthylène)



Figure 20 - Transmittance du polyéthylène

En y regardant de plus près, on distingue cependant de fines gravures sur l'une des faces: c'est là que réside tout le secret. Il s'agit à vrai dire de la même technique que celle utilisée pour réaliser les plus puissantes des lentilles, celles équipant les phares maritimes: chaque strie est en fait un minuscule prisme moulé avec une extrème précision, et l'ensemble se comporte pratiquement comme une épaisse lentille de verre, bien que son épaisseur soit inférieure au millimètre. Mieux encore, en associant de multiples microprismes de caractéristiques différentes, on peut obtenir un résultat qui exigerait normalement l'assemblage de plusieurs lentilles très particulières.



Figure 21 - Caractéristiques d'une lentille de Fresnel (Réf. 9)

Le meilleur exemple est celui de la figure 21 : la lentille est un rectangle qui ne rassemble pas moins de vingt-quatre lentilles distinctes. Pourvu qu'on l'installe avec le rayon de courbure prescrit et que le détecteur pyroélectrique (voir chapitre 1.3.1.) soit placé à son foyer optique; on obtiendra de ce fait vingt-quatre zones de détection distinctes réparties dans un quart de cercle de rayon 10 à 12 mètres. (Réf. 9)

Non seulement cette disposition permet de concentrer la sensibilité du détecteur sur les zones significatives, mais en plus elle accentue l'aptitude de l'ensemble à détecter des mouvements lents (cambrioleur astucieux cherchant à tromper le système). En effet, chaque zone sensible est séparée de sa voisine par un secteur insensible: en passant, même très lentement, d'un secteur au suivant, un corps rayonnant engendrera automatiquement une nette variation du rayonnement reçu.



Figure 22 - Caractóristiques de lentille de Fresnel (Réf. 9)

La lentille de la figure 22 est de même dimentions que celle de la figure 21, mais présente des caractéristiques optiques fondamentalement différentes: sa zone de sensibilité se réduit à un mince "rideau" constituant une véritable "barrière invisible". Son emploi est généralement réservé à des cas un peu spéciaux, notamment lorsqu'une zone sensible trop large entraîne des risques de déclenchements intempestifs, spécialement en extérieur (présence d'animaux ou de passants).

Un positionnement extrêmement précis du capteur par rapport à la lentille est absolument indispensable pour que les performances annoncées par le constructeur soient obtenues.



Figure 23 - La zone de couverture d'un détecteur infrarouge passif dépend de la lentille qui l'équipe (Réf. 8)

La figure 23 montre ainsi à titre d'exemple quelques diagrammes de couverture des principales lentilles de Fresnel. On voit qu'ils peuvent différer assez notablement les uns des autres et donc que le choix de cette lentille pour l'utilisation en surveillance à en faire est très important.

De plus en plus souvent, ces détecteurs sont fournis avec un jeu de lentilles qu'il est facile de mettre en place en fonction des besoins puisque la zone de couverture de chacune d'entre-elles est indiquée dans la notice de l'appareil.

On peut ainsi couvrir des pièces de grandes dimensions avec des lentilles à zone de couverture hémisphérique, mais aussi de longs couloirs étroits avec des lentilles en faisceaux en forme de pinceau (voir par exemple la figure 24).

Figure 24 - Rideau (Réf. 9)



Pour concentrer le rayonnement I.R., il est possible d'utiliser un réflecteur de type parabolique ainsi on s'affranchit de l'effet filtre optique et du coefficient de transmission. Par contre il faut tenir compte du pouvoir réflecteur des métaux dans l'I.R.. Ces phénomènes seront étudiés dans le chapitre II en fonction du choix du capteur.

# **1.3. LES CARACTERISTIQUES ET TYPES DE DETECTEURS I.R.**

La radiation I.R. est utilisée dans un large domaine aussi bien technique que scientifique, incluant l'industrie, l'agriculture, la médecine, l'astronomie, les communications et le domaine spatial. Les applications des détecteurs infrarouge s'étendent beaucoup aux domaines de la mesure et du contrôle. Il est utile d'avoir une large connaissance de tous les types de détecteurs et de connaître leur fonctionnement pour choisir un détecteur selon l'utilisation à en faire.

Les détecteurs thermiques peuvent être séparés en détecteurs à contact recevant la chaleur par conduction ou convection et détecteurs sans contact recevant les radiations thermiques sous forme d'ondes électromagnétiques.

Les "détecteurs thermiques à contact" sont de type sonde thermique, thermocouple, thermomètre à liquide...Ces détecteurs sont classiques, leurs descriptions et fonctionnements sont bien connus mais inutilisables pour notre détection I.R. à distance.

Les "détecteurs sans contact" ont la caractéristique essentielle d'être sensibles à un spectre de rayonnement I.R.. Un détecteur de rayonnement est un capteur qui, sous l'effet d'une densité de flux  $\phi$  de rayonnement, subit une modification "d'amplitude A" de l'une de ses propriétés. Cette modification est d'autant plus importante que la valeur de la densité de flux est élevée; ainsi on peut déduire la valeur de  $\phi$  de la mesure de "A". Cependant, en réalité, le détecteur sans contact capte plus ou moins convenablement les impulsions thermiques et leur transformation en impulsions électriques dépend du flux absorbé  $\phi_A$ . Comme c'est la valeur de  $\phi$  qu'il est important de connaître, il est indispensable de relier la valeur de  $\phi_A$  à celle de  $\phi$ . (Réf. 10)

Un étalonnage au préalable permet en général d'obtenir cette relation avec précision. Nous ne nous attarderons pas aux méthodes d'étalonnage des capteurs puisqu'ils ne ressortissent pas de ce rapport, mais il sera intéressant d'expliciter celui appliqué au capteur de notre système.

Deux méthodes de base permettent la détection des radiations électromagnétiques:

l'effet d'absorption d'énergie intégrée, utilisé par les détecteurs thermiques, et l'effet de variation quantitative directe induite par les photons, utilisé par les détecteurs quantiques.(voir paragraphe 1.3.2.1.)

L'énergie des I.R. est donnée par: (Réf. 1)

 $E = hC/\lambda = 1,24/\lambda$  [en eV] (29) h: constante de Planck = 6,625.10<sup>-34</sup> J.s = 4,14.10<sup>-15</sup> eV.s C: 3.10<sup>10</sup> cm/s  $\lambda$  = longueur d'onde en µm

On peut dire que les I.R. ont des petits niveaux d'énergie allant de 1,24 eV pour  $1\mu m$  à 0,12 eV pour  $10\mu m$  si on les compare aux niveaux du visible et de l'ultraviolet (U.V.) Ces faibles niveaux nécessitent donc l'usage de capteurs très sensibles.

#### 1.3.1. Caractéristiques des détecteurs

Lorsque l'on veut utiliser des détecteurs I.R. certains paramètres doivent être pris en considération afin d'établir un choix permettant l'usage d'un capteur pour une application bien précise. Ces paramètres, déterminant les performances pour tous types de capteurs, sont essentiellement présentés ci-dessous comme guide de sélection pour les détecteurs infrarouge : (Réf. 4)

| Types de Détecteurs |   |                        | Détecteurs   | Reponse<br>Spectrale<br>(µm)                           | Température<br>d'utilisation<br>(T)                 | D*<br>(cm.H2½/W)   |
|---------------------|---|------------------------|--|--|---|--|
| Type<br>thermique   | Thermocouple, Thermopile, Fluxmètre<br>Bolomètre<br>cellule Pneumatique<br>Détecteur Pyroélectrique |                        | Cellule de Golay ,<br>Capacité microphone<br>TGS, LiTaO3 | Indépendant de la<br>longueur d'onde                   | 300<br>300<br>300<br>300                            | $D^{*}(\lambda, 10, 1) = 6 * 10^{8}$<br>$D^{*}(\lambda, 10, 1) = 1 * 10^{8}$<br>$D^{*}(\lambda, 10, 1) = 1 * 10^{9}$<br>$D^{*}(\lambda, 10, 1) = 2 * 10^{8}$   |
|                     | Type<br>Intrinsèque   | Type<br>Photoconductif | PbS<br>PbS<br>HgCdTe                                     | 1 à 3.6<br>1.5à 5.8<br>2 à 16                          | 300<br>300<br>77                                    | D*(500,600,1)=1×10 <sup>9</sup><br>D*(500,600,1)=1×10 <sup>8</sup><br>D*(500,600,1)=2×10 <sup>10</sup>   |
| Type<br>quantum     |   | Type Photovoltaïque    | Ge<br>InGaAs<br>InAs<br>InSb<br>HgCdTe                   | 0.8 à 1.8<br>0.7 à 1.7<br>1 à 3.1<br>1 à 5.5<br>2 à 16 | 300<br>300<br>77<br>77<br>77<br>77                  | $\begin{array}{l} D^{*}(\lambda p,1000,1) = 1 \times 10^{11} \\ D^{*}(\lambda p) = 5 \times 10^{12} \\ D^{*}(500,1200,1) = 1 \times 10^{10} \\ D^{*}(500,1200,1) = 2 \times 10^{10} \\ D^{*}(500,1000,1) = 1 \times 10^{11} \end{array}$ |
|                     | Type Extrinsèque  |                        | Ge:Au<br>Ge:Hg<br>Ge:Cu<br>Ge:Zn<br>Si:Ga<br>Si:As       | 1 à 10<br>2 à 14<br>2 à 30<br>2 à 40<br>1à17<br>1à23   | 77<br>4.2<br>4.2<br>4.2<br>4.2<br>4.2<br>4.2<br>4.2 | $D^{*}(500,900,1)=1\times10^{11}$<br>$D^{*}(500,900,1)=8\times10^{9}$<br>$D^{*}(500,900,1)=5\times10^{9}$<br>$D^{*}(500,900,1)=5\times10^{9}$<br>$D^{*}(500,900,1)=5\times10^{9}$<br>$D^{*}(500,900,1)=5\times10^{9}$                    |

Tableau 2 - Types et caractéristiques des détecteurs infrarouge disponibles dans le commerce

τ<del>η</del>

# 1.3.1.1. Le temps de réponse (Réf. 10)

C'est le temps entre le brusque éclairement du détecteur et la montée du courant ou de la tension à sa valeur maximale. Pratiquement, on utilise la constante du temps qui est définie comme le temps nécessaire pour que le signal électrique atteigne 63% de sa valeur finale.

En plus des caractéristiques du détecteur, la constante de temps peut dépendre, suivant les capteurs, de la température du détecteur, du taux de radiation de l'arrière-plan parvenant au détecteur et de la longueur d'onde de l'éclairement. Il est donc très important de tenir compte de ces trois paramètres lorsque le choix du capteur est à prendre pour une application bien définie.

C'est ainsi, par exemple, qu'une communication optique nécessitera une fréquence de réponse de 1 GHz tandis qu'une détection d'intrusion humaine sera de l'ordre de 0,1 Hz à 10 Hz.

#### 1.3.1.2. La réponse spectrale

Comme la figure 25 nous le montre, il existe une grande variété de détecteurs I.R. possédant des caractéristiques en réponse spectrale très différentes.





72

La réponse spectrale est la réponse obtenue en excitant le détecteur par un flux de radiation constant par unité d'intervalle de longueur d'onde.

La réponse des détecteurs thermiques est proportionnelle à l'énergie absorbée. Elle est représentée par une droite horizontale dans le diagramme des réponses relatives en fonction de la longueur d'onde comme nous pouvons le voir sur la figure 25.

Pour les détecteurs quantiques (photoniques) (voir paragraphe 1.3.2.1.), il existe, dans le cas idéal, une longueur d'onde d'arrêt, au-delà de laquelle le détecteur ne répond plus. De plus ces détecteurs sont sensibles, non pas à l'énergie rayonnante, mais au nombre des photons absorbés. Comme l'énergie des photons est inversement proportionnelle à la longueur d'onde (loi de Planck), le détecteur est conçu pour absorber davantage de photons aux grandes longueurs d'onde, ce qui permet d'obtenir une énergie constante en fonction de la longueur d'onde. Il en résulte une courbe de réponse croissante avec  $\lambda$ , jusqu'à la longueur d'onde d'arrêt  $\lambda_a$  qui compense l'effet de la loi de Planck. La mesure de cette réponse spectrale se fait habituellement pour un flux d'énergie constant, plutôt que pour un flux de photons donné, en balayant la gamme des longueurs d'onde intéressantes.

Dans la pratique, la réponse du détecteur n'est pas parfaitement linéaire et la chute de sensibilité n'est pas forcément brutale à la fréquence de coupure comme le montre la figure 26, théorique (Réf. 10). Aussi est-il bon de se représenter théoriquement les réponses spectrales des détecteurs thermiques et quantiques telles que sur la figure 26, mais il est juste de se référer expérimentalement au tableau des réponses 25 pour n'importe quelle application en détection I.R..





# Bande de fréquences (ou température) de l'objet à mesurer :

En référence aux réponses spectrales des détecteurs I.R. de la figure 18 et des limites en température, comme nous l'indique la table 2 de quelques détecteurs, il est nécessaire et judicieux de sélectionner les détecteurs I.R. selon les applications à en faire.

| Limite basse en température | Détecteur infrarouge |  |  |
|-----------------------------|----------------------|--|--|
| 873°K                       | Si                   |  |  |
| 473°K                       | Ge                   |  |  |
| 373°K                       | FuS                  |  |  |
| 323°K                       | PbSe                 |  |  |
| 273°K                       | InSb                 |  |  |

Tableau 3 - Limites en température de quelques détecteurs I.R. (Péf. 4)
### 1.3.1.3. La sensibilité (Réf. 10)

La sensibilité est le rapport entre l'amplitude de sortie du détecteur et l'énergie radiante incidente:

$$\mathbf{S} = \mathbf{V}/\boldsymbol{\phi} \qquad \left[ \mathbf{V}/\mathbf{W}/\mathbf{m}^2 \right] \tag{30}$$

V : Signal de sortie [V]

 $\phi$ : énergie incidente [W/m<sup>2</sup>]

1.3.1.4. Responsivité (densité de sensibilité) (Réf. 10)

La responsivité est la tension (ou courant) de sortie par Watt quand le bruit n'est pas pris en considération.

$$\mathbf{R} = \mathbf{V}/\mathbf{A}.\boldsymbol{\phi} = \mathbf{S}/\mathbf{A} \qquad [\mathbf{V}/\mathbf{W}] \qquad (31)$$

A : surface sensible (active) du détecteur

1.3.1.5. N.E.P. ("Noise Equivalent Power") (Réf. 10)

Le NEP représente un seuil minimal de détection pour un détecteur. Il s'exprime par le rapport entre la quantité de bruit intrinsèque du capteur et la quantité de puissance radiative incidente reçue par le capteur : c'est-à-dire lorsque le rapport de ces deux quantités est égal à l'unité. Ou encore, ce seuil est atteint quand le détecteur est éclairé avec une puissance nécessaire à l'apparition d'un signal de sortie équivalent au bruit électrique du détecteur.

Le détecteur qui engendre une tension de sortie supérieure par rapport à un autre, à éclairement égal, est de plus grande sensibilité. Le détecteur à grande capacité de détection a une faible puissance équivalente de bruit. Ainsi "le NEP est un critère de détection".

La limite théorique d'un détecteur peut être calculée en analysant les différents types de bruit du détecteur: bruit de Johnson (thermique) dû aux électrons de conduction, bruit aléatoire d'environnement arrivant sur le détecteur, bruit de l'excitation de la maille du détecteur, etc.. Alors que le bruit de Johnson relatif à l'agitation thermique est donné par la relation de Nyquist, le NEP équivaut à:

$$\mathbf{NEP} = \mathbf{N} / \mathbf{R} \cdot \sqrt{\Delta \mathbf{f}} \qquad [\mathbf{W} / \sqrt{\mathbf{H}}\mathbf{z}] \qquad (32)$$

N : bruit en sortie :  $\sqrt{4kTBR_e}$  [V] R : responsivité [V/W]  $\Delta f$  : largeur de bande pour le bruit [Hz]

# 1.3.1.6. Détectivité normalisée D\* (Réf. 4)

Ce paramètre est directement lié à la sensibilité du détecteur. C'est la quantité qui définit la puissance minimale qu'un détecteur peut "voir".

Comme le bruit dépend de la largeur de bande de l'amplificateur ( $\Delta f$ ) auquel le capteur est raccordé et aussi de la surface du détecteur (s), la détectivité est normalisée pour une surface de détecteur de 1 cm<sup>2</sup> et pour une largeur de bande de l'amplificateur de 1 Hz. La puissance normalisée est celle du corps noir à 500°K à la valeur de pic de la bande passante du détecteur. Cela donne la détectivité normalisée D\* utilisable pour faire une comparaison de différents détecteurs.

$$\mathbf{D}^{\star} = \sqrt{\mathbf{A}} / \mathbf{NEP} \qquad \left[ \operatorname{cm.} \sqrt{\mathrm{Hz}} / \mathrm{W} \right] \qquad (33)$$

On peut dire que plus la valeur de D\* est élevée, meilleur est le détecteur.

Notons que D\* peut apparemment être augmenté virtuellement en réduisant les rayonnements de l'arrière-plan, en réduisant le champ de vue du détecteur ou en utilisant des filtres diminuant la gamme spectrale que le détecteur "voit".

Cependant, habituellement la réduction des radiations d'arrière-plan exige un refroidissement supplémentaire, ce qui entraîne une augmentation de la constante de temps. De même un filtre incorrect peut réduire les radiations de la source (cible).

Une relation est établie entre la détectivité D\* du détecteur et de son pic de responsivité à une longueur d'onde donnée. Comme il a déjà été dit précédemment, dans l'établissement des caractéristiques d'un détecteur I.R., un corps noir à 500°K est très souvent utilisé comme source radiative. Entre D\* (500, f, 1) du corps noir comme source de radiation et D\* ( $\lambda$ , f, 1) pour une longueur d'onde  $\lambda$  à son pic de responsivité, la relation suivante est donnée:



Figure 27 - Relation entre D\* et le pic de responsivité à une longueur d'onde (Réf. 4)

• Limite théorique de D\*: (voir Figure 26) (Réf. 4)

Comme nous venons de le dire dans le paragraphe1.3.1.5. NEP, certains bruits viennent perturber la détection des infrarouges. Ces bruits peuvent venir du détecteur I.R. lui-même, comme de son circuit électronique ou du bruit aléatoire d'environnement.

Supposons que le bruit propre du capteur et de son circuit soient négligeables par rapport au bruit d'environnement. La limite de détection peut être alors déterminée seulement par le bruit d'environnement. Il est appelé "Blackground Limited Infrared Photodetection" (Bruit Limitant la Détection Infrarouge) (**BLIP**).

Les Blips des types de détecteurs photovoltaïques et photoconductifs sont donnés par:

$$D^*_{\text{photovoltaïque}} = \lambda \sqrt{\eta} / hc \sqrt{2Q} \qquad [cmHz^{1/2} / W] \qquad (34)$$

 $\lambda$  : longueur d'onde

 $\eta$  : nbre de porteurs

h : constante de Planck

$$D_{\text{photoconductif}}^{*} = \lambda . \sqrt{\eta} / 2hc\sqrt{Q} \quad [cmHz^{1/2} / W]$$
 (35)

76

c : célérité

Q: flux des radiations environnantes

# 1.3.2. Types de détecteur I.R.

Grâce à la détection des radiations I.R. à l'aide de capteurs spécifiques, des mesures sans contact, des systèmes de surveillance ou la recherche de certains facteurs comme la température, sont possibles de jour comme de la nuit.

Les détecteurs I.R. sont essentiellement classés en deux groupes:

- <u>les détecteurs quantiques</u> (les photons incidents interagissent directement avec les électrons de la matière du détecteur. Ces détecteurs sont toujours des semi-conducteurs).
- <u>les détecteurs thermiques</u> (le rayonnement absorbé par la maille provoque son échauffement, ce qui produit une variation dans le comportement électrique de la matière).

## 1.3.2.1. Les détecteurs quantiques ou "quanta"

## 1.3.2.1.1 Généralités

Les détecteurs type quantum ont en général une très grande détectivité comme nous pouvons le voir sur la figure 25.

Leur temps de réponse est d'autre part très court (  $< 10 \mu s$  ) (Réf. 10)

Leur responsivité est dépendante de la longueur d'onde, ce qui oblige l'utilisateur à choisir le capteur en fonction de la source infrarouge à surveiller.

Très souvent, ces types de capteurs s'échauffent avec le rayonnement qu'ils reçoivent. Ils nécessitent alors un système de refroidissement appelé "cooling" tel que, par exemple, un environnement gazeux.

Tous ces détecteurs de photons sont basés sur l'interaction. Le résultat d'une interaction entre photon et matière est appelé "photon-effet". Comme il nous est rappelé dans le rapport du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, il existe quatre possibilités:

- Le photon incident transfère toute son énergie à un électron du matériau détecteur, l'électron peut avoir alors une énergie suffisante pour s'échapper de la surface. Cet effet est appelé effet <u>photoélectrique</u> ou <u>photoémissif</u>.
- Par ailleurs, il y a un grand nombre de "photoeffets" internes dans lesquels l'énergie transférée d'un photon à un électron, d'un état non conducteur à un état conducteur, produit un transfert de charges. Si le matériau est un semiconducteur pur ou intrinséque, il y a création d'une paire électron-trou. Si le matériau est un semi-conducteur avec des impuretés, ou extrinsèque, il n'y a transfert que d'une seule charge. En appliquant un champ électrique, il y aura variation des charges. Cet effet s'appelle <u>l'effet photoconducteur</u>.
- Si le photon produit une paire électron-trou au voisinage d'une jonction p-n, le champ électrique à travers la jonction séparera les deux charges pour donner une différence de tension. Cet effet s'appelle <u>l'effet photovoltaïque</u>.
- Si la paire électron-trou est formée près de la surface d'un semi-conducteur, elle tend à diffuser à l'intérieur du matériau de façon à rétablir une équivalence

électrique. Durant ce processus, les charges peuvent être séparées par un champ magnétique intense. Cet effet s'appelle <u>effet photoélectromagnétique.</u>

### 1.3.2.1.2. Les détecteurs photoélectriques ou photoémissifs (Réf. 10)

Ils sont très anciens et peu pratiques.

Un détecteur photoélectrique se compose, en général, d'une cathode photoémissive et d'une plaque métallique enfermées dans un tube à vide constitué d'une enveloppe (de fabrication diverse). Une tension est appliquée à l'extérieur et maintient le potentiel de la plaque à environ +100 V par rapport à celui de la cathode. Lorsqu'un rayonnement vient frapper la photocathode, il y a émission d'électrons dont les charges sont recueillies par la plaque au potentiel supérieur. Cependant, la surface photoémissive crée des électrons par excitation thermique, ce qui vient perturber la détection et limiter le seuil de détection. Ce nombre d'électrons ou ce bruit de fond parasite peut être réduit par refroidissement de la photocathode.



### **1.3.2.1.3.** Les détecteurs photoconductifs (Réf. 10)

conducteurs dont la résistance interne décroît avec l'augmentation de l'intensité lumineuse.

Ce sont des détecteurs semi-

Les radiations infrarouges provoquent l'excitation des porteurs de charges entre les lieux de valence et de conduction dans le cas des semi-conducteurs purs (excitation intrinsèque) et entre le niveau d'impureté et une des bandes dans le cas des semiconducteurs impurs (extrinsèques).

a) Effet photoconductifb) Effet photovoltaïque

**Figure 28 -** Effet quantique (Réf. 10)

Cette excitation provoque un changement de la densité des porteurs du semiconducteur, ce qui entraîne une variation de leur conductivité. Ces détecteurs, nommés photoconductifs, fonctionnent avec une source de courant continu et une résistance de charge.Comme pour les détecteurs photoélectriques, ces détecteurs ont une longueur d'onde limite au-dessus de laquelle un photon ne possède pas d'énergie suffisante pour créer une paire électron-trou. Ce détecteur commence maintenant à être utilisable au dessurde 7µm grâce à des nouvelles compositions de matériaux et semi-conducteurs associes à des systèmes de refroidissement importants. Les détecteurs photoconductifs intrinsèques sont en général du Silicium, Germanium, Sulfate de plomb, Arsenic d'indium...(voir tableau 2)

Afin d'augmenter le seuil de détection, il faut utiliser des détecteurs extrinsèques ou dopés. La plupart de ces détecteurs utilisent du Germanium ou Silicium dopé avec de l'or, ou du cuivre par exemple. Seuls les matériaux du type p sont en général utilisés en détection I.R.. On peut ainsi reculer la limite de longueur d'onde à  $\lambda$ >100µm.

En règle générale: (Réf.10)

- pour la détection de rayonnements de longueur d'onde λ<3μm, il n'est pas utile de refroidir ces détecteurs.
- pour la détection de rayonnements de longueur d'onde  $3 < \lambda < \mu m$ , le refroidissement doit se faire aux alentours de  $77^{\circ}$ K. (-196°C)
- pour la détection de rayonnements de longueur d'onde  $\lambda > 17 \mu m$ , le refroidissement doit descendre vers  $10^{\circ}$ K.

Les technologies de réalisation des détecteurs photoconducteurs ainsi que celles pour les détecteurs photovoltaïques présentés ci-après, sont celles des transistors: croissance épitaxiale des cristaux, purification, dopage... Ces techniques ont permis d'obtenir et de développer encore aujourd'hui de nouveaux détecteurs. Il faut signaler, par exemple, chez le fabriquant HAMAMATSU, que la réalisation de certains semiconducteurs tels que les HgCdTe et PbSnTe a permis d'augmenter très fortement la largeur de bande de travail. En effet, le cristal du HgCdTe a sa hauteur de Gap dépendant de la composition intrinsèque d'HgTe ou CdTe. Cela permet, en fonction de ces compositions, d'obtenir des détecteurs infrarouge ayant une responsivité maximale dans une certaine bande de fréquences. De la hauteur du Gap Eg et de la longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$  il existe la relation suivante:

$$\lambda_{c \ [\mu m]} = 1,24/Eg_{[eV]} \tag{36}$$

En associant les paramètres composition intrinsèque, niveau du Gap et la température, nous obtenons la formule<sup>1</sup> suivante:

$$Eg = 1,59x-0,25+5,23\cdot10^{-4}$$
.T. $(1-2,08x)+0,327x^{-3}$  (Réf.10) (37)

où x est le chiffre de composition de Hg<sub>1-x</sub>.Cd<sub>x</sub>Te et T est la température absolue (°K).



concentration intrinsèque (Réf.4)

<sup>1</sup>Relation établie par D.Long, Energy Bands in Semiconductors (1968), Wiley, N.Y.

Il faut remarquer que le bruit de ce type de détecteur est un bruit composé du bruit de courant en 1/f, du bruit des recombinaisons des électrons et des trous, et du bruit de Johnson correspondant au bruit thermique. Le bruit en 1/f est donc dominant en fréquences basses et le bruit de recombinaison élevé en fréquences hautes.



Lorsque ce détecteur est utilisé au-dessus de  $3\mu m$ les fluctuations des radiations environnantes à 300°K par exemple ne peuvent pas être ignorées et sont considérées comme un bruit important. En effet, lorsque la température ambiante augmente, le nombre des photons de l'environnement augmente dans le même sens que les porteurs de l'élément semi-conducteur.

**Figure 31** - Rapport Signal / Bruit (Réf.4)

Cela raccourcit la durée de vie moyenne des porteurs excités par la lumière du signal incident et donc la responsivité diminue. Pour prévenir ce phénomène, il est nécessaire de prêter attention au design du système optique. Pour l'instant, la seule possibilité utilisée par les fabriquants est d'empaqueter l'élément détecteur afin de l'isoler du milieu extérieur et de le refroidir à l'aide d'un gaz (Azote à -196°C).



Figure 32 - Exemples d'empaquetage.

# 1.3.2.1.4. Les détecteurs photovoltaïques

Un détecteur photovoltaïque est une jonction p-n faite dans un semiconducteur intrinsèque, ce qui limite la longueur d'onde maximale détectable.

Un détecteur photovoltaïque est une photodiode qui convertit une énergie radiante incidente en un courant ou une tension quand ce flux radiatif entre dans sa jonction p-n.

Dans le cas des semi-conducteurs à jonction p-n, nous pouvons dire que lorsqu'il n'arrive pas d'énergie I.R. sur le détecteur, un équilibre thermique s'établit au niveau de Fermi sur tout le semi-conducteur p-n. Il se forme alors un potentiel aux contacts de sortie dû à une barrière de potentiel s'établissant dans la couche de déplétion.



Figure 33 - Structure des niveaux

Lorsque les photons de radiation des I.R. entrent en interaction avec les porteurs au voisinage de la jonction p-n, ces porteurs sont excités. Quand l'énergie de ces électrons excités est supérieure à l'énergie Eg du Gap, ces électrons sautent ce Gap et arrivent dans la bande de conduction, devenant eux-mêmes porteurs libres et laissant des trous positifs dans la bande de valence.



Figure 34 - Effet phototension (Réf. 10)

De ce fait, les trous positifs de la zone de déplétion sont attirés dans la couche p et les électrons libres négatifs de cette zone de déplétion se déplacent dans la couche n au travers de la barrière de potentiel. Le stockage de charges au niveau de la barrière de potentiel, le déplacement d'électrons libres de la couche n vers p, ainsi que le déplacement des trous de p vers n, ont comme effet d'engendrer une phototension.

Comme tous les autres types de détecteurs, les limites les plus basses pour la détection de lumière pour un détecteur photovoltaïque sont déterminées par leurs

caractéristiques en bruit. Le bruit  $i_n$  d'un détecteur I.R. photovoltaïque s'exprime par la somme du bruit de Johnson  $i_j$  causé par la résistance de shunt interne  $R_{sh}$  et du bruit  $i_s$  résultant du photocourant et du courant noir.

Ce bruit in est donné par :

$$i_n = \sqrt{i_j^2 + i_s^2}$$
 (Réf. 10) (38)

Etant donné que les détecteurs I.R. photovoltaïques ont un courant noir important, ils sont utilisés sous potentiel nul. Dans ce cas le bruit est déterminé seulement par le bruit de Johnson  $i_i$  et vaut:

$$i_n = i_j = \sqrt{4.k.T.B / R_{sh}}$$
 (Réf. 10) (39)

avec k : constante de Boltzmann

- $T : T^{\circ}$  absolue
- B : largeur de bande

Quand le détecteur est utilisé sous une tension, le courant est ajouté et vaut :

$$\mathbf{i}_{s} = \sqrt{2qIB}$$
 (Réf. 10) (40)

q : charge élémentaire

I : photocourant + courant noir

Il faut dire que généralement le bruit des radiations environnantes à une température de 300°K n'est pas négligeable, aussi ce bruit est le seul à être pris en compte, et la directivité D\* des détecteurs photovoltaïques s'exprime par :

$$\mathbf{D}^{\star} \left[_{\operatorname{cm} \operatorname{H}^{1/2}/\operatorname{W}}\right] = \lambda \sqrt{\eta} / \operatorname{h.c.} \sqrt{2q} \qquad (\operatorname{R\acute{e}f. 10}) \qquad (41)$$

 $\lambda$  : longueur d'onde

 $\eta$ : nombre de particules

h : constante de Planck

c : célérité

q : flux des radiations environnantes [ nombre de photons /  $cm^2$ . sec. ]

<u>Remarque:</u> Quand la lumière du visible ou de l'ultra-violet en plus des I.R. à mesurer entrent dans le détecteur, des charges électriques s'accumulent à la surface de l'élément, donc le courant noir tend à augmenter. L'augmentation de ce courant noir fait augmenter le niveau du bruit, dégradant de ce fait le rapport signal / bruit. Pour filtrer le visible et l'U.V., les constructeurs ont placé une couche filtrante au niveau de la fenêtre incidente. Toujours pour diminuer ce bruit, ils plongent leur élément sensible dans un milieu froid tel que l'azote liquide.

## 1.3.2.1.5. Les détecteurs photoélectromagnétiques

Ces détecteurs sont constitués d'un disque coupé dans un lingot de matériau semi-conducteur intrinsèque et d'un aimant. Les photons incidents produisent des paires électrons-trous qui sont séparées par le champ magnétique de l'aimant.

Ces détecteurs ne sont pratiquement jamais utilisés car leur sensibilité est beaucoup plus faible que celle des détecteurs photoconductifs ou photovoltaïques.

# 1.3.2.2. Les détecteurs thermiques

### 1.3.2.2.1. Généralités

Ces détecteurs ont la particularité d'avoir leurs propriétés physiques affectées par les radiations incidentes. Ces types de détecteurs utilisent la chaleur émise par les infrarouges.

Ils sont caractérisés par une responsivité indépendante de la longueur d'onde du rayonnement ( ils ont théoriquement une réponse identique quelle que soit la longueur d'onde du rayonnement. Voir chapitre III réponse fréquentielle.) et beaucoup de ces détecteurs thermiques ne nécessitent pas de système de refroidissement pour avoir un fonctionnement correct.

Ces détecteurs sont principalement de cinq types (Réf. 10): thermopile, bolomètre, pneumatique, calorimétrique sont d'utilisation ancienne, le pyroélectrique est plus récent. Leurs points communs sont :

\* relativement grande constante de temps due au fait que le détecteur chauffe et se refroidit et, donc, ne peut répondre à une variation rapide du rayonnement. Il faut remarquer que ce point a énormément évolué depuis une dizaine d'années. Voir paragraphe fluxmètre.)

\* pour éviter toute réflexion du rayonnement, le détecteur peut être recouvert d'une mince couche de peinture dont l'absorption est indépendante de la longueur d'onde.

\* ils peuvent être utilisés en bande spectrale en déposant un filtre mince sur le détecteur.

Un détecteur thermique idéal comporte un élément sensible ayant pour fonction d'absorber le rayonnement thermique à détecter en provenance d'une scène thermique ou d'une cible. C'est en pratique une surface "noire" absorbante thermiquement isolée et disposée de façon à absorber l'intégralité du rayonnement à mesurer.



Figure 35 - Détecteur thermique idéal

l'élément sensible étant thermiquement isolé, tout apport radiatif provoque une élévation de la température de l'élément sensible. L'élévation de température en fonction du temps est décrite par l'équation d'échange:

$$\mathbf{C} \cdot \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{dt}} \mathbf{T}_{\mathbf{d}} = \alpha \cdot \mathbf{\phi} + \alpha \cdot \mathbf{\phi}_{\mathbf{e}} - \mathbf{\phi}_{\mathbf{d}}$$
(42)

dans laquelle

C est la capacité thermique de l'élément détecteur,

 $T_d$  sa température instantanée

Te sa température d'environnement

 $\phi$  la puissance du rayonnement à détecter (watt)

 $\phi_e$  la puissance du rayonnement thermique en provenance de l'environnement

 $\phi_d$  l'émission propre du détecteur

α coefficient d'absorption de la surface du détecteur soumise au rayonnement

Le milieu environnement "vu" par la surface absorbante étant supposé à la température  $T_e$ , le flux d'énergie reçu par l'élément sensible de surface A en provenance du milieu environnant est

$$\phi_e = \mathbf{A}\sigma \mathbf{T_e}^4 \tag{43}$$

 $\sigma$  constante de Stephan 5,68.10-12 W/cm<sup>2</sup>K<sup>4</sup>

De la même façon l'émission propre de la surface du capteur est donnée par la relation

$$\phi_{\rm d} = \varepsilon A \sigma T_{\rm d}^{4} \tag{44}$$

T<sub>d</sub> température du détecteur

Pour un élément sensible (thermiquement isolé) vérifiant la relation classique  $\alpha = \varepsilon$ , l'équation d'échange prend la forme simplifiée

$$C \cdot \frac{d}{dt} T_{d} = \alpha \cdot \phi - \varepsilon A \sigma \left( T_{d}^{4} - \frac{\alpha}{\epsilon} T_{e}^{4} \right)$$
(45)

$$\mathbf{C} \cdot \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{d}t} \mathbf{T}_{\mathsf{d}} = \alpha \cdot \phi - \varepsilon \mathbf{A} \sigma \left( \mathbf{T}_{\mathsf{d}}^{4} - \mathbf{T}_{\mathsf{e}}^{4} \right)$$
(46)

Pour les faibles écarts entre la température de l'élément sensible et celle du milieu environnant

$$T_{d}^{4} - T_{e}^{4} = 4.T_{d}^{3}.(T_{d} - T_{e}) = 4.T_{d}^{3}\Delta T$$
 avec  $\Delta T = (T_{d} - T_{e})$ 

L'équation d'échange se simplifie sous la forme

$$C \cdot \frac{d}{dt} T_{d} = \alpha \cdot \phi - 4\epsilon A\sigma T_{d}^{3} \Delta T$$
(47)

qui admet pour solution asymptotique à l'équilibre thermique  $\frac{d}{dt}T_d = 0$ 

$$\phi = 4A\sigma T_d^3 \Delta T = G_R \Delta T$$

avec  $G_{R} = 4 \sigma A T_{d}^{3}$  coefficient de déperdition radiative

Mesurer l'énergie du rayonnement incident revient à mesurer l'élévation de la température de l'élément sensible par rapport à celle du milieu environnant.

- La sensibilité est définie par le rapport des grandeurs d'entrée et de sortie

$$S = \frac{\Delta T}{\Phi} = \frac{1}{G_{\rm R}}$$
(48)

<u>- La constante de temps</u> thermique par le rapport de la capacité thermique du détecteur à la conductance des dépenditions radiatives.

$$\tau_{th} = \underline{C} = \frac{\rho_c A_e}{G_R 4A \sigma T_d^4} = \frac{\rho_c e}{4\sigma T_d^4}$$
avec  $\rho$  masse volumique (49)  
c chaleur massique  
e épaisseur

La sensibilité et la constante de temps caractérisent le comportement du détecteur en régime de variation.

En l'absence de rayonnement thermique incident  $\phi = 0$ , la température de l'élément détecteur est égale à celle du milieu environnant ( $\Delta T = 0$ ;  $T_d = T_e$ ). En fait, la température T <u>fluctue</u> autour de sa valeur d'équilibre. L'énergie moyenne des fluctuations de température étant définie par le domaine spectral par la relation statistique:

$$\Delta T^2_{\min} = \frac{4kT^2}{G} \Delta F$$
(50)

k constante de Boltzmann  $\Delta F$  bande de fréquence

Il n'est pas possible de détecter un rayonnement thermique générant un signal de sortie de variance supérieure à  $\Delta T^2_{min}$ .

Compte tenu de la relation de définition de la sensibilité  

$$\Delta T^{2}_{min} = \oint_{m} \frac{\Phi_{m}^{2}}{G} = \frac{4kT^{2}}{G} \Delta F$$
(51)

On obtient la valeur du flux énergétique équivalente au bruit de sortie (NEP noise equivalent power)

$$NEP = \sqrt{\phi_m^2} = \sqrt{4kTG_r\Delta f}$$
(52)

Soit compte tenu de l'expression de la conductance radiative Gr

$$NEP = 4 \sqrt{4k\sigma}TSA\Delta f$$
(53)

La puissance d'entrée équivalente au bruit de sortie est la plus petite valeur du flux radiatif détectable. C'est une limite du détecteur. Pour caractériser l'aptitude d'un composant à détecter les faibles signaux, on introduit la détectivité à partir du NEP par la relation:

$$D = 1/NEP$$
 (coefficient mesurer en Watt) (54)

Les détecteurs les plus performants sont ceux qui ont la détectivité la plus grande. La détectivité normée est introduite pour comparer les détecteurs de rayonnement thermique entre eux à partir de la variance du signal amené

- à un capteur de surface unitaire

- à l'unité de bande passante

### 1.3.2.2.2. Le bolomètre

Le bolomètre est un détecteur thermique dont la résistance électrique subit une modification lorsqu'il reçoit un rayonnement incident. Dans la plupart des cas, les bolomètres sont constitués d'une barrette de métal connectée à une branche d'un pont de Wheastone. En général, le coefficient de résistance est de l'ordre de 0,5% par degré Celsius pour les métaux. Afin d'éliminer les dérives, on utilise deux barrettes identiques dont l'une est blindée au rayonnement incident.

Certains bolomètres sont également réalisés avec des matériaux semi-conducteurs, ce qui permet d'avoir des coefficients de résistance à la température de l'ordre de 4% par degré Celsius.

Ce type de bolomètres que l'on trouve dans le commerce utilisent pour matériau thermosensible une céramique (noire) d'oxydes de nickel, de cobalt et de manganèse dont on fait les thermistances. L'expérience montre que, dans ces bolomètres, le rapport signal/bruit passe par un maximum lorsque l'élévation de la température due à la polarisation est voisine de 4 °K; cette valeur est à comparer à la différence de température équivalente au bruit qui, pour une largeur de bande de 1 Hz, est ici de l'ordre de 1  $\mu$ K. La puissance dissipée engendre de la chaleur; l'expérience montre que l'on a intérêt à déposer la thermistance sur un support bon conducteur de la chaleur: on augmente ainsi la vitesse de réponse et la robustesse mécanique.

Le bolomètre thermistor possède un temps de réponse inférieur à 50 ms et est constitué de lamelles fines formées par agglomération d'oxydes métalliques. Ces lamelles sont montées sur un substrat isolé électriquement, lui-même monté sur une plaque de refroidissement.

Le bolomètre supra-conducteur utilise le grand changement de résistance qui intervient lors de la transition de certains métaux et semi-conducteurs de leur état normal à leur état supra-conducteur

Dans la gamme de transition, qui est seulement une fraction de degré Celsius, le coefficient de résistance à la température est d'environ 500% par degré Celsius. La température de transition se fait aux environs de 15°K.

Il existe aussi le bolomètre à "carbone", celui-ci refroidit à 2,1°K

Le bolomètre à germanium est constitué d'un cristal de gallium dopé au germanium et, refroidi à 2,1°K

Tous ces bolomètres sont généralement utilisés en laboratoire car il faut tout un système de stabilisation pour maintenir le détecteur à une température constante correspondant à la température de transition. La contrainte cryogénique en a limité jusqu'ici l'emploi à des expériences scientifiques telles que astrophysiques notamment.

### 1.3.2.2.3. Le détecteur "pneumatique"

C'est un thermomètre à gaz. Il est constitué d'un absorbeur placé dans une chambre à gaz. La chaleur dégagée par suite de l'absorption du rayonnement augmente le produit pression-volume d'une petite masse de gaz (une fraction de centimètre cube à 1 atmosphère et à  $20^{\circ}$ C) enfermée dans une enceinte étanche. Cette enceinte comporte deux chambres séparées par une membrane élastique très mince (10 nm) revêtue d'une métallisation formant électrode ou miroir. L'une de ces chambres contient une autre membrane mince recouverte d'un dépôt absorbant chargé de transformer le rayonnement en chaleur , laquelle est immédiatement transférée au gaz. L'élévation de température du gaz contenu dans cette chambre augmente son produit pression-volume et provoque une déformation de la première membrane. On observe cette déformation par un moyen électrique (variation de capacité : **détecteur de Luft**) ou optique (défocalisation de la lumière réfléchie par le miroir : **détecteur de Golay**) : le détecteur est donc un instrument complet comportant son propre amplificateur. Ces détecteurs ne sont sensibles qu'à des rayonnements modulés (de quelques hertz à une centaine de hertz) ; ils ont une très bonne détectivité spécifique D\*

Citons le détecteur calorimétrique: ce détecteur appelé aussi "détecteur noir" (black radiation detector) sert d'étalon pour déterminer la réponse spectrale des autres détecteurs. L'émissivité et l'absorption d'un tel détecteur sont maintenant supérieures à 0,995 du visible à 40  $\mu$ m. Ce type de détecteur est plus utilisé pour mesurer le rayonnement que pour la détection.

### 1.3.2.2.4. Le détecteur pyroélectrique

Le détecteur pyroélectrique est un détecteur pour lequel l'échauffement de la maille entraîne un changement de la polarisation des dipôles du solide. L'effet pyroélectrique est une propriété de toutes les matières ferroélectriques: variation spontanée de la polarisation électrique (concentration des charges électriques) de la matière aux sollicitations thermiques (Réf.21)(Réf.22)(Réf.23).

Un détecteur pyroélectrique, formé d'une mince plaque constituée de cristaux ferroélectriques placée entre deux électrodes, est semblable à un condensateur à plaques. Les radiations incidentes sur une électrode (transparente à la conduction thermique) augmentent la température des cristaux et engendre sur les électrodes une tension électrique proportionnelle à l'énergie rayonnante. L'accroissement de la température provoque une augmentation de l'agitation thermique d'où une diminution de la charge de surface dans la matière. Il en résulte un excès dans la charge induite sur les électrodes qui se traduit par un potentiel, suivant l'équation:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{C}.\mathbf{U} \qquad (\text{Réf.10}) \tag{57}$$

où

Q : exces de C : capacité

U: potentiel

La détection est faite en mesurant cet excès de charge par l'intermédiaire du courant passant par la résistance de charge à laquelle le détecteur est raccordé. La quantité d'excès de charge est proportionnelle au coefficient pyroélectrique dP / dT où P est le taux de polarisation.

Les comportements thermiques et électriques de ces détecteurs peuvent être représentés par un modèle global simplifié.



Figure 36 - Modèles de détecteurs pyroélectriques. (Réf. 10)

• modèle thermique:

Quand un élément pyroélectrique est soumis à une radiation, il absorbe une partie de l'énergie, ce qui augmente sa température et réfléchit le reste. La partie absorbée est liée à l'énergie incidente par le coefficient d'efficacité d'absorption (n). L'augmentation de la température de l'élément qui s'ensuit est inversement proportionnelle à sa capacité thermique C<sub>h</sub>, alors que la perte de la chaleur vers le support est proportionnelle à la conductivité de l'élément (G). Cet effet peut être représenté par le modèle thermique simplifié de la figure 36. Exposé à une intensité de radiation I (W/cm<sup>2</sup>), la variation de la température  $\Delta T$  de l'élément sera:

$$\Delta \mathbf{T} = \mathbf{n} \mathbf{I} / \mathbf{G} + \mathbf{j} \mathbf{w} \mathbf{C}_{\mathbf{h}} \qquad (\text{Ref. 10}) \qquad (58)$$

où w est la fréquence de modulation de la radiation incidente.

Ce modèle permet de déterminer les paramètres nécessaires à la construction d'un détecteur.

• modèle électrique:

D'après le modèle électrique (figure 29 b), le détecteur peut être considéré comme un générateur de courant:

$$I_e = S \cdot dP/dT \cdot \Delta T/dt \qquad (Réf. 10) \tag{59}$$

avec:  $\Delta T/dt = jw \Delta T$  : taux de variation de température

dP/dT = coefficient pyroélectrique ou taux de changement de polarisation avec la température

S = surface du détecteur

La variation de la tension aux bornes du détecteur est donnée par:

$$\Delta U = dP/dT \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{dt} \cdot 1/(1/R + jwC_e) \qquad (Réf. 10) \quad (60)$$

avec:

R: résistance de ch<sup>2</sup> ge du détecteur  $C_e$ : capacité électrique du détecteur.

De la combinaison des expressions de  $\Delta T$  (modèle thermique) et de la tension  $\Delta U$ , on déduit la sensibilité et les constantes de temps thermique et électrique. On peut en conclure que la constante de temps thermique (C<sub>h</sub>/G) doit être plus petite que la constante de temps électrique (R.Ce), due à la redistribution des charges compensatrices, pour que le signal puisse être prélevé. Physiquement, cela montre que le détecteur pyroélectrique est un générateur de courant alternatif qui mesure des <u>niveaux de température</u>, à la différence des autres détecteurs thermiques (bolomètres par exemple) qui mesurent des <u>variations de</u> température.

Le matériau pyroélectrique utilisé pour l'électronique générale doit présenter une grande stabilité en température car c'est en fonction de celle-ci que les caractéristiques propres de l'élément sont performantes. Pour le LiTaO<sub>3</sub>, les performances sont élevées et sa stabilité en température est remarquable pour une température d'utilisation fixe à 600°C. Bien sûr il existe une plus large palette de matériaux employés (figure 37) mais grâce à sa stabilité chimique, le LiTaO<sub>3</sub> est très souvent préféré par les fabriquants de détecteurs pyroélectriques.

| Température (°C)          | 49                | 618            | 200-270   | 220         | 1200               | 470                | 115            | 120      |
|---------------------------|-------------------|----------------|-----------|-------------|--------------------|--------------------|----------------|----------|
| Matériaux pyroélectriques | TGS               | LiTaO3         | PTZ       | PTZ modifié | LiNbO <sub>3</sub> | PbTiO <sub>3</sub> | SBN            | PVDF     |
|                           | Cristal organique | Cristal simple | céramique | céramique   | Cristal simple     | céramique          | Cristal simple | polymère |

Figure 37 - Matériaux pyroélectriques (Réf.3)

Comme points faibles, on peut signaler leur vieillissement rapide dû à la dégradation de la polarisation et la difficulté pour obtenir une bonne homogénéité des éléments du réseau en mosaïque, du point de vue sensibilité.

Les types de détecteur pyroélectrique habituellement proposés par les fabriquants tel que HAMAMATSU, PHILIPS, ... sont construits à partir d'un élément pyroélectrique à résistance élevée et d'un transistor FET à faible bruit empaqueté dans un boîtier TO5.





Le cristal pyroélectrique tel que le LiTaO<sub>3</sub> est spontanément polarisé. Si le cristal est chauffé à une température proche de la température de Curie (de stabilisation) par un champ électrique, les dipôles du cristal s'alignent dans la direction de ce champ électrique forcé. Quand les électrodes opposées se chargent au contact du cristal polarisé, la surface est électriquement chargée. Cette charge est neutralisée par les ions de l'air.

Quand la radiation I.R. entre dans le cristal, et est absorbée, la température du cristal change, transformant la polarisation spontanée de telle façon que la charge à la surface du cristal se déséquilibre. Ce déséquilibre de charge se transforme en sortie par une variation de tension équivalant à une détection de radiation I.R.. Etant donné que le détecteur pyroélectrique détecte la radiation seulement lorqu'il y a changement de température au niveau du cristal, il car nécessaire d'utiliser un chopper optique (type lentille

de Fresnel) pour détecter des objets très peu mobiles. La figure 39 suivante montre un schéma présentant l'effet pyroélectrique.



Figure 39 - Présentation schématique de l'effet Pyroélectrique (Réf. 14)

### 1.3.2.2.5. La thermopile

Les thermopiles sont des détecteurs thermiques possédant une surface sensible aux infrarouges. Cette surface peut être constituée de dizaines ou centaines de thermocouples (bismuth-antimoine, par exemple) branchés en série formant un ensemble absorbeur qui permet de convertir le signal thermique en signal électrique.

Ce type de détecteur fonctionne sans source de polarisation; la puissance dans la réponse provient de la puissance de l'excitation. Pour que la sensibilité soit grande, il est impératif que la conductance thermique entre l'absorbeur et le milieu environnant soit faible. La thermopile est le seul détecteur thermique utilisable en courants continus; même aux très basses fréquences, le bruit n'est en pratique que celui qui est dû à l'agitation thermique dans sa résistance.

Il existe trois types de thermopiles: (Réf. 10)

Les thermopiles à lames métalliques: elles sont formées par brasure de feuilles minces d'alliages (constantan, manganine,...) et découpées en forme de grecque, puis montées sur un support tel que les jonctions d'ordre impair soient maintenues à la température ambiante alors que celles d'ordre pair sont thermiquement isolées. Ces détecteurs ont en général une aire étendue, une faible sensibilité aux flux, ils sont lents mais robustes et fiables. Ils sont utilisés pour l'observation de rayonnements



Figure 40 - Thermopile à lames métalliques. (Réf. 10)

relativement intenses selon des méthodes et avec des instruments de mesure à courant continu.

Les thermopiles à couches semiconductrices (de Schwarz): thermopiles. l'élément Dans ces sensible est constitué par une petite feuille d'or soudée sur deux plots prismatiques de semiconducteurs euxmêmes brasés sur deux électrodes. disposition minimise Cette la



conductance et la capacité thermiques du détecteur, permettant d'obtenir une sensibilité au flux élevée et une grande résistance électrique par unité de surface. Ces thermopiles, relativement fragiles, sont conçues pour la radiométrie de signaux faibles avec modulation de l'excitation, amplification alternative de la réponse et détection synchrone.

Les thermopiles à couches minces: Elles sont formées par dépôt de métaux, (Sb. semi-métaux Bi. Te) ou semiconducteurs (Bi2Te3) formant une grecque sur un substrat isolant mince, plastique (Mylar, Kapton) ou un minéral  $(Al_2O_3,..)$ , lequel est collé au droit des ionctions froides sur un support conducteur de la chaleur. Ces détecteurs sont relativement sensibles et rapides; l'emploi de métaux ou semiconducteurs permet d'obtenir une résistance (10k $\Omega$ ) adaptée aux amplificateurs à découplage par transistor à effet de champ avec de grandes ou de petites surfaces sensibles.



Figure 42 - Thermopile à couches minces (Réf. 10)

# 1.3.2.2.6. Le fluxmètre thermique

Dans l'étude des systèmes physiques en évolution, la détermination des énergies d'intéraction entre systèmes a une importance capitale. Pour déterminer les énergies échangées, lors des études expérimentales, on utilise des méthodes basées sur la mesure des températures à l'aide de capteurs, et on détermine les échanges thermiques par calculs. En comparant les détecteurs thermiques infrarouges idéaux avec les capteurs fluxmétriques, on constate la différence suivante:



Figure 43 - Détecteurs thermiques à fluxmètre

Comparés aux détecteurs thermiques idéaux présentés dans le paragraphe 1.3.2.2.1., on mesure directement le bilan thermique pour les fluxmètres, soit:

en temps réél, 
$$\alpha . \phi + \alpha . \phi_e - \phi_d = \phi_{radiatif} = U/k$$
 (en W/m<sup>2</sup>) (61)

k étant le coefficient d'étalonnage correspondant à la sensibilité du capteur,

et U la force électromotrice générée par le fluxmètre.

on mesure des  $W/m^2$  correspondants à :

$$\phi$$
 (intrus) + ( $\alpha$ . $\phi_e - \phi_d$ ) (équilibre thermique) =  $\phi_{\text{radiatif mesurée}}$  (62)

c'est-à-dire que le fluxmètre détecte et mesure un équilibre thermique. Cet équilibre pouvant être perturbé par une intrusion.

 $\Rightarrow$  Lorsqu'on dérive l'équation (62), la variation de flux radiatif  $\phi_{rad}$  mesuré correspond au déséquilibre thermique provoqué par une intrusion. Nous avons utilisé cette remarque pour déclencher les alarmes de notre système de surveillance.

 $\Rightarrow$  Pour quantifier le système on mesure la variation minimum de densité de flux détectable.

On peut dire que cette variation minimum  $d_{dt}$  (bilan), pour être détectable, correspond au bruit thermique de la thermopile associée à son amplificateur.

### Les paramètres caractéristiques d'un fluxmètre radiatif sont les suivants:

• La sensibilité : comme nous l'avons déjà cité en 1313, c'est le rapport entre l'amplitude de la tension de sortie (générée par le capteur) et la densité de rayonnement absorbée ou émise par la surface sensible du capteur. La sensibilité est une valeur unique à l'émission et à la réception et se mesure en  $\mu V/W/m^2$  ou en mV/W/cm<sup>2</sup> suivant l'intensité du rayonnement à détecter. La sensibilité est définie par la relation: S = V/ $\phi$  (V/W/m<sup>2</sup>)

Mesurer la sensibilité, c'est imposer un échange radiatif déterminé entre la surface du capteur et le milieu environnant et mesurer la tension en sortie du capteur. Imposer un échande radiatif, c'est fixer l'écart entre la température du capteur et la température radiante vue par le capteur. En pratique, le capteur est posé sur une plaque métallique maintenant la température du capteur à une valeur constante et soumis au rayonnement d'une plaque métallique de grande surface placée à proximité. Un montage de deux plaques contrôlées en température et parallèles permet d'imposer un échange par rayonnement thermique et par suite l'étalonnage des fluxmètres radiatifs. Le capteur étant placé entre les plaques, la fem détectée est proportionnelle au nombre de thermocouples sur la surface sensible. Elle augmente donc avec la densité de thermoéléments intégrés par unité de surface, avec la surface active du capteur. Une valeur habituellement obtenue avec les capteurs utilisés est 4  $\mu$ V/W/m<sup>2</sup> ou 40 mV/W/cm<sup>2</sup>.

• La densité de sensibilité (la responsivité, 1314): on peut également caractériser un fluxmètre radiatif par la tension de sortie générée lorsque la surface sensible absorbe ou émet une puissance déterminée (100 mW par exemple). Par définition, la densité de sensibilité s'exprime par la relation 31, soit :  $R = V/\phi = V/A.\phi = S/A$  (en V/W) Ce coefficient à l'avantage de ne pas dépendre de la surface sensible du cantern. Il est de valeur d'autant plus important que la densité d'éléments intégrés sur la surface sensible à une valeur importante. • NEPD (Noise equivalent power density) : les paramètres précédents caractérisent uniquement la caractéristique statique de l'élément détecteur. Il faut également considérer pour les applications pratiques, les limitations dues au bruit de fond généré par le capteur et les appareils de mesure pour la détection des signaux de faible intensité. Le NEPD caractérise la limite inférieure d'utilisation du capteur et représente la densité minimale de densité de rayonnement détectable. C'est le signal d'entrée, c'est-à-dire la densité de rayonnement générant un signal de sortie ayant une puissance équivalente au bruit généré par le capteur ou l'amplificateur associé. Pour définir le NEPD, il faut analyser l'ensemble des causes de bruit: bruit d'environnement, bruit de fond du capteur, bruit ramené à l'entrée de l'amplificateur. En pratique, il suffira souvent de considérer les seules limitations de l'interface électronique utilisée pour amplifier le signal de sortie du capteur. La plupart des amplificateurs utilisés permettent de détecter le microvolt. Avec le fluxmètre de sensibilité 5  $\mu V/W/m^2$ , le NEPD est de 0,2  $W/m^2$ .

### 1.3.2.3. Les détecteurs hyperfréquences ou radars (Réf.8)

Bien que beaucoup moins répandus que les autres types de détecteurs, en partie en raison des nombreuses fausses alarmes qu'ils ont provoquées par le passé mais aussi en raison de l'existence des détecteurs à infrarouge passif, il semble important de dire quelques mots des détecteurs hyperfréquences.

Fonctionnant selon la technique du *vrai* radar, de tels détecteurs émettent un faisceau d'hyperfréquences et décèlent en retour tout mouvement dans la zone surveillée grâce à l'effet Doppler. Comme ces ondes passent facilement au travers de cloisons légères (pour peu qu'elles ne soient pas renforcées par des mailles métalliques formant alors une cage de Faraday), un seul détecteur de ce type peut couvrir une zone très étendue, parfois même un bâtiment entier.

Cela semble très pratique à première vue mais présente, hélas, un inconvénient majeur directement lié à cette possibilité de passer au travers des cloisons. Il est en effet impossible d'ordonner aux ondes radio de s'arrêter aux limites du local protégé. Vous pouvez donc très bien détecter le véhicule qui passe dans la rue ou le piéton qui marche sur le trottoir le long de ce local par exemple. C'est ce qui explique le taux élevé de fausses alarmes provoquées par ces détecteurs et leur relatif abandon aujourd'hui.

Les références faites ici sur les détecteurs hyperfréquences n'ont pas pour but de dénigrer ces détecteurs mais de les caractériser et de les reconnaître en ce qui concerne l'existence et le choix des différents systèmes d'alarme. Par ailleurs, il faut savoir que, tout comme pour les modéles à infrarouge passif, il existe des modèles simples et des modèles à comtage d'impulsions.

Nous mentionnons ici, pour mémoire, les détecteurs combinés, alliant l'infrarouge et les hyperfréquences. Ce type de détecteur, utilisé dans un milieu perturbé, ne déclenchera l'alarme que si les deux conditions sont remplies simultanément: détection par infrarouge passif ET détection par hyperfréquences.

# 1.3.3. Le choix du fluxmètre radiatif et son positionnement dans les systèmes de surveillance.

Comme il a été dit tout au début de ce rapport, l'objectif est la surveillance à distance d'objets ou de zones de dimensions finies (type couloir, local ou objet).

La température des salles de stockage et des pots de matières fissiles telles que le plutonium n'atteint pas les 100 °C. Nous avons vu dans le paragraphe 1.2.3.1. qu'un corps humain à une température de 37 °C peut avoir une température de surface qui change avec les habits portés et avec les saisons, mais elle reste dans une plage comprise entre 20 °C et 30 °C.

Même en imaginant des conditions défavorables d'intempéries comparables à celles auxquelles sont parfois soumis les militaires entre -70 °C et +150 °C, il est difficilement envisageable de faire de la surveillance d'intrusions ou de vols dans une autre bande de températures que celle nommée précédemment.

Pour pouvoir faire de la détection dans une gamme de températures (-70 °C à +150 °C) nous sommes donc obligés de choisir des capteurs travaillant dans la bande de fréquences (7 à  $14\mu m$ ).

Ce critère de fréquences écarte un grand nombre de détecteurs à semi-conducteur travaillant en dehors de cette bande ou dans une bande trop étroite. Pour une application telle qu'une surveillance permettant de circuler ou de laisser travailler des personnes dans une zone non surveillée du même local, les détecteurs volumétriques sont inutilisables.

Le choix du capteur est aussi influencé par la nature du milieu dans lequel il sera installé. Pour notre application, le milieu dans lequel devrait être placé le système de surveillance n'est pas astreignant puisqu'il s'agit de sites de travail ou de stockage considérés comme milieu non spécialement agressif. Malgré cela, pour chaque installation de système de surveillance " à l'épreuve de tout ", il est bon de considérer les perturbations que pourrait amener l'environnement telles que les poussières, la condensation, les radiations, les vapeurs corrosives, des potentiels électriques ou des parasites divers (voir le paragraphe 4.4. installation dans une ferme expérimentale).

La gamme de fréquences  $(7 - 14\mu m)$  correspond au rayonnement I.R. moyen comme nous l'avons rappelé dans l'introduction de ce rapport. Les fluxmètres thermiques travaillent justement dans cette gamme de fréquences.

Les fluxmètres thermiques offrent des perspectives d'applications nombreuses et importantes, dans la mesure où leurs dimensions (de l'ordre du centimètre carré début 1994, correspondant au commencement de ce travail de doctorat, jusqu'à plusieurs décimètres carrés, suivant les applications) en font des capteurs discrets et où leur prix ne se montre pas dissuasif.

Le fluxmètre thermique est initialement utilisé pour la mesure des transferts d'énergie en régime permanent, ici il est appliqué en régime variable. Le fluxmètre thermique qui fournit une information représentative du déséquilibre énergétique entre un système et son environnement est idéal pour prendre en compte les variations de charge thermique (déperdition). L'utilisation en détection est une application particulière importante du fluxmètre thermique en régime variable.

# **CHAPITRE 2**

# CONCEPTION ET REALISATION DU SYSTEME PARABOLIQUE DE DETECTION " SYCLOP "

# "SYstème de Contrôle pour Locaux et Objets par Parabole "

# **2.1. INTRODUCTION**

### 2.1.1. Présentation du problème

En matière de sécurité et de surveillance, la détection d'une intrusion constitue actuellement un problème dans le domaine de l'instrumentation. Il apparaît que les systèmes de sécurité existants ne peuvent fonctionner de façon continue et fiable sans mettre en œuvre des moyens de détection importants, associés à une électronique sophistiquée et très coûteuse.

Un des problèmes actuellement posés est la surveillance de zones sensibles ou d'objets à distance grâce à un appareil répondant à certaines caractéristiques spécifiques.

Cet appareil doit être un système *passif* et  $s\hat{u}r$ , de surveillance à distance de zone particulière de dimensions finies, ou d'objet, situés par exemple dans un couloir, un local ou même à l'air libre sans que la circulation de personnes ou d'objets autour des limites de cette zone particulière n'affecte ou ne perturbe ladite surveillance.

Le dispositif envisageable doit bénéficier d'une très grande facilité de production industrielle et de mise en oeuvre *in situ*. Sa conception lui offrirait une totale fiabilité et une faible maintenance permettant de jouer sur son coût de production et d'amortissement.

L'appareil ainsi conçu pourra répondre aux exigences liées à la sûreté, c'est-à-dire posséder une grande résistance à la fraude et aux leurres. En effet, en fonction de son utilisation éventuelle dans un site de stockage de matières fissiles, la possibilité de frauder le système doit être minimale.

### 2.1.2. Evocation des solutions aujourd'hui disponibles

Actuellement, pour assurer la continuité de la connaissance d'une quantité de matière définie au préalable et surveiller une zone de dimensions finies, on utilise des systèmes de scellés, électroniques ou non (avec identité et/ou intégrité), des systèmes de surveillance optique (caméras) et un éventail de capteurs classiques.

Les systèmes de scellés, par le fait que la plupart soient utilisables seulement une fois et qu'ils soient incapables de surveiller à distance, sont inadéquats pour le problème posé.

Au niveau des systèmes de surveillance vidéo, l'investissement important nécessaire, le traitement d'images et de signaux afin de détecter une intrusion, la possibilité d'être trompé par une fausse image, font que ces systèmes présentent d'énormes défauts vis-à-vis du problème à résoudre. Les systèmes de surveillance traditionnels à ultrasons, dans la plupart des applications en "détection", sont utilisés pour la mesure de rayonnement de sources en "mouvement". Leur principe est difficilement utilisable pour le problème à résoudre car il est impossible d'utiliser leur technologie lorsqu'il s'agit de faire de la surveillance à grande distance tout en permettant le déplacement dans une zone non surveillée du même local.

En effet, la surveillance est impossible dès qu'il y a un quelconque déplacement autour des limites de la zone surveillée par des détecteurs à ultrasons puisqu'ils sont basés sur le principe même de déplacement et de vibration moléculaire.

De nombreux dispositifs pyroélectriques et à semi-conducteurs sont généralement utilisés pour la détection du rayonnement thermique émis par une source en mouvement. Le rayonnement thermique émis dépendant de l'émissivité de la surface, ces détecteurs présentent le grand désavantage d'une responsivité dépendant de la longueur d'onde (besoin de choisir le capteur en fonction de la source à surveiller puisque le capteur travaille dans une bande de fréquences étroite). De plus, ces types de capteurs s'échauffant avec le rayonnement qu'ils reçoivent, ils nécessitent toujours un système de refroidissement. (besoin d'un environnement gazeux, par exemple).

Nous pouvons donc dire que tous les systèmes énoncés ci-dessus présentent, au regard du problème posé, les nombreux inconvénients suivants :

- la responsivité est pratiquement toujours dépendante de la longueur d'onde (besoin de choisir le capteur en fonction de la source à surveiller)
- les systèmes à infrarouges ou à ultrasons sont basés uniquement sur le mouvement dans le cadre de la détection. Ils fournissent seulement l'information "détection" due au déplacement d'une source de rayonnement thermique dans une zone surveillée, et non pas l'information "présence"
- ils nécessitent l'utilisation d'une lentille optique pour focaliser les rayons incidents, d'où un effet filtre optique (coefficient de transmission, effet capacitif du verre ou du plastique)
- ils posent un problème d'empaquetage du capteur (type TO5) pour éliminer le bruit extérieur (la convection)
- ils impliquent la nécessité d'un système de refroidissement pour le capteur, très souvent délicat et cher
- les systèmes à ultrasons ne peuvent pas focaliser une surveillance sur une zone particulière de dimensions finies sans être perturbés par la circulation de personnes ou d'objets autour des limites de cette zone particulière.

### 2.1.3. Solution proposée

Surveiller à distance un objet tout en autorisant la circulation autour de lui semble impossible. Pourtant, dans le domaine des "Garanties", pour le contrôle et le stockage de matières fissiles, pour la surveillance ponctuelle à distance et pour le stockage à très long terme, le besoin s'avère pressant et la demande est importante.

L'innovation du système de surveillance a été de concentrer le rayonnement thermique en provenance d'une région de l'espace à l'aide d'un réflecteur du type parabolique sur un capteur. Par cette association, toute modification de l'équilibre thermique dans la zone surveillée peut être détectée à l'aide d'un capteur de rayonnement thermique.

# 2.2. SOURCE LAMBERTIENNE ET SYSTEMES D'INTEGRATION

Dans beaucoup d'applications, il est nécessaire de détecter le rayonnement d'un faisceau sous un angle important (pour des sources divergentes) ou d'une source inhomogène dont la surface à analyser est beaucoup plus importante que la surface active du capteur.

Excepté dans le cas où la mesure s'effectue à très faible distance (quelques centimètres), il faut utiliser des systèmes pour "intégrer" les rayonnements. Ces systèmes "intégrateurs" d'énergie sont caractérisés par leur forme et doivent posséder des propriétés particulières selon le type d'application exigée.

Généralement, la luminance d'une source est la même dans toutes les directions, une telle source est appelée source à émission isotrope ou diffuse, et obéit à la loi de Lambert. (Réf.1)

$$\mathbf{L}_{ox} = \mathbf{L} = \mathbf{I}_{ox} / \mathbf{dS} \cdot \mathbf{cos} \theta = \mathbf{I}_{on} / \mathbf{dS}$$
(63)

avec L : luminance en  $W/m^2$ . stéradian

| dS : unité de surface ém   | $\theta$ : angle d'émission        |                                |      |
|----------------------------|------------------------------------|--------------------------------|------|
| Ion : Intensité dans une d | irection On normale à dS           | $d\Omega$ : surface différenti | elle |
| On en déduit que :         | $I_{ox} = I_{ox} \cdot \cos\theta$ | (loi du Cosinus)               | (64) |

L'indicatrice d'émission est une sphère tangente en O à la surface émettrice dS. Une indicatrice d'émission est une surface associée à l'élément de surface dS, en portant à partir de celui-ci des vecteurs proportionnels à l'intensité  $I_{ox}$  dans les directions considérées (Figure 44).



Figure 44 - Emission Lambertienne (Réf.20)

Dans ce cas :  $L_{ox} = L$  et en intégrant sur l'angle hémisphérique  $2\pi$  stéradian (66)

$$\mathbf{d\phi} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{dS} \mathbf{J}_{(1/2 \text{ espace})} \cos \theta \cdot \mathbf{d\Omega} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{dS} \cdot \pi$$
(67)

avec

le flux  $d\phi = L \cdot dS \cdot \pi$ 

l'émittance 
$$\mathbf{M} = \mathbf{d}\phi / \mathbf{dS} = \mathbf{L}\pi$$

L'émittance d'une source diffuse est donc constante et vaut  $L.\pi$ Pour un rayonnement monochromatique, le même raisonnement aurait abouti à :

$$\mathbf{M}_{\lambda} = \pi \mathbf{.} \mathbf{L}_{\lambda} \tag{70}$$

Pour concentrer le flux émis par des sources Lambertiennes, il est nécessaire d'utiliser des systèmes de type "intégrateur". Ces intégrateurs de rayonnement sont de deux types: les lentilles optiques et les miroirs. Les lentilles sont plutôt utilisées lorsqu'on désire travailler en puissance, en optique image ou lorsqu'on veut établir un tracé guidé du rayonnement.

Ces problèmes n'étant pas posés dans le cadre de notre application, nous avons opté pour une solution concentrateur miroir qui a le grand avantage de ne pas atténuer l'énergie du rayonnement infrarouge à détecter (les pertes de transmission dans les matériaux sont inexistants)

### **2.3. CHOIX DU MIROIR**

Une lentille optique a le désavantage d'être généralement très chère. Avec le capteur radiatif (fluxmètre 10mm × 10mm) utilisé pour réaliser le dispositif de surveillance, l'utilisation d'un miroir concave type lentille recouverte d'un traitement réfléchissant or, de diamètre 65 mm (soit la moitié du diamètre de notre système parabolique), multiplie par 10 le coût d'un réflecteur métallique classique (Miroir concave de f = 21,5 mm,  $\phi$  = 65mm, chez Melles Griot, 1900 FF H.T.)

Les grands désavantages des miroirs sont la dissipation de la chaleur et la non uniformité de l'image. Or, pour notre application de détection à distance, nous ne sommes pas confrontés à ces problèmes et nous pouvons justifier notre <u>choix du miroir</u> par :

- \* le bas prix
- \* la facilité d'utilisation
- \* l'absorption très faible
- \* *le peu d'entretien* (le maintien de la propreté est beaucoup moins astreignant pour un réflecteur en or que pour une lentille optique).

# Les miroirs sont classés en deux catégories:

- les miroirs plats: les plus simples, utilisés pour transmettre, pour scruter, pour positionner ou pour tester;

- les miroirs de puissance: ils ont les mêmes fonctions que les systèmes à lentilles optiques mais travaillent dans une bande de fréquences plus large, permettent très souvent de diminue. les dimensions des dispositifs, grâce à un jeu de réflexions évitant d'aligner de nombreuses séries de lentilles, et sont indépendants des aberrations chromatiques.

(68)

(69)

Les critères de choix pour les miroirs se font sur:

- le matériau pour le substrat
- la forme
- la qualité exigée
- le type de surface nécessaire

- Le type de matériau est choisi selon sa solidité, sa stabilité et son coût.

Les matériaux couramment utilisés sont le verre, le Duran / Pyrex, la silice fondue, le verre céramique tel que le Zerodur (qui offre une bonne résistance thermique mais n'est pas facile à fixer), et les métaux (pour les longueurs d'ondes > 1 $\mu$ m) comme l'aluminium, le cuivre, le nickel.

Le grand avantage des miroirs en métal est leur capacité de s'intégrer à l'ensemble du dispositif grâce à un simple système de fixation.

Les matériaux présentent une alternative attrayante quand une grande quantité de signaux ou une largeur de bande importante ou un transfert rapide de chaleur sont désirés, en particulier lorsqu'on travaille en dynamique ou dans des applications laser à grande puissance. Généralement un système de refroidissement est utilisé pour ces applications. Dans la nôtre, ici présentée, étant donné les très faibles puissances détectées, il n'est pas nécessaire de refroidir le réflecteur.

 $\Rightarrow$  Pour des raisons de commodité, de coût et de solidité nous avons décidé de choisir un réflecteur en métal pour réaliser notre premier prototype de système de détection.

- Le choix de la forme du miroir est relatif aux dimensions de la surface à regarder. La surveillance par des détecteurs de grandes dimensions ne permet pas une bonne sensibilité pour la mise en évidence d'un pic de température très localisé, car l'indication de l'instrument consiste normalement en une valeur moyenne sur laquelle une variation trop locale ne peut avoir qu'une influence trop faible.

 $\Rightarrow$  Selon les dimensions de la surface à surveiller et de la taille du capteur, nous avons donc à trouver un compromis pour choisir la forme du miroir utilisé comme réflecteur.

Les surfaces sphériques sont bien adaptées pour focaliser sur une surface proche ou sur une surface importante.

Les surfaces réfléchissantes de forme paraboloique sont indiquées pour l'imagerie ponctuelle se situant en parallèle et près du rayon incident principal.

Pour chaque type d'application, nous avons choisi la forme du réflecteur selon les dimensions de la surface à surveiller

- La qualité du réflecteur dépend du niveau de réflection qui est en relation directe avec la rugosité de la surface. La spécification de chaque type de miroir doit être donnée et référencée avec une table de propriétés durant la fabrication. Selon l'application, un maximum de défauts de surface est toléré, et établit alors le degré de polissage exigé lors de la production. Pour notre application de surveillance, une valeur de R<sub>a</sub> (rugosité moyenne) dans la catégorie trois triangles pour la surface du réflecteur sera satisfaisante pour offrir une qualité en réflexion suffisante.(voir le paragraphe 2.6.3.)

Le type de surface utilisée pour le revêtement des réflecteurs est certainement le choix le plus important. En effet le coefficient de réflexion dépend directement du traitement appliqué au miroir. Nous devons choisir le traitement réfléchissant en fonction de la bande de fréquences dans laquelle l'application est envisagée.

Le simple guide de sélection du traitement des miroirs présenté par le tableau suivant nous permet de voir, sans entrer en détail dans toutes les caractéristiques des différents traitements de miroirs, que pour notre système de surveillance travaillant dans une longueur d'onde supérieure à 1µm nous sommes limités aux miroirs métalliques.

|                                     | AL2           |      |           |       | -       |      |      |     |     |              |      |    |              |    |   |
|-------------------------------------|---------------|------|-----------|-------|---------|------|------|-----|-----|--------------|------|----|--------------|----|---|
| Miroirs<br>métalliques              |               | ER.3 |           |       |         |      |      |     |     |              |      |    |              |    |   |
| meaniques                           |               | Ē    | R.1       |       |         |      |      |     |     |              |      |    |              |    |   |
|                                     |               |      |           |       | FR 2    |      |      |     |     |              |      |    |              | ┷┙ |   |
|                                     |               |      |           |       | - LICZ  |      |      |     |     |              |      | -+ | +            | ╉  | - |
| Miroirs                             | RM.2          |      |           |       |         | BD.1 |      |     |     |              |      |    |              |    |   |
| diélectriques                       |               | DM.6 |           | DM.4  |         |      |      | B   | 0.2 |              |      |    |              |    |   |
|                                     |               |      | DM.5 -    | - LD  | 2       |      |      |     |     |              |      |    |              |    |   |
|                                     |               |      |           | LD.1  |         |      | I    | M.7 | -   | DM 8         |      |    |              |    |   |
| Miroirs pour lasers                 | EM4X -        | EM2X |           |       |         |      |      |     |     |              |      |    |              |    |   |
| E                                   | 4.1X —        | H    | M.3X      |       |         |      |      |     |     |              |      |    |              |    |   |
| Miroirs pour lasers haute puissance | м.7x ——       |      |           |       |         |      |      | -   | I   | <b>M</b> .1X |      |    |              |    |   |
|                                     | IM.4X, 5X, 6X |      | HM.3X     |       |         | — н  | 1.2X |     |     |              | <br> |    |              |    |   |
| Super Mirning TM                    |               |      |           |       |         |      |      |     |     |              |      |    |              |    |   |
| Supervitons                         |               |      | SR.30, SH | .70   |         |      |      |     |     | }            |      |    |              |    |   |
| Miroirs pour impulsions             |               | -    |           |       |         |      |      |     |     |              |      |    |              | T  |   |
| ultracourtes                        |               |      |           |       |         |      |      |     |     |              |      |    |              |    |   |
|                                     |               |      |           | UF.20 | , UF.25 |      |      |     |     | ļ            |      |    | $\downarrow$ | ++ |   |
| Longueur d'onde                     |               |      |           |       |         |      |      |     |     |              |      |    |              |    |   |
| 0,                                  | 2 0,3         | з с  | ,4 0      | ,5 0  | ,6 0    | ),7  |      | 1   | ,0  |              | <br> |    |              |    |   |

Tableau 4 - Guide de sélection du traitement des miroirs (Réf. 22)

Dans ce tableau de sélection, on voit qu'en fonction de la longueur d'onde en abscisse, on trouve en ordonnée peu de familles possibles de traitement réfléchissant utilisable au-delà de  $1\mu m$ .

D'un prix peu élevé, les miroirs métalliques sont peu sensibles en longueur d'onde, en incidence et en polarisation. En revanche, il faut éviter de leur soumettre des flux importants, et il faut les nettoyer avec précaution.

Le choix du métal utilisé pour le réflecteur du type parabolique de notre système est présenté dans le paragraphe 2.6.1.

# 2.4. BILANS RADIATIFS

Dans ce paragraphe nous quittons l'étude de la photométrie énergétique et des lois régissant l'émission, la réflexion et l'absorption des radiations thermiques par les surfaces, pour aborder l'étude des échanges thermiques par rayonnement entre deux ou plusieurs surfaces.

Exposer ici tous les calculs des bilans thermiques radiatifs qui s'établissent entre le capteur et son environnement serait quelque chose de bien ambitieux vis-à-vis de nos

lecteurs. En effet, le seul fait d'arriver à calculer le bilan radiatif qui évolue constamment entre le système capteur, le volume surveillé et son entourage pourrait faire l'objet d'une recherche de thèse à lui seul.

L'objectif de notre application n'étant pas de mesurer un flux radiatif mais de détecter les variations de bilan thermique d'un système, nous nous limiterons à une étude qualitative pour les échanges radiatifs existants entre notre capteur fluxmétrique, le concentrateur parabolique et les surfaces à surveiller.

C'est-à-dire que nous ne chercherons pas à calculer la quantité de flux radiatif qui arrive sur notre capteur pour la mesurer, mais nous vérifierons que le flux radiatif arrivant sur le capteur correspond bien à celui surveillé par notre système concentrateur sous un angle de regard établi à l'avance.

Nous allons donc nous limiter à la notion purement géométrique de facteur d'angle relative à deux surfaces; notion qui est étroitement liée au flux qui quitte une certaine surface et atteint (est incident sur) une seconde surface. Nous n'introduirons donc pas la notion d'enceinte, notion généralement envisagée pour mesurer et calculer les échanges radiatifs qui existent entre des surfaces à la fois noires ou grises et d'émission et réflexion diffuses, ces calculs n'étant pas nécessaires pour notre application en surveillance.

Ensuite, nous nous assurerons expérimentalement que le bilan thermique radiatif au niveau du capteur fluxmétrique, ou encore que l'équilibre thermique entre le capteur et la surface éblouissant celui-ci, ne change fortement que lorsqu'un intrus pénètre dans la zone surveillée par la parabole.

## 2.4.1. Facteur d'angle

Afin d'estimer la densité de flux net perdu par unité de surface (ou la densité de flux échangée entre deux éléments de surfaces différentes) et de considérer les sources influençables et influencées pour mieux connaître le système zone surveillée, réflecteur et capteur, il est intéressant d'introduire le facteur d'angle f; notion s'appliquant aux échanges radiatifs entre surfaces à émission et réflexion isotropes (voir § 2.2).

Considérons (figure 45) deux éléments de surface différentiels plans  $dS_1$ , à la température  $T_1$  et  $dS_2$  à la température uniforme  $T_2$ , disposés de façon quelconque dans l'espace, séparés par la distance r, cette dernière direction faisant avec les normales aux surfaces, les angles respectifs  $\beta_1$  et  $\beta_2$  (d $\omega_1$  est l'angle solide sous-tendu par  $dS_2$  et ayant son sommet en  $dS_1$ ).

On suppose que les émittances  $M_1$  et  $M_2$  des éléments  $dS_1$  et  $dS_2$  sont isotropes (§ 2.2). Rappelons ici la relation (70) liant, dans ce cas, l'émittance  $M_1$  à la luminance apparente  $L_1$ :

$$\mathbf{M}_1 = \boldsymbol{\pi} \cdot \mathbf{L}_1$$

Le flux quittant  $dS_1$  et incident sur  $dS_2$  s'écrit :

$$d^{2} \phi_{(dS1 \rightarrow dS2)} = L_{1} \cdot dS_{1} \cdot \cos\beta_{1} \cdot d\omega_{1}$$
(71)

Introduisons la valeur de d $\omega_1$  dans (71):

 $d\omega_1 = dS_2$ .  $\cos\beta_2 / r^2$ , tout en utilisant (70) :

$$d^{2} \phi_{(dS1 \rightarrow dS2)} = \underline{M}_{1} \underline{dS_{1}} \underline{dS_{2}} \underline{\cos\beta_{1}} \underline{\cos\beta_{2}}.$$

$$\pi r^{2}$$
(72)



Figure 45 - Echange entre deux éléments de surface différentiels. (Réf. 1)

On appelle *facteur d'angle* d f  $_{(dS1 \rightarrow dS2)}$  la fraction du flux quittant l'élément de surface dS<sub>1</sub> (dans toutes les directions), qui tombe sur (ou est intercepté par, ou est incident sur) l'élément de surface dS<sub>2</sub>. C'est donc le quotient de l'équation (72) par le flux quittant l'élément dS<sub>1</sub> (qui vaut M<sub>1</sub>.dS<sub>1</sub>):

$$df_{(dS1 \to dS2)} = \frac{dS_2 \cdot \cos\beta_1 \cdot \cos\beta_2}{\pi r^2}$$
(73)

On a affecté le premier membre de l'équation (69) du signe différentiel d car il est proportionnel à l'élément différentiel  $dS_2$ .

On peut encore mettre (73) sous la forme :

$$df_{(dS1 \to dS2)} = \frac{\cos\beta_1 \cdot d\omega_1}{\pi}$$
(74)

L'équation (74) montre que le facteur d'angle ne dépend que de la grandeur  $dS_2$ , de son orientation relative par rapport à  $dS_1$ , et de la distance r.

L'équation (75) montre que tous les éléments  $dS_2$  conduisent au même facteur d'angle d f  $_{dS_1 \rightarrow dS_2}$  s'ils sous-tendent le même angle solide  $d\omega_1$  (quand ils sont vus de  $dS_1$ ), et quand ils sont placés sur une direction r faisant un angle  $\beta_1$  avec la normale à  $dS_1$ .

En effectuant le même calcul pour le facteur d'angle d f  $_{dS2 \rightarrow dS1}$ , la fraction de flux quittant  $dS_2$  et incidente sur  $dS_1$ , on trouverait :

$$df_{dS2 \to dS1} = \frac{dS_1 . \cos\beta_2 . \cos\beta_1}{\pi . r^2}$$
(75)

En comparant les équations (73) et (75) on obtient la relation générale de réciprocité :

$$df_{(dS1 \to dS2)} dS_1 = df_{(dS2 \to dS1)} dS_2 = \frac{\cos\beta_1 \cdot \cos\beta_2}{\pi \cdot r^2} dS_1 dS_2$$
(76)

Si la surface  $S_1$  est concave (telle qu'une calotte sphérique ou une parabole), la fraction de flux partant de  $S_1$  et revenant sur  $S_1$  elle-même est donnée par le facteur de forme :

$$df_{(dS1 \rightarrow dS1')} dS_1 = \underline{co.^{\beta_1} \cdot cos\beta_1 \cdot dS_1 dS_1}{\pi t^2}$$
(77)

Pour des surfaces planes ou convexes, aucun flux partant de S ne peut revenir sur S de sorte que :

$$\mathbf{f} = \mathbf{0} \tag{78}$$

A l'opposé, si  $S_1$  entoure entièrement une surface convexe  $S_2$ , on a :

$$f = 1$$
 (79)

Certaines applications font intervenir des facteurs de forme mettant en jeu une surface élémentaire  $dS_1$  ou même deux surfaces élémentaires  $dS_1$ ,  $dS_2$ . Certaines des équations précédentes deviennent alors inutiles. A partir de l'expression générale, on obtient :

- le facteur de forme de dS<sub>1</sub> vers S<sub>2</sub>:  $f_{(dS1 \rightarrow S2)} = \int_{(S2)} \frac{\cos\beta_1 \cdot \cos\beta_2}{\pi r^2} dS_2$  (80)

- le facteur de forme différentiel de S2 vers dS1:

$$df_{(S2 \to dS1)} = \underline{dS_1} \cdot \int_{(S2)} \frac{\cos\beta_1 \cdot \cos\beta_2}{\pi \cdot r^2} dS_2$$
(81)

- le facteur de forme différentiel de dS<sub>1</sub> vers dS<sub>2</sub> :

$$df_{(dS1 \rightarrow dS2)} = \frac{\cos\beta_1 \cdot \cos\beta_2}{\pi \cdot r^2} dS_2$$
(82)

### 2.4.2. Evaluation des facteurs de forme pour notre dispositif installé

Considérons notre dispositif de surveillance réglé et installé dans un local. C'est-àdire que le capteur de surface différentielle  $S_0$ , associé à son système de concentration de type parabolique de surface  $S_1$ , focalise et surveille une surface de dimension finie  $S_2$ (figure 46).





### Décomposition de notre système capteur, parabole et surface de dimension finie:

Le but de cette décomposition, en deux systèmes (a) et (b), est de ramener la détermination du facteur d'angle à des cas plus simples.

(a): le système capteur-parabole

(b): le système parabole-zone du local ourveillée

Par l'équation (72), on sait que dans le cas où la radiosité  $M_1$  est uniforme, le flux  $\phi_{(S_1 \rightarrow S_2)}$  quittant la surface 1 et incident sur la surface 2 vaut:

$$\phi_{(S1 \to S2)} = S_{1.}F_{(S1 \to S2)}M_1$$
(83)

On peut établir l'équation (83) de façon plus physique et intuitive en notant que le flux quittant  $S_1$  vaut  $\int M_1 dS_1$  et si  $M_1$  est uniforme, il est égal à  $M_1 S_1$ .

Puis, par la définition du facteur d'angle F  $_{(S_1 \rightarrow S_2)}$ , il est clair que l'expression  $F_{(S_1 \rightarrow S_2)}$ .  $(S_1M_1)$  est le flux quittant  $S_1$  et incident sur  $S_2$ .

En considérant les surfaces diffuses (émission et réflexion) et de radiosité uniforme (avec une erreur relative d'autant plus grande que l'excentricité est grande pour le système  $S_1 S_2$ ), il est clair, d'après le principe de conservation de l'énergie, que la fraction d'énergie émise par  $S_2$ , et reçue sous un certain angle par le réflecteur parabolique, se focalise sur la partie sensible du capteur fluxmétrique  $S_0$ .

Nous admettons que le flux incident sur la parabole (l'éclairement) est uniforme sur toute sa surface. De même, sa surface étant spéculaire (bien polie et focalisante), l'hypothèse de la réflexion diffuse n'est pas acceptable et il faut tenir compte des trajets spécifiques suivis par les flux directionnels réfléchis que nous devons calculer (voir § 2.5) et vérifier expérimentalement.

- Considérons le système (a):

On peut dire que ce système a une influence nulle sur l'environnement.

Les facteurs d'angles entre les deux surfaces S<sub>0</sub> et S<sub>1</sub> s'expriment par :

 $f_{00} = 0$  (pour une surface non concave,  $f_{ii}$  vaut zéro)  $f_{01} = 1$  (quand tout flux issu d'une surface 1 atteint l'autre surface 0, le facteur  $f_{01}$  vaut évidemment l'unité)  $\Rightarrow$  en fait ici, si le capteur est bien positionné, il est ébloui par la parabole. (voir application numérique suivante)

Application numérique :

Sachant que la surface d'une calotte de parabole s'exprime par:

$$\begin{array}{c} d = 2r \\ h \\ h \\ h \\ \end{array}$$

$$S = 2\pi / 3p \cdot (\sqrt{(d^2/4 + p^2)^3} - p^3)$$

$$\begin{array}{c} (84) \\ (84) \\ avec \ p = d^2 / 8h \\ \end{array}$$

pour d = 14.8 cm r = 7.4 cm h = 4 cmOn a :  $p = 14.8^2 / 32 = 6,845$ Soit :  $S_1 = (2\pi / 3.6,845) \cdot (\sqrt{(7,4^2/4 + 6,845^2)^3} - 6.845^3)$  $S_1 = 215,275 \text{ cm}^2$ 

c'est-à-dire que:  $f_{10} = 1 \text{ cm}^2 / 215,275 \text{ cr}^2 = 0,0046$ 

On peut dire que la parabole a une influence totale sur le capteur. Le capteur est entièrement ébloui par le flux incident et réfléchi sur le concentrateur.

Si le capteur est positionné parfaitement sur la focale de la parabole selon les calculs préétablis d'angle de regard (voir § 2.5), il est ébloui uniquement par le flux incident arrivant sous l'angle prédéterminé pour la surveillance désirée.

- Considérons le système (b):

En considérant  $S_2$  source isotrope, on a  $M_2$  uniforme et  $S_2 f_{21} = S_1 f_{12}$ c'est-à-dire pour  $f_{12} = 1$  (cas idéal pour ne pas dire que  $f_{12}\neq 0$ ),  $\Rightarrow f_{21} = S_1 / S_2$ avec  $S_2 >> S_1$ ,  $f_{21} \rightarrow 0$  (cas idéal pour ne pas dire que  $f_{21}\neq 0$ )

Cela est justifié pour l'utilisation de la parabole rectangulaire lorsqu'elle regarde une très grande surface vis-à-vis de sa surface propre ( $S_2 >> S_1$ ).

Les facteurs d'angle entre les deux surfaces S1 et S2 s'expriment par :

| $f_{11} = 0$      | (en considérant S <sub>1</sub> comme un disque de surface $\pi r^2$ )                                      |
|-------------------|--|
| $f_{12} = 1$      | (cas idéal)  |
| $f_{21}\approx 0$ | de même $S_2 / S_0 \rightarrow \infty$ , $\Rightarrow f_{20} \rightarrow 0$ pour la parabole rectangulaire |
| $f_{22} = 0$      | (cas idéal, car en fait # 0)   |

Pour vérifier l'influence que peut avoir la parabole sur la surface surveillée et vice versa, on dispose aussi de deux possibilités en utilisant la méthode des flux partant et incident.

En considérant  $S_1$  comme un petit disque de rayon r (7,4 cm) et de surface  $\pi r^2$ , placé à une distance h de la surface  $S_2$  à surveiller et assimilée à un grand disque de rayon  $R_2$ , on obtient:



Figure 47 - Eléments de surface de notre système de surveillance

La détermination des facteurs de forme est possible :

- soit en se reportant à l'expression tabulée relative à deux disques parallèles de même axe avec la simplification  $r \ll R$  (Réf.1)

C'est-à-dire : pour 
$$R_1 = r / h$$
 et  $R_2 = R / n$  avec  $X = 1 + \frac{1 + R_2^2}{R_1^2}$ 

On a: 
$$f_{12} = 1/2. (X - \sqrt{X^2 - 4(R_2/R_1)^2})$$
 (85)

C'est-à-dire en A.N., pour une distance de surveillance de 5m par exemple, on a pour  $f_{12}$ :

 $\begin{array}{ll} R_{1}=0,074\ /\ 5=0,0148\\ R_{2}=0,6\ /\ 5=0,12 & (pour une parabole circulaire d'angle d'ouverture 14^{\circ}, à 5m celle-ci regarde une surface circulaire de diamètre1,2m)\\ donc \ X=1+\frac{1+0,0144}{2,19.10^{-4}}\\ X=4632,11\\ soit: \ f_{12}=1/2.\ (4632,11-\sqrt{4632,11^{2}-4.(0,12\ /\ 0,0148)^{2}}\ )=0,0142\\ et \ pour\ f_{21}: \end{array}$ 

$$X = 1 + 1+2,19.10^{-4}}{0.0144}$$
  
X = 70,46

soit:  $f_{21} = 1/2$ . (70,46 -  $\sqrt{70,46^2 - 4.(0,0148/0,12)^2}) = 0,00021$ 

- soit, à partir de dS<sub>1</sub>, considérer l'angle  $d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta$  compris entre les deux cônes d'angle  $\theta$  et  $\theta + d\theta$  et écrire (Réf.10):

$$f_{12} = f_{dS1S2} = \frac{1}{\pi} \int_{S2} \cos\theta \, d\Omega = \sin^2 \theta_2 = \frac{R^2}{R^2 + h^2}$$
(86)

soit:  $f_{12} = 0,6^2 / 0,6^2 + 5^2 = 0,0142$ 

Si on néglige l'influence radiative de l'environnement, le flux surfacique  $\phi_1^i$  incident sur la parabole s'exprime par:

$$\phi_1^{\ 1} = \mathbf{f}_{12}. \ \phi_2$$

De même,  $\phi_2^i = f_{21} \phi_1$ 

Ce flux incident  $\phi_2^i$  est très faible étant donné que le facteur de forme  $f_{21}$  est le produit de deux quantités petites telles que:

$$\mathbf{f}_{21} = \mathbf{f}_{12} \ \frac{\mathrm{d}\mathbf{S}_1}{\mathbf{S}_2}$$

On constate que les résultats sont les mêmes.

La parabole a une influence nulle sur l'environnement et la surface surveillée a une influence assez négligeable sur le détecteur.

Il est donc nécessaire de bien focaliser le système sur la zone à surveiller, d'avoir un capteur thermique le plus sensible possible, surtout pour faire de la détection à grande distance, et de s'intéresser fortement au rapport signal / bruit pour chaque cas de surveillance envisagé.

Ajoutons que les bilans énergétiques instantanés que nous avons considérés ne limitent pas cette étude aux états stationnaires, dans le sens que le système est étudié comme figé dans le temps à un moment précis, mais peut évoluer, cela permettant de déclencher des alarmes.

Pour caractériser les performances de notre dispositif, des études expérimentales ont permis de confirmer que le bilan thermique radiatif au niveau du fluamètre, autrement dit l'équilibre thermique entre le capteur et la surface éblouissant celui-ci, se déséquilibre fortement uniquement lorsqu'un intrus pénétre dans la zone surveillée par la parabole.

# 2.5. PRINCIPE DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

## 2.5.1. Première application: détection d'intrusion humaine dans des zones protégées

Le projet de surveillance des zones simulant un stockage de Pu dans le laboratoire LaSCo (Laboratory of Surveillance and Containment) de l'Institute for Systems, Informatics and Safety (ISIS), tout en ayant la possibilité de réglage en fonction du volume à protéger (c'est-à-dire en fonction de la distance et de l'angle de regard du dispositif), est le cadre dans lequel ont été réalisé nos essais.





#### 2.5.1.1. Etude du concentrateur de type parabolique

### 2.5.1.1.1. Principe du dispositif expérimental

Les conclusions d'études et de réalisations de prototypes portant sur plusieurs types de réflecteurs au sein du laboratoire L.C.I., pendant l'année du D.E.A., nous ont amené à l'usage de réflecteurs du type paraboloïque afin de surveiller à distance toute sorte d'objet ou toutes zones de dimensions finies.

Le problème était de réaliser un ensemble capteur réflecteur associés en vue de mesurer un flux radiatif incident. L'utilisation d'un réflecteur concave de géométrie adaptée permet de concentrer et d'amplifier le rayonnement incident sur la surface du détecteur.



k:sensibilité (uV/W) S:surface du capteur G:gain de concentration

Figure 49 - Schéma synoptique du dispositif

Le signal de sortie du capteur est amplifié et mesuré.

### 2.5.1.1.2. Etude du réflecteur

Les réflecteurs deux dimensions ont été envisagés en plaquant une feuille métallique (voir §2.6.) sur une forme adaptée circulaire ou parabolique. Il est important de remarquer que la flexibilité du support et les systèmes de maintien permettent, dans une certaine mesure, d'effectuer la correction parabolique nécessaire pour la focalisation de l'image. En contrepartie, l'axe non courbé n'amène aucun facteur de gain et ne présente pas de caractère directionnel. Mais cette propriété est utilisée comme avantage vis-à-vis du système car il permet de regarder tout l'horizon.

### 2.5.1.1.2.1. Parabolisation d'un miroir sphérique

Ce paragraphe vise à montrer la possibilité de corriger l'aberration de sphéricité en modifiant la courbure d'un réflecteur circulaire (2D).

Le problème consiste à retoucher un miroir sphérique concave pour le rendre parabolique afin d'obtenir une image rigoureusement stigmatique d'un point à l'infini sur l'axe.

Le cercle est un cas particulier de la famille des courbes coniques ellipses:

Ellipse générale:

$$(x2 / a2) + (y2 / b2) - 1 = 0$$
(87)

si a = b l'ellipse devient cercle

$$x^2 + y^2 - R^2 = 0 \tag{88}$$

a = b = c équation de cercle

Soit dans un repère X0'Y (figure 50 ci-dessous)

 $(R^2 - X^2)^{1/2} = Y$  et dans le repère xoy décalé en x: Y = y et X = x - R

$$y = (R^2 - (x - R)^2)^{1/2} = (2xR - x^2)^{1/2}$$
(89)

l'équation du cercle devient:

$$y_{\rm c} = (2 {\rm x} {\rm R} - {\rm x}^2)^{1/2}$$
 (90)

Une parabole de paramètre p englobant ce cercle a pour équation:  $y_p = (2px)^{1/2}$ 



Figure 50 - Parabolisation d'un miroir sphérique

Dans l'hypothèse où les deux tracés sont rapprochés avec (p = 2f et R = 2f), on considère  $R_d \ll f$ . La parabole s'écarte de son cercle osculateur en s'évasant (figure cidessus).

$$y_c = (4fx_c - x^2_c)^{1/2}$$
(91)

et

$$y_p = (4f.x_p)^{1/2}$$
 (92)

En  $y_{op} = y_{oc} = R_{d_i}$  quel retrait  $dx_o$  faut-il donner au cercle  $x_{oc}$  pour rejoindre  $x_{op}$ ? Le retrait  $dx_o = e$  constitue l'épaisseur à supprimer.

Soit 
$$x_p = x_c - e$$
  
et  
 $R_d = (4f(x_c - e))^{1/2} \text{ donc } x_c = e + (R_d^2/4f)$  (93)

----

....

et 
$$4f(x_c-e) = 4f_x - x_c^2$$
 donc  $4f_e = x_c^2 = (e+R^2d/4f)^2$  (94)

d'où 4f.e =  $(e+R^2d/4f)^2 \# Rd^4/16f^2$  en négligeant e dans le membre de droite.

$$e = R^4 d/64 f^3 \tag{95}$$

(Remarque: cette correction est rarement effectuée mécaniquement. Il est fréquent d'établir un gradiant de température dans la masse du matériau au cours du polissage.)

Dans le dispositif réalisé, nous avons supposé que la petite partie de cercle utilisée est très proche d'une parabole lorsqu'on ne s'écarte pas de la base (o sur la figure).

### 2.5.1.1.2.2. Optimisation d'un miroir circulaire

La fixité du foyer n'est pas une condition obligatoire lorsque le capteur est utilisé uniquement en collecteur de flux énergétique et non en récepteur d'images. Le réflecteur n'a alors qu'un rôle de focalisateur d'énergie.

• Abstraction de la condition de stigmatisme pour un miroir concave sphérique:



Figure 51 - Focalisation des rayons incidents

Lorsque l'ouverture (angle entre le centre de la sphère et la périphérie du miroir) est faible, l'examen de la figure ci-dessus mène aux considérations suivantes:

- tout rayon de la sphère intercepte la surface de façon normale
- les lois de la réflexion de l'optique géométrique montrent que i = r

- soit une onde incidente (rayon a) parallèle à SC aboutissant en Y.

Le rayon réfléchi intercepte l'axe principal SC au point F. Si H est le pied de la perpendiculaire abaissée de F sur YC, alors:

 $CH = CF \cos i'$  avec i = i' angles alternes-internes, et i = r loi de la réflexion.

Par conséquent i' = r. Cette égalité entraîne YF = FC et YH = HC = R/2. Il en résulte que R/2 = CF cos i. En notant f la distance SF entre le sommet du miroir et le point de convergence des rayons marginaux paralléles à l'axe principal, il apparaît:

$$R/2 = (R-f) \cos i$$
 (96)

Relation angle d'incidence i, distance focale f, rayon R.

Conséquences: - lorsque l'angle d'incidence est faible

i tend vers 0, cos i tend vers 1, donc f tend vers  $R/2 = f_0$  (condition de Gauss)

- le foyer f se décalle vers S lorsque l'incidence augmente. Ce déplacement constitue l'aberration de sphéricité. En effet, avec  $CF = R/2 \cos i$ 

- si i augmente alors cos i tend vers 0 donc CF augmente et SF = f diminue
- angle pour lequel la distance focale s'annule:
- (96) tend vers  $R/2 = R \cos i$  soit  $\cos I = 1/2$  d'où I =60° (97)

Soit une ouverture de 120° (voir figure 52 ci-dessous)



Figure 52 - Angle d'ouverture de la parabole

• Recherche de l'angle d'ouverture maximum pour un capteur de rayon r:

On remarque que  $\alpha = 2.i$ 

et d'autre part: 
$$r / f_0 - f_1 = tang \alpha$$
, soit  $r = (f_0 - f_1) \cdot tg \alpha$  (98)

(96) tend vers  $f_0 = (R-f_1) \cdot \cos \alpha/2$ 

Soit: 
$$f_0 = (2f_0 - f_1); \cos \alpha/2 = f_0 \cdot \cos \alpha/2 + (f_0 - f_1) \cdot \cos \alpha/2$$
 (99)

et

 $f_0 (1 - \cos \alpha/2) = (r \cdot \cos \alpha/2) / tg \alpha$ (100)

donc

 $r = f_0 tg \alpha. ((1/\cos \alpha/2) - 1)$  (101)

Au-delà de l'angle d'ouverture alpha défini par ces relations, les rayons réfléchis passent hors de la surface du capteur d'où:

$$r_{max} = R/2 \cdot tg \alpha \cdot ((1/\cos \alpha/2) - 1)$$
 (102)

• Fonction d'efficacité du système:

En supposant que l'on ne s'intéresse pas aux critères de netteté de l'image obtenue dans la zone focale, le miroir sphérique reste utilisable dans la mesure où un maximum de la puissance incidente est projeté sur le capteur dont la mesure du rayon a fait l'objet du paragraphe précédent. Dans le cas d'un faisceau incident collimaté il est possible de définir un rayon d'ouverture J tel que représenté sur la figure ci-dessous.


Figure 53 - Fonction d'efficacité du système définissant un rayon d'ouverture J

 $\alpha$  est défini par l'angle d'ouverture YCY' pour un rayon r b. Aprés réflexion en Y, le rayon marginal r b intercepte l'extrémité r d'un éventuel capteur et reste susceptible d'être pris en compte dans la mesure. Cependant, le capteur de rayon r fait écran au faisceau de rayon J. Seule la partie ( J -r ) participe à l'éclairement du plan gauche du capteur. En considérant les qualités intrinsèquement différentielles du capteur fluxmétrique, deux situations peuvent être étudiées:

1) La partie incidente de rayon r sur la face droite vient se soustraire à la qualité (J -r), soit une prise en compte de l'information sur le rayon efficace (J-2r)

2) La partie incidente du rayon r n'atteint pas la surface droite du capteur, cette dernière étant à l'abri d'un écran réfléchissant, proche du capteur (cas réalisé voir suite), l'information prise en compte est alors relative à la qualité (J -r).

Dans les deux cas l'énergie relative incidente est, aprés équilibre en régime permanent, évacuée par un processus de convection du au milieu environnant le capteur.

Chacune de ces deux situations peut faire l'objet d'une optimisation relative à l'angle d'ouverture utilisable compte tenu de la longueur du capteur utilisée. La qualité "efficace" f(J,r) demande à être définie dans les deux cas pour ensuite faire l'objet d'une analyse mathématique. F(J,r) possède un extremum dont la valeur est calculée à l'aide du logiciel EUREKA (Borland).

Expression de la fonction d'efficacité: l'observation de la figure précédente mène à la définition de J:

> $J/R = \sin i$ et compte tenu des lois de la réflexion, (103)

$$1 = \alpha/2$$
, soit  $J = R \cdot \sin \alpha/2$  (103)

a) Cas du fluxmètre en mesure différentielle effective:

$$J-2r = R \sin \alpha/2 - 2. R/2.(tg\alpha).(1/\cos \alpha/2 - 1)$$
(104)

expression dont l'extremum ne dépend pas de R

Le calcul mène, quel que soit R, à la valeur optimale;  $\alpha = 67,5^{\circ} = 1,17$  rad b) Cas du fluxmètre avec écran réflecteur sur le plan de droite:

$$J - r = R \sin \alpha/2 - R/2.(tg \alpha).(1/\cos \alpha/2 - 1)$$
(105)  
soit la valeur optimale  $\alpha = 81, 2^{\circ}$ 

Le choix de R est alors dicté par la relation (80) d'une part, et par les dimensions de la feuille réflectrice imposées par la construction (  $\alpha R = L$ )

Pour réaliser le dispositif, une gaine goulotte support est utilisée dans laquelle est glissée une feuille réflectrice (voir §2.6.). Ainsi la seule dimension imposée a été celle de la hauteur de regard (2 J). Puis une grandeur de rayon R est choisie en fonction de la largeur du capteur afin d'obtenir un montage mécanique réalisable.



Figure 54 - Principe de disposition des éléments

Naturellement, il faut garder à l'esprit qu'en fonction de la dimension du capteur utilisé, de la surface de la zone à surveiller et de la distance de contrôle imposée, il y a toujours un compromis à trouver entre la surface sensible du capteur et l'ouverture de la parabole.

Plus le rayon R est grand, plus le capteur s'éloigne de S et sa surface doit être petite, et plus le dispositif est directif. Pour cette première application de surveillance de couloir et de partie de local nous recherchons justement le contraire, un angle de regard important ( $> 10^{\circ}$ ).

A l'origine même du projet, en début d'année 1995, les dimensions minimales des capteurs qui nous étaient proposés par le laboratoire L.C.I. et donc imposées pour notre étude ne pouvaient pas être inférieures au centimètre carré. Malgré tout, cette condition nous était favorable pour la surveillance de zones de dimensions finies du types couloir et surface importante.

# 2.5.1.1.3. Exemple de réglages pour la parabole rectangulaire polyvalente

Afin que nos lecteurs puissent plus facilement suivre la démarche que nous avons entreprise pour chaque réglage de ce type de parabole rectangulaire, nous allons expliquer comment nous avons réglé la parabole SYCLOP qui surveille actuellement la zone rouge du laboratoire LaSCo présenté par la figure 48.

L'objectif est de surveiller une zone en longueur (figure 55) que l'on peut considérer comme un couloir dans lequel se trouvent une porte d'accès au local, deux conteneurs simulant un stockage de matières fissiles, et un passage ouvert permettant l'accès à une autre zone de stockage.



Figure 55 - Zone en rouge à surveiller dans LaSCo

Sachant que pour surveiller la zone rouge (interdite) entre l'armoire de stockage ASA1 et la porte d'entrée côté couloir, on doit avoir d'après les mesures in situ un angle i équivalent à : tg(i) = 1,56 / 4,8 soit:  $i = 18^{\circ}$ , on règle la parabole de la façon suivante:

Afin d'avoir une parabole de dimensions correctes s'intégrant facilement au cadre dans lequel elle devra être installée, c'est-à-dire pour ne pas avoir une parabole, par exemple, dont le capteur soit placé à une distance focale de cinquante centimètres, nous avons considéré une longueur de rayon R de 18,6 centimètres après nous être fixés les conditions idéales suivantes pour avoir le moins d'aberration de sphéricité:

avec J = 5,75 cm et  $r_{/2} = 0,5$  cm (imposé par une largeur du capteur de 1 cm) la distance focale ne s'annule pas ( $i < 60^{\circ}$ )

$$r_{max} = 0.5 = R/2.tg\alpha .(1/\cos(\alpha/2) - 1)$$

avec  $R = J/sin(\alpha/2)$ 

L'application numérique avec J et r fixés nous donne pour un angle i de 18°, un rayon R équivalent à 18,6 cm.

Grâce à la figure 56 qui nous a servi de table de réglage pour toutes les paraboles actuellement en fonctionnement, il nous est facile d'obtenir le positionnement d'un capteur correspondant à l'angle de regard que doit prendre sa parabole de surveillance.



Figure 56 - Positionnement du capteur en fonction de l'angle de surveillance

L'idée, qui est en fait une obligation pour nos applications, a été de défocaliser le capteur afin de porter le point focal ébloui à une surface sensible de quelques millimètres carrés. Pour avoir le maximum de sensibilité et d'informations captées sans pertes dues à la surface du capteur ainsi que pour avoir un réglage optimal de l'angle de surveillance, il convient de positionner très précisément le fluxmètre afin que la totalité de sa surface soit éblouie. Une photographie du premier prototype de ce concentrateur parabolique rectangulaire est présentée en annexe 2.

Remarque: Gain naturel de concentration

En appelant gain de concentration ou  $G_c$  le rapport des puissances incidentes engendré par la configuration Capteur-Réflecteur, on a:

$$G_{c} = P_{g}/P_{d} = R.F. (S_{r} - S_{c})/F.S_{c} = R((S_{r}/S_{c})-1)$$
 (grandeur sans dimension) (106)

avec  $P_g$  = puissance thermique venant de la gauche du capteur (W).

 $P_d$  = puissance thermique venant de la droite du capteur (W).

- R = coefficient réflecteur du revêtement en large spectre (ici 99 %, voir §2.6.sur les facteurs de réflexion)
- F = densité de flux supposée collimatée à longue distance de la source (en W/m<sup>2</sup>)
- $S_r = surface du réflecteur$
- $S_c$  = surface du capteur (1 cm de large sur 10 cm de long)

- Le gain naturel du système est:  $G_c = 0,99.((120/10) - 1) \# 10,89$ 

# 2.5.2. Seconde application: surveillance de conteneur de Plutonium individuel.

Une seconde application du système de surveillance "réflecteur parabolique capteur thermique", est présentée comme moyen de "monitoring" (surveillance individuelle d'un objet) pour le stockage de Plutonium (dans des pots).Voir figure 57

On utilise le même principe que précédemment: surveiller à distance une zone de dimensions finies tout en pouvant circuler et travailler dans une zone non surveillée du même local. En revanche, il n'est pas nécessaire de surveiller un volume aussi important qu'un couloir. De ce fait, le concentrateur de rayonnement I.R. est choisi afin de surveiller une zone surfacique sur laquelle est posé un pot simulant un conteneur de Pu.



Figure 57 - Surveillance de pot individuel par SYCLOP

# 2.5.2.1. Etude du concentrateur parabolique

Ici on utilise un concentrateur du type réflecteur associé au détecteur pour concentrer sur celui-ci le rayonnement thermique émanant d'une zone spaciale prédéterminée. La combinaison d'un concentrateur du type réflecteur avec un détecteur du type fluxmètre planaire permet de cerner une zone de surveillance avec précision et de détecter toute modification de l'équilibre thermique dans la zone surveillée.

Avantageusement, le concentrateur est un "vrai" réflecteur parabolique. Chaque dispositif de contrôle a un champ de détection bien défini qui correspond à une zone de surveillance spécifique. Le champ de détection est adapté à la zone de surveillance requise en jouant sur l'un ou plusieurs des paramètres suivants: la forme du réflecteur, la taille de ce dernier, la distance entre l'ensemble de détection et la base de la zone de surveillance, l'orientation du réflecteur dans la zone de surveillance, et éventuellement la position de la surface sensible du détecteur relativement à son réflecteur.

Dans notre cas de réflecteur parabolique de dimension compacte, on obtient un champ de détection relativement uniforme sur un volume conique autour du détecteur comme le montre la figure 57.

La base du cône, qui définit la surface de détection, peut être aisément modulée pour obtenir des contours circulaires ou ovales de différentes dimensions en jouant uniquement sur la distance et l'orientation du réflecteur relativement à cette surface de détection.

Pour une vraie parabole, tous les rayons marginaux parallèles à l'axe principal se focalisent au foyer en un point. Comme le capteur au foyer ou proche du foyer a une largeur quelconque, il capte des rayons sous des angles autres que ceux arrivant parallèlement à l'axe principal (figure 58).



Figure 58 - Concentrateur parabolique de flux radiatif incident

Comme nous l'avons déjà précisé dans le paragraphe 2.5.1.1.2.2., la dimension de un centimètre certé de surface sensible de capteur nous était imposée au début du projet. Aussi, même si depuis nous avons la possibilité d'utiliser des capteurs de dimension plus petite, nous étions amenés à l'origine de l'étude à employer des capteurs de forme et de taille minimales imposées par le constructeur.

Le paramètre taille du capteur étant fixé, une matrice pour la fabrication de parabole par repoussage a été construite et nous a été gracieusement prêtée par Monsieur le Professeur D. Leclercq afin de réaliser des prototypes nécessaires à notre projet.

Cette matrice a été réalisée au tour à commande numérique par la méthode découpe de cercles (voir annexe 3: construction de parabole avec cercles) en introduisant une ordonnée au foyer de 35 mm, une profondeur de parabole de 40 mm, un rayon  $R = \sqrt{p.(2Y_c - p)}$  et Abs =  $\sqrt{2p(Y_c - p)}$ 

Cette matrice, servant de négatif pour la fabrication de nos prototypes par la technique de "repoussage " expliquée dans le paragraphe 2.6.3.2. "Fabrication du concentrateur parabolique", est utilisée pour la réalisation de la parabole correspondante au tracé géométrique suivant:



Figure 59 - Tracé de parabole, méthode par points

En fait, la parabole est une courbe plane telle que chacun de ses points est à égale distance d'une droite fixe XY, appolée "directrice", et d'un point fixe F, appelé "foyer". Le double de la distance du "foyer" à la "directrice" est nommé "paramètre". Il est représenté par 2p.

Pour tracer la parabole, il faut:

- choisir sur l'axe des points quelconques 1, 2, 3...
- élever de 1, 2, 3....des perpendiculaires sur l'axe.
- de F comme centre, successivement avec O1,O2, O3...comme rayons, décrire des arcs de circonférence qui coupent les perpendiculaires en 1', 2', 3'...
- réunir ces points par une courbe régulière

Ceci nous permet en plaçant un capteur de un centimètre carré à quarante millimètres du sommet S de la parabole d'obtenir un angle de regard de  $14^{\circ}25$  (tg  $\alpha = 0,5/4$ ), angle tout à fait utilisable pour nos applications de surveillance de conteneurs de matière fissile. C'està-dire, par exemple, qu'il est possible de surveiller à une distance de 3m une surface circulaire ayant un diamètre de 75 cm. (tg 7,125 = 0,375 / 3)

En fonction de la surface du capteur et de son positionnement sur l'axe principal comme nous pouvons le voir sur la figure 60, l'angle de regard  $\alpha$  varie et nécessite un réglage minutieux en fonction de la surveillance souhaitée.

Dans un mode de réalisation préféré, le détecteur est monté mobile par rapport à un axe du concentrateur pour permettre une adaptation aisée au champ de détection par un simple réglage de position prédéterminé.



Figure 69 - Schéma simplifié d'un détecteur circulaire

Une photographie du premier prototype de ce concentrateur parabolique circulaire est présentée en annexe 4.

Remarque: Gain naturel de concentration pour une parabole circulaire

En appelant gain de concentration ou  $G_c$  le rapport des puissances incidentes engendré par la configuration Capteur-Réflecteur, on a:

$$G_{c} = P_{g}/P_{d} = R.F. (S_{r} - S_{c}) / F.S_{c} = R((S_{r}/S_{c})-1)$$

(grandeur sans dimension)

avec  $P_g$  = puissance thermique venant de la gauche du capteur(W).

 $P_d$  = puissance thermique venant de la droite du capteur(W).

R = coefficient réflecteur du revêtement en large spectre (ici 99 %, voir §2.6.sur les facteurs de réflexion)

F = densité de flux supposée collimatée à longue distance de la source (en W/m<sup>2</sup>)

 $S_r = surface du réflecteur$ 

 $S_c$  = surface du capteur (1 cm<sup>2</sup> de surface sensible + 1 cm<sup>2</sup> pour les connexions)

Nous avons déjà vu dans le paragraphe 2.4.3. que la surface d'une calotte sphérique s'exprime par la relation (84):

S = 
$$2\pi / 3p \cdot (\sqrt{(d^2/4 + p^2)^3} - p^3)$$

et qu'avec un diamètre de 14.8 cm et une profondeur de 4 cm on obtient une surface de calotte sphérique équivalente à 215.275 cm<sup>2</sup>

- Le gain naturel du système circulaire parabolique vaut alors:

 $G_c = 0,99.((215,275/2) - 1) # 105,57$ 

# 2.6. CARACTERISATION DU REFLECTEUR

# 2.6.1. Choix du matériau utilisé

Le dispositif de détection I.R. associe des capteurs de type *fluxmétrique* à un réflecteur parabolique jouant le rôle d'amplification naturelle.

En premier lieu, il faut remarquer que les rayonnements infrarouges se comportent comme les rayons lumineux. Ils sont susceptibles de produire une élévation en température d'un corps irradié si celui-ci absorbe tout ou une partie des radiations qu'il reçoit. Si le matériau que les rayons I.R. rencontrent est parfaitement "perméable", les I.R. le traversent sans qu'il y ait production de chaleur. Si la substance est parfaitement réfléchissante, les I.R. sont réfléchis purement et simplement sans production de chaleur.

Le domaine de longueur d'onde considéré par les radiations thermiques auxquelles nous nous intéressons s'étend plus particulièrement au rayonnement I.R. ]1µm...15µm [.

Il est nécessaire d'être attentif au pouvoir réflecteur des matériaux car le rapport de l'énergie réfléchie par une surface étudiée en fonction de l'énergie incidente reçue est variable d'un métal à l'autre, et il est fonction de la longueur d'onde.



Figure 61 - Facteur de réflexion (Réf.2)

L'argent est, de tous les matériaux, celui qui, dans le visible et l'infrarouge, a le plus grand pouvoir réflecteur. Malheureusement, les miroirs d'argent se ternissent vite, souvent on les remplace par des miroirs d'aluminium dont le pouvoir réflecteur est sensiblement inférieur mais reste à peu près constant.

Les possibilités de fabrication et l'usage du réflecteur pour la surveillance nous ont amené à étudier un réflecteur parabolique circulaire réalisé avec différents matériaux.

*Etude du pouvoir réflecteur du matériau pour le choix du réflecteur parabolique surveillant le pot* 

Un banc de mesures a été construit (Figure 62) afin de déterminer le matériau ayant le meilleur coefficient de réflexion parmi l'Or, le Cuivre, l'Inox, l'Aluminium, le Chrome et le Laiton.



Figure 62 - Mesure de la réflexion

- Capteur de flux:  $10 \times 10 \text{ mm}$
- Sensibilité =  $0.32 \text{ W/m.m/}\mu$
- Câble de 15 m: oui
- Amplificateur: 1000
- Unités relevées: mV

Grâce à un pot en verre peint en noir mat et chauffé à l'aide d'une résistance électrique, plusieurs relevés de f.e.m. délivrée par la parabole pour une même puissance et à même distance de mesure nous ont permis d'obtenir le tableau 5 de valeurs moyennes délivrées par la parabole en fonction du type de réflecteur et de la distance de mesure.

Relevés de tension en mV délivrée par les paraboles en différent matériau et effectués avec un multimètre Hameg:

| Distance | Or  | CuChr | AI  | Cu  | Inox | Laiton |
|----------|-----|-------|-----|-----|------|--------|
| 0.5 m    | 392 | 346   | 355 | 374 | 328  | 349    |
| 1 m      | 203 | 157   | 164 | 178 | 165  | 165    |
| 1.5 m    | 104 | 80    | 81  | 91  | 85   | 79     |
| 2 m      | 63  | 48    | 49  | 55  | 50   | 47     |

Tableau 5 - Mesure en réflexion

La figure 63 suivante montre les mesures en réflexion des différents réflecteurs en fonction de la distance entre la source et la parabole.



Figure 63 - Mesure en réflexion des différents réflecteurs en fonction de la distance

Le tableau suivant donne le pourcentage de signal détecté avec les paraboles en différents matériaux par rapport à celle en or, parabole délivrant le plus de signal détecté.

| Distance | Gain(%) Cu/Or | Gain(%)Inox/Or | Gain(%)Al/Or | Gain(%) Laiton/Or | Gain(%) CuChr/Or |
|----------|---------------|----------------|--------------|-------------------|------------------|
| 0.5m     | -5            | -20.7          | -10.4        | -12.3             | -13.3            |
| 1m       | -14           | -23            | -22.5        | -23               | -29.3            |
| 1.5m     | -16.5         | -22.3          | -28.4        | -31.6             | -30              |
| 2m       | -14.5         | -26            | -28.6        | -34               | -31.2            |

Tableau 6 - Pourcentage de signal détecté par rapport à l'or





La figure 64 nous confirme que l'usage de l'or nous donne la meilleure réflexion, donc la meilleure détection car au-delà d'une distance de un mètre entre la parabole et la source détectée, nous avons toujours au moins 15 % en plus de signal détecté par rapport à la seconde parabole ayant la deuxième meilleure réflexion.

| Classement | Distance 0.5m | Distance 1m | Distance 1.5m | Distance 2m |
|------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| 1          | Or            | Or          | Or            | Or          |
| 2          | Cu            | Cu          | Cu            | Cu          |
| 3          | Al            | Al          | Inox          | Inox        |
| 4          | Inox          | Inox        | Al            | Al          |
| 5          | CuChr         | Laiton      | CuChr         | CuChr       |
| 6          | Laiton        | CuChr       | Laiton        | Laiton      |

On obtient alors les tableaux suivants:

**Tableau 7** : Classement des matériaux en fonction du signal fem délivré / la distance entre le pot et la parabole

| Distance | Or - Cu | Or - Inox | Or - Al | Or - Laiton | Or - CuChr | Signal Or |
|----------|---------|-----------|---------|-------------|------------|-----------|
| 0,5m     | 18mV    | 62mV      | 37mV    | 43mV        | 46mV       | 392mV     |
| 1m       | 25mV    | 38mV      | 39mV    | 38mV        | 46mV       | 203mV     |
| 1,5m     | 13mV    | 19mV      | 23mV    | 25mV        | 24mV       | 104mV     |
| 2m       | 8mV     | 13mV      | 14mV    | 16mV        | 15mV       | 63mV      |

Tableau 8 : Ecart de tension relevée par rapport à celle délivrée par la parabole en Or

| Distance | Or  | Cu    | Inox  | Al    | CuChr | Laiton |
|----------|-----|-------|-------|-------|-------|--------|
| 0,5m     | 100 | 95,40 | 83,70 | 90,50 | 88,30 | 89,00  |
| 1m       | 100 | 88    | 81,30 | 80,80 | 76,90 | 81,30  |
| 1,5m     | 100 | 87,5  | 81,70 | 77,90 | 77,00 | 75,90  |
| 2m       | 100 | 87,30 | 79,40 | 77,80 | 76,20 | 74,60  |

Tableau 9 : Tableau de mesures indexées sur l'Or

et la figure 65 suivante représentant les valeurs indexées sur l'Or en fonction de la distance:



Figure 65 - Mesures indexées sur l'or

#### Remarque sur la figure 65 :

Lorsque l'on place une parabole très proche d'une source infrarouge (< 1m), elle est fortement affectée par les émissions en radiation de cette source. Le réflecteur peut donc être perturbé et influencé par la source sur laquelle il se focalise, cela explique les difficultés à mesurer avec précision et à distinguer facilement les écarts ou les similitudes dans les valeurs relevées pour nos mesures de réflexion à faible distance.

Le cuivre, malgré son très bon pouvoir réflecteur, reste inutilisable car il s'oxyde très vite, de même que l'argent, celui-ci ayant été d'office éliminé pour cette raison.

L'essai cuivre chromé ne nous apporte rien, le chrome ayant un trop mauvais pouvoir réflecteur. D'autant plus que pour notre application en détection de faible rayonnement infrarouge nous recherchons un revêtement donné d'un très bon coefficient de réflexion.

L'or remplace avantageusement l'aluminium ou l'argent avec un facteur de réflection identique et une inaltérabilité pratiquement totale.

Enfin, pour sa faible différence de coût, l'or reste largement préférable à l'inox de par son gain en réflexion.

#### Autres remarques:

Les métaux purs polis ont le plus souvent de faibles émissivités et absorptivités et par conséquent des réflectivités élevées. Mais c'est là une loi qui est loin d'être générale. En effet, un métal peut avoir un coefficient d'émissivité variable selon la direction, la longueur d'onde, la température de surface, la rugosité de la surface ou les dépôts superficiels.

\* Notre surface de réflecteur n'est pas utilisée comme simple miroir planaire réfléchissant mais plutôt comme concentrateur de rayonnement. Aussi l'angle d'ouverture de la parabole aura-t-il une influence sur l'angle de surveillance ainsi que sur le niveau de détection (voir les diagrammes de sensibilité dans le chapitre III).

\* Un métal poli réfléchit mieux les grandes longueurs d'onde que les courtes. Les métaux se comportant comme des miroirs dans l'infrarouge, la longueur d'onde n'a aucune influence pour notre application.

\* Comme la réflectivité électrique des métaux augmente avec la température, on peut prévoir, par application de la loi de Hagen-Rubens, que l'émissivité d'un métal augmente également avec la température. C'est effectivement ce que l'on constate en général. L'équation de Hagen-Rubens donne l'émissivité spectrale directionnelle, dans la direction normale, pour les métaux polis, et pour les longueurs d'onde supérieures à 5µm.

$$\varepsilon_{\lambda,n}^{\prime}(\lambda) = 2 / \sqrt{0,003} \overline{\lambda_0}/r_e$$
 Hagen-Rubens (ou de Drude) (107)

où r<sub>e</sub> est la résistivité électrique en ohms-mètres,  $\lambda_0$  est la longueur d'onde dans le vide, en microns.

En intégrant l'équation (107) par rapport à  $\lambda$  (de 0 à  $\infty$ , en supposant que la température du métal soit suffisamment basse pour que l'énergie émise entre 0 et 5 µm soit petite par

rapport à celle émise à plus de 5  $\mu$ m), en utilisant la loi d'émissivité totale directionnelle (De Vriendt, tome II, p52, équation 3-15) et la loi de Planck en supposant que pour les matériaux purs

$$r_e = r_{e,273K}$$
 (T / 273) (De Vriendt, tome II, équation 5-45a)

re,273K étant la résistivité électrique évaluée en ohms-mètres, à 273K, on trouve

$$\varepsilon'_n(T) = 0.0349 \sqrt{r_{e,273K}}$$
. T (De Vriendt, tome II, équation 5-46)

D'une façon générale, même si l'on vient de constater que l'émissivité totale des matériaux augmente avec la température, il est supposé qu'en dessous de 373 °K la réflectibilité des métaux ne change pas, ce qui est notre cas.

\* La rugosité, quand elle est grande, a aussi une influence notable sur les caractéristiques d'émission et de réflexion directionnelles. Quand la géométrie de la rugosité est complètement spécifiée on peut prédire les propriétés directionnelles dans certains cas. Mais le plus souvent, la rugosité est très irrégulière et il faut choisir un modèle statistique. Selon l'application du réflecteur, un niveau de rugosité doit être exigé et, excepté en optique de précision, le degré de lissage du métal est relativement facile à obtenir.(voir le paragraphe 2.6.3)

\* L'influence des dépôts superficiels est un facteur non négligeable à prendre en compte pour tout métal utilisé en réflexion. Une surface, à l'origine optiquement lisse, peut perdre cette qualité si un film d'oxyde (même très mince) s'est formé (naturellement ou artificiellement) ou encore si un dépôt de matière étrangère s'est effectué (pellicule de vapeur d'eau absorbée, film d'huile... voire même des excréments de mouches, par exemple, dans le paragraphe 3.15).



Figure 66 - Influence du degré d'oxydation sur l'émissivité du cuivre [ 5,22 ] (De Vriendt, tome II, figure 5.9)

La figure 66 montre, par exemple, comment l'émissivité du cuivre varie avec le degré d'oxydation et la température.

Le choix de l'or pour notre application comme matériau réflecteur semble tout à fait correspondre aux exigences requises dans le domaine du stockage nucléaire. En effet, la fiabilité et le peu d'entretien du réflecteur en or sont de tout premier ordre pour notre choix.

### 2.6.2. Procédé de fabrication du concentrateur

#### 2.6.2.1. Fabrication du concentrateur rectangulaire de type parabolique

Etant donné qu'il doit être de forme rectangulaire, une simple feuille de métal recouverte d'une microépaisseur d'or est suffisante. Les usines de métallisation de métal peuvent employer un procédé d'ionisation pour déposer cette fine couche d'or. Le réflecteur de notre application a été réalisé avec une feuille en laiton d'épaisseur 200  $\mu$ m sur laquelle a été rajouté 7 à 8  $\mu$ m de Nickel permettant le dépôt de 1 à 2  $\mu$ m d'or à dix-huit carats, épaisseur suffisante pour avoir un coefficient de réflexion quasi égal a l'unité.

Il a suffi de placer sous notre réflecteur un support quelconque (polystyrène, plaque métallique dans notre dernier prototype) ayant la forme calculée dans le paragraphe 2.5.1.1. pour obtenir la courbure, la précision et les dimensions exigées.

# 2.6.2.2. Fabrication du concentrateur parabolique

Le concentrateur parabolique circulaire doit être construit avec précision selon les caractéristiques définies au paragraphe 2.5.2.1. Contrairement au réflecteur rectangulaire, il est impossible de réaliser manuellement ce type de concentrateur parabolique.

Ces formes pourraient être construites par "injection"; c'est-à-dire que l'on injecte une matière plastique dans un moule. Cette technique d'injection est très coûteuse et utilisée lorsqu'on a besoin de fabriquer un très grand nombre d'objets.

Une autre possibilité de réaliser cette parabole serait d'employer la technique d'emboutissage. Le prix de "l'emboutissage", même s'il est moins élevé que celui de "l'injection", reste encore élevé puisqu'il faut fabriquer deux matrices au préalable. Aussi la technique de "l'emboutissage" s'utilise lorsqu'on désire fabriquer au moins plusieurs centaines d'objets.

Cela n'étant pas l'objectif de notre étude, nous nous sommes dirigés vers une troisième possibilité de fabrication qui est la technique de "repoussage". Pour réaliser notre prototype de parabole circulaire nous avons utilisé une matrice obtenue à partir d'un bloc d'acier au carbone C<sub>40</sub> usiné au tour à commande numérique. Afin de répondre au paragraphe 2.5.2.1., c'est-à-dire de placer un capteur de dimentions 10x10 mm au niveau du foyer du réflecteur parabolique et d'avoir un angle d'ouverture de 14°, nous avons pris 40 mm de profondeur de parabole et introduit les équations : Rayon =  $\sqrt{p.(2Y_c-p)}$  et Abs=  $\sqrt{2p.(Y_c-p)}$  au tour numérique (voir l'annexe 3).

Une fois la matrice obtenue on applique la technique du repoussage, qui consiste à déformer une plaque métallique (choisie en laiton pour notre application pour sa meilleure finition) à l'aide d'une tige servant à repousser et à plaquer la matière sur cette même matrice. La plaque ainsi déformée prend la forme de la matrice, donc de la parabole, et il ne reste plus qu'à déposer les quelques microns d'or.

# 2.6.3. Influence de la rugosité d'une surface sur la réflexion des infrarouges

# 2.6.3.1. Introduction

Les surfaces des pièces usinées ne sont pas parfaites. Elles présentent des défauts plus ou moins prononcés qui peuvent être classés en deux catégories (fig 67) :

- Défauts d'ordre macrogéométrique constitués par les erreurs de forme et les ondulations
- Défauts d'ordre microgéométrique constitués par des irrégularités de surface, à intervalles relativement petits, qui rendent la pièce rugueuse et qui échappent à la mesure des dimensions.





Or, pour que la pièce puisse remplir correctement sa fonction, il est indispensable que son état de surface soit compatible avec cette fonction.

Ici nous ne rentrerons pas en détail sur la qualité de la surface des pièces mais nous regarderons la rugosité des différentes paraboles pour voir s'il y a une influence en réflexion due à l'état de surface.

#### 2.6.3.2. Rappel de notions théoriques

Les rugosités des pièces peuvent être très diverses, tant par leur importance (hauteur des stries) que par leur forme (fig. 68).

7



Figure 68 - Types de rugosités différentes. (Réf. 26)

Or, pour aborder le problème des états de surface, il est nécessaire de traduire la rugosité en valeurs numériques. Pour cela, deux systèmes de référence auxquels se rattachent un certain nombre de paramètres ont été définis (fig 69)



Figure 69 - Système de rugosité "E". (Réf. 26)

Dans le premier, dit système "M", la rugosité est mesurée par rapport à la ligne moyenne du profil, c'est-à-dire à la ligne qui partage le profil de telle sorte que la somme des carrés des distances du profil à cette ligne soit minimale. Pratiquement, la surface des pleins, situés au-dessus de cette ligne, est égale à la surface des creux, situés au-dessous.

Dans le second, dit système " E ", la rugosité est rapportée à la ligne enveloppe de la surface, matérialisée par le déplacement du point inférieur d'un cercle se deplaçant en contact avec le profil.

Les principaux paramètres se rapportant à ces systèmes de référence sont :

- La valeur moyenne de rugosité :  $R_A$
- La profondeur moyenne de rugosité : R<sub>Z</sub>
- La profondeur maximale de rugosité : R<sub>MAX</sub>
- La capacité d'aplanissement : RPM
- Le nombre de pics par cm : PC

(Les critères de rugosité sont définis dans le paragraphe 2.6.3.3.3.)

# 2.6.3.3. Principe de mesure

Différentes techniques peuvent être utilisées afin de caractériser la rugosité d'un matériau. Chaque lecture est une signature unique dépendant de différents facteurs liés au composant, tels sa nature, son élaboration, sa mise en forme, son état d'oxydation, ses défauts, sa forme géométrique et surtout sa rugosité. Le prix de revient d'une pièce croît en général en même temps que l'on améliore son état de surface.

On est donc conduit à exiger, pour chacune des surfaces :

- un degré de finition minimale compatible avec la fonction de la pièce et donnant le meilleur prix de revient.

- ou une qualité de surface comprise entre un minimum et un maximum.

## 2.6.3.3.1. Echantillons "Rugotest"

Ces échantillons "Rugotest" sont présentés sous forme d'une plaquette comportant 27 modèles de rugosité obtenus par électroformage de nickel dur permettant d'obtenir une dureté d'environ 50 Rc (voir suite) et de limiter l'usure par rayures.

Les trois plus fortes rugosités sont présentées sous quatre variantes : sphérique grosse, sphérique fine, angulaire grosse et angulaire fine, le détail de chaque rugosité est donné ci-dessous :

| N°             | 18   | 17  | 16  | 15   | 14   | 13   | 12   | 11   | 10    |
|----------------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|-------|
| Symbole i      | FR   | FR  | FR  | RC   | RC   | RC   | RC   | RC   | RC    |
| <b>Ra</b> (µ)  | 13.3 | 7.8 | 3   | 1.55 | 0.82 | 0.35 | 0.2  | 0.1  | 0.05  |
| <b>R</b> z (μ) | 65   | 38  | 16  | 7.6  | 4.4  | 1.75 | 1.05 | 0.53 | 0.40  |
| Symbole        | FB   | FB  | FB  | FB   | FB   | RD   | RD   | I RD | RD    |
| <b>R</b> a (µ) | 13.5 | 5.5 | 3.4 | 1.75 | 0.75 | 0.44 | 0.2  | 0.09 | 0.04  |
| <b>R</b> z (µ) | 51   | 29  | 16  | 7.6  | 3.75 | 2.8  | 1    | 0.53 | 0.2   |
| Symbole        | TRB  | TRB | TRB | TRB  | TRB  | SF   | SF   | SF   | SF    |
| <b>R</b> a (µ) | 14   | 7   | 3.5 | 1.65 | 0.75 | 0.43 | 0.2  | 0.11 | 0.045 |
| <b>Rz</b> (μ)  | 56   | 30  | 13  | 6.3  | 3.3  | 2.4  | 1.15 | 0.65 | 0.30  |

Tableau 10 - Echantillons "Rugotest" "E". (Réf. 26)

avec: FR = fraisage; RC = rectification; FB = fraisage; RD = rodage; TRB = rabotage-tournage; SF = pierrage-super fini

L'expérience montre que ce procédé de comparaison visuelle et tactile (à l'ongle) d'une surface donnée avec une surface type de texture similaire est d'une extraordinaire précision. Il permet d'apprécier à l'oeil nu des différences de hauteur de rugosité de quelques microns.

A titre indicatif les correspondances suivantes sont suggérées entre les symboles de façonnage et la valeur de  $R_a$  (en microns)

|   | N° | 18   | 17       | 16  | 15              | 14  | 13  | 12                     | 11  | 10   |
|---|----|------|----------|-----|-----------------|-----|-----|------------------------|-----|------|
|   | Ra | 12,5 | 6,3      | 3,2 | 1,6             | 0,8 | 0,4 | 0,2                    | 0,1 | 0,05 |
| _ | ~  |      | $\nabla$ |     | $\nabla \nabla$ |     |     | $\nabla \nabla \nabla$ | 7   |      |
|   |    |      |          |     | •               |     |     |                        |     |      |

tableau 11 - Echelle des critères de rugosité (Réf. 26)

#### 2.6.3.3.2. Le laser Monopoint

C'est une méthode optique qui consiste à déterminer la forme de l'image d'un point de l'objet observé, obtenue par une optique fortement astigmatique. Une telle déformation est naturellement fonction de la distance de l'objet à l'optique d'observation et de la signature de la surface.

La lecture de surface laser met en oeuvre un système de microscopie différentielle par détection à quatre cadrans. Ce système comporte une optique destinée à focaliser le faisceau émis par une diode laser sur l'objet à observer et une optique qui forme une image fortement astigmatique du point de l'objet observé sur un détecteur à quatre cadrans : cette image provient de la lumière réfléchie par l'objet. Le fait de mesurer l'intensité totale délivrée par les quatre cadrans permet de s'affranchir de la connaissance du coefficient de réflexion de la surface observée.

# 2.6.3.3.3. Le Perthometer

Les perthometers fonctionnent selon le principe de palpage d'une ligne de coupe.

Le micropalpeur parcourt, au cours du contrôle, la surface à contrôler à une vitesse constante de palpage. Lors de cette opération, une pointe diamant de palpage, flexible dans le sens vertical, palpe le profil de surface. Un convertisseur électromécanique transforme les oscillations de la pointe en des impulsions électriques. Les résultats sont imprimés immédiatement à la fin de l'opération de contrôle grâce à l'enregistreur à aiguilles incorporé, sur du papier graphique, en caractères alphanumériques, ce qui permet de constituer un procès-verbal, document de travail. Ra



Figure 70 - Rugosité moyenne R<sub>a</sub> (DIN 4768)

c'est la moyenne arithmétique de toutes les valeurs du profil de rugosité R pour la totalité de la longeur de contrôle  $l_m$ . (Réf. 26)





Figure 71 - Profondeur moyenne de rugosité  $R_z$  (DIN 4768)

c'est la moyenne des profondeurs de rugosité individuelles de cinq segments individuels d'évaluation consécutifs  $l_e$ .

Profondeur de rugosité individuelle  $R_{z1} \dots R_{z5}$ :

c'est la distance verticale entre le pic le plus haut et le creux le plus profond du profil de rugosité R pour un segment individuel d'évaluation  $l_e$ . (Réf. 26)

# RMAX

# Profondeur maximale Rmax (DIN 4768) : (Réf. 26)

c'est la valeur la plus grande de profondeur de rugosité individuelle pour toute la longueur de contrôle  $l_m$ .



Figure 72 - Capacité moyenne d'aplanis-sement  $R_{pm}$ : (Réf. 26) c'est la moyenne des capacités d'aplanissement individuelles de cinq segments individuells d'évaluation consécutifs  $l_e$ .

c'est le pic le plus haut du profil de rugosité R pour un segment individuel d'évaluation  $l_e$ .



Figure 73 - Nombre de pics P<sub>c</sub> : (Réf. 26)

c'est le nombre de points caractéristiques du profil R par cm (ou par inch) dont la valeur, pour un pic, dépasse la ligne de coupe supérieure ce pic étant suivi, dans son prolongement, par un creux dont la valeur dépasse la ligne de coupe inférieure. Les lignes de coupe supérieure et inférieure sont parallèles et distantes l'une de l'autre de la distance z, réglable. Elles sont

symétriques par rapport à la ligne

moyenne M.

# 2.6.3.3.4. Types de surfaces étudiées et essais obtenus par le Perthometer

Après l'étude faite précédemment sur les matériaux pour la construction de nos réflecteurs paraboliques, nous avons fait fabriquer des prototypes de paraboles circulaires en Cuivre, Inox, Aluminium, Cuivre Chromé, Laiton, Laiton avec dépôt Or et en Laiton dépôt Or pour notre prototype de parabole rectangulaire.

Un protocole a été réalisé pour chacune des surfaces des matériaux utilisés pour les prototypes ca Or, Cuivre, Inox, Aluminium, Cuivre Chrome, Laiton.

Les figures 74 et 75 identifient chaque type de surface par un relevé graphique et ses valeurs  $R_a$ ,  $R_z$ , Rmax, RPM.



Figure 74 - Protocoles relevés pour diverses surfaces de matériaux



Figure 75 - Protocoles relevés pour diverses surfaces de matériaux

Les valeurs de R<sub>a</sub> entrent toutes dans la catégorie trois triangles (Ra <  $0.8 \mu m$ ).

Les rugosités moyennes Ra des différents matériaux sont du même ordre de grandeur, entre 0,11 et  $0,05 \ \mu m$ .

Nous pouvons considérer les états de surface des matériaux tout à fait utilisables après "repoussage et dépôt Or" pour notre application en réflexion.

Si nous comparons deux réflecteurs, un fabriqué en laiton et l'autre en cuivre, nous voyons qu'ils ont une rugosité moyenne  $R_a$  égale. En revanche, une parabole en laiton recouverte d'Or a un  $R_a$  deux fois meilleur qu'une parabole en Cuivre recouverte de Chrome.

On remarque qu'avec un dépôt de un à deux microns d'or la rugosité d'une surface est en générale plus faible. Ainsi, la couche d'or n'apporte pas seulement un meilleur coefficient de réflexion mais diminue aussi la rugosité du réflecteur.

Remarque confirmée par le protocole de la feuille Laiton plus dépôt d'Or utilisée pour fabriquer le réflecteur rectangulaire.

Nous réaliserons donc tous nos réflecteurs en laiton, ce métal donnant une meilleure finition, sur lequel sera déposée une microcouche d'or dix-huit carats.

Il faut faire remarquer que le prix du demi-gramme d'or déposé sur la faible surface d'une parabole circulaire ou d'une parabole rectangulaire est négligeable par rapport au coût total du prototype final installé (de 3 à 6 % du coût total).

# 2.7. CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DU MONTAGE CAPTEUR-AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL

Pour amplifier le microsignal délivré par un capteur de flux radiatif, un amplificateur, dont la tension de sortie est proportionnelle à la force électromotrice générée par le capteur de flux, est nécessaire.

L'amplificateur différentiel dont le gain voisin de 1000 permet d'obtenir des tensions de sortie de l'ordre du millivolt doit présenter à la fois un très faible temps de réponse, une faible dérive en température et un faible bruit.

Un montage classique d'amplificateur, type TSC 900 de Teledyne, a été retenu à l'origine pour son système intégré à commutateur de capacité ("chopper"). Ces amplificateurs permettent de s'affranchir de la dérive lente en température (0,02  $\mu$ m/°C) et leur faible bruit (300nV/Hz<sup>1/2</sup>) est intéressant.

Le choix du TSC 900 s'est fixé expérimentalement au niveau du bruit car les circuits classiques types 1179 et 1078 se sont révélés trop sensibles au bruit extérieur. De plus, le TSC 900 ne demande pas d'adaptation.

#### 2.7.1. Gain et linéarité de l'amplificateur

En utilisant un montage amplification classique, la relation entre la tension de sortie et la tension d'entrée de l'amplificateur différentiel peut être relevée expérimentalement pour différentes valeurs de tension d'entrée injectée.

Afin d'évaluer la linéarité du dispositif, des mesures de même type ont été menées en utilisant un générateur de tension précis au mV près (Programable Power supply HM 8142 HAMEG), correspondant à des tensions d'entrée de 1 à 300  $\mu$ V et contrôlées en sortie par un multimètre HM 8112.

| Tension dennee en pV- | Tension de sorticien my | Game 6=0s/Fie |
|-----------------------|-------------------------|---------------|
| 18                    | 18                      | 1000          |
| 36                    | 36                      | 1000          |
| 53                    | 54                      | 1018          |
| 72                    | 71                      | 1014          |
| 89                    | 90                      | 1011          |
| 107                   | 108                     | 1009          |
| 133                   | 135                     | _1015         |
| 168                   | 170                     | 1012          |
| 222                   | 224                     | 1009          |
| 295                   | 296                     | 1004          |

On constate que les gains obtenus s'échelonnent entre 1000 et 1018.

Tableau 12 - Linéarité du dispositif amplificateur TSC900

Il ressort de ces mesures que le gain du conditionneur est très proche du gain calculé pour l'amplificateur différentiel (1004=1+402k/400) (soit #  $1+R_2/R_1$ ). La linéarité sur l'étendue des mesures comprises entre 0 et 300  $\mu$ V de tension d'entrée est supérieure à 0,5%.

Dans ces conditions, dans la suite de ce travail, le gain sera considéré comme constant avec pour valeur la moyenne arithmétique des dix gains mesurés, soit G = 1011.

#### 2.7.2. Temps de réponse et tension de bruit de l'amplificateur différentiel

Pour mettre en œuvre cette mesure, il est nécessaire de produire une variation brutale de la tension d'entrée de l'amplificateur. Un générateur de signaux carrés (HM 8130), associé à un pont diviseur, est branché à l'entrée de l'amplificateur.

Le générateur délivrant des signaux de 100 mV d'amplitude, la f.e.m. appliquée à l'entrée du dispositif varie donc de 0 à 100  $\mu$ V, valeur contrôlée par le HAMEG 8142, et la fréquence, pour être dans toute la bande de détection possible et utilisable de 1 $\mu$ m-15 $\mu$ m, est ajustée par le générateur de signaux. Puiscue la mesure est effectuée directement en entrée-sortie de l'amplificateur, le régime permanent pout être atteint dès la première impulsion suivant la transition du signal d'entrée.

Nous avons constaté que le temps de réponse de l'amplificateur TSC 900, inférieure à la milliseconde, était tout à fait négligeable vis-à-vis du temps de réponse des capteurs fluxmétriques utilisés (voir suite). En effet, la réponse indicielle de l'amplificateur mesurée à l'oscilloscope est de l'ordre de 100  $\mu$ s; temps nécessaire pour que le signal électrique atteigne 63% de sa valeur finale.

D'autre part, le bruit généré par les composants électroniques de l'amplificateur différentiel provoque une fluctuation centrée d'environ 4 mV de la tension de sortie.

Le signal (séries1) relevé expérimentalement est représenté figure 76.

Afin d'améliorer la précision du système, un filtre passe-bas pourra être introduit au niveau de la sortie de façon à diminuer la fluctuation de tension due au bruit. Un circuit R-C du premier ordre de constante de temps à déterminer permettra de réduire la tension de bruit en sortie. L'augmentation du temps de réponse qui en résulte ne devrait pas être trop pénalisante puisque les variations des grandeurs thermiques à mesurer lors d'une détection devraient être beaucoup plus lentes. Cette amélioration s'effectuera lorsque le système sera couplé à un ordinateur de contrôle et de gestion d'alarmes.

# 2.7.3. Tension de bruit du capteur / tension de bruit de l'amplificateur

Le capteur thermique a une dimension de 10mm x 10mm pour une sensibilité de l'ordre de 3 millivolts par Watt net incident. La résistance interne de l'ordre de 1000 ohms, totalement négligeable devant l'impédance d'entrée de l'amplificateur, est associée à un faible bruit thermique.

*Bruit du capteur:* le bruit de Johnson relatif à l'agitation thermique est donné par la relation de Nyquist :

$$\mathbf{U} bruit rms = (\mathbf{4}\mathbf{K}\mathbf{T}\mathbf{B}\mathbf{R})^{1/2} \tag{108}$$

où K est la constante de Boltzman : 1,4.10<sup>-23</sup> J/K T est la température absolue de Kelvin R est la résistance de l'élément en ohms B est la bande de fréquence envisagée en Hertz

Avec R=1000  $\Omega$  et même avec une fréquence de capteur à 10 Hz (à 300 °K)

On a : U*bruit* =  $(4.1, 4.10^{-23}, 300.10, 1000)^{1/2} \# 13$  nVolts

Avec une valeur de R.M.S. de 13 nanovolts, on peut estimer des fluctuations crêtes de l'ordre de 30 nanovolts, soit une résolution en mesure de flux définie par le critère suivant :

Si la sensibilité est de 3 mV/W , 30 mV équivalent à 10.10  $^{-6}$  W soit 10  $\mu$ V.

Ainsi la contribution de Johnson dans le bruit se réceie negligeable devant d'autres facteurs expérimentaux. Par exemple, les interactions mécaniques dues au collage, à l'air sur le capteur, aux connexions, aux inclusions gauques et au bruit de l'amplificateur différentiel semblent contribuer en majeure partie au signal de bruit.



Figure 76 - Niveau de bruit pour l'amplificateur TSC 900

avec :

<u>séries1</u>: Signal en sortie de l'amplificateur avec un court-circuit en entrée (# bruit de l'ampli.)

<u>séries2</u>: Signal en sortie de l'amplificateur avec un capteur radiatif en entrée <u>séries3</u>: Signal en sortie de l'amplificateur avec une résistance équivalente de 1000W en entrée (équivalant à la résistance électrique interne de notre capteur)

# Remarques

\* En plaçant une résistance de 1000 W (identique à la résistance interne du capteur thermique) en entrée de l'amplificateur, le bruit obtenu est très élevé et principalement produit par les agitations thermiques et les perturbations extérieures captées par les fils des connexions.

\* Les enregistrements du bruit, réalisés avec un court-circuit ou des capteurs radiatifs en entrée de l'amplificateur, sont très similaires et ont une variation d'amplitude crête à crête de l'ordre de 3,5mV à 4mV chacun. Aussi, le bruit de Johnson calculé précédemment se révèle bien négligeable vis-à-vis du bruit naturel de l'amplificateur (3 à 4  $\mu$ V en entrée).

# Améliorations possibles

Un circuit RC du premier ordre a été placé en sortie de l'amplificateur différentiel afin de diminuer les fluctuations de tension dues au bruit. Il a été observé que même avec un circuit RC (R = 10k $\Omega$  et C = 1µF), soit avec un temps de retard  $\tau$  de 10ms, le signal de sortie chute de moitié environ mais il est beaucoup plus stable.

Nous avons choisi de placer un filtre passe-bas de ce genre pour sélectionner le type de surface pour la fabrication de nos paraboles (en Or, Cu, Al...). En effet pour être dans les mêmes conditions de mesure il nous faut une grande stabilité dans cette expérience (§ 2.6.1.).

En revanche, pour notre dispositif utilisé lors de la surveillance, nous avons constaté que le rapport signal / bruit est meilleur sans filtre RC. On observe que la détection est bien plus grande et qu'il est plus facile de détecter une intrusion avec un rapport signal / bruit élevé. Aussi, même si le signal n'est pas aussi stable, nous n'introduirons pas de circuit RC en sortie de l'amplificateur.

Afin d'améliorer notre rapport signal / bruit (S/B) nous avons remplacé le TSC 900 par un amplificateur de très faible bruit (**TLC 2654** avec 1  $\mu$ V de bruit en entrée). Cet amplificateur 2654 travaille en large bande, il est très stable en température (0,01  $\mu$ V/°C) et son très faible bruit en entrée nous assure un gain important pour le rapport S/B vis-à-vis du TSC 900. Les caractéristiques de l'amplificateur opérationnel 2654 de chez Texas Instruments fournies en annexe 5 nous donnent une réponse indicielle qui est encore plus rapide que le TSC 900, étant inférieure à 3 $\mu$ s.

En utilisant le même montage amplification classique qu'en 2.7.1. afin d'évaluer la linéarité de l'amplificateur 2654, nous obtenons des gains s'échelonnant entre 1000 et 1014. Il ressort ainsi de ces mesures que la linéarité sur l'étendue de mesure comprise entre 0 et 300  $\mu$ V de tension d'entrée est supérieure à 0,4%.

Dans la suite de ce travail, le gain sera considéré comme constant avec pour valeur la moyenne arithmétique de dix gains mesurés, soit G = 1009 (nous verrons dans le chapitre 3 pourquoi un gain de 1000 a été choisi).

 $\rightarrow$  Cette considération n'est pas pénalisante pour notre système de contrôle étant donné que nous ne devons pas faire *une mesure de flux* mais *une détection de déséquilibre* thermique.

 $\rightarrow$  C'est-à-dire que nous ne mesurons pas un niveau de flux comparé à un seuil pour déclencher une alarme, mais nous regardons l'évolution d'une pente de signal pour l'assimiler ou pas à une intrusion dans une zone surveillée.



Le relevé suivant nous montre les tensions de bruit des amplificateurs TSC 900 et TLC 2654.(avec un gain de 1000)

Figure 77 - Comparaison des niveaux de bruit du TSC 900 et du TLC 2654 avec un court-circuit en entrée.

# 2.7.4. Temps de réponse

Connaître le temps de réponse d'un capteur est une préoccupation essentielle dans tous les domaines de l'instrumentation. Or, le temps de réponse d'un fluxmètre dépend à la fois du capteur et de la nature des conditions limites supposées connues sur les faces du capteur. Pour notre application de détection de déséquilibre thermique il nous est donc utile de vérifier le temps de réponse des fluxmètres radiatifs que nous allons employer pour nos systèmes SYCLOP.

La figure 78 montre la variation en fonction du temps du signal de sortie obtenu par un fluxmètre radiatif initialement en état d'équilibre thermique et dont la face supérieure a été brusquement éclairée par un corps noir fabriqué au centre de recherche d'Ispra (voir figure 8).



Figure 78 - Temps de réponse du capteur (associé à l'amplificateur)

On constate que le temps de réponse du capteur associé à l'amplificateur 2654 est proche de 250 ms. En collant notre capteur radiatif sur son support métallique comme on peut le voir sur la figure 61, le capteur n'a pas le temps de s'échauffer avec le rayonnement incident car ce flux traverse la partie sensible du détecteur très mince, celui-ci se refroidissant très rapidement grâce à son support faisant office de "puits thermique".

La vitesse à laquelle une personne peut se déplacer rentre dans la gamme de fréquences de 0,1 Hz à 10 Hz, déplacement allant de la course à un déplacement lent effectué sur la pointe des pieds (Réf.4). Voir expériences de simulations d'intrusion humaine dans le chapitre 3 pour vérifier les vitesses de passage dans une zone surveillée.

Le temps de réponse du capteur fluxmétrique, voisine, donc, des 200 ms, nous permet l'usage de celui-ci pour une application telle qu'une détection d'intrusion humaine. D'ailleurs, nous pouvons déjà faire remarquer qu'il est plus difficile de détecter une intrusion lente qu'une intrusion rapide étant donné qu'elle est perçue moins facilement par tout détecteur quel qu'il soit.

# 2.8. N.E.P.

Comme nous l'avons cité dans le paragraphe 1.3.1., lorsqu'on veut utiliser des détecteurs infrarouges, certains paramètres doivent être pris en considération afin d'établir un choix permettant l'usage d'un capteur pour une application bien précise.

Parmi ces paramètres déterminant les performances pour tous types de capteurs, sont exprimés généralement le NEP et la détectivité normalisée  $D^*$  comme critère de détection (voir 1.3.1.5. et 1.3.1.6.). Afin de comparer différents types de détecteurs à l'aide de ces paramètres il convient de fixer les mêmes conditions de calcul ou d'étalonnage. De ce fait, nos critères de comparaison sont représentatifs et comparables pour différentes sortes de capteurs.

Pour comparer le capteur fluxmétrique utilisé pour notre application de surveillance à d'autres détecteurs à infrarouges disponibles dans le commerce et présentés dans la table 2, nous nous sommes fixé les mêmes conditions de calcul de la détectivité normalisée présentée dans la dernière colonne de cette table. Nous avons obtenu un critère arbitraire mais utilisable pour la comparaison des détecteurs.

Comme le bruit dépend de la largeur de bande de l'amplificateur ( $\Delta f$ ) auquel le capteur est raccordé et aussi de la surface du détecteur (s), la détectivité est normalisée pour une surface de détecteur de 1 cm<sup>2</sup> et pour une largeur de bande de l'amplificateur de 1 Hz. La puissance normalisée est celle du corps noir à 500 °K à la valeur de pic de la bande passante du détecteur. Cela donne le NEP et les détectivités normalisées D\* présentés dans la table 2.

Pour nos fluxmètres dont les caractéristiques sont les suivantes :

- sensibilité de l'ordre de  $3\mu V / W / m^2$  (3,2 $\mu V / W / m^2$  pour notre capteur n°32 pris en exemple)
- résistance électrique interne <  $1000\Omega$  (900 $\Omega$  pour le capteur n°32)
- surface active du capteur 0,5 cm<sup>2</sup> (pour 1 cm<sup>2</sup> de surface de capteur, il n'y a que la moitié recouverte par les pistes qui est réellement sensible).

| on obtient d | 'après les relations (32) :  | $\mathbf{NEP} = \mathbf{N} / \mathbf{R} \cdot \sqrt{\Delta \mathbf{f}}$ | [W/ <del>\Hz</del> ]       |
|--------------|--|---|----------------------------|
|              | N : bruit en<br>R : respons<br>$\Delta f$ : largeur                      | sortie : $\sqrt{4kTBR_e}$<br>ivité<br>de bande pour le bruit            | [ V ]<br>[ V/ W ]<br>[ Hz] |
| et (33):     | $\mathbf{D}^{\star}$ (à T en °K, $\Delta f$ , 1 W incident) = $\sqrt{2}$ | A / NEP   | $[ cm.\sqrt{Hz} / W ]$     |

les applications numériques suivantes:

NEP = 
$$\frac{\sqrt{4 * 900 * 1,38 10^{-23} * 500 * 1} * 0,5 10^{-4}}{3.2 10^{-6}}$$
 = 7,78 10<sup>-8</sup> W /  $\sqrt{\text{Hz}}$ 

et 
$$D^*_{(500, 1, 1)} = 1 / 7,78 \ 10^{-8} = 1,28 \ 10^7 \ \text{cm.} \sqrt{\text{Hz}} / \text{W}$$

à 300 °K nous aurions : NEP = 6,03  $10^{-8}$  W /  $\sqrt{\text{Hz}}$ et D<sup>\*</sup> (300, 1, 1) = 1 / 6,03  $10^{-8}$  = 1,66  $10^{7}$  cm.  $\sqrt{\text{Hz}}$  / W Nous pouvons dire que nous sommes dans des ordres de grandeurs comparables à d'autres types de capteurs thermiques et que la sensibilité de nos capteurs radiatifs fournit une détectivité normalisée  $D^*$  suffisante pour notre application de surveillance à distance.

# 2.9. CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre était de décrire la conception et la réalisation d'un système parabolique de détection répondant à certaines caractéristiques spécifiques telles que la surveillance à distance de zone particulière de dimensions finies, ou d'objets situés, par exemple, dans un couloir, un local ou même à l'air libre sans que la circulation de personnes ou d'objets autour des limites de cette zone particulière n'affecte ladite surveillance.

A l'origine même du projet, en début d'année 1995, les dimensions minimales des capteurs qui nous étaient proposés par le laboratoire L.C.I. et donc imposées pour notre étude ne pouvaient pas être inférieures au centimètre carré. Cette condition, qui apparaissait comme un handicap, était en fait favorable pour la surveillance de zones de dimensions finies de types couloir et surface importante.

En fonction de la dimension du capteur utilisé, de la surface de la zone à surveiller et de la distance de contrôle imposée, il y a toujours un compromis à faire entre la surface sensible du capteur et l'ouverture de la parabole.

En pratique, pour des raisons de coût et de fiabilité, nous avons décidé de choisir un réflecteur en métal pour réaliser notre premier prototype de système de détection.

Le concentrateur de rayonnement infrarouge circulaire ou rectangulaire adéquat doit être choisi en fonction de l'importance du volume à surveiller allant du simple objet à de très grandes zones de dimensions finies, de la distance de détection et du degré de sensibilité des alarmes désiré.

Dans la plupart des réalisations, le détecteur est mobile par rapport à l'axe du concentrateur pour permettre une adaptation aisée au champ de détection par un simple réglage de position prédéterminé. L'idée, qui est en fait une nécessité pour nos applications, a été de défocaliser le capteur afin que celui-ci soit entièrement ébloui par le flux radiatif incident.

La précision et la linéarité de l'amplificateur utilisé dans notre application ne sont pas astreignantes étant donné que nous ne devons pas faire *une mesure de flux* mais *une détection de déséquilibre thermique*. C'est-à-dire que nous ne mesurons pas un niveau de flux pour le comparer à un seuil afin de déclencher une alarme, mais nous regardons l'évolution d'une pente de signal pour l'assimiler ou pas à une intrusion dans une zone surveillée.

Nous avons choisi l'utilisation de plusieurs paraboles pour faire de la surveillance à distance de zone particulière de dimensions finies plutôt qu'une parabole avec plusieurs capteurs scrutés. Ce choix a été déterminé par le fait que la production du type de concentrateur ainsi que le réglage de focalisation sont faciles à mettre en œuvre pour un capteur simple. De plus, l'association de plusieurs capteurs nous permet d'augmenter la sensibilité de notre système et donc de porter la surveillance à une plus grande distance.

# **CHAPITRE 3**

# RESULTATS EXPERIMENTAUX DES PARABOLES DE SURVEILLANCE " SYCLOP "

L'objet de cette partie est de caractériser, d'expérimenter et de régler notre dispositif de surveillance de manière à en faire un système utilisable dans le domaine des "Garanties".

# **3.1. REGLAGE DU GAIN**

Comme nous l'avons indiqué au paragraphe 2.7, nous sommes dans l'obligation, pour amplifier le microsignal délivré par un capteur de flux radiatif, d'utiliser un amplificateur dont la tension de sortie est proportionnelle à la force électromotrice générée par le capteur.

Après avoir sélectionné le TLC 2654 (Texas Instruments) comme amplificateur ayant un très faible temps de réponse, une faible dérive en température et surtout une très faible tension de bruit permettant d'améliorer fortement les performances du système (tant en ce qui concerne la distance de surveillance que la sensibilité de détection), nous sommes amenés à fixer un gain d'amplification.

Or, rappelons que la précision et la linéarité du gain de l'amplificateur utilisé dans notre application n'est pas astreignante étant donné que nous ne devons pas faire *une mesure de flux* mais *une détection de déséquilibre thermique*. C'est-à-dire que nous ne mesurons pas un niveau de flux pour le comparer à un seuil afin de déclencher une alarme, mais nous regardons l'évolution d'une pente de signal pour l'assimiler ou non à une intrusion dans une zone surveillée.

Afin de fixer nos gains d'amplificateur, il est bon de savoir dans quelle gamme de températures se situent les détections que nous devons assurer.

La force électromotrice générée étant directement liée à l'équilibre thermique qui s'établit entre le capteur et le volume surveillé, il est utile de connaître l'ordre de grandeur que prendra cette f.e.m. en fonction de la différence de température existant entre le fluxmètre et la surface de dimensions finies à contrôler.

Le gain d'amplification peut être ajustable, par exemple de 10 à 10000, mais il est prudent de régler l'amplificateur en fonction de l'application et de l'installation à effectuer de telle manière que l'amplificateur opérationnel ne soit jamais saturé du fait du trop grand écart en température qui pourrait se créer lors d'une détection d'intrusion ou simplement sous un état d'équilibre thermique.

Nous avons donc monté une petite expérience afin de voir l'ordre de grandeur que prend la force électromotrice générée par le capteur en fonction d'un écart de température établi entre celui-ci et la surface focalisée à l'aide de son concentrateur parabolique.

A l'aide du corps noir de référence (voir figure 8) distant ici de 1,6m, par exemple, afin d'être entièrement regardé par une parabole, nous avons simulé un écart de température représentatif d'une mesure effectuée in situ (laboratoire, local de stockage, habitation...).

Soit le dispositif suivant :



Figure 79 - Réglage du gain d'amplification

Sans tenir compte des rapports de forme, de la distance, des émissivités, c'est-à-dire en imaginant un coefficient global  $\alpha$  "fixe", indépendant de la différence de température entre T<sub>1</sub> et T<sub>2</sub>, pour  $\phi = \alpha$  (T<sub>1</sub><sup>4</sup> - T<sub>2</sub><sup>4</sup>) nous avons obtenu, en réglant arbitrairement le gain de l'amplificateur à 1000 le relevé suivant :


**Figure 80** - Fem délivrée par Syclop en fonction de l'écart de température entre lui-même et une source distante de 1,6m et pour un gain d'amplification de 1000.

On remarque qu'avec un écart de température de 40°C entre la température du capteur et la température moyenne de la surface surveillée, le signal en sortie d'amplificateur après être amplifié par 1000 est de l'ordre de 2,3 volts, ce qui correspond à peu près à la moitié de la tension de saturation de l'amplificateur TLC 2654.

Ceci nous permet de conclure qu'en choisissant un gain de 1000 pour l'amplificateur nous sommes tout à fait dans la gamme des gains autorisant une surveillance avec un écart en température important mais réel ; pour un site de stockage de matières fissiles, par exemple, cet écart pouvant être celui entre la température du capteur situé en hauteur près d'un plafond, donc avoisinant les 50°C, et la température du sol en hiver; ou bien encore celui entre le capteur et un pot de matières nucléaires; ou la température d'un intrus passant très près de la parabole.

De ce fait nous établirons le gain à 1000 pour l'ensemble de nos amplificateurs, valeur pouvant être changée pour un type d'application particulière.

#### **3.2. TEMPS DE REPONSE DU SYSTEME**

Le temps de réponse du capteur 10x10 associé à l'amplificateur TLC 2654 a déjà été indiqué dans le paragraphe 2.7.4. Nous avons vu qu'il est de l'ordre de 200 ms et qu'il permet l'usage du capteur pour une application telle qu'une détection d'intrusion humaine. En effet, le système de surveillance répond suffisamment vite pour éviter de masquer un passage rapide d'intrus dans une zone contrôlée.

L'objectif ici est de voir si le temps de réponse de notre capteur fluxmétrique varie en fonction du fait qu'il soit collé ou non sur un support métallique. Dans notre cas nous ne chercherons pas à amortir le signal reçu pour mesurer un flux radiatif moyen en augmentant volontairement le temps de réponse du capteur, mais nous essaierons de voir si le temps de réponse dépend de l'application ou non du capteur contre un support métallique de type aluminium.



Figure 81 - Support métallique sur lequel sont collés les capteurs

D'après les figures 82 et 83, on voit que le temps de réponse  $\tau$  du fluxmètre radiatif de dimensions 10x10 est meilleur en stabilité et en réponse lorsque le capteur est collé sur un support métallique, support nécessaire pour notre application afin de positionner le détecteur dans le système réflecteur parabolique.



Figure 82 - Temps de réponse d'un capteur radiatif 10x10 collé sur un support métallique.

On constate que le support métallique appliqué au capteur n'augmente pas la capacité thermique du détecteur mais joue le rôle de puits thermique, c'est-à-dire qu'il permet, en outre, d'accélérer la vitesse d'écoulement de la chaleur reçue. Sans support métallique le détecteur donne une réponse moins stable aux fluctuations thermiques, comme nous pouvons le voir sur la figure 83.





# **3.3. CARACTERISATION EN FREQUENCE DU SYSTEME**

Comme nous l'avons défini dans le paragraphe 1.3.1.2, la réponse spectrale est la réponse obtenue en excitant le détecteur par un flux de radiation constant par unité d'intervalle de longueur d'onde.

La réponse des détecteurs thermiques est proportionnelle à l'énergie absorbée. Elle est représentée par une droite horizontale dans le diagramme des réponses relatives en fonction de la longueur d'onde, comme nous le rappelle la figure 19.

Le fluxmètre radiatif que nous utilisons n'a jamais été étudié en réponse spectrale. Afin de vérifier sa bonne utilisation pour notre application et pour prévenir une éventuelle fenêtre en fréquence, soit une température non surveillée par notre système, nous avons fait faire des essais de caractérisation en sensibilité spectrale par le LNE (Laboratoire National d'Essais de Trappes, Paris).

**3.3.1. Caractérisation spectrale du capteur radiatif seul** Voir annexe 18 pour les conditions et les méthodes d'essai.

La sensibilité spectrale du fluxmètre thermique monté sur une tige support et possédant deux fils pour la mesure du signal a été établie entre 2,5 et 11  $\mu$ m à l'aide d'un corps noir et de filtres interférentiels.

Le corps noir est une cavité sphérique à 900 °C utilisée comme source de rayonnement infrarouge. Le spectre est réalisé grâce à des filtres interférentiels centrés à 12 longueurs d'onde entre 2,5 à 11  $\mu$ m.

Le tableau suivant donne les sensibilités moyennes trouvées en fonction de la longueur d'onde nominale du filtre utilisé et présentées par la figure 84.

| filtre | S    | 2σ   |  |  |  |
|--------|------|------|--|--|--|
| nm     | mV/W |      |  |  |  |
| 2510   | 15,5 | 4,5  |  |  |  |
| 3010   | 16,4 | 4,4  |  |  |  |
| 3510   | 16,7 | 6,0  |  |  |  |
| 3990   | 11,6 | 5,4  |  |  |  |
| 4490   | 9,8  | 7,4  |  |  |  |
| 5000   | 13,5 | 5,3  |  |  |  |
| 5510   | 12,9 | 11,2 |  |  |  |
| 7350   | 21,3 | 13,7 |  |  |  |
| 7990   | 24,6 | 12,6 |  |  |  |
| 9060   | 27,6 | 20,3 |  |  |  |
| 9950   | 36,0 | 16,9 |  |  |  |
| 11130  | 35,8 | 71,2 |  |  |  |

**Tableau 13 -** Sensibilités moyennes d'un fluxmètre radiatif  $10 \times 10$  mm en fonction de la longueur d'onde nominale du filtre utilisé (Réf. 27).



Figure 84 - Sensibilité moyenne avec barre d'incertitude à  $1\sigma$ 

Les incertitudes mentionnées correspondent à 2 écarts-types, sauf indication contraire. Les sensibilités en éclairement se déduisent des sensibilités en flux en multipliant ces dernières par la surface du détecteur, soit un centimètre carré.

Nous constatons que la sensibilité est stable jusque 6000 nm puis augmente, voir double au delà (de 15 à 30 mV/W). Dans l'ensemble, nous pouvons dire que la réponse spectrale du fluxmètre est représentée par une droite horizontale jusque 6000 nm puis augmente un peu linéairement dans le diagramme des réponses relatives en fonction de la longueur d'onde. Cette variation est malgré tout considérée faible sur des courtes largeurs de bande selon les applications telle que 9,26  $\mu$ m- 10,61  $\mu$ m (soit de 40 °C à 0 °C).

Pour notre application de surveillance il est important de savoir que nous n'avons pas de trou de fréquence dans la bande où le capteur est amené à détecter. Grâce à cette caractérisation nous nous assurons de ne pas perdre la détection de sources infrarouges susceptibles d'être surveillées.

## 3.3.2. Caractérisation spectrale du détecteur muni du réflecteur parabolique

Comme nous l'expliquons dans l'annexe 18, nous avons comparé la sensibilité d'un détecteur muni d'un réflecteur doré (parabole circulaire) et d'un détecteur seul à deux longueurs d'onde à l'aide de raies laser à 3,39 et  $10,6 \mu m$ .

Nous avons remarqué que pour une même puissance incidente mesurée à raie de laser égale, et en considérant les incertitudes importantes dues aux interpolations et extrapolations nécessitées par la méthode de balayage de l'essai, la sensibilité du détecteur avec parabole est de 8 à 16 fois plus grande que celle du capteur seul pour la manipulation effectuée. Notre parabole joue bien son rôle de concentrateur d'énergie et même si elle n'est pas emploiée pour faire de la mesure, elle nous est utile pour focaliser le rayonnement incident surveillé.

#### **3.4. DIAGRAMME DE DISPERSION**

Le fait de défocaliser la capteur afin de porter le point focal ébloui à une surface sensible de quelques millimètres carrés nous amène à caractériser la visibilité du dispositif. En effet la zone de couverture d'un détecteur est fonction du volume à surveiller et du positionnement du fluxmètre vis-à-vis du réflecteur. En fonction du choix du concentrateur selon le type de surveillance à assurer, il est nécessaire de connaître quelques diagrammes de couverture avant toute installation.

Les figures suivantes montrent ainsi à titre d'exemples quelques diagrammes de couverture type que nous pouvions déjà imaginer avec les figures 56 et 57.

Afin de relever ces diagrammes de dispersion de l'amplitude du signal reçu en fonction de l'angle de regard et de l'éloignement pour les systèmes paraboliques circulaire et rectangulaire, nous avons réalisé l'installation expérimentale suivante:



Figure 85 - Dispositif pour relever le diagramme de sensibilité

- Système d'acquisition: la chaîne d'acquisition Vishay, telle qu'elle est décrite dans le paragraphe 3.5, permet d'enregistrer de 1 à 120 voies en parallèle et de visualiser jusqu'à 6 voies en temps réel. Pour ces relevés nous avions une vitesse d'acquisition de 9 points par seconde.

- *Table angulaire*: réalisée à l'aide d'un panneau sur lequel a été tracée une carte angulaire afin de faire décrire un demi-cercle à la source chaude grâce à un câble tendu.

Le diagramme de sensibilité est obtenu en faisant décrire un demi-cercle à une source chaude située devant le système parabole/capteur. La source ponctuelle utilisée est une pointe métallique (fer à souder de puissance 50W) portée à une température de 300°C; elle rayonne ainsi dans l'infrarouge lointain et, malgré sa petite taille, elle est facilement détectable. Afin de pouvoir considérer cette source comme ponctuelle, elle était placée à une distance minimale de 0,80 m du foyer de la parabole.



Pour un <u>Syclop circulaire</u> nous obtenons ce type de relevé en fonction de la vitesse de passage d'une source chaude évoluant comme il est décrit sur la figure 85.

Figure 86 - Relevé de sensibilité pour un Syclop circulaire à une distance de 1,45m









Figure 88 - Diagramme de sensibilité d'un Syclop circulaire à 0,80 m



Figure 89 - Diagramme de sensibilité d'un Syclop circulaire à 1,10 m



Figure 90 - Diagramme de sensibilité d'un Syclop circulaire à 1,45 m

## Conclusion :

On constate donc que, en fonction de l'angle de regard et de l'éloignement entre la source infrarouge et le détecteur, le diagramme de sensibilité est défini différemment et qu'il faut tenir compte de ces caractéristiques avant toute installation.

La figure 91 résume les écarts de détection présentés en fonction de la distance et de l'angle de présence de l'intrus dans la zone surveillée par une parabole. Les écarts sont exprimés par rapport à un angle, par exemple 20°, angle sous lequel le système ne détecte pas d'intrusion; donc reste stable thermiquement.

L'ensemble de ces diagrammes de sensibilité montre et confirme que la parabole circulaire est très directive car elle possède bien un angle d'ouverture réduit à 14°.

On remarque que plus la détection se fait à une distance importante plus l'énergie est concentrée, c'est-à-dire qu'elle se disperse moins angulairement, ce qui est tout à fait logique puisque la source infrarouge devient de plus en plus ponctuelle avec son éloignement.

La figure 91 nous permet de conclure que la parabole circulaire a un pouvoir de détection en accord avec le besoin établi et que les courbes de dispersion sont tout à fait satisfaisantes puisque l'on voit que les niveaux de détection suivent une loi en  $1 / d^2$ , (d ; distance d'éloignement).



Figure 91 - Ecarts de détection en fonction de la distance et de l'angle de présence

De même, pour un <u>Syclop rectangulaire</u> dont le capteur thermique a été positionné de manière que l'angle de surveillance soit de 40°, nous obtenons le type de relevé suivant en déplaçant la source chaude ponctuelle soit à 1m/s soit à 0,14m/s.



Figure 92 - Relevé de sensibilité pour un Syclop rectangulaire à une distance de 1,30m



Soit encore, en détaillant pour un passage lent, les variations de niveaux mesurés suivants :

Figure 93 - Ecarts de sensibilité pour un Syclop rectangulaire à une distance de 1,30m

Pour les Syclops rectangulaires nous obtenons toujours le même style de réponse en forme de "V" quelle que soit la distance de surveillance.

A partir de trois relevés pour trois distances différentes et en prenant toutes les mesures indexées sur celle prise à la distance de 1m, nous arrivons aux diagrammes de sensibilité suivants:



Figure 94 - Diagramme de sensibilité d'un Syclop rectangulaire à 1 m



Figure 95 - Diagramme de sensibilité d'un Syclop rectangulaire à 1,30 m



Figure 96 - Diagramme de sensibilité d'un Syclop rectangulaire à 1,50 m

Les diagrammes de sensibilité sont obtenus comme toujours en faisant décrire un demi-cercle à une source chaude située devant le système parabole/capteur. La source ponctuelle utilisée est une pointe métallique ( de puissance 50W ) portée à une température de 300 °C; elle rayonne ainsi dans l'infrarouge lointain et, malgré sa petite taille, elle est facilement détectable. Afin de pouvoir considérer cette source comme ponctuelle, elle était placée à une distance d'au moins 1m du foyer de la parabole.

Sur la figure 92 il est possible de remarquer que les écarts de sensibilité ( $\Delta$  mV) au point 0° sont plus importants pour les passages lents que pour les passages rapides. Au point de vue thermique, cela s'explique par le fait que lors d'un passage rapide le capteur a moins le temps de se refroidir avant une autre remontée en détection que lors d'un passage plus lent.

D'ailleurs, on voit aussi que pour un passage rapide le temps de montée est plus brusque mais qu'il atteint un niveau moins élevé en détection car le fluxmètre a moins de temps pour recevoir toute l'énergie quantifiable et donc reçoit moins de radiations incidentes que pour une intrusion lente.

Nous constatons aussi que la détection est beaucoup plus forte au point 15° qu'au point 20° pour un réglage d'angle d'ouverture de 40°. C'est-à-dire qu'il serait possible de faire déclencher l'alarme du système à 15°, même si l'on surveille sous 20° ou, pourquoi pas, d'ouvrir un peu plus l'angle de surveillance de la parabole pour une détection à assurer sous un angle quelconque.

### 3.5. DESCRIPTION DES INSTALLATIONS EXPERIMENTALES

Pour l'ensemble de nos applications, que ce soit pour le réglage ou pour la mesure, nous avons utilisé divers appareils selon les essais envisagés et les avons classés suivant trois types.

## 3.5.1. Relevé d'un signal fourni par une parabole en mesure directe

Pour lire le signal généré par un système parabolique et l'afficher constamment en temps réel, nous avons utilisé les afficheurs Infinity de chez Newport Electronics. Ce contrôleur permet de suivre l'évolution de la force électromotrice amplifiée et délivrée par le système détecteur.

Cet Infinity est un indicateur compact. Six digits permettent un affichage précis. L'appareil est muni d'une sortie standard (par exemple 4-20 mA ou 0-14 Volts) qui peut être entièrement mise à l'échelle et peut remplir deux fonctions: le contrôle proportionnel ou l'affichage pour lecture immédiate. Cette sortie peut être mise en configuration soit de contrôle proportionnel, soit de lecture d'affichage. Des sorties doubles relais sont également prévues pour servir de systèmes d'alarme et de commande de process délicats. Les spécifications du Newport sont présentées en annexe 6.



Figure 97 - Vue face avant de l'Infinity Newport

Nous avons toujours utilisé pour nos applications ce Newport comme simple afficheur permettant de suivre une évolution de signal.

Chaque indicateur Newport doit être programmé, avant toute utilisation, avec des menus et des sous-menus internes en fonction du type de signal appliqué en entrée et que l'on désire lire, en fonction du nombre de décimaux souhaités pour l'affichage, en fonction de la vitesse d'affichage ou d'acquisition.

Pour la lecture des tensions délivrées par tout système parabolique, nous avons adopté pour chaque indicateur de process Newport la configuration suivante:

| L1C1=0   | L2C1=0      | L3C1=0  | L4C1=0  | IN.CNF  | IN.CNF.OF | DEC.PT=   | FFFFF.F |
|----------|-------------|---------|---------|---------|-----------|-----------|---------|
| L1C2=0   | L2C2= 0     | L3C2=0  | L4C2=0  | INP1= 1 | INPUT1=#  | CNT.BY=   | 1       |
| L1C3=0   | L2C3=0      | L3C3=0  | L4C3=0  | INP2= 1 | READ1=#   | FIL.CNF   | FIL1=0  |
| L1C4= 0  | L2C4= 0     | L3C4= 0 | L4C4= 0 | INP3= 1 | INPUT2=#  |           | FIL2=1  |
| L1C5= 0  | L2C5= 0     | L3C5=0  | L4C5=0  | INP4= 0 | READ2=#   | ]         | FIL3=0  |
| L1C6=0   | L2C6=0      | L3C6= 0 |         | INP5=0  |           | FIL TI=64 |         |
| L1C7= 1  | L2C7= 0     | L3C7=0  |         | INP6= 0 |           |           |         |
| L1C8 = 1 | $L_{2C8=0}$ | L3C8=0  |         | INP7=0  | 1         |           |         |

| VOLTS:    | RDG.CNF                 | DG.SC=0.01 | (RDG1=0) | RD.SC.OF                 | (RDG=1) |
|-----------|-------------------------|------------|----------|--------------------------|---------|
| +/- 50 mV | RDG1=1                  | RDG.OF=0   |          | INPUT1=                  | #       |
|           | RDG2=0                  |            |          | READ1=                   | #       |
|           | RDG3=0                  |            |          | INPUT2=                  | #       |
|           | RDG4=1                  |            |          | READ2=                   | #       |
|           | RDG5=0                  |            |          |                          |         |
|           | RDG6=0                  |            |          |                          |         |
|           | *********************** |            |          | ************************ |         |

# 3.5.1.1 Etalonnage et linéarité des Newports Infinity

L'objectif de la manipulation est de voir si les Newports Infinity indiquent bien les valeurs qui leurs sont appliquées en entrée. En effet le Newport étant utilisé pour vérifier et visualiser la microtension en sortie des capteurs de flux radiatif, il s'agit de savoir si le Newport a une réponse linéaire, s'il est bien étalonné et de corriger son offset si nécessaire.

Description de la mesure :

Après avoir connecté le capteur à l'Infinity n°1 et mis celui-ci à une échelle précise permettant l'affichage en unités physiques (le microvolt précisèment dans notre cas), nous nous sommes aperçus que le Newport avait un offset de 4  $\mu$ volts, offset corrigé en faisant RDG.1 = 0 et RDG OF = - 00004 avec CNT.BY à 1.

Pour vérifier la linéarité de l'Infinity nous avons injecté une tension en entrée, vérifiée à l'aide du Hameg G8142, et contrôlé les valeurs affichées. Nous avons alors obtenu le tableau suivant :

|            |              | l I   |       |
|------------|--------------|-------|-------|
| Input (µV) | Newport1(µV) | 1     |       |
| -299       | -296,7       |       |       |
| -288,7     | -286,7       | 8.8   | 8,8   |
| -278,9     | -276,9       | 18,8  | 18,7  |
| -268,8     | -266,9       | 28,4  | 28,4  |
| -258,9     | -257,1       | 38,5  | 38,3  |
| -248,9     | -247,1       | 48,3  | 48    |
| -238,8     | -237,4       | 58,3  | 58    |
| -228,4     | -226,7       | 68,2  | 67,8  |
| -218,6     | -217         | 78,9  | 78,5  |
| -208,2     | -206,9       | 88,6  | 88,1  |
| -198,9     | -197,2       | 98,6  | 98    |
| -188,8     | -187,2       | 108,5 | 107,8 |
| -178,9     | -177,5       | 118,5 | 117,8 |
| -168,8     | -167,6       | 128,4 | 127,5 |
| -158,9     | -158         | 138,1 | 137,6 |
| -149       | -147,6       | 148,4 | 147,5 |
| -139       | -137,7       | 158,9 | 157,9 |
| -128,6     | -127,6       | 168,6 | 167,5 |
| -118,8     | -117,9       | 178,6 | 177,4 |
| -108,8     | -107,9       | 188,1 | 187,2 |
| -98,9      | -98,1        | 198,4 | 197,1 |
| -88,8      | -88,1        | 208,2 | 206,8 |
| -79,1      | -78,5        | 218,3 | 216,8 |
| -68,4      | -67,9        | 228,2 | 226,7 |
| -58,5      | -58,1        | 238,9 | 237,3 |
| -48,5      | -48,1        | 248,7 | 247   |
| -39,1      | -38,4        | 258,8 | 257   |
| -28,8      | -28,5        | 268,6 | 266,8 |
| -18,9      | -18,7        | 278,7 | 276,8 |
| -9,3       | -8,9         | 288,6 | 286,7 |
| -0,8       | -0,7         | 298,8 | 296,7 |

Tableau 13 - Relevés de mesures pour l'indicateur de process Newport n°1

On constate avec la figure 98 que la linéarité de l'afficheur est satisfaisante dans la plage des tensions d'entrée considérées utiles.





## 3.5.1.2. Influence de la longueur du câble

Après avoir vérifié l'offset de l'indicateur et regardé sa linéarité grâce au branchement capteur-Newport, nous nous sommes intéressés à l'influence sur le signal en sortie de la longueur des câbles utilisés pour transmettre le signal électrique entre les paraboles et les modules électroniques.

De ce fait nous avons réalisé le petit montage suivant afin de voir les influences et les écarts d'affichage susceptibles d'intervenir. Montage réalisé pour les figures 97 et 98.





| Sans câble |               | Avec câble de 15 m |               |  |
|------------|---------------|--------------------|---------------|--|
| Input( µV) | Newport1( µV) | Input(mV)          | Newport1( mV) |  |
| -299       | -296,7        | -298,8             | -296,8        |  |
| -288,7     | -286,7        | -288,6             | -286,7        |  |
| -278,9     | -276,9        | <b>-278</b> ,7     | -276,9        |  |
| -268,8     | -266,9        | -268,7             | -266,9        |  |
| -258,9     | -257,1        | -258,8             | -257          |  |
| -248,9     | -247,1        | -248,7             | -247,1        |  |
| -238,8     | -237,4        | -239               | -237,4        |  |
| -228,4     | -226,7        | -228,2             | -226,7        |  |
| -218,6     | -217          | -218,3             | -216,9        |  |
| -208,2     | -206,9        | -208,2             | -206,9        |  |
| -198,9     | -197,2        | -198,5             | -197,2        |  |
| -188,8     | -187,2        | -188,4             | -187,2        |  |
| -178,9     | -177,5        | -178,6             | -177,4        |  |
| -168,8     | -167,6        | -168,6             | -167,5        |  |
| -158,9     | -158          | -158,9             | -157,8        |  |
| -149       | -147,6        | -148,5             | -147,5        |  |
| -139       | -137,7        | -138,5             | -137,6        |  |
| -128,6     | -127,6        | -128,4             | -127,6        |  |
| -118,8     | -117,9        | -118,6             | -117,8        |  |
| -108,8     | -107,9        | -108,5             | -107,8        |  |
| -98,9      | -98,1         | -98,7              | -98,1         |  |
| -88,8      | -88,1         | -88,6              | -88,1         |  |
| -79,1      | -78,5         | -78,9              | -78,4         |  |
| -68,4      | -67,9         | -08,2              | -67,8         |  |
| -58,5      | -58,1         | -58,4              | -58           |  |
| -48,5      | -48,1         | -48,3              | -48           |  |
| -39,1      | -38,4         | -38,0              | -38,4         |  |
| -28,8      | -28,5         | -28,0              | -28,4         |  |
| -18,9      | -18,7         | -18,6              | -18,7         |  |
| -9,3       | -8,9          | -6,6               | -8,8          |  |
| -0,0       | -0,7          | 0,0                | 80            |  |
| 19.9       | 18.7          | 10                 | 18.8          |  |
| 28.4       | 28.4          | 28.8               | 28.5          |  |
| 20,4       | 20,4          | 38.8               | 20,5          |  |
| 48.3       | 48            | 48.8               | 48.2          |  |
| 58.3       | 58            | 58.6               | 58.1          |  |
| 68.2       | 67.8          | 68.5               | 68            |  |
| 78.9       | 78.5          | 79.2               | 78.5          |  |
| 88.6       | 88.1          | 88.9               | 88.2          |  |
| 98,6       | . 98          | 98,9               | 98,1          |  |
| 108,5      | 107,8         | 108,8              | 107,9         |  |
| 118,5      | 117,8         | 118,8              | 117,9         |  |
| 128,4      | 127,5         | 128,6              | 127,7         |  |
| 138,1      | 137,6         | 138,8              | 137,7         |  |
| 148,4      | 147,5         | 148,7              | 147,6         |  |
| 158,9      | 157,9         | 159,1              | 157,9         |  |
| 168,6      | 167,5         | 168,8              | 167,6         |  |
| 178,6      | 177,4         | 178,8              | 177,5         |  |
| 188,1      | 187,2         | 188,6              | 187,3         |  |
| 198,4      | 197,1         | 198,6              | 197,2         |  |
| 208,2      | 206,8         | 208,5              | 206,9         |  |
| 218,3      | 216,8         | 218,5              | 216,9         |  |
| 228,2      | 226,7         | 228,5              | 226,8         |  |
| 238,9      | 237,3         | 239,1              | 237,4         |  |
| 248,7      | 247           | 248,9              | 247,1         |  |
| 258,8      | 257           | 259                | 257,1         |  |
| 268,6      | 266,8         | 268,9              | 266,9         |  |
| 278,7      | 276,8         | 279                | 277           |  |
| 288,6      | 286,7         | 288,8              | 286,7         |  |
| 1 206.8    | 1 706 7       | 1 700              | 206.8         |  |

| Avec an      | plificateur et cab | le de 15 m     |
|--------------|--------------------|----------------|
| U entrée(µV) | U sortie(mV)       | U Newport1(mV) |
| -375         | -508               | 502.9          |
| -367         | -583               | -578 1         |
| 257          | -565               | 5641           |
|              | -308               | -304,1         |
| -349         | -333               | -549,8         |
| -339         | -558               | -534,2         |
| -329         | -524               | -519,6         |
| -321         | -511               | -506,1         |
| -311         | -496               | -492,1         |
| -303         | -481               | -478,1         |
| -293         | -466               | -462,4         |
| -284         | -452               | -447.9         |
| -275         | -439               | -434.9         |
| -266         | -423               | -420           |
| -257         | -408               | 405.1          |
| 249          | -400               | -403,1         |
| -248         | -393               | -390,8         |
| -239         | -380               | -377,1         |
| -229         | -365               | -361,6         |
| -220         | -351               | -347,8         |
| -211         | -337               | -333,1         |
| -201         | -320               | -319,1         |
| -191         | -308               | -303.2         |
| -182         | 291                | -288.7         |
| -173         | -277               | -274.4         |
| -164         | -262               | -260.2         |
| -104         | -202               | -200,2         |
| -134         | -448               | -240,0         |
| -145         | -233               | -231,5         |
| -136         | -219               | 217,4          |
| -128         | -205               | -202,6         |
| -117         | -189               | -187,1         |
| -108         | -175               | -173,3         |
| -99          | -160               | -158,4         |
| -90          | -145               | -144.1         |
| -80          | -132               | -129.7         |
| -00          | -152               | -125,7         |
| -/1          | -11/               | -110,9         |
| -01          | -102               | -101           |
| -52          | -89                | -88            |
| -42          | -73                | -72            |
| -33          | -58                | -57,3          |
| -24          | -44                | -43,2          |
| -16          | -29                | -28,6          |
| -11          | -14                | -13.6          |
| -2           | -1                 | 0.6            |
| 6            | 15                 | 14.6           |
| 16           | 20                 | 14,0           |
| 10           | 29                 | 28,5           |
| 24           | 44                 | 43,1           |
| 33           | 58                 | 57,4           |
| 42           | 73                 | 72,5           |
| 52           | 89                 |                |
| 61           | 102                | 100,8          |
| 71           | 117                | 115,8          |
| 80           | 132                | 129,6          |
| 90           | 145                | 144.2          |
| 99           | 160                | 158.6          |
| 108          | 175                | 173.5          |
| 117          | 100                | 107 2          |
| 100          | 189                | 187,5          |
| 128          | 205                | 202,7          |
| 136          | 219                | 217,5          |
| 145          | 233                | 231,6          |
| 154          | 248                | 245,5          |
| 164          | 262                | 260,4          |
| 173          | 277                | 274,5          |
| 182          | 291                | 288.8          |
| 191          | 308                | 303.2          |
| 201          | 320                | 310.2          |
| 201          | 320                | 2,212          |
| 211          |                    | 233            |
| 220          | 351                | 347,9          |
| 229          | 365                | 361,7          |
| 239          | 380                | 377,3          |
| 248          | 395                | 391            |
| 257          | 408                | 405            |
| 266          | 423                | 419.8          |
| 275          | 430                | 435            |
| 284          | 457                | 435            |
| 204          |                    | 440            |
| 293          | 400                | 402,3          |
| 303          | 481                | 478            |
| 311          | 496                | 492            |
| 321          | 510                | 505,5          |
| 329          | 524                | 519,5          |
| 339          | 538                | 53-4           |
| 349          | 555                | 549.6          |
| 357          | 548                | 562 5          |
| 267          | 500                | 505,5          |
| 1 30/        | 283                | 577,5          |

Tableau 14 - Relevés de mesures pour l'indicateur de process



Figure 100 - Linéarité de l'indicateur de process avec câble et sans amplificateur



Figure 101 - Linéarité de l'indicateur de process avec câble de 15m et avec souplificateur



Figure 102 - Ecart d'affichage dû à l'indicateur de process avec câble de 15m et avec amplificateur.

#### Conclusions :

D'après la figure 100, on voit que la longueur du câble n'influe pas la linéarité de la lecture. Une longueur de quinze mètres a été fixée car elle représente une longueur moyenne pour les installations sur les sites de montage ainsi que pour notre application dans le laboratoire de simulation LaSCo d'Ispra.

D'ailleurs, la figure 101 confirme que la longueur du câble n'influence en rien la lecture, au moins pour une faible longueur. On constate que les linéarités des tensions en sortie d'amplification et de l'affichage se suivent.

La figure 102 montre l'évolution des écarts de lecture entre la tension en sortie d'amplificateur et la tension affichée par l'indicateur de process Newport. Ces tensions, présentées dans le tableau 14, ont été relevées à la sortie d'un amplificateur de gain proche de mille six cents et sur un afficheur Infinity connecté en série à l'aide d'un câble de quinze mètres de long.

On a constaté que l'écart d'affichage présenté par le Newport suit la même linéarité que celle de la figure 98. Plus le signal d'entrée est grand, plus l'écart d'affichage augmente. Sachant que pour notre expérience nous avons utilisé une alimentation de haute précision stabilisée à  $+/- 2\mu V$  après un pont diviseur à 1 % près, que l'amplificateur opérationnel a un bruit d'entrée de  $1\mu V$ , il est possible d'avoir déjà au moins 3 millivolts d'erreur de lecture pour un gain 1000. Ces erreurs cumulées à celle de l'afficheur n'atteignent pas plus de 5 millivolts après amplification, ce qui nous limite à une erreur de lecture inférieure à 1%, pourcentage d'erreur tolérable et n'intervenant pas sur le calcul de la détection d'intrusion, celui-ci s'établissant sur une variation instantanée et beaucoup plus importante.

## 3.5.2. Lecture et enregistrement de plusieurs signaux

Dans le laboratoire LaSCo, cinq ensembles de détection de rayonnement thermique ont été installés dans le local ASA simulant un entrepôt de stockage de Plutonium (voir fig.55). Chaque ensemble a un champ de détection bien défini qui correspond à une zone de surveillance spécifique. Le champ de détection est adapté à la zone de surveillance requise en jouant sur l'un ou plusieurs des paramètres suivants : la forme du réflecteur, la taille de ce dernier, la distance entre l'ensemble de détection et la base de la zone de surveillance, l'orientation du réflecteur dans la zone de surveillance, et la position de la surface sensible du détecteur relativement à son réflecteur.

Le signal de sortie de chaque ensemble de détection après amplification est transmis et recueilli sur des voies respectives de la chaîne d'acquisition de données Vishay-Micromesure.



Figure 103 - L'acquisition multivoies

Le système d'acquisition de données 4000 de chez Vishay Micromesure a été utilisé car, construit à partir de modules de base et piloté par un calculateur, il est capable d'évoluer sans modification vers l'équipement d'une plate-forme d'essais.

Comme nous pouvons le voir sur la figure 104, notre unité de commande a été composée:

- d'un contrôleur 4220 assurant l'interface entre l'unité de commande (le calculateur) et les modules de conditionnement ainsi que la conversion analogique/digitale des données acquises (14 bits plus le signe).

- de six modules "thermocouples" 4290 ayant chacun la capacité de 20 voies et assurant le conditionnement et la linéarisation jusqu'à 20 thermocouples standards type K pour nos applications (avec une résolution de +/- 0,03 deg/deg ).

- d'un module "universel" 4280 ayant la capacité de dix voies pour recevoir chacune des tensions allant du mV à  $\pm/-15V$  (avec une résolution de  $\pm/-0.4$  %)



Figure 104 - Unité d'acquisition mobile Système 4000

Notre système d'acquisition 4000, piloté par le logiciel 610, se montre à la fois mobile, rapide et facile à mettre en œuvre puisque les raccordements pour les thermocouples ou pour les paraboles s'effectuent simplement à partir de borniers à vis situés à l'arrière de chaque module.

Les principales caractéristiques du système 4000 :

- logiciels complets de programmation
- définition de tout type de capteurs
- extension du système jusqu'à 750 voies
- sélection de la tension d'excitation
- correction de sensibilité
- linéarisation automatique des thermocouples
- traitement sur écran graphique, sur traceur, sur tableur et copie sur disquette ou sur imprimante à l'aide du programme utilisateur
- acquisition sur une ou plusieurs voies
- acquisition manuelle ou automatique
- numérique de 1 à 120 voies en temps réel
- déclenchement à partir de seuils définis ou de paliers
- sous formes graphiques linéaires (12 voies) ou barregraphes (44 voies) en temps réel

'D

• en surveillance selon des seuils définis

### **3.6. REPONSE AVEC UN, DEUX...PLUSIEURS CAPTEURS**

#### 3.6.1. Positionnement des capteurs

Chaque système parabolique rectangulaire possède une surface non négligeable sur laquelle est placé le détecteur fluxmétrique. Cette surface - support des capteurs - joue le rôle de puits thermique comme nous l'avons déjà explicité précédemment.

Etant donné que nous avons la possibilité d'installer nos capteurs 10x10 comme nous le souhaitons sur cette surface correspondant à une plaque rectangulaire de 10mm sur 100mm, nous avons envisagé trois cas de positionnement de capteurs afin de voir s'il est possible d'améliorer la détection et de diminuer le bruit du système (voir figure 81).

Les trois cas envisagés sont les suivants :



Figure 105 - Associations possibles de capteurs sur le support

La première association (a) effectuée est celle de deux capteurs connectés en opposition et positionnés l'un sur le côté du support métallique faisant face au réflecteur parabolique et l'autre sur le côté recevant directement le rayonnement incident.

A l'aide de la chaîne d'acquisition de données Vishay et en gardant l'équilibre thermique dans l'environnement de la parabole rectangulaire utilisée pour cette manipulation, nous avons obtenu le relevé suivant :







Figure 107 - Equilibre thermique d'une parabole rectangulaire équipée de deux capteurs montés en série et sur la même face



Figure 108 - Equilibre thermique d'une parabole rectangulaire équipée de deux capteurs montés en opposition et sur la même face.

Les figures 107 et 108 sont les relevés pour l'association (b) de deux capteurs en série sur la même face du support et pour l'association (c) de deux capteurs montés en opposition sur la même face du support. On constate que le bruit des signaux est du même ordre de grandeur, entre 2 et 5 mV. Comme nous l'avions déjà vu dans le paragraphe 2.7.3, ce bruit correspond au bruit naturel 2 à  $3\mu V$  de l'amplificateur 2654 ayant subi un gain de 1000.

L'association (a) montre que le signal est moins stable à cause du positionnement d'un capteur sur la face du support regardant directement le rayonnement incident, c'est-àdire que ce capteur est sensible aux rayonnements autres que ceux considérés uniquement par l'angle de regard de la parabole. Cette association (a) est donc à éliminer.

# 3.6.2. Relevés de détection selon le positionnement des capteurs

Afin de voir quelle association détecte le mieux parmi les trois envisagées (a), (b) et (c), nous avons équipé trois paraboles rectangulaires sous ces trois configurations. Les systèmes paraboliques ont été réglés angulairement et orientés pour surveiller une même surface. Puis différentes intrusions ont été déclenchées par la présence d'une source chaude telle qu'une personne et ont été enregistrées avec la chaîne d'acquisition.

Ceci nous a permis d'obtenir les différents relevés suivants:



Figure 109 - Détection en fonction du positionnement des capteurs sur le support

a) deux capteurs en opposition placés sur deux faces différentes du support de la parabole rectangulaire

b) deux capteurs connectés en série

c) deux capteurs en opposition et placés sur la même face du support côté réflecteur

Nous constatons sur le relevé (c) que l'association de deux capteurs en opposition et placés sur la même face du support ne permet pas de détecter une intrusion du fait que les forces électromotrices générées par les deux capteurs lors d'une intrusion s'annulent entre elles. Il y a quand même un bruit dû à l'amplificateur. Cette association est donc à éliminer pour faire de la détection.

L'association (a) de deux capteurs en opposition placés sur deux faces différentes du support de la parabole rectangulaire, l'un du côté du rayonnement incident et l'autre du côté réflecteur, n'offre pas d'amélioration par rapport à l'association (b) de deux capteurs connectés en série sur la même face du support côté réflecteur.

En effet le bruit est le même dans les deux cas et on constate qu'il y a moins de détection avec l'association (a) qu'avec l'association (b): ce qui est normal puisqu'elle s'effectue avec un seul capteur placé côté réflexion. L'autre capteur monté en face directe, si l'on peut dire, ne détecte rien au-delà d'une distance d'intrusion supérieure au mètre. Par contre, même s'il n'occupe pas la place d'un autre capteur sur la face du support côté réflecteur, il fait augmenter le coût du système sans améliorer la détection. Cette association (a) est donc aussi à éliminer comme nous l'avions déjà signalé, puisqu'elle offrait un signal instable.

Pour nos systèmes de détection nous resterons donc à l'association en série de plusieurs capteurs placés sur un support et montés du même côté, celui faisant face au réflecteur.

## 3.6.3. Détections relevées en fonction du nombre de capteurs installés

Connaissant le positionnement des éléments sensibles pour chaque détecteur parabolique, nous avons relevé une série de détections avec des paraboles rectangulaires équipées d'un nombre différent de capteurs radiatifs.

L'enregistrement suivant, effectué avec la chaîne Vishay, a été réalisé afin de voir si une parabole rectangulaire équipée avec un, deux ou trois capteurs est capable de détecter une intrusion effectuée de différentes manières.



Figure 110 - Essais de détection d'intrusions

La figure 110 nous confirme bien que deux capteurs reliés en opposition ne permettent pas de détecter une intrusion, et ceci quelle que soit la distance.

Nous constatons que le niveau de détection dépend, bien sûr, de la distance d'intrusion mais aussi du nombre de capteurs installés ainsi que de la vitesse de déplacement de l'intrus. En effet, on peut remarquer qu'à 4m les pics de détection sont plus élevés lorsque la vitesse d'intrusion est plus lente: ceci s'explique par le rayonnement radiatif ou le déséquilibre thermique plus important provoqué par la présence plus longue de l'intrus dans la zone surveillée.

Puis nous avons fait les enregistrements de détection présentés sur la figure 111 afin de nous assurer que le niveau de détection est proportionnel au nombre de capteurs employés pour la surveillance. Nous avons donc utilisé et réglé de façon identique paraboles rectangulaires montées avec un, deux, trois et quatre capteurs radiatifs.



Variation d'amplitude du signal délivré en mV

Figure 111 - Niveau de détection

Après nous être assuré que le niveau de détection est bien proportionnel au nombre de capteurs radiatifs montés dans une parabole rectangulaire, chose qui n'était pas forcement à prévoir du fait que le support rectangulaire 10 mm par 100 mm est très important en surface et que tout capteur sur ce support n'est pas obligatoirement ébloui lors d'une intrusion, nous avons effectué des enregistrements dans les mêmes configurations de manipulation que pour les relevés de la figure 111 mais sur une durée plus importante.



Figure 112 - Niveau de détection sur une longue durée

On voit sur la figure 112 que le niveau de détection reste bien proportionnel au nombre de capteurs radiatifs utilisés pour la surveillance lorsqu'on provoque plusieurs intrusions (avec une vitesse de l'ordre de 2m/s) sur une longue durée. Nous pouvons faire remarquer que la variation lente du signal observée plus particulièrement avec les paraboles équipées de trois et quatre capteurs est causée par l'élévation lente en température d'une fenêtre ensoleillée faisant partie de la zone surveillée.

La même manipulation que les deux précédentes a été réalisée mais cette fois-ci à des distances plus courtes et avec des enregistrements plus rapides afin de caractériser la fluctuation du signal de sortie des paraboles par rapport au niveau de détection. Nous avons obtenu les relevés suivants :



Figure 113 - Niveau de détection en fonction du nombre de capteurs et de la distance

En rassemblant les écarts de détection du aux fluctuations du signal de sortie des paraboles lors d'intrusions, nous obtenons les résultats présentés dans le tableau 15.

| Distance          | Ecart de détection | Ecart de détection | Ecart de détection | Ecart de détection |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| (parabole/intrus) | (avec 1 capteur)   | (avec 2 capteurs)  | (avec 3 capteurs)  | (avec 4 capteurs)  |
| 3 m               | 5 mV               | 8 mV               | 16 mV              | 18 mV              |
| 2 m               | 7 mV               | 10 mV              | 17 mV              | 20 mV              |
| 1 m               | 6 mV               | 7 mV               | 8 mV               | 10 mV              |

Tableau 15 - Ecart de détection lors d'intrusions humaines



Figure 114 - Fluctuation du signal en fonction du niveau de détection

Il est observé que les écarts de détection entre une parabole équipée avec un seul capteur et une parabole montée avec deux , trois ou quatre capteurs sont plus faibles à très courte distance (1m). Ceci s'explique en partie par le peu de place existant entre la surface (ou l'objet surveillé) et la parabole, ce qui ne permet pas à un corps humain, par exemple, de venir se placer facilement entre l'objet et la parabole, et donc de rentrer dans l'angle d'ouverture de celle-ci sans perturber l'état même des capteurs.

De plus, comme nous l'avons déjà explicité dans le paragraphe 3.4, le fait de s'introduire à une certaine distance de la parabole et de se placer angulairement dans le volume sous contrôle à un endroit ou un autre fournit un écart de détection différent. En effet, l'écart de détection est encore proportionnel à la répartition surfacique du flux de l'intrus se déplaçant dans le diagramme de dispersion de la parabole.

De par sa taille, son rayonnement et sa température, le corps humain provoque à très faible distance une élévation de la température du capteur lui-même. Le bilan thermique effectué par le capteur radiatif change et l'on peut dire qu'il s'amoindrit à faible distance par le fait que la température du capteur augmente et se rapproche de celle de la surface contrôlée ou bien encore de celle de l'intrus.

Avec le type de réflecteur rectangulaire, l'usage d'un grand nombre de capteurs n'est pas nécessaire pour faire de la surveillance à très faible distance (1 m), mais de toute façon, l'intérêt de la parabole rectangulaire est de couvrir une grande zone de regard associée à une détection lointaine (plusieurs mètres).

De ce fait, nous installerons le maximum de capteurs sur le support utilisé pour la parabole rectangulaire, c'est-à-dire six fluxmètres afin de garantir la meilleure détection possible à grande distance.

### **3.7. STABILITE EN TEMPERATURE**

Une fois la parabole équipée de son élément sensible, c'est-à-dire d'un fluxmètre pour les paraboles circulaires et de six fluxmètres pour les paraboles rectangulaires, nous nous sommes intéressés à la stabilité en température de notre système de surveillance.

Le système de surveillance Syclop fonde ses détections sur toute modification de l'équilibre thermique dans la zone surveillée à l'aide d'un capteur de rayonnement thermique radiatif, aussi nous a-t-il contraint à vérifier s'il était stable en température en fonction des perturbations thermiques de l'environnement.

En effet, sur un site de stockage réel ou semblable à celui simulé au laboratoire LaSCo, il est possible de rencontrer divers facteurs dans l'environnement de la surveillance amenant des perturbations thermiques et pouvant remettre en cause le principe de détection utilisé.

C'est pourquoi, afin d'étudier la stabilité en température d'une parabole et de voir s'il y a une possible corrélation entre les niveaux de détection lors d'intrusions et le signal délivré en constante évolution, nous avons effectué à l'aide de la chaîne d'acquisition Vishay et de plusieurs paraboles installées dans LaSCo des manipulations simulant différents cas de configuration susceptibles d'être rencontrés sur des installations et pouvant perturber la surveillance.

La première manipulation réalisée est l'enregistrement de surveillance avec et sans éclairage. Le laboratoire est éclairé par des tubes à néon classiques dont l'allumage et l'utilisation peuvent perturber notre système. Nous avons obtenu les relevés suivants:



Figure 115 - Relevés de détection avec et sans éclairage

Nous constatons que lors de la mise en route de l'éclairage le signal délivré par une parabole subit un pic de détection beaucoup plus important que ceux obtenus par de réelles intrusions. Nous avons remarqué que ce problème est rencontré principalement pour des paraboles installées près de sources d'éclairage ou plutôt orientées en direction de ces sources. Nous avons réussi à éliminer ce problème en déplaçant et en réorientant nos détecteurs.

Sur les relevés de la figure 115 nous observons que lorsque l'éclairage est enclenché, le signal fourni par la parabole évolue rapidement dès que l'ampoule chauffe. En effet, l'équilibre thermique change alors et se décale dans notre cas positivement. On remarque que cet équilibre thermique, représenté par l'évolution du signal délivré par le détecteur, est moins stable avec l'éclairage. Ceci est tout à fait normal, vu les variations thermiques engendrées par cette source de rayonnement thermique. Notre rapport signal sur bruit (NEP) est alors affaibli, cette agitation thermique représentant un bruit environnant, mais reste suffisamment important pour assurer la détection d'intrusion par des alarmes, comme nous l'expliquons dans le paragraphe 3.11. La deuxième manipulation a été réalisée afin de voir si la climatisation perturbe la surveillance. Il faut dire que dans notre laboratoire d'essais la climatisation est imposante du fait de la grande dimension des canalisations (50cm de large) ainsi que des grandes bouches d'aération où est pulsé de l'air chaud ou froid selon les saisons. Les résultats obtenus pour deux paraboles sont représentés sur la figure116.



Figure 116 - Relevés avec et sans climatisation

On voit très bien le cycle de la climatisation qui est de l'ordre de vingt minutes. Dix minutes en mode soufflerie et dix autres minutes en mode repos représentent la durée du cycle.

Le relevé a été fait pour deux paraboles: une éloignée de cinq mètres de la bouche d'aération et représentée par la courbe en rouge, et l'autre très voisine de cette bouche et représentée par la courbe en noir. Nous constatons que malgré des positionnements et des orientations différentes, les deux paraboles délivrent un signal évoluant avec le cycle de la climatisation. Lorsque la climatisation est arrêtée, les signaux délivrés par les paraboles n'évoluent plus suivant le cycle de ventilation.

Nous pouvons faire remarquer aussi que l'évolution descendante des signaux est due à la diminution générale de l'ensoleillement provoquée par la tombée de la nuit refroidissant murs et fenêtres du laboratoire.

Certaines évolutions du relevé en noir semblent parfois importantes et peuvent faire craindre de fausses détections. Or nos acquisitions se font toutes les trente secondes, durée relativement grande. Cela explique les écarts parfois importants entre deux acquisitions de niveau d'équilibre thermique relevées successivement. Cette vitesse d'acquisition n'est pas représentative pour le suivi des détections d'intrusion, celles-ci s'effectuant à des vitesses beaucoup plus élevées et ne permettant pas l'enregistrement de la totalité des acquisitions sur une longue durée.

Cet enregistrement montre qu'il y a une corrélation entre le cycle de la climatisation et l'évolution du signal délivré par le détecteur parabolique. Cette remarque confirme bien que notre détecteur radiatif suit l'évolution d'un équilibre thermique entre le capteur et la surface surveillée par le système parabolique. La période du cycle de la climatisation est grande et ne perturbe pas la surveillance, en général, dans le cas où la parabole n'est pas installée trop près d'une bouche d'aération: remarque à ne pas négliger lors d'installations à effectuer.

Nous pouvons voir sur la figure 117 qu'une intrusion se détache des bruits thermiques de l'environnement assimilable à la climatisation, par exemple, et reste détectable à condition d'être prudent lors des installations et des réglages de chaque parabole.



Figure 117 - Relevé de détection sous climatisation
## **3.8. STABILITE DANS LE TEMPS**

Après nous être assuré de la stabilité en température de notre système de détection nous avons vérifié sa stabilité dans le temps à l'aide de plusieurs relevés effectués par la même chaîne d'acquisitions Vishay que précédemment, mais avec des vitesses d'acquisition plus lentes nous permettant d'enregistrer et de visualiser de longues durées de surveillance.

Le fait d'enregistrer des acquisitions sous des vitesses considérées très lentes, c'està-dire, par exemple, toutes les trente ou soixante secondes, nous amène à considérer les courbes suivantes comme des courbes représentant une évolution générale d'équilibre thermique dans le temps. L'important est de voir l'évolution globale de cet équilibre sur plusieurs heures et de vérifier si n'apparaissent pas des pics très importants pouvant être assimilés à des intrusions ou des déséquilibres remarquables dus à des perturbations externes.

Etant limité à 4000 acquisitions par enregistrement sur disquette, nous avons réglé une vitesse d'acquisition pour la chaîne Vishay afin d'avoir la totalité d'une surveillance par disquette, cela facilitant la conversion des fichiers d'un mode d'acquisition à un mode de lecture et de visualisation. En établissant 4000 acquisitions pour 24 heures, soit 86400 secondes, nous sommes amenés à enregistrer toutes les 21,6 secondes. Ce fractionnement étant très délicat pour l'horloge interne de la chaîne d'acquisitions ainsi que pour notre repérage horaire personnel, nous nous sommes fixé un pas d'acquisition de 21 secondes. De ce fait, l'enregistrement sur 4000 acquisitions correspond à 84000 secondes, ou encore 23h33. 1h10 équivaut alors à 200 acquisitions ou 4200 secondes.



## Figure 118 - Enregistrements de nuit pour deux paraboles

Les figures 118 et 119 représentent un enregistrement de surveillance effectué par deux paraboles installées dans le laboratoire LaSCo sur une durée approchant les vingtquatre heures.

La grande quantité de valeurs acquises toutes 21 secondes pendant la totalité de l'enregistrement nous oblige à couper celui-ci en deux afin de pouvoir travailler et présenter visuellement l'ensemble des acquisitions. Nous constatons que les courbes obtenues suivent bien l'évolution de la nuit et du jour en fonction de l'évolution de la température moyenne des surfaces contrôlées.



Figure 119 - Enregistrement de jour pour deux paraboles

Les deux paraboles sont installées de manière à surveiller chacune un couloir de 2m de large sur 5m de long. Naturellement, une surface surveillée par une parabole et pour un couloir est différente de l'autre. La température moyenne de la surface surveillée se caractérise en fonction des objets et surfaces lui appartenant. C'est ainsi que la surveillance d'une surface par une parabole aura son propre équilibre thermique défini en fonction des températures des surfaces. Cet équilibre thermique lié à un bilan thermique au niveau du capteur radiatif évolue en fonction de tout changement de température pouvant être causé par une climatisation, un ensoleillement...

Sur les figures 118 et 119 nous remarquons facilement en fin d'après-midi d'automne la tombée de la nuit causant un refroidissement au niveau des fenêtres et du sol et provoquant une diminution importante de l'équilibre thermique relevé. Au lever du jour on constate un réchauffement malgré le peu d'ensoleillement de la saison et de la journée. Il est constaté que les deux paraboles délivrent un signal différent mais évoluent dans le même sens en fonction de la climatisation du local, de l'ensoleillement sur les fenêtres et murs, ainsi que des perturbations provoquées par le personnel circulant par la porte d'entrée du laboratoire.

Ce premier relevé présenté est l'un des nombreux enregistrements effectués sur une longue durée par différentes paraboles réglées et orientées différemment dans le laboratoire d'essais. Nous avons remarqué qu'il est très difficile d'obtenir deux relevés identiques pour une même parabole car l'équilibre thermique d'un système de surveillance s'établit avec de nombreux paramètres pouvant varier d'un jour à l'autre en fonction des conditions climatiques, d'une simple lumière allumée ou pas... et difficiles ou quasi impossibles à déterminer.

C'est ainsi, comme nous pouvons le voir sur la figure 120, que des paraboles de surveillance bien réglées, bien orientées et ne détectant pas d'intrusion peuvent présenter sur une longue durée d'acquisition des relevés de signaux différents et évoluant de manières distinctes.



Figure 120 - Enregistrement de surveillance pendant 12 heures par trois paraboles le 22/07/1995

184

# 3.9. RELEVES DE DETECTION DANS DES VOLUMES IMPORTANTS AVEC LE CONCENTRATEUR RECTANGULAIRE

#### 3.9.1. Corps noir de référence

Après avoir caractérisé et fabriqué notre corps noir comme nous l'avons explicité dans le paragraphe 1.2.1, nous l'utilisons ici comme référence à laquelle on compare le rayonnement d'un corps humain.

Afin de garantir au maximum l'équilibre thermique dans la zone des manipulations envisagées, c'est-à-dire d'éliminer de possibles perturbations environnantes, nous avons réalisé lors de journées sans mouvement de personnel des séries d'intrusions humaines et d'intrusions de notre corps noir.

Pour pouvoir faire une comparaison entre une intrusion humaine et une référence, nous avons pris notre corps noir dont les dimensions (80cm x 63cm) assurent une surface de 0,5 m<sup>2</sup> comparable à celle d'un homme, en général. Lors des relevés présentés sur la figure 121, la température ambiante du local était de 20°C et celle relevée sur le thorax d'un humain était de 26°C. Aussi avons-nous établi une température mesurée de corps noir de 26°C équivalant à un flux émis de 40W/m<sup>2</sup> à l'aide de l'alimentation stabilisée en puissance DCR Sorensen-Raytheon Compagny 50VDC-100ADC dont nous avons réglé l'intensité à 3A et la tension à 13,3V. En vue de simuler les intrusions du corps noir dans une zone surveillée avec une parabole rectangulaire dont l'angle d'ouverture a été réglé à 40° pour les relevés suivants, nous avons installé notre tableau noir présenté en figure 8 sur un chariot à roulettes guidé par une tige afin de réaliser les entrées et sorties dans un couloir sous contrôle.



Figure 121 - Intrusions corps noir, corps humain de 1m à 7m de distance entre l'intrusion et la parabole

La figure 121 représente la totalité des détections réalisées à l'aide d'intrusions humaines et d'intrusions du corps noir dans une zone surveillée. Les acquisitions ont été effectuées toutes les 270 millisecondes, et nous pouvons remarquer que les 4000 acquisitions sur une durée de 18 minutes visualisent presque une période du cycle de la climatisation du local. On voit que les instrusions provoquent toujours un déséquilibre thermique bien plus important que le bruit du signal et qu'elles sont aisément détectables.

Pour obtenir les relevés 122 et 123, nous avons effectué à différentes distances des passages de notre corps noir et d'un être humain, et ceci sous divers angles en nous repérant sur un diagramme de dispersion comme dans le paragraphe 3.4.



Figure 122 - Intrusions corps noir, corps humain de 1m à 4m de distance entre l'intrusion et la parabole

CN: corps noir CH: corps humain a: angle de positionnement 20° b: angle de positionnement 15°

c: angle de positionnement 10° d: angle de positionnement 5° e: angle de positionnement 0°



Figure 123 - Intrusions corps noir, corps humain de 5,3m à 7m de distance entre l'intrusion et la parabole

Nous constatons qu'à de très faibles distances telles que 1m et 2m, l'intrusion du corps noir provoque un bien plus grand déséquilibre thermique qu'une intrusion humaine, et ceci quel que soit l'angle de positionnement. Nous expliquons cette remarque par le fait que plus l'intrus a une surface importante et proche de la parabole de surveillance, plus grande est la part qu'il occulte de la surface auparavant surveillée. Le corps noir a une surface plus compacte et sa température est plus homogène et mieux répartie que celle d'un corps humain. Donc, on peut considérer qu'il éblouit davantage le détecteur.

En revanche, avec un éloignement suffisant par rapport au détecteur, deux sources infrarouges de surface et température équivalentes sont assimilées à une source ponctuelle provoquant les mêmes pics de détection, comme nous pouvons le constater sur les relevés. Les relevés d'intrusion établis par le corps noir sont plus larges et légèrement plus importants que ceux dus aux intrusions humaines à cause du déplacement sur roulettes de notre corps noir. De ce fait, le passage est plus lent et le temps de présence plus important permet une détection plus grande de flux radiatif incident par le capteur.

On peut donc conclure que notre système de surveillance détecte bien les vraies intrusions humaines que nous avons provoquées et comparées à une source infrarouge équivalente tel notre corps noir de référence.

## 3.9.2. Détection de différents types d'intrusion

La vitesse à laquelle une personne peut se déplacer rentre dans la gamme de fréquences de 10 Hz à 0,1 Hz, déplacement allant de la course à un déplacement lent effectué sur la pointe des pieds (réf.4). Le temps de réponse du capteur associé à son amplificateur est proche de 250 ms comme nous l'avons vérifié dans le paragraphe 2.7. Aussi avons-nous simulé des intrusions humaines pour constater les vitesses de passage dans une zone surveillée et pour nous assurer que notre système de surveillance est capable de détecter tout type d'intrusion.

Le graphique 124 montre différentes détections d'intrusion humaine dans un couloir surveillé par un Syclop rectangulaire. Les intrusions sont simulées à différentes distances et de différentes manières.

Nous constatons que même à des distances importantes, telles que des distances supérieures à 4m, par exemple, notre système de surveillance est encore capable de différencier une intrusion humaine du bruit propre du signal représentant l'équilibre thermique de la zone surveillée.

De plus, le système arrive à détecter, même avec une vitesse d'acquisition considérée lente telle que 250ms, des intrusions effectuées très rapidement et très lentement.

Pour vérifier le bon fonctionnement de la détection, nous sommes entrés dans un couloir (2m de large sur 5m de long) sous surveillance en le franchissant de différentes façons: en courant, en marchant normalement puis en marchant très lentement.

On remarque qu'en rentrant dans la zone contrôlée même en marchant très lentement et à une distance de 7m, distance considérée importante, une parabole de surveillance est capable de détecter un faible déséquilibre thermique provoqué par une intrusion humaine. Le fait de pénétrer très lentement dans le couloir sous contrôle provoque une variation de l'équilibre thermique établi précédemment. Cette variation est plus importante en amplitude que celles dues au bruit du signal et elle est détectable car la température de l'intrus est différente de la température moyenne de la surface occultée par le corps de l'intrus.



Figure 124 - Détection d'intrusions simulées à différentes distances et de différentes manières dans un couloir surveillé par un Syclop rectangulaire

# 3.9.3. Surveillance d'un couloir dans le laboratoire de simulation LaSCo (Laboratoire de Surveillance et de Confinement)

L'objectif est de surveiller un grand volume et de voir si dans des conditions astreignantes pour la surveillance il est possible de détecter des déséquilibres thermiques suffisamment importants pour les assimiler à des intrusions.

De ce fait, nous avons installé une parabole rectangulaire d'angle d'ouverture 40° dans le laboratoire de simulation LaSCo afin de surveiller la zone en rouge représentée en figure 125.

Ce volume est un couloir dans lequel se trouve une porte d'accès au local, deux conteneurs simulant un stockage de matières fissiles et un passage ouvert permettant l'accès à une autre zone de stockage.



Figure 125 - Surveillance d'un couloir à LaSCo

Les mesures sont effectuées avec une parabole rectangulaire montée avec deux capteurs de surface  $1 \text{ cm}^2$  dont les sensibilités avoisinent les 2,5 mV/W chacun. Les conditions expérimentales sont les suivantes :

- lumière néon allumée
- climatisation en marche
- câble de connection de 15 m
- amplification de gain 1000
- source détectée : homme chaudement habillé sous une blouse blanche (50W)
- température du local : 23,7°C

Les dimensions du couloir, l'orientation de la parabole, le mur et les objets formant partie de la zone surveillée expliquent qu'à certaines distances et sous certains angles il nous était impossible de placer l'homme, et donc de parvenir à une intrusion.

Nous avons effectué par trois fois des intrusions à différentes distances et sous divers angles afin d'obtenir, grâce à un indicateur de process Newport, les relevés de

mesures présentés dans le tableau en annexe 7. Grâce aux moyennes effectuées avec trois intrusions d'être humain en chaque positionnement repéré en distance et en angle dans la zone surveillée, nous obtenons la figure 126 à partir du tableau 9 résumant les intrusions relevées en marchant.

|       | Moy.   | Moy.  | Moy.  | Moy.  | Moy.  | Moy.  | Moy.  | Moy.  | Moy. |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Dist. | -30°   | -20°  | -15°  | -10°  | -5°   | 0°    | +5°   | +10°  | +15° |
| 1m    | -10.53 | 7.93  | 26.10 | 20.80 | 10.17 | 10.33 | 13.10 | 13.53 | 3.13 |
| 2m    | -10.47 | 2.37  | 14.30 | 5.23  | -2.43 | -0.17 | 3.53  |       |      |
| 3m    | -9.63  | -4.93 | 5.93  | 0.73  | -2.93 | -2.30 |       |       |      |
| 4m    | -10.93 | -7.83 | 0.10  | -4.67 | -7.87 |       |       |       |      |
| 5m    | -10.13 | -8.03 | -2.40 | -6.57 | -8.67 |       |       |       |      |
| 6m    | -11.20 | -9.23 | -4.23 | -7.63 | -9.17 |       |       |       |      |
| 7m    | -10.80 | -8.67 | -5.87 | -9.33 |       |       |       |       |      |

Tableau 9 - Relevés d'intrusions



Figure 126 - Relevés de mesures d'intrusion

On voit que sous un angle de 30° ou -30°, c'est-à-dire en dehors de la zone sous contrôle, le signal mesuré reste stable car la parabole ne détecte pas de variation thermique.

En revanche, dès 20°, angle maximal d'entrée d'intrusion dans la zone surveillée, nous avons détection de déséquilibre thermique. Il y a bien détection d'intrusion quel que soit l'angle d'intrusion. On constate que plus l'intrusion est distante de la parabole, plus le déséquilibre est faible, mais il reste suffisant pour être détecté.

Etant donné que pour déclarer une alarme il est nécessaire de considérer une variation d'équilibre thermique suffisamment importante pour l'assimiler à une détection d'intrusion, il nous est utile de connaître l'écart de valeur que le signal subit lors du déséquilibre thermique causé par l'intrus.

De ce fait, en indexant l'état de stabilité thermique lorsque l'intrus est encore hors zone de surveillance au dessous de 20°, par exemple 30°, nous obtenons le tableau 10 présentant les variations de signaux dues à des intrusions à différentes distances et sous différents angles.

|       | Ecart |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Dist. | 20-30 | 15-30 | 10-30 | 5-30  | 0-30  | 5-30  | 10-30 | 15-30 |
| 1m    | 18.47 | 36.63 | 31.33 | 20.70 | 20.87 | 23.63 | 24.07 | 13.67 |
| 2m    | 12.83 | 24.77 | 15.70 | 8.03  | 10.30 | 14.00 |       |       |
| 3m    | 4.70  | 15.57 | 10.37 | 6.70  | 7.33  |       |       |       |
| 4m    | 3.10  | 11.03 | 6.27  | 3.07  |       |       |       |       |
| 5m    | 2.10  | 7.73  | 3.57  | 1.47  |       |       |       |       |
| 6m    | 1.97  | 6.97  | 3.57  | 2.03  |       |       |       |       |
| 7m    | 2.13  | 4.93  | 1.47  |       |       |       |       |       |

Tableau 10 - Variations de signal dues aux intrusions et indexées sur la stabilité thermique

On obtient alors la figure 127, en page suivante, visualisant réellement les variations de tension que subit une parabole lors d'intrusions d'être humain, sous différents angles et à différentes distances, effectuées dans une zone surveillée.

Les remarques sont les mêmes que précédemment mais il est possible de lire directement les variations du signal lors de chaque détection, et cela en fonction de la distance et du positionnement de l'intrus dans la zone contrôlée.



Figure 127 - Variations de signal causées par des intrusions

# 3.10. SURVEILLANCE PONCTUELLE D'UN POT DE PLUTONIUM AVEC LE CONCENTRATEUR CIRCULAIRE

Le principe est de surveiller à distance une surface ou un objet de dimensions finies tout en pouvant circuler et travailler dans une zone non surveillée du même local. En revanche, il n'est pas nécessaire de surveiller un volume aussi important qu'un couloir. De ce fait, le concentrateur de rayonnement infrarouge est choisi circulaire afin de contrôler une zone surfacique sur laquelle est posé un pot simulant un conteneur de Plutonium.

# 3.10.1. Simulation de surveillance de pots de Plutonium



Figure 128 - Surveillance ponctuelle avec une parabole circulaire

Manipulation présentée au XVII<sup>e</sup> Symposium des "Garanties et Gestion du Matériel Nucléaire" d'ESARDA<sup>\*</sup> à Aix-la-Chapelle (All.) les 9-11 mai 1995. L'article "SYCLOP, Heat Flow Sensor Parabola Used for Surveillance in Safeguards" du bulletin d'Esarda n° 26 de mars 1996 explique le principe de cette surveillance ponctuelle et figure dans les annexes du rapport.

Pour caractériser les performances de notre dispositif présenté en figure 57 et figure 128, nous avons dû faire appel à des notions subjectives afin de modéliser un conteneur de Pu.

Nous avons utilisé un pot en acier inoxydable (type 316) régulé en température (de 40°C à 60°C) pour caractériser la sensibilité et la fiabilité du système. Une résistance chauffante de 10,6  $\Omega$  est placée dans le pot. Cette résistance est alimentée en courant et en tension à l'aide d'une alimentation stabilisée. Le pot, pour être assimilé à un conteneur classique, a une hauteur de 200mm et un diamètre de 125mm. La figure 129 montre l'aspect d'un tel pot.



Figure 129 - Pot de stockage

Ce pot a été usiné à l'atelier central du centre de recherche d'Ispra. Afin de simuler un conteneur de matière fissile dont la température se situe entre 40 et 60 degrés Celsius, nous injectons une certaine puissance électrique. Un vrai conteneur de matière est considéré stable à court terme en puissance émise et en température.

Ayant une certaine capacité thermique, notre pot simulé nécessite un temps de stabilisation en température avant d'être considéré comme une source chaude stable. La courbe suivante représente le temps de montée en température pour un pot en acier sous une puissance injectée de 20W (U = 14,56V et I = 1,37A), puissance permettant d'atteindre les 50°C après deux heures.

<sup>\*</sup> ESARDA : EUROPEAN SAFEGUARDS RESEARCH AND DEVELOPMENT ASSOCIATION





Lorsque notre pot en acier est stable en température, il nous est alors possible de le surveiller à distance à l'aide d'une parabole circulaire très focalisante. Une étude expérimentale a permis de confirmer tous les résultats prévus à partir de la modélisation classique des miroirs paraboliques présentée dans le chapitre 2. En pratique, un capteur de sensibilité 30 mV/W permet de bien surveiller un pot de Pu (voir figure 128) à une distance de cinq mètres sans perturbations dues à l'environnement avec une amplification de 5000 ou plus, soit avec un rapport signal/bruit très important.

#### 3.10.2. Surveillance d'un pot

Après avoir modélisé un conteneur de Pu à l'aide d'un pot chauffant régulé en température grâce à une alimentation continue stabilisée, nous avons réalisé la surveillance de ce conteneur par une parabole circulaire montée avec un capteur radiatif 10 mm x 10 mm.

Afin de suivre l'évolution en température du pot chauffant, nous avons collé sur celui-ci 106 thermocouples de types K comme indiqué en annexe 8. Ces 106 thermocouples étaient tous reliés à la chaîne d'acquisitions Vishay (voir figure 131). Nous avons donc pu enregistrer les 106 lectures de température délivrées par nos thermocouples. Avant tout, nous avons dû étalonner l'ensemble de la chaîne d'acquisitions des thermocouples à l'aide d'un bain d'huile régulé en température et d'une sonde Pt 100 de référence précise au centième de degré. C'est-à-dire que nous avons calibré la lecture d'une température en reliant chaque thermocouple sur une entrée de carte d'acquisitions de la chaîne Vishay, celle-ci reliée à un écran afficheur. Nous n'avons pas calibré le thermocouple en

température mais nous avons calibré toute la ligne thermocouple-carte d'acquisitionsafficheur à l'aide de la Pt100 de référence.



Figure 131 - Vue de la chaîne de mesure

En faisant varier la température du bain de  $25^{\circ}$ C à  $80^{\circ}$ C (± de 1 °C) nous obtenons grâce à la Pt 100, une courbe de température réelle et une courbe de température qui doit être corrigée pour chaque ligne de calibration des 106 thermocouples.

Aussi, pour chaque thermocouple, lorsque l'on est à une température proche de la température de référence, il faut retrancher l'écart au thermocouple pour connaître la température exacte que devrait donner le thermocouple. L'annexe 9 reprend l'ensemble des écarts de température à retrancher pour tous les thermocouples.

L'exécution graphique de la courbe de calibration pour l'ensemble des 106 thermocouples étant impossible, nous expliquons la méthode et la correction à faire pour le thermocouple numéro 1 relié à l'entrée d'acquisitions n° 1 de la chaîne Vishay. Pour une température de bain donnée nous obtenons une température réelle par la Pt100 (T° de



référence) et une température exprimée par la ligne de calibration du thermocouple n° 1. Soit, pour une plage de température allant de  $25^{\circ}$ C à  $80^{\circ}$ C :

Figure 132 - Calibration de la ligne thermocouple n°1

Grâce à l'équation polynômiale de degré 2 de cette courbe nous obtenons la température réelle en fonction de la température donnée par la ligne du thermocouple.

Donc, pour l'ensemble des 106 thermocouples reliés à la carte d'acquisitions, il est nécessaire d'établir l'équation pour chacune des lignes de mesure afin d'obtenir la température réelle en fonction de la température relevée.

Après avoir modélisé un conteneur de Pu à l'aide de notre pot régulé en température et nous être assuré que les températures soient correctement relevées grâce à des lignes de mesure de température calibrée, nous avons essayé de faire de la surveillance à distance ponctuelle, c'est-à-dire de contrôler une petite surface avec un concentrateur parabolique circulaire.

De ce fait, comme le montre la figure 133, nous avons effectué des relevés à l'aide d'une parabole circulaire fixée à un bras élévateur, calibré en centimètres, de notre pot chauffant régulé en puissance et de notre banc de mesure multivoies Vishay.









L'objectif étant de faire de la surveillance et non pas de la mesure de flux, nous avons relevé, pour une puissance électrique injectée et à une distance donnée, l'écart de signal que délivre la parabole lorsqu'elle regarde le sol avec et sans le pot chauffé: à une distance de surveillance fixée, nous avons relevé la variation de signal donné par la parabole lorsqu'elle regarde un pot chauffé posé sur le sol puis lorsqu'on coupe le champ de surveillance par une plaque de polystyrène.

Les surfaces surveillées sont connues et varient en fonction de la distance. Avec un capteur de  $1 \text{ cm}^2$  placé à 4 cm du sommet de la parabole circulaire, nous avons les surfaces surveillées suivantes :



Figure 134 - Surfaces surveillées

Ces surfaces sont suffisamment grandes pour permettre de poser notre pot chauffé en position couchée ou debout. Nous avons donc obtenu pour le pot en position couchée puis en position debout les relevés d'écart de signal suivants en fonction de la distance et de la puissance injectée dans le pot.

Pour le pot en position couchée :

|           | Ecart de signal à | Ecart de signal à | Ecart de signal à |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|
|           | une               | une               | une               |
| Puissance | distance de 3m    | distance de 2,5m  | distance de 2m    |
| 9,43W     | 0,24 mV           | 2,94 mV           | 10,57 mV          |
| 21,23W    | 1,02 mV           | 7,51 mV           | 22,85 mV          |
| 27,26W    | 1,87 mV           | 11,53 mV          | 32,68 mV          |

 

 Tableau 11 - Ecart de signal relevé à différentes distances en fonction de la puissance injectée dans le pot en position couchée

 On constate qu'à une distance de 3 m il est difficile, dans un local chauffé, de surveiller efficacement un pot, même atteignant une température de 55°C lorsqu'il est alimenté sous 27,26W. En effet, l'écart de flux relevé est à peine de 2 mV, écart à la limite du bruit. A cette distance il est nécessaire d'utiliser un capteur plus petit pour focaliser davantage la surveillance ou d'amplifier le signal afin d'augmenter le rapport signal sur bruit.



Figure 135 - Ecarts de signal relevés pour un pot en position couchée en fonction de la puissance injectée et de la distance de surveillance

En revanche, à une distance de surveillance inférieure à 2,5m, il est possible de contrôler un pot même sous 9,43W, puissance correspondant à une température de 24°C, en augmentant la surface regardée par la parabole. Nous pouvons voir sur la figure 135 l'évolution des variations de flux provoquées par la présence d'un pot alimenté sous différentes puissances, c'est-à-dire à différentes températures relevées en surface plus importante regardée par la parabole.

Pour la surveillance à distance de notre pot chaud nous ne cherchons pas à établir une carte des températures de surface de celui-ci pour réaliser un profil thermique, mais nous vérifions que la détection de cette source de chaleur est proportionnelle à la température et à la distance de contrôle. Grâce aux températures de surface relevées sur la face du pot surveillée par la parabole, donc soit sur le haut du pot en position debout, soit sur un côté latéral en position couchée, nous avons obtenu des températures moyennes de la surface surveillée en fonction des puissances électriques injectées. Nous avons constaté que ces températures movennes de surface surveillée sont du même ordre de grandeur en position debout ou couchée. Cette réponse est linéaire (présentée sur la figure 136), et correspond bien au relevé par conduction de température fonction d'une puissance.



Figure 136 - Température de la surface surveillée du pot en fonction de la puissance injectée

|           | Ecart de signal à | Ecart de signal à | Ecart de signal à |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|
|           | une               | une               | une               |
| Puissance | distance de 3m    | distance de 2,5m  | distance de 2m    |
| 9,43W     | 0,5 mV            | 1,91 mV           | 6,39 mV           |
| 21,23W    | 1,69 mV           | 7,27 mV           | 22,05 mV          |

2,68 mV

Pour le pot en position debout :

27,26W

Tableau 12 - Ecart de signal relevé à différentes distances en fonction de la puissance injectée dans le pot en position debout

15,68 mV

34,578 mV



Figure 137 - Ecarts de signal relevés pour un pot en position debout en fonction de la puissance injectée et de la distance de surveillance

A une même puissance injectée dans le pot, il est observé pour celui-ci, en position debout ou en position couchée, que les écarts de signal relevés à une même distance à l'aide de la parabole circulaire sont du même ordre de grandeur. En effet, on constate que la température moyenne de la surface du pot regardée par la parabole est sensiblement la même. C'est-à-dire que même s'il y a des points plus chauds ou plus froids sur la zone latérale du conteneur en position couchée ou sur la surface circulaire lorsqu'il est debout, globalement la température moyenne est voisine et nous considérons que le bilan des puissances échangées est constant quelle que soit la position dans laquelle se trouve le pot.

La manipulation permet de voir qu'il est possible de surveiller un conteneur de matières fissiles en position de stockage debout ou couchée. D'ailleurs, les stockages sont organisés généralement en fonction de problèmes d'émissivités radioactives et d'encombrement.

Pour une même puissance injectée dans notre pot et à une même distance de surveillance, nous expliquons par deux causes les différences dans les relevés des écarts de flux que nous avons pu rencontrer.

Premièrement, par le fait que lorsque le pot est couché il est légèrement plus éloigné de la parabole que quand il est en position verticale. Puis, en principale considération, par le fait que l'endroit où l'on place le conteneur dans la zone surveillée n'est pas toujours le même selon la position dans laquelle il se trouve et selon la manipulation. Nous avons en effet vu dans le paragraphe 3.4 que chaque parabole a son diagramme de dispersion et que son diagramme de sensibilité est défini différemment en fonction de l'angle de regard et de l'éloignement entre la zone contrôlée et le détecteur.

## 3.11. NIVEAU D'ALARME ET POSSIBILITE DE FRAUDER LE SYSTEME

#### 3.11.1. Niveau d'alarme (principe de détection sur une pente de signal)

Grâce à l'association fluxmètre planaire et concentrateur de rayonnement thermique, il nous est possible de détecter toute modification de l'équilibre thermique d'un volume bien défini causée, par exemple, par une intrusion humaine dans une zone surveillée.

Suite au paragraphe 3.10.2 sur la surveillance d'un pot, considérons l'exemple du relevé expérimental qui confirme l'équilibre thermique radiatif s'établissant au niveau de notre système de surveillance et qui caractérise le flux radiatif contrôlé à une certaine distance et sous un certain angle de détection prédéfinis :



204



Figure 139 - Signal délivré par une parabole circulaire regardant une zone sous surveillance

Le relevé précédent montre la stabilité du signal délivré par notre système regardant une zone ou un objet à surveiller. En situation de repos, soit en équilibre thermique, le détecteur émet un signal "plancher" présentant des fluctuations relativement faibles dues aux bruits du dispositif et de l'ambiant, comparées à une fluctuation correspondant à une vraie intrusion.

Lorsqu'un intrus humain pénètre dans la zone surveillée, le bilan thermique change, le signal varie brusquement (ici en a,b,c) ce qui permet de déclencher une alarme.

L'objectif de notre système de surveillance est ici de pouvoir détecter un changement qui correspond à une intrusion, et cela sans être perturbé par le milieu extérieur environnant le dispositif.

Nous considérons une alarme, c'est-à-dire une intrusion suffisante pour provoquer un déséquilibre thermique important du dispositif de surveillance, lorsque le signal délivré par le système acquiert non seulement un niveau au moins supérieur au double du maximum du bruit (+3 dB) mais sous une certaine pente (ou une variation).

Etant donné que notre système est toujours en équilibre thermique, que celui-ci évolue constamment en fonction des variations de température du milieu, et que le capteur surveille toute la bande de l'infrarouge moyen, nous avons basé <u>la détection sur une variation absolue</u> du signal délivré par le capteur en temps réel et non sur un franchissement de seuil.

Lors d'une intrusion par une présence humaine ou un objet matériel, on obtient un pic positif ou négatif de forte amplitude causé par une variation de flux importante. Nous avons alors établi *une détection sur la mesure de cette variation de flux* et non pas sur le franchissement d'un niveau de flux.

Afin de suivre visuellement et concrètement l'évolution du signal fourni par le système de surveillance et d'enclencher une alarme lors d'un déséquilibre thermique correspondant à une intrusion, nous avons fait faire un petit programme par la société informatique NOS S.r.l. de Rome. Ce logiciel (voir présentation en annexe 11) réalisé en

Labwindows/CVI sous Windows v.3.01 permet de concrétiser les acquisitions des signaux provenant de la parabole à l'aide d'une carte d'acquisitions PCNCIA (National Instruments).

La visualisation en temps réel du signal est réalisée à l'aide d'un écran oscillographe. La liste des valeurs acquises est présentée dans un tableau dans lequel pour chaque point acquis (en direct ou calculé) viennent s'inscrire la date, l'heure, le numéro absolu de l'acquisition, sa valeur et l'état de l'alarme éventuelle.

Etant donné que nous ne réalisons plus seulement des acquisitions mais que nous devons établir correctement une alarme, nous avons introduit dans le logiciel diverses fonctions permettant d'analyser et d'interpréter différemment le signal pour justifier une alarme.

Cinq fonctions sont introduites: le mode direct permettant l'acquisition d'une valeur toutes les "x" millisecondes (réglable avec le sample rate), le mode moyenne sur un bloc, le mode moyennes décalées permettant une variation plus lente et plus homogène de la valeur moyenne, le mode différence sur les moyennes qui élimine la composante basse fréquence et fait ressortir les variations rapides, puis le mode moyenne des différences éliminant les pics trop violents.

A partir de la configuration de la fonction et du résultat du traitement comparé à une valeur paramétrée fixée, une alarme est déclenchée dans le cas d'un déséquilibre thermique correspondant à une intrusion.

Cette première manipulation a été présentée en mai 1995 lors du symposium ESARDA à l'aide du matériel figurant sur la photo 128 accompagné de deux posters explicatifs joints en annexe 12.

Après la mise au point de ce premier montage permettant la surveillance à distance de petites zones, ou encore assurant la "surveillance ponctuelle" d'objet, nous avons réalisé avec la collaboration de la société Doerler-Mesures (Nancy, France) un prototype portable multivoies de contrôle. Nous avons été confronté au besoin de contrôler plusieurs paraboles en temps réel et d'enclencher correctement les alarmes.

De ce fait, un prototype d'acquisition et de traitement pour 16 voies a été réalisé à l'aide d'une carte multiplexeur, d'un système d'acquisitions portable à microprocesseur SoMat 2000 comportant un module Processeur et un module Alimentation/Communications, et d'un logiciel Test-Contrôle (TSC)



Figure 140 - Prototype d'acquisition 16 voies

Nous joignons en annexe 13 quelques explications sur le système d'acquisitions SoMat 2000. Il est nécessaire d'utiliser un guide d'installation et d'utilisation de ce système d'acquisitions SoMat car les configurations et les spécifications sont nombreuses et très compliquées à décrire.

Afin de ne pas perdre des informations une fois les voies calibrées et le mode d'acquisitions défini pour des surveillances ou des intrusions, il est important d'employer un système d'acquisitions qui ne recouvre pas la fréquence du capteur et des passages de l'intrus dans la zone contrôlée. C'est-à-dire que sa vitesse d'acquisition doit être suffisamment rapide pour tout enregistrer et la fréquence du traitement des informations adaptée afin de ne pas éliminer de données.

Nous avons déjà vu que la vitesse à laquelle une personne peut se déplacer rentre dans la gamme de fréquences de 10 Hz à 0,1 Hz, déplacement allant de la course à un déplacement lent effectué sur la pointe des pieds (Réf.4). Rappelons nos expériences de simulation d'intrusion humaine dans le chapitre 3 pour vérifier les vitesses de passage dans une zone surveillée. Nous avons constaté aussi que la réponse du capteur fluxmétrique, voisine des 200 ms, nous permet l'usage de celui-ci pour une application telle qu'une détection d'intrusion humaine. Ces basses fréquences ne sont pas un problème pour les systèmes d'acquisitions classiques. En effet, ces fréquences permettent d'être traitées facilement. Nous avons utilisé le système SoMat car il présente la possibilité de faire de l'acquisition jusqu'à 16 voies indépendamment l'une de l'autre. Le système est compact (77mm x 77mm x 127 mm), autonome (batterie haute capacité en lithium) et ses entrées sont normalisées en tension/courant ( $\pm$  10V, 0-20 mA). Ce système offre le grand intérêt de posséder de multiples possibilités de déclenchement pour chaque voie (sur pente, sur condition logique entre les voies...) ainsi que de programmation indépendante (sensibilité, cadence d'échantillonnage...)

(Voir paragraphe 3.14 pour le réglage des alarmes)

Enfin il est utile de savoir qu'à l'aide d'un système d'acquisitions et de traitement comme la SoMat nous pensons avoir apporté une innovation au niveau du principe de détection sur une pente de signal et sur le réglage des alarmes. La mise au point de notre système de surveillance ne nécessite pas, en effet, la calibration de notre capteur fluxmétrique puisque le réglage de l'alarme s'effectue par une calibration du système avec une détection d'intrusion dans la zone contrôlée par celui-ci (paragraphe 3.14).

#### 3.11.2. Frauder la surveillance

En matière de sécurité et de surveillance, la détection d'une intrusion constitue un problème dans le domaine de l'instrumentation. Surveiller à distance un objet tout en pouvant circuler autour semble impossible. Pourtant, dans le domaine des "Garanties Nucléaires", pour le contrôle et le stockage de matières fissiles, pour la surveillance ponctuelle à distance et pour le stockage à très long terme, le besoin s'avère pressant et la demande est importante.

Un des problèmes posés est la surveillance à distance d'une zone particulière de dimensions finies, ou d'objet situé, par exemple, dans un couloir, un local ou même à l'air libre sans que la circulation de personnes ou d'objets autour des limites de cette zone particulière n'affecte ou ne perturbe ladite surveillance.

Afin de prouver que notre application de "fluxmétrie dans le domaine des Garanties" est exploitable, nous avons réalisé les prototypes de surveillance présentés dans

ce rapport. Ces appareils semblent répondre aux exigences liées à la sûreté, c'est-à-dire posséder une grande résistance à la fraude et aux leurres: en effet, en fonction de leur utilisation éventuelle dans un site de stockage de matières fissiles, la possibilité de frauder le système doit rester minime.

Le capteur génère une force électromotrice proportionnelle aux seuls échanges par rayonnement, aussi pouvons- nous dire qu'il établit un bilan thermique entre sa température et la température "vue par le réflecteur parabolique". La stabilité de cette force électromotrice détectée est donc étroitement liée à la stabilité des échanges.

Le fluxmètre thermique qui fournit une information représentative du déséquilibre énergétique entre un système et son environnement est idéal pour prendre en compte les variations de charge thermique importantes provoquées par des intrusions et traduites par des alarmes. Toute variation de température causée par des apports ou déperditions d'énergie lors d'une intrusion est détectée par notre système.

En théorie on pense pouvoir remplacer un objet à une certaine température par un autre. En pratique il est impossible d'avoir une même surface homogène en température capable de s'introduire comme un caméléon dans une zone surveillée à distance.

Une série d'expériences a été menée pour tenter de frauder notre système de surveillance, celles-ci sont restées vaines. Nous avons essayé de pénétrer dans la zone surveillée en entrant très rapidemment, normalement, lentement, habillé de noir ou de blanc, peu ou fortement vêtu, isolé avec des cartons ; mais le système a détecté chacune des tentatives d'intrusion.

# Etant donné qu'il est quasi impossible de connaître la température de chaque point de la surface occultée par l'intrus, et que la température de l'intrus doit être égale à cette température moyenne de la surface qu'il cache afin que le bilan thermique reste stable, nous pouvons dire qu'il est extrêmement difficile de frauder notre système.

Toutes les caractéristiques spécifiques et les avantages que présente notre solution nous permettent de constater qu'en fait notre nouveau système de surveillance à distance répond pleinement au problème posé initialement. Mais il est important de savoir que notre système ne réalise pas une détection dans le sens d'une analyse des infrarouges, mais seulement par une modification de l'équilibre thermique dans la zone surveillée.

## **3.12. RESISTANCE AUX RADIATIONS**

Pour être certain que notre système de surveillance est capable de fonctionner à long terme dans un milieu exposé aux radiations nous avons placé un fluxmètre thermique voisin d'un échantillon de matières fissiles à PERLA (Laboration de PERformances à Ispra).

Par souci de rigueur, nous n'avons pas étalonné uniquement le fluxmètre mais nous avons calibré un capteur radiatif associé à un afficheur Newport portable. L'étalonnage de cette ligne de mesures a pour objet d'évaluer la sensibilité de celle-ci, c'est-à-dire la tension délivrée par le capteur et affichée par l'indicateur quand on le soumet à une densité de flux imposée. Cette mesure nous permet de vérifier le bon fonctionnement du capteur avant et après son exposition aux radiations. Le dispositif utilisé pour étalonner notre ligne de mesures est schématisé par la figure suivante :



Figure 141 - Dispositif d'étalonnage de notre ligne de mesures

Le 20 mars 1996 nous avons relié un fluxmètre radiatif de sensibilité 3,1 mV/W, de 1 cm<sup>2</sup> de surface à un afficheur Newport réglé sur la gamme 100 mV, (.FF) d'affichage et (128 Ti) de comptage moyen. Le capteur a été placé sur un puits thermique. Une résistance électrique plane (128  $\Omega$ ) a été superposée à très faible distance du capteur (2mm). Celle-ci, alimentée par une alimentation stabilisée, délivre une puissance thermique P réglable (P = U<sup>2</sup>/128). La plaque de polystyrène superposée à la résistance et faisant office de couche isolante limite le flux ascendant.

En injectant diverses puissances dans la résistance électrique, notre ligne de mesures nous a fourni les microtensions suivantes :



Figure 142 - Relevés de notre ligne de mesures avant exposition

Une fois effectuée la calibration de notre capteur radiatif associé à son afficheur, nous avons placé celui-ci à quelques centimètres d'un pot contenant des échantillons de matières fissiles du type Pu dont l'identification et le contenu sont donnés en annexe 14.

La température de contact est de l'ordre de 56°C, donc considérée chaude, et les émissions sont du type gamma et neutronique. Afin de voir si notre fluxmètre ne se

détériore pas et conserve toutes ses capacités de mesure après une longue exposition aux radiations, nous avons repris notre ligne de mesures après 7 mois, soit le 15 octobre 1996.

Nous avons alors refait l'étalonnage de notre ligne de mesures avec le même dispositif que celui de la figure 141 et obtenu des relevés de valeurs identiques à ceux de la figure 142 à 2 ou 3 % près d'écart dû aux erreurs de lecture et aux imprécisions dans la manipulation. On peut donc conclure que le fluxmètre résiste bien à une exposition aux radiations.

# 3.13. PRE-QUALIFICATIONS DU SYSTEME SOUS CONTRAINTES DE L'ENVIRONNEMENT

Initialement, cette technologie a été développée pour le contrôle des matières nucléaires à des fins de non prolifération. Le dispositif s'adresse à une activité particulière d'une importance capitale pour la société et permet l'ouverture vers d'autres activités, car des sondages ont déjà été effectués dans les milieux :

- bancaire

- agricole (surveillance d'animaux en vue de meilleures gestion et production)
- commercial (bijouterie, magasins...)
- culturel (musées)
- industriel (surveillance de turbines, de prototype automobile...)

Du fait des multiples possibilités d'utilisation de notre système de surveillance à distance SYCLOP, nous avons effectué des pré-qualifications de celui-ci afin de déterminer ses performances lorsqu'il est soumis à diverses contraintes thermiques, mécaniques ainsi qu'électromagnétiques telles qu'il en rencontrera sur des sites d'installation.

Ces essais constituent également une première approche quant à la confirmité du détecteur vis-à-vis de différentes normes internationales.

Tous les résultats obtenus pendant et après les différents essais sont valides seulement pour le détecteur parabolique circulaire présenté en annexe 4, et il est possible de consulter la note technique n° I.96.84 au laboratoire T.E.M.P.E.S.T. de l'institut I.S.I.S. du CCR d'Ispra. (extrait en annexe 15).

## Test n° 0: Mesures de référence:

La parabole, connectée à un voltmètre, est placée à 1 m en face d'un corps noir de référence chauffé avec une puissance spécifiée. Alimenté sous 20 V par 8,95 A, la température de notre corps noir était de  $34^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$ .

Le gain de notre détecteur Syclop était de 5000. Après stabilisation, la tension de sortie de la parabole mesurée à l'aide du voltmètre était :  $U = 1,12 \pm 0,01 V$ Cette tension sert de référence pour les mesures effectuées après chaque essai.

# Essais thermiques (simulation de stockage) et mécaniques (simulation de transport et manutention)

Test nº 1: exposition à froid- Test Ab d'après la norme CEI 68.2.1

Le dispositif non opérant est exposé 16 heures à -40°C. Après l'essai, une mesure de sa tension de sortie est effectuée comme au test 0.

Test No.2: exposition à chaud- Test Bb d'après la norme CEI 68.2.2

Le dispositif non opérant est exposé 16 heures à +70°C. Après l'essai, une mesure de sa tension de sortie est effectuée comme au test 0.

<u>Test n° 3</u>: variation de température- Test Na d'après la norme CEI 68.2.14 Le dispositif non opérant est exposé à 5 cycles, 2heures à chaque température avec  $T_a = -40^{\circ}$ C et  $T_b = +70^{\circ}$ C. Le temps de passage entre les deux températures est de 20 à 30 secondes.

Après l'essai, une mesure de sa tension de sortie est effectuée comme au test 0.

<u>Test n° 4</u>: exposition à l'humidité- Test Cb d'après la norme CEI 68.2.56 Le dispositif non opérant est exposé 4 jours à 40°C et à 85% d'humidité. Après l'essai, une mesure de sa tension de sortie est effectuée comme au test 0.

<u>Test n° 5</u>: choc mécanique- Test Ea d'après la norme CEI 68.2.27 Le dispositif non opérant est exposé à 3 chocs de 15 g durant 11 ms en forme de dents de scie à parité finale dans chaque axe. Voir annexe 16.

Après l'essai, une mesure de sa tension de sortie est effectuée comme au test 0.

Test nº 6: vibration 1- Test d'après la norme CEI 68.2.6

Le dispositif non opérant est exposé dans chaque axe au cycle de vibrations sinus de 10 à 55 Hz, d'amplitude de déplacement 0,75 mm.

Après l'essai, une mesure de sa tension de sortie est effectuée comme au test 0.

Test nº 7: vibration 2- Test d'après la norme CEI 68.2.6

Le dispositif non opérant est exposé dans chaque axe au cycle de vibrations sinus de 10 à 59 Hz en contrôle d'amplitude de déplacement et de 59 à 150 Hz en contrôle d'accélération sous 5g.

Après l'essai, une mesure de sa tension de sortie est effectuée comme au test 0.

# Immunité à la décharge électrostatique d'après la norme CEI 1000-4-2 (immunité pour des appareils qui seront utilisés en résidentiel, commercial et industrie légère)

Test n° 8: 4 kV de décharge par contact- Test d'après la norme EN 50082-1

Le dispositif opérant est exposé à 10 décharges par contact de 4 kV (en polarité + et -) en différents points de son coffret. Pendant chaque décharge le signal délivré par le dispositif varie de 100 à 300 mV par rapport à la tension initiale. A la fin du test il est constaté que le système n'a subi aucun dommage. Après l'essai, une mesure de sa tension de sortie est effectuée comme au test 0.

Test nº 9: 8 kV de décharge par contact- Test d'après la norme EN 50082-1

Le dispositif opérant est exposé à 10 décharges par contact de 8 kV (en polarité + et -) en différents points de son coffret. Pendant chaque décharge le signal délivré par la dispositif varie de 120 à 260 mV par rapport à la tension initiale. A la fin du test il est constaté que le système n'a subi aucun dommage. Après l'essai, une mesure de sa tension de sortie est effectuée comme au test 0.

# Immunité au champ électrostatique, au champ radio-fréquence et émission d'après la norme CEI 1000-4-3 (immunité pour des appareils qui seront utilisés en résidentiel, commercial et industrie légère)

Test nº 10: 3 V/m de 80 MHz à 1 GHz de bande de fréquence- Test d'après la norme EN 50082-1

Le dispositif opérant est exposé à un champ électrique sous 3 V/m de 80 MHz à 1 GHz de bande de fréquence. De 80 à 200 MHz on effectue un balayage par pas de 800 kHz toutes les 2 secondes et il est constaté que le signal délivré par le voltmètre reste stable sauf à 200 MHz où l'on observe un pic de 2.15V. De même, de 80 MHz à 1 GHz par pas de 2 MHz, le signal reste stable entre 0.01 et 0.03 V. Après l'essai, une mesure de sa tension de sortie est effectuée comme au test 0.

## Mesure d'émission du dispositif

#### Test nº 11: mesure de 100 kHz à 1 GHz

Le dispositif opérant étant placé dans une chambre micro anéchoïque et selon différentes positions et fréquences, on mesure son émission électrique dans la bande 100kHz -1GHz.

## **Conclusion:**

Notre dispositif a passé tous les tests thermiques et mécaniques.

Quelques variations sur la tension délivrée ont été observées, ce qui est tout à fait normal puisque notre détecteur est sensible aux décharges électrostatiques et électromagnétiques qu'il traduit comme un déséquilibre, donc en alarme.

Les autres perturbations subies ou émises à certaines fréquences peuvent être éliminées à l'aide de filtres et d'améliorations au niveau de la masse de notre système.

# 3.14. INSTALLATION DANS UN SITE DE STOCKAGE DE MATIERES FISSILES POUR LES INSPECTEURS DE L'EURATOM

# 3.14.1. Introduction

Les bons résultats obtenus après l'étude et le développement de notre système de surveillance à distance de présence humaine dans une zone contrôlée, grâce à l'installation de plusieurs de ces appareils de surveillance et à la vérification du bon fonctionnement du principe inventif dans le laboratoire expérimental LaSCo au Centre Commun de Recherche d'Ispra (Italie), nous ont permis de protéger l'idée début 1996 par un brevet déposé au nom de la Commission des Communautés Européennes (voir brevet PCTFR97/00142 joint en annexe 16).

Nous avons constaté que cette technologie présente un grand potentiel d'utilisation, exploitable par des entreprises grandes ou petites, mais qu'il est nécessaire de faire des essais de démonstration.

Après une première présentation publique de notre système lors du XVII<sup>e</sup> Symposium d'ESARDA (European Safeguards Research and Development Association) à Aix-la-Chapelle (Allemagne) les 9-10-11 mai 1995, notre nouvelle technique de détection à distance par voie thermique a fortement intéressé les opérateurs de sites nucléaires qui acceptent le contrôle de leur combustible dans le cadre des traités internationaux en vigueur.

Notre premier objectif qui était de faire connaître concrètement, c'est-à-dire grâce à des essais sur sites réels, ce nouveau système de surveillance à distance à des futurs utilisateurs avec l'installation de prototypes chez ceux-ci, s'est donc très vite réalisé.

Rappelons qu'à partir d'une application sur site réel de matières nucléaires, le présent système de contrôle peut prendre toute sa valeur pour la surveillance des futurs grands sites de stockage après le démantèlement des armes nucléaires.

En effet, dans le domaine des "Garanties", pour le contrôle et le stockage de matières fissiles même à très long terme, pour la surveillance ponctuelle à distance, le besoin s'avère pressant.

De ce fait, une application concrète, suite à un besoin réel et urgent, s'est exprimée très rapidement par l'Agence de contrôle des Commissions européennes de Luxembourg (EURATOM).

# 3.14.2. Principe du réglage des alarmes pour les détections d'intrusion humaine dans une zone surveillée

La direction du Contrôle de Sécurité d'Euratom (DCS) de Luxembourg a pour mission d'assurer, conformément au chapitre VII du Traité Euratom, à l'échelon de la Communauté, que les matières nucléaires ne soient pas détournées vers des fins autres que celles auquelles elles sont destinées.

Le contrôle est assuré par des unités d'inspection nucléaire. Après la présentation de notre prototype de surveillance devant les inspecteurs, à qui nous adressons de nouveau tous nos remerciements, l'Euratom a identifié une possible application en tant que projet pilote pour étudier la faisabilité du système Syclop dans un site de stockage réel.

Pour des raisons de discrétion et de forte sensibilité du sujet, nous limitons les explications et les photos du site choisi.

La photo suivante montre une vue d'ensemble du site de Dounreay, en Ecosse, qui comprend plusieurs salles de stockage pour de la matière nucléaire.



Figure 143 - Premier site de démonstration de SYCLOP à Dounreay

Il nous a été demandé de contrôler trois salles dont l'accès est limité pour divers raisons. Après une première approche des lieux, nous avons étudié les prototypes à réaliser selon les différentes configurations des zones à surveiller. Une fois les prototypes réalisés et caractérisés selon la surveillance à assurer, nous avons effectué l'installation des premiers prototypes sur le site de stockage de matières fissiles à Dounreay.

De manière à expliquer concrètement le principe de réglage des alarmes de notre dispositif, nous présentons l'exemple de la mise au point d'une parabole. Le relevé suivant montre une intrusion humaine à une distance de quatre mètres du détecteur dans une zone surveillée par une parabole circulaire d'angle d'ouverture 14° et connectée sur l'une des voies d'entrée du système d'acquisition Somat (la voie n°109). Les enregistrements sont effectués en temps réel, sans traitement de signal et toutes les 50 millisecondes.

La figure suivante enseigne l'évolution du signal délivré par le système de surveillance et permet de visualiser parfaitement un déséquilibre thermique dû à une intrusion dans une zone contrôlée.



Figure 144 - Déséquilibre thermique dû à une intrusion dans une zone surveillée

Nous pouvons dire qu'il se produit une alarme, c'est-à-dire une intrusion suffisante pour provoquer un déséquilibre thermique important du dispositif de surveillance, lorsque le signal délivré par le système acquiert une pente (ou une variation) au moins égale à celle visualisée sur la figure ci-dessus.

Comme nous l'avons déjà exposé dans le paragraphe 3.11, l'originalité de notre dispositif de surveillance vient du fait que <u>la détection se fonde sur une variation absolue</u> du signal délivré par le capteur en temps réel et non sur un franchissement de seuil.

En situation de repos, soit en équilibre thermique, le détecteur émet un signal de plancher présentant des fluctuations relativement faibles dues aux bruits du dispositif et de l'ambiant, comparées à une fluctuation correspondant à une vraie intrusion.

Lors d'une intrusion par une présence humaine, on obtient un pic positif ou négatif de forte amplitude causé par une variation de flux importante. Nous avons alors établi *une détection sur la mesure de cette variation de flux* et non pas sur le franchissement d'un niveau de flux.

Dans l'exemple, le relevé montre un pic de détection correspondant à la pénétration d'une personne dans la zone de détection et effectuant un passage normal.

Le pic est présenté pour une distance entre la personne et le foyer de la zone (parabole) de quatre mètres.

On remarque que le signal obtenu est aisément détectable grâce notamment au temps de réponse rapide du détecteur et à la très grande sensibilité autorisée par la combinaison du capteur et de son concentrateur du type à réflexion.

Le système de surveillance fournit un signal de détection causé par une modification, au niveau du détecteur, du bilan thermique entre le rayonnement reçu et le rayonnement réémis. La présence d'un intrus dans le champ de détection constitue une modification de la cartographie thermique de la zone surveillée, soit par le fait d'un apport en chaleur (cas le plus probable), soit par l'occultation d'une source de chaleur, ce qui peut être le cas dans un site industriel.

<u>Remarque</u>: Dans l'exemple ici présenté, la variation de flux étant négative, on peut dire que la température de l'intrus est inférieure à la température moyenne de la surface qu'il cache.

Nous avons vu dans le chapitre III que le système d'acquisition et de traitement de signaux SOMAT permet de lire en temps réel seize voies en parallèle. Le processeur du SOMAT effectue à une cadence d'échantillonnage préétablie des moyennes x et y, qui se suivent, de points d'acquisition mémorisés sur chacune des voies. Il peut alors faire une différence de ces deux moyennes x et y, puis comparer cette différence absolue à une valeur seuil A que nous pouvons définir comme étant le niveau d'alarme.

Soit :



La difficulté du réglage de l'alarme réside dans le nombre et le choix des paramètres présents qui sont la fréquence d'acquisition (soit l'échantillonnage), le nombre de valeurs mémorisées pour la moyenne x, le nombre de valeurs mémorisées pour la moyenne y, et la valeur seuil qui sera comparée à la différence absolue des deux moyennes x et y, et qui servira à déclencher une alarme.

Nous nous sommes fixé après plusieurs essais une cadence de vingt échantillons par seconde étant donné qu'en mode direct, c'est-à-dire lorsque l'on visualise sur l'écran de l'ordinateur la réponse d'une parabole, la cadence d'échantillonnage est automatiquement calée sur celle-ci (soit une valeur mémorisée toutes les 50 millisecondes). Elle permet au processeur de traiter et de suivre sans problème seize voies simultanément.

Après un certain nombre de premiers réglages d'alarme, ce choix de fréquence d'acquisition semble tout à fait juste car le processeur arrive à traiter toutes les fonctions nécessaires à l'alarme et la fréquence d'échantillonnage correspond à celle des fréquences d'intrusion humaine comme nous l'avons vu dans le premier chapitre de cette thèse.

Après avoir fixé cette cadence d'échantillonnage, un premier enregistrement en mode direct nous a donné l'évolution du signal délivré par une parabole, fourni et visualisé sur la figure précédente une intrusion humaine dans une zone contrôlée, ainsi que la liste des valeurs mémorisées toutes les cinquante millisecondes sur la voie 109 (voir tableau n°14 en annexe 17).

A partir de ces valeurs et de la pente visualisée, nous pouvons considérer que l'évolution du signal du à une intrusion s'établit sur 400 ms, soit sur huit valeurs d'acquisition.

Ces huit valeurs donnent une pente suffisante pour définir une alarme et permettre de la mémoriser.

Tout l'enregistrement est une série de valeurs mémorisées toutes les 50 ms. Si on décide d'établir une fonction détection d'alarme sur 8 points d'acquisition, le calcul se fait de 8 points en 8 points, décalé d'un pas d'acquisition pour chaque traitement de moyenne absolue.



Sur chaque groupe de huit points, il faut réaliser deux moyennes x et y parmi ces valeurs et en faire une différence absolue. Sachant qu'il est possible de faire varier les moyennes x et y, et que les moyennes absolues se suivent toutes décalées de un pas d'acquisition, nous avons obtenu plusieurs tableaux et courbes de moyennes absolues selon les valeurs données à x et à y.

L'objectif de ces calculs est de voir quelles sont les valeurs absolues de différences de moyennes qui ont le plus d'écart d'amplitude entre valeur minimale et valeur maximale.


Figure 145 - Evolution de la moyenne absolue sur 8 points en fixant les paramètres x = 1 et y = 7



Figure 146 - Evolution de la moyenne absolue sur 8 points en fixant les paramètres x = 7 et y = 1



Figure 147 - Evolution de la moyenne absolue sur 8 points en fixant les paramètres x = 2 et y = 6



Figure 148 - Evolution de la moyenne absolue sur 8 points en fixant les paramètres x = 6 et y = 2



Figure 149 - Evolution de la moyenne absolue sur 8 points en fixant les paramètres x = 3 et y = 5



Figure 150 - Evolution de la moyenne absolue sur 8 points en fixant les paramètres x = 5 et y = 3



Figure 151 - Evolution de la moyenne absolue sur 8 points en fixant les paramètres x = 4 et y = 4

Les résultats mathématiques des moyennes absolues pour différentes valeurs données à x et à y nous fournissent tous les rapports " signal / bruit " suivants:

pour M1 - M7, S/B = 0.1147/0.0091 = 12.6pour M7' - M1', S/B = 0.0854/0.0070 = 12.2pour M2 - M6, S/B = 0.1160/0.0045 = 25.77pour M6' - M2', S/B = 0.1107/0.0037 = 29.91pour M3 - M5, S/B = 0.1144/0.0036 = 31.77pour M5' - M3', S/B = 0.1121/0.0021 = 53.38pour M4 - M4, S/B = 0.1141/0.0018 = 63.39 Ces résultats montrent clairement que plus les valeurs données à x et à y se rapprochent l'une de l'autre, plus le rapport signal sur bruit est élevé. C'est-à-dire que hors détection, le signal a peu de fluctuations dues aux bruits extérieurs et en détection l'évolution du signal est très importante. Ce raisonnement est valable naturellement sur un court temps d'acquisition lorsque l'on a une intrusion puisque, en fait, le signal évolue constamment en fonction de l'équilibre thermique établi au niveau du capteur.

Ces constatations sont plus clairement observées sur les courbes correspondant aux calculs des moyennes absolues. Les courbes obtenues en fonction du temps sont représentées sur les figures précédentes avec x et y comme paramètres pour les moyennes, et il est facile de constater visuellement les résultats de l'analyse des moyennes.

On remarque que le meilleur rapport signal sur bruit est celui de la moyenne absolue lorsque la moyenne x est égale à la moyenne y.

Les calculs obtenus par les valeurs mémorisées et l'analyse des résultats des moyennes absolues nous ont permis d'arriver à cette remarque sur le rapport signal sur bruit en considérant à l'origine que huit valeurs d'acquisition sont suffisantes pour définir une alarme et permettre de la mémoriser.

L'optimisation de ce rapport signal sur bruit obtenu par calculs nécessite une optimisation de cette hypothèse fondamentale de pente suffisante pour considérer et définir une alarme.

Compte tenu qu'en considérant comme suffisantes huit valeurs d'acquisition dans l'évolution du signal due à une intrusion pour définir une alarme et que nous arrivons au meilleur rapport signal sur bruit lorsque la moyenne x est égale à la moyenne y, il s'avère nécessaire de comparer les résultats de la simulation numérique de ce paramètre "nombre de valeurs d'acquisition suffisantes".



Figure 152 - Pic de détection dû à une intrusion sur la parabole n°109

Figure 153 - Evolution de la moyenne absolue sur 4 points en fixant les paramètres x = 2 et y = 2.



Figure 154 - Evolution de la moyenne absolue sur 6 points en fixant les paramètres x = 3 et y = 3

Figure 155 - Evolution de la moyenne absolue sur 8 points en fixant les paramètres x = 4 et y = 4



223

Figure 157 - Evolution de la moyenne absolue sur 12 points en fixant les paramètres x = 6 et y = 6



Figure 158 - Evolution de la moyenne absolue sur 14 points en fixant les paramètres x = 7 et y = 7

Figure 159 - Evolution de la moyenne absolue sur 16 points en fixant les paramètres x = 8 et y = 8



Figure 160 - Evolution de la moyenne absolue sur 20 points en fixant les paramètres x = 9 et y = 9

Figure 161 - Evolution de la moyenne absolue sur 20 points en fixant les paramètres x = 10 et y = 10

En appliquant les mêmes calculs pour les moyennes absolues aux données mémorisées lors d'une intrusion humaine par la parabole n°109, nous obtenons la liste de ces moyennes absolues dans le tableau 17 (voir annexe 17).

Ces résultats sont représentés par les différentes figures précédentes.

Les résultats mathématiques des moyennes absolues obtenues lorsque la moyenne "x" est égale à la moyenne "y" nous fournissent tous les rapports " signal / bruit " suivants :

| pour M2-M2,   | S / B = 0.0635 / 0.0097 = 6.55  |
|---------------|---------------------------------|
| pour M3-M3,   | S / B = 0.0903 / 0.0065 = 13.9  |
| pour M4-M4,   | S / B = 0.1141 / 0.0061 = 18.7  |
| pour M5-M5,   | S / B = 0.1348 / 0.0063 = 21.4  |
| pour M6-M6,   | S / B = 0.1518 / 0.0073 = 20.8  |
| pour M7-M7,   | S / B = 0.1575 / 0.0076 = 20.72 |
| pour M8-M8,   | S / B = 0.1758 / 0.0070 = 25.11 |
| pour M9-M9,   | S / B = 0.1845 / 0.0065 = 28.38 |
| pour M10-M10, | S / B = 0.1914 / 0.0056= 34.18  |

On remarque que ce rapport augmente jusqu'à M5-M5, puis baisse un peu avant de remonter fortement comme nous le montre la figure suivante.



Figure 162 - Evolution du rapport S / B en fonction des paramètres "x" et "y"

Avec des valeurs égales et très élevées de moyenne "x" et de moyenne "y", nous constatons que le rapport signal sur bruit est meilleur qu'avec des valeurs basses.

Cela s'explique par le fait que plus le nombre de points d'acquisition dans le calcul de la moyenne absolue est important, plus la courbe des résultats de ces calculs est lissée et moins elle se confond avec le bruit du signal. On observe bien sur les relevés pour des valeurs x et y faibles que l'évolution de la moyenne absolue se détache moins du bruit que sur des relevés avec des valeurs x et y élevées.

Nous constatons que lorsque les valeurs de x et de y sont élevées le rapport S / B est important mais aussi que la réponse à l'intrusion est beaucoup plus lente qu'avec des faibles valeurs de x et de y. C'est-à-dire que l'information alarme se fait savoir après la détection.

On peut donc conclure que plus la moyenne absolue se fait sur un nombre de données élevées, plus l'intrusion est décelable car elle se détache du bruit du signal, mais plus la connaissance de cette détection est retardée dans le temps.

Dans le cas de moyennes absolues sur un nombre de données élevées, il est difficile de dissocier une intrusion humaine très lente avec une variation lente de l'équilibre thermique due à une variation de la température de l'ambiant.

Il faut donc accepter un compromis entre la vitesse de détection d'une intrusion et la certitude que l'alarme correspond à une vraie intrusion dans la zone surveillée.

Etant donné que pour notre application la vitesse de détection n'est pas trop importante vis-à-vis de la connaissance d'une vraie alarme, nous avons réglé les valeurs de x et de y à 5 afin d'avoir un rapport signal sur bruit élevé tout en permettant la connaissance d'une vraie alarme (5x 50ms) un quart de seconde après le début de celle-ci.

De nombreux enregistrements ont été effectués avec ce réglage de moyenne absolue à 10, et avec x = 5 et y = 5. En fixant notre seuil d'alarme A à 0,12 V, c'est-à-dire en considérant une détection et en la mémorisant lorsque la moyenne absolue est supérieure à ce seuil "A", nous avons réussi à repérer et garder uniquement les alarmes correspondant aux intrusions humaines.

#### **3.14.3. Résultats expérimentaux**

En dépit des conditions difficiles de travail et d'installation, nous avons connecté dans les trois pièces de stockage choisies les paraboles aux câbles déjà préinstallés par le site, et relié les câbles de sortie de ces paraboles à la centrale d'acquisitions Somat présentée précédemment, elle-même reliée à l'ordinateur portable permettant de traiter et de présenter les alarmes dans un tableau.

Après avoir focalisé chaque parabole dans chaque salle de stockage à l'aide de son pied support en fonction de la zone à contrôler, nous avons effectué les réglages des seuils de détection et les niveaux signal sur bruit comme nous l'expliquons dans le paragraphe 3.14.2.

Le grand problème rencontré lors de ces réglages a été l'illumination et le système de ventilation des salles. En effet, la forte chaleur dégagée par les spots lumineux et le faible éloignement de certains de ceux-ci avec quelques paraboles perturbent considérablement la surveillance. Malgré cela, les niveaux d'alarme ont été réglés mais n'ont pas pu être qualifiés dans le temps. Le contrôle des données et une évaluation des résultats nous permettra de valider ces réglages.

A partir d'un logiciel de présentation d'alarmes établi par la société Doerler Mesure d'après notre cahier des charges pour les inspecteurs de l'EURATOM de Luxembourg, le système de surveillance à distance détecte, traite et présente dans un tableau toutes les alarmes correspondant aux intrusions humaines dans chaque zone surveillée (voir annexe 18 pour la présentation du système).

#### **3.15. INSTALLATION DANS UNE FERME EXPERIMENTALE**

#### 3.15.1. Introduction

Après l'installation de plusieurs prototypes dans notre laboratoire de recherche illustrant la possibilité de mise en œuvre du concept inventif, nous avons constaté que ce nouveau système, permettant de surveiller à distance un objet ou un volume de dimensions finies tout en pouvant se déplacer autour de ce volume sous contrôle comme si on avait créé un mur virtuel, nous permet d'envisager son application vers des domaines autres que le nucléaire.

En effet, suivant les résultats obtenus des premiers essais, il apparaît que ce système n'est pas seulement utilisable pour la détection thermique, mais il pourrait être utilisable pour des mesures thermiques. Grâce à l'association du fluxmètre thermique radiatif et de son concentrateur parabolique, certaines nouvelles applications semblent possibles en termes de mesure à distance de température et de flux thermique.

De ce fait, après l'intérêt porté par le département de Pathologie et de Production Animales de l'Université Autonome de Barcelone sur le système de détection à distance Syclop, une collaboration a été établie afin de faire " des essais d'orientation " dans une ferme expérimentale.



Figure 163 - Ferme expérimentale de l'Université Autonome Vétérinaire à Barcelone

## 3.15.2. Objectif de l'essai

L'agriculture a besoin de quelques nouveaux instruments afin d'étudier et d'optimiser la reproduction des animaux de ferme ainsi que le rendement animal tel que la production de lait, par exemple. Ces deux paramètres chez les animaux de ferme sont étroitement liés :

- aux moments où l'animal s'alimente
- à la quantité et au type d'aliment
- aux moments où l'animal rumine
- à la période de gestation
- à la période de lactation (traite), etc...

Ces différents facteurs sont corrélés avec la libération de chaleur provenant du métabolisme de l'animal.

La production de chaleur chez les ruminants se trouve dans "la chaîne énergétique" des produits terminaux de la digestion (Réf.28). Afin de comprendre le bilan énergétique de la digestion et de voir à quel niveau placer notre dispositif de contrôle, nous présentons le schéma général d'utilisation de l'énergie de l'aliment par l'animal (Réf.28 et Réf.29).



Figure 164 - Utilisation de l'énergie des aliments par les ruminants

Sans chercher à détailler les principales causes de variation de chaleur énergétique des aliments et d'aborder les méthodes de leur détermination et estimation du type

calorimétrique, respiratoire ou chimique, le schéma précédent nous permet de faire un bilan synoptique énergétique de la digestion chez les ruminants.

La digestion microbienne dans les réservoirs gastriques et le gros intestin ainsi que la digestion enzymatique dans l'intestin grêle aboutissent à la production de composés qui sont soit absorbés (acides gras volatils, acides aminés, glucose, acides gras, bases et sucres dérivant de la digestion des acides nucléiques), soit éliminés (gaz carbonique et méthane essentillement).

Les trois quarts environ de l'énergie apparemment digestible (énergie ingérée énergie des fèces) disparaissent au niveau des réservoirs digestifs (rumen et gros intestin) et correspondent donc à des composés d'origine fermentaire. Cependant pour obtenir l'énergie disponible pour l'organisme, c'est-à-dire l'apport énergétique des nutriments absorbés (énergie stockée et libérée sous forme principalement d'ATP), il faut soustraire de l'énergie apparemment digestible l'énergie perdue sous forme de méthane, des urines et de chaleur des fermentations. Finalement, l'énergie nette d'engraissement ou de production est définie comme la différence entre l'énergie nette d'entretien (énergie puisée dans les réserves corporelles de l'animal à jeun et nécessaire au fonctionnement des tissus et organes et à son activité physique) et les pertes d'extra-chaleur du type entretien, lactation ou production.

Notre objectif n'est pas d'établir un bilan énergétique qualitatif et de mesurer les variations de la production de chaleur du ruminant en fonction de la quantité d'énergie métabolisable ingérée. En effet de nombreux facteurs rentrent en jeu dans la production et la répartition des énergies générées. Le pourcentage et la répartition des énergies produites est variable en fonction des caractéristiques de la ration du niveau alimentaire (composition, présentation) et de l'âge des animaux. Les fourrages condensés ou longs, les rations broyées, agglomérées ou mixtes, l'état de lactation ou de gestation, par exemple, influencent considérablement la balance énergétique et nécessitent une connaisance approfondie de la nutrition et de l'alimentation des ruminants.

Notre essai restant d'orientation, nous avons cherché à voir ce que nous pourrions mesurer sur un ruminant à l'aide de notre système parabolique. Les deux sources principales de chaleur chez les ruminants sont le métabolisme basal (en condition de jeûne) et l'extra-chaleur (c'est-à-dire une production de chaleur causée par les processus de la digestion et de la synthèse des productions telles que le lait, l'engraissement, etc...). Après manger, par exemple, il est constaté que la température corporelle de l'animal augmente. De même, la température d'une vache en lactation est supérieure à celle d'une vache "séche". La température générale de l'animal peut même être augmentée avec l'activité physique.

Pour étudier les productions de chaleur et optimiser ces différents phénomènes chez le ruminant, il est nécessaire d'étudier les températures locales de l'animal ou d'utiliser notre système de contrôle afin de voir s'il est capable de mesurer en temps réel le flux de chaleur généré par l'animal et si ce flux de chaleur est corrélé avec les processus de l'alimentation et du métabolisme.

#### 3.15.3. Relevés de température corporelle

Afin de voir s'il y a une corrélation entre les productions de chaleur chez la vache et les températures relevés sur l'animal, différentes mesures de température ont été réalisés sur

une journée. Le tableau suivant rassemble les mesures effectuées sur une vache en lactation située dans son box. (complété par d'autres mesures en annexes 20)

| Contr | ol de te | mperat | turas: Va | ica 3 (en | lactació | ón, 20 1/0 | d )  | 10-11/abril/97                  |
|-------|----------|--------|-----------|-----------|----------|------------|------|---------------------------------|
|       | media    | Tmercu | urio      | Tdigital  |          | Tbrauns    | scan | Observaciones                   |
| Hora  | Tamb     | TMr    | TMv       | TDr       | TDv      | TSr        | TSv  | (r=rectal, v=vaginal))          |
| 7:00  | 13.5     | 38.4   | 38.6      | 38.49     | 38.71    | 39.9       | 40.4 | Després munyida/menjant         |
| 8:00  | 13.0     | 38.4   | 38.4      | 38.38     | 38.39    | 40         | 40   | (après la traite / en mangeant) |
| 9:00  | 13.0     | 38.3   | 38.2      | 38.55     | 38.15    | 39.7       | 39.6 |                                 |
| 10:00 | 14.0     | 38.4   | 38.2      | 38.38     | 38.36    | 40.2       | 39.3 |                                 |
| 11:00 |          |        |           |           |          |            |      |                                 |
| 12:00 |          |        |           |           |          |            |      |                                 |
| 13:00 | 18.0     | 38.3   | 38.2      | 38.38     | 38.16    | 39.7       | 40.2 |                                 |
| 14:00 | 18.0     | 38.4   | 38.2      | 38.36     | 38.22    | 39         | 39.5 |                                 |
| 15:00 | 18.0     | 38.3   | 38.4      | 38.17     | 38.36    | 39.9       | 40.1 | Després orinar (TM∨)            |
| 16:00 | 18.0     | 38     | 38.1      | 38.05     | 38.12    | 39.3       | 39.9 |                                 |
| 17:00 | 18.0     | 38.5   | 38.2      | 38.29     | 38.15    | 39.7       | 39.9 |                                 |
| 18:00 | 18.0     | 38.2   | 38.4      | 38.18     | 38.19    | 39.6       | 39.8 |                                 |
| 19:00 | 19.0     | 38.5   | 38.3      | 38.31     | 38.28    | 38.8       | 40.1 |                                 |
| 20:00 | 19.0     | 38.3   | 38.3      | 38.23     | 38.22    | 40.1       | 39.8 |                                 |
| 21:00 |          |        |           |           |          |            |      |                                 |
| 22:00 | 18.0     | 38.2   | 38.7      | 38.19     | 38.58    | 39.6       | 40.6 | Orina (TMv) (urine)             |
| 23:00 | 18.0     | 38.3   | 38.4      | 38.04     | 38.21    | 39         | 40   |                                 |
| 0:00  | 18.0     | 38.4   | 38.3      | 38.28     | 38.31    | 39.5       | 39.4 |                                 |
| 1:00  |          |        |           |           |          |            | _    |                                 |
| 2:00  |          |        |           |           |          |            |      |                                 |
| 3:00  |          |        |           |           |          |            |      |                                 |
| 4:00  |          |        |           |           |          |            |      |                                 |
| 5:00  |          |        |           |           |          |            |      |                                 |
| 6:00  |          |        |           |           |          |            |      |                                 |
| 7:00  | 14.0     | 38.5   | 38.7      | 38.41     | 38.75    | 39.2       | 39.7 | Defecació (TMr)/ Abans munyida  |
| 8:00  | 14.0     | 38.5   | 38.5      | 38.45     | 38.58    | 38.8       | 40.2 | Abans munyida (avant la traite) |
| 9:00  | 16.0     | 38.7   | 38.4      | 38.25     | 38.28    | 39.6       | 39.6 |                                 |
| 10:00 | 18.0     | 38.5   | 38.2      | 38.45     | 38.18    | 39.1       | 39.9 |                                 |
| 11:00 |          |        |           |           |          |            |      |                                 |
| 12:00 |          |        |           |           |          |            |      |                                 |
| 13:00 | 21.0     | 37.9   | 38.2      | 37.86     | 38.09    | 38.6       | 39.7 |                                 |
| 14:00 | 22.0     | 38.2   | 38.2      | 38.06     | 38.08    | 38.8       | 39.9 |                                 |
| 15:00 | 23.0     | 37.8   | 38.4      | 37.99     | 37.98    | 38.8       | 39.3 |                                 |
| 16:00 | 23.0     | 38     | 38.5      | 37.96     | 38.46    | 38.1       | 39.5 | Orina (TM∨)                     |

Tableau 21 - Contrôle de températures pour la vache n°3



Figure 165 - Relevés de température pour la vache n°3 au cours d'une journée

Les relevés précédents établis à l'aide d'un thermomètre à mercure, d'un thermomètre digital et d'un thermomètre "braunscan" (type pistolet auriculaire) ne nous permettent pas de conclure positivement. En effet nous remarquons que la mesure de la température corporelle représente mal la production de chaleur qui se voit conditionnée par la dissipation (affectée par la température ambiante), par les erreurs de mesure et par la représentativité fonction de l'échantillonnage.

## 3.15.4. Installation dans une ferme expérimentale



Figure166 - Une parabole circulaire focalisée sur une vache

Une première installation de parabole a été réalisée afin de voir s'il n'y aurait pas une corrélation apparente entre le flux détecté par le système parabolique et le comportement physiologique d'un animal de ferme: une vache, un mouton, une chèvre... La configuration de l'installation dans la ferme expérimentale est la suivante: dans la grange choisie, chaque vache est placée dans un box où l'animal est debout ou couché. Une parabole a été installée à 1,50m au-dessus de la vache mais légèrement décalée pour ne pas



Figure 167 - Installation du système dans la ferme



Figure 168 - Vue de la parabole

être perturbée par les remontées d'air chaud provenant de l'animal. Deux afficheurs ont été installés afin de visualiser la température proche de la surface dorsale de l'animal et la température voisine de notre système parabolique.



Figure 169 - Lecteurs de température



Figure 170 - Système d'enregistrement

Dans une salle de mesure à l'écart des animaux, nous avons installé un afficheur indiquant le flux délivré par le capteur en microvolts et un enregistreur permettant de relever les températures et le signal fourni par la parabole sur papier.

Après une première installation de parabole sur une vache faite en juillet 1995, voici des enregistrements types que nous avons pu obtenir :



Figure 171 - Enregistrements pour une vache dans la ferme expérimentale

Les premières remarques que l'on peut avancer d'après les résultats de ces enregistrements sont les suivantes:

- on peut voir très facilement si l'animal est debout ou couché
- lorsque la vache est couchée, le flux qu'elle dégage est beaucoup plus stable
- il semble que lorsque l'animal mange ou boit, les variations de son flux dégagé sont plus faibles
- pendant la traite, le flux dégagé apparaît plus stable
- après la traite, la température de l'animal chute un peu et se stabilise fortement pendant 5 bonnes minutes. (conséquence de perte de masse : Q (chaleur) = m (masse de lait#30L). qe (chaleur spécifique du lait # 0,9)
- il apparaît que la vache est très sensible aux perturbations extérieures du type présence humaine, porte qui claque, contrariété du fait de son isolement..
- on peut remarquer que plus la température de l'animal ou du local augmente, moins on détecte de flux. Cela est normal puisqu'en juillet il fait chaud en Espagne, donc le capteur est à une température élevée. En effet, plus la température de la surface surveillée se rapproche de la température du capteur, plus cette différence de température s'amoindrit et moins le système délivre de signal (flux).

Toutes ces remarques semblent intéressantes dans le sens où il est possible à l'aide d'une simple parabole focalisant une vache de décrire son comportement, c'est-à-dire ses activités; son positionnement debout ou couchée, les moments où elle mange...

On peut dire que cet essai d'orientation reste une première approche mais qu'il nous fournit déjà des renseignements utilisables et qu'il serait intéressant de continuer l'expérience en ayant la possibilité de relever toutes les activités de l'animal au cours de la journée. Nous avons aussi constaté qu'il est nécessaire de protéger la parabole, à l'aide d'un bas par exemple, contre les excréments de mouche qui mettent très vite hors de fonctionnement le système comme nous pouvons le voir sur la photo suivante.



Figure 172 - Parabole sans protection mise hors fonctionnement par les mouches

# CONCLUSION

L'objectif initial de notre travail était d'évaluer l'intérêt d'appliquer les méthodes fluxmétriques au domaine des Garanties Nucléaires. L'application choisie était en relation avec le problème de la surveillance passive des sites de stockage de matières fissiles.

Notre travail de thèse n'a pas été d'analyser un capteur de flux radiatif ni de réaliser le meilleur système de détection possible, mais plutôt de valider un nouveau principe de détection en vue de réaliser une opération de démonstration dans les conditions normales d'utilisation.

Dans la première partie de notre travail nous avons réalisé une étude bibliographique ayant pour objet de présenter la technologie des capteurs fluxmétriques et de la comparer avec les détecteurs du type à semi-conducteurs, pyroélectriques ou à ultrasons généralement emploiés dans les systèmes traditionnels de surveillance passive.

L'objectif de cette partie était de montrer que le fluxmètre thermique est un capteur de bilan qui se différencie des capteurs ponctuels habituellement mis en œuvre dans un système de détection de présence. Nous avons montré l'intérêt d'adapter ces capteurs à un concentrateur de forme non traditionnelle. L'intérêt essentiel de la technologie est de pouvoir s'adapter à toute configuration expérimentale et de ne pas nécessiter d'encapsulation.

A l'origine même du projet, en début d'année 1995, les dimensions minimales des fluxmètres qui nous étaient proposés par le laboratoire L.C.I. et donc imposées pour notre étude ne pouvaient pas être inférieures au centimètre carré. Cette condition, qui apparaissait comme un handicap, nous a été favorable pour surveiller des surfaces importantes et apporter une solution en disposant ces capteurs à surface non nulle dans des réflecteurs du type parabolique.

Puis nous avons décrit dans une seconde partie la conception et la réalisation de deux prototypes de systèmes paraboliques. En pratique, pour des raisons de coût, pour ne pas atténuer le rayonnement à détecter nous avons choisi de réaliser un réflecteur en métal recouvert d'une microcouche d'or pour réaliser notre premier prototype de système de détection. Dans ce chapitre nous avons expliqué pourquoi et comment le concentrateur de rayonnement infrarouge circulaire ou rectangulaire adéquat doit être choisi en fonction de l'importance du volume à surveiller / allant du simple objet à de très grandes zones de dimensions finies /, de la distance de détection et du degré de sensibilité des alarmes désirées. Dans la plupart des applications, la mobilité et la défocalisation du capteur par rapport au réflecteur permettent que celui-ci soit entièrement éclairé par le flux radiatif incident.

Grâce à l'association fluxmètre planaire et concentrateur de rayonnement thermique, il nous a été possible de détecter toute modification de l'équilibre thermique d'un volume bien défini causée, par exemple, par une intrusion humaine dans une zone surveillée. A partir de caractérisations, de nombreux essais et résultats expérimentaux présentés dans une troisième partie, nous avons constaté que la précision et la linéarité des capteurs et de l'électronique utilisés ne sont pas astreignantes étant donné que *nous ne devons pas faire une mesure de flux* mais une *détection de déséquilibre thermique*. C'est-àdire que nous ne mesurons pas un niveau de flux pour le comparer à un seuil afin de déclencher une alarme, mais nous regardons l'évolution de la pente du signal délivré par le système pour l'assimiler ou non à une intrusion dans une zone surveillée.

Il a été constaté que, en fonction de l'angle de regard et de l'éloignement entre la source infrarouge intrus et le détecteur, le diagramme de sensibilité des concentrateurs paraboliques est défini différemment et qu'il faut tenir compte de ces caractéristiques avant toute installation.

Nous avons remarqué que plus la détection se fait à une distance importante plus l'énergie est concentrée, c'est-à-dire qu'elle se disperse moins angulairement, ce qui est tout à fait logique puisque la source infrarouge devient de plus en plus ponctuelle avec son éloignement. Le niveau de détection dépend, bien sûr, de la distance d'intrusion mais aussi du nombre de capteurs installés ainsi que de la vitesse de déplacement de l'intrus. Il a été constaté qu'à une distance au moins 4m les pics (niveaux) de détection sont plus élevés lorsque la vitesse d'intrusion est plus lente: ceci s'explique par le rayonnement radiatif ou le déséquilibre thermique plus important provoqué par la présence plus longue de l'intrus dans la zone surveillée.

L'application consistait à pouvoir détecter une intrusion dans un milieu éventuellement soumis à des perturbations (déplacement humain, climatisation, ouverture de porte, éclairage...).

Etant donné que notre système est toujours en déséquilibre thermique, que celui-ci évolue constamment en fonction des variations de température du milieu, et que le capteur surveille toute la bande de l'infrarouge moyen, nous avons basé <u>la détection sur une</u> <u>variation absolue</u> du signal délivré par le capteur en temps réel et non sur un franchissement de seuil.

Lors d'une intrusion par une présence humaine ou un objet matériel, on obtient un pic positif ou négatif de forte amplitude causé par une variation de flux importante. Nous avons alors établi *une détection sur la mesure de cette variation de flux* et non pas sur le franchissement d'un niveau de flux.

Le fluxmètre thermique qui fournit une information représentative du déséquilibre énergétique entre un système et son environnement est idéal pour prendre en compte les variations de charge thermique importantes provoquées par des intrusions et traduites par des alarmes. Toute variation de température causée par des apports ou déperditions d'énergie lors d'une intrusion est détectée par notre système.

En théorie on pense pouvoir remplacer un objet à une certaine température par un autre. En pratique il est impossible d'avoir une même surface homogène en température capable de s'introduire dans une zone surveillée à distance. Une série d'expériences a été menée pour tenter de frauder notre système de surveillance, celles-ci sont restées vaines. Nous avons essayé de pénétrer dans la zone surveillée en entrant très rapidemment, normalement, lentement, habillé de noir ou de blanc, peu ou fortement vêtu, isolé avec des cartons ; mais le système a détecté chacune des tentatives d'intrusion.

Etant donné qu'il est quasi impossible de connaître la température de chaque point de la surface occultée par l'intrus, et que la température de l'intrus doit être égale à cette température moyenne de la surface qu'il cache afin que le bilan thermique reste stable, il est extrêmement difficile de frauder notre dispositif.

Toutes les caractéristiques spécifiques et les avantages que présente notre solution nous permettent de constater qu'en fait notre nouveau système de surveillance à distance apporte une solution nouvelle au problème de la surveillance passive et répond pleinement au problème posé initialement. Mais il est important de savoir que notre système ne réalise pas une détection dans le sens d'une analyse des infrarouges, mais seulement par une modification de l'équilibre thermique dans la zone surveillée.

Après le dépôt de brevet début 1996 au nom de la Commission des Communautés Européennes du système de surveillance à distance par voie thermique, une application concrète a été proposée par l'agence de contrôle européenne (EURATOM) et une première installation de prototypes a été réalisée dans un site de stockage de matières fissiles.

Les problèmes rencontrés lors des réglages in situ étaient dus à l'influence de l'illumination et du système de ventilation des salles à contrôler. En effet, la forte chaleur dégagée par les spots lumineux et le faible éloignement de certains de ceux-ci avec quelques paraboles perturbent considérablement la surveillance. Malgré cela, les niveaux d'alarme ont été réglés mais n'ont pas pu être qualifiés dans le temps. Le contrôle des données et une évaluation des résultats nous permettra de valider ces réglages.

Nous pensons donc que nous avons réussi à appliquer la fluxmétrie dans le domaine des Garanties Nucléaires mais aussi que, grâce à la continuation du développement technique et à partir d'installations sur sites réels de prototypes expérimentaux, nous devrions arriver à satisfaire les utilisateurs dans le domaine du contrôle nucléaire et étendre l'emploi de cette technologie vers d'autres domaines telles que industrielle, bancaire, agricole ou culturelle.

D'ailleurs un projet de valorisation de cette technologie soutenue par la DGXIII à Luxembourg est en cours de réalisation. Une collaboration a été établie avec le département de pathologie et de reproduction animales de l'Université Vétérinaire Autonome de Barcelone afin de continuer et faire " des essais d'orientation " dans une ferme expérimentale. Il est envisagé d'installer des prototypes dans un musée afin de faire de la surveillance ponctuelle et de tester notre dispositif comme moyen de surveillance innovatif.

# **BIBLIOGRAPHIE**

.

| /1/  | ANDRE B. DE VRIENDT<br>"La transmission de la chaleur" (Vol. 2), 3 <sup>ème</sup> édition 1992, Ed.Gaëtan Morin  |
|------|--|
| /2/  | G. GAUSSORGUES<br>"La thermografie infrarouge", Editions Technique et Documentation (1980)   |
| /3/  | MIYAUCHI, Sensor Gijyutsu, p. 45, (15. Oct. 1995)  |
| /4/  | HAMAMATSU Photonics Technical Information SD - 12 Jul. 93  |
| /5/  | NISHI Y., GONZALES R. R., GAGGE A. P.<br>"Direct measurement of clothing heat transfer properties during sensible and insensible<br>heat exchange with thermal environment", Ed. ASHRAE Trans 81 |
| /6/  | K. CENA ET J. A. CLARK<br>"Bioengineering, thermal physiology and comfort", Ed. Wroclaw Technical University<br>Press 1980   |
| /7/  | De H. A. Gebbie, et al., Proc. Roy. Soc., p. 87, A206 (1951)   |
| /8/  | E. LACLAIS<br>"L'Alarme? Pas de panique! ", Ed.Publitronic, 1 <sup>ère</sup> édition 1995  |
| /9/  | PATRICK GUELLE<br>"Alarme et surveillance à distance", Editions Techniques et Scientifiques Françaises,<br>ETSF, 1 <sup>ère</sup> édition 1991   |
| /10/ | Rapport (30-52) du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées pour le Ministère de l'Urbanisme et du Logement - Ministère des Transports (Avril 1982)  |
| /11/ | PLESSEY, Pyroelectric detectors, applications notes, optoelectronic and microwave Ltd, GB publication ps. 6011 (1979)  |
| /12/ | S. T. LIU, L. DONNALD, Pyroelectric detectors and material, IEEE Vol 66 (1978)   |
| /13/ | G. BAKER, D. CHARLETON<br>"High performances pyroelectric detectors, R. Elec. Energ. 42 (1972)   |
| /14/ | HAMAMATSU<br>"Characteristics and Use of Infrared Detectors", Information technique SD - 12 Jul. 93  |
| /15/ | GEORGES ASCH et collaborateurs<br>"Les capteurs en instrumentation industrielle", Ed. Duvod,(1989)   |

/16/ THERY P., KOUGBEADJO R. A. ET LECLERCO D. "Mesure simultanée de flux et température", Journées industrielles de la Ste de Physique, Toulouse (F), Mars 1980 /17/ LECLERCQ D. "Contribution à l'étude de l'effet Peltier dans les circuits bimétalliques à électrodes plaquées. Application à la conception de nouveaux capteurs", Thèse d'Etat n° 792, Université des Sc. et Tech. de Lille, Flandres-Artois (Fr), (1991) GÜTHS S. /18/ "Anémomètre à effet Peltier et fluxmètre thermique", Thèse de doctorat 1994, Université d'Artois de Béthune (Fr) /19/ THERY P. "Mesure de flux thermiques, un concept trop méconnu", Revue Mesure 677 -Septembre 1995 Ealing Catalogue 1994-1995 /20/ (21)A. MOUSSA, P. PONSONNET "Optique" cours de physique, éditions Desvigne, tome 1, ISBN 2.7037.0054.7 /22/ Catalogue Micro - Contrôle 1995 : Composants optiques /23/ Catalogue Melles Griot : Image générée à l'ordinateur, pris du catalogue Optique, Optomécanique, Laser et Instrumentation, Ed. Mai 1995 /24/ P. FLEURY, J. P. MATHIEU : "Lumière", Ed. Eyrolles, Paris, (1979) /25/ LANDAU & LIFCHITZ - "Cours de Physique Théorique, Mécanique", Ed. Mir. (1981) /26/ Notice du Perthometer M4P /27/ Rapport d'essai du Laboratoire National d'essais (annexe 19), N° DEMT/1, Dossier 6030417, (1996) /28/ R. JARRIGE (Editeur) : "L'alimentation des ruminants" Editions INRA, Versailles. 597 pp, INRA(1978) C. DE BLAS, G. GONZALEZ et A. ARGAMENTERIA: "Nutrición y alimentación /29/ del ganado" Mundi-Prensa, Madrid. 543 pp, (1987) /30/ P.GUILMAIN - "Détection de sources infrarouges à longues distances, conception et réalisation d'un dispositif directionnel destiné à la localisation des incendies de forêt"-Lille(Fr.) - Rapport DEA au Laboratoire L.C.I. P3-Villeneuve d'Ascq - Juillet 1993.

- /31/ P.GUILMAIN, C.KORN, M.CUYPERS, P.THERY "Heat flow sensor parabola used for surveillance in safeguards" - Posters - European Safeguards Research and Development Association - Congrès ESARDA d'Aix-La-Chapelle 9-11 Mai1995 Ed.Luxembourg /Office for Official Publications of the European Communities, 1995
- /32/ P.GUILMAIN, C.KORN, P.THERY "Dispositif de détection de rayonnement thermique et appareil de détection de présence à base d'un tel dispositif." - Brevet (PCTFR97/00142) déposé par la Commission des Communautés Européennes. 1996
- /33/ P.GUILMAIN, C.KORN, M.CUYPERS, P.THERY "SYCLOP (System of Control of Locations and Objects by Parabola)" Bulletin Esarda n°26 ISSN 0392-3029-Ed. ESARDA, JRC Ispra (It), Mars 1996
- /34/ G.AZZALIN, C.BUZZI, P.GUILMAIN, F.VAN PAEMEL, C.KORN
  "Qualification Tests on SYCLOP Detector" Test Report Note Technique N°.I-96-84- J.R.C. Ispra (Italy) - Juin 1996

<u>.</u>

# LISTE DES FIGURES

| FIGURE 1  | Fluxmètre à paroi auxiliaire  |
|-----------|---|
| FIGURE 2  | Banc d'étalonnage   |
| FIGURE 3  | Thermopile planaire   |
| FIGURE 4  | Schéma d'un fluxmètre à gradient thermique tangentiel                                       |
| FIGURE 5  | Schéma des deux parties du circuit avant assemblage   |
| FIGURE 6  | Fluxmètre de Gardon   |
| FIGURE 7  | Spectre des ondes électromagnétiques  |
| FIGURE 8  | Corps noir de référence réalisé au C.C.R. d'Ispra   |
| FIGURE 9  | Facteurs d'émissivité e de différents objects   |
| FIGURE 10 | Loi de Planck   |
| FIGURE 11 | Schéma représentatif des échanges par rayonnement   |
| FIGURE 12 | Variation de température du milieu soumis à une variation en échelon du rayonnement absorbé |
| FIGURE 13 | Mesure de flux sur un élément   |
| FIGURE 14 | Schéma synoptique des échanges par rayonnement pour un capteur à deux fluxmètres thermiques |
| FIGURE 15 | Coupe transversale d'une cellule de fluxmètre radiatif                                      |
| FIGURE 16 | Absorption atmosphérique au dessus du niveau de la mer                                      |
| FIGURE 17 | Transmittance des systèmes optiques   |
| FIGURE 18 | Exemple de transmittance caractéristique pour un filtre passe-bande                         |
| FIGURE 19 | Un détecteur infrarouge passif et ses différentes lentilles de Fresnel                      |
| FIGURE 20 | Transmittance du polyéthylène   |
| FIGURE 21 | Caractéristiques d'une lentille de Fresnel  |
| FIGURE 22 | Caractéristiques de lentille de Fresnel   |
| FIGURE 23 | La zone de couverture d'un détecteur infrarouge passif dépend de la lentille qui l'équipe   |
| FIGURE 24 | Rideau  |
| FIGURE 25 | Réponse spectrale des détecteurs I.R.   |
| FIGURE 26 | Réponses spectrales théoriques des détecteurs thermiques et quantiques                      |
| FIGURE 27 | Relation entre D* et le pic de responsivité à une longueur d'onde                           |
| FIGURE 28 | Effet quantique   |
| FIGURE 29 | Relation entre l'énergie du Gap et la concentration intrinsèque                             |
| FIGURE 30 | Réponse spectrale   |
| FIGURE 31 | Rapport Signal / Bruit  |
| FIGURE 32 | Exemples d'empaquetage  |
| FIGURE 33 | Structure des niveaux   |
| FIGURE 34 | Effet phototension  |
| FIGURE 35 | Détecteur thermique idéal   |

- FIGURE 36 Modèles de détecteurs pyroélectriques
- FIGURE 37 Matériaux Pyroélectriques
- FIGURE 38 Constuction
- FIGURE 39 Présentation schématique de l'effet Pyroélectrique
- FIGURE 40 Thermopile à lames métalliques
- FIGURE 41 Thermopile de Schwarz
- FIGURE 42 Thermopile à couches minces
- FIGURE 43 Détecteurs thermiques à fluxmètre
- FIGURE 44 Emission Lambertienne
- FIGURE 45 Echange entre deux éléments de surface différentiels
- FIGURE 46 Echanges entre les éléments de surface de notre système de surveillance
- FIGURE 47 Eléments de surface de notre système de surveillance
- FIGURE 48 Dispositif de zones à surveiller par SYCLOP dans le laboratoire LaSCo
- FIGURE 49 Schéma synoptique du dispositif
- FIGURE 50 Parabolisation d'un miroir sphérique
- FIGURE 51 Focalisation des rayons incidents
- FIGURE 52 Angle d'ouverture de la parabole
- FIGURE 53 Fonction d'efficacité du système définissant un rayon d'ouverture J
- FIGURE 54 Principe de disposition des élements
- FIGURE 55 Zone en rouge à surveiller dans LaSCo
- FIGURE 56 Positionnement du capteur en fonction de l'angle de surveillance
- FIGURE 57 Surveillance de pot individuel par SYCLOP
- FIGURE 58 Concentrateur parabolique de flux radiatif incident
- FIGURE 59 Tracé de la parabole, méthode par points
- FIGURE 60 Schéma simplifié d'un détecteur circulaire
- FIGURE 61 Facteur de réflexion
- FIGURE 62 Mesure de la réflexion
- FIGURE 63 Mesure en réflexion des différents réflecteurs en fonction de la distance
- FIGURE 64 Ecart de signal détecté en pourcentage par rapport à l'or en fonction de la distance de mesure
- FIGURE 65 Mesures indexées sur l'or
- FIGURE 66 Influence du degré d'oxydation sur l'émissivité du cuivre
- FIGURE 67 Défauts macro et microgéométriques des surfaces
- FIGURE 68 Types de rugosités différentes
- FIGURE 69 Système de rugosité "E"
- FIGURE 70 Rugosité moyenne Ra
- FIGURE 71 Profondeur moyenne de rugosité Rz
- FIGURE 72 Capacité moyenne d'aplanissement Rpm
- FIGURE 73 Nombre de pics Pc

FIGURE 75Protocoles relevés pour diverses surfaces de matériauxFIGURE 76Niveau de bruit pour l'amplificateur TSC 900FIGURE 77Comparaison des niveaux de bruit du TSC 900 et du TLC 2654 avec un court-circuit en<br/>entréeFIGURE 78Temps de réponse du capteur (associé à l'amplificateur)FIGURE 79Réglage du gain d'amplificateur

Protocoles relevés pour diverses surfaces de matériaux

FIGURE 74

- FIGURE 80 Fem délivrée par SYCLOP en fonction de l'écart de température entre lui-même et une source distante de 1,6 m et pour gain d'amplification de 1000
- FIGURE 81 Support métallique sur lequel sont collés les capteurs
- FIGURE 82 Temps de réponse d'un capteur radiatif 10x10 collé sur un support métallique
- FIGURE 83 Temps de réponse d'un capteur radiatif 10x10 laissé à l'air libre
- FIGURE 84 Sensibilité moyenne avec barre d'incertitude à 1 $\sigma$
- FIGURE 85 Dispositif pour relever le diagramme de sensibilité
- FIGURE 86 Relevé de sensibilité pour un Syclop circulaire à une distance de 1,45 m
- FIGURE 87 Relevé de sensibilité pour un Syclop circulaire à une distance de 0,80 m
- FIGURE 88 Diagramme de sensibilité d'un Syclop circulaire à 0,80 m
- FIGURE 89 Diagramme de sensibilité d'un Syclop circulaire à 1,10 m
- FIGURE 90 Diagramme de sensibilité d'un Syclop circulaire à 1,45 m
- FIGURE 91 Ecarts de détection en fonction de la distance et de l'angle de présence
- FIGURE 92 Relevé de sensibilité pour un Syclop rectangulaire à une distance de 1,30 m
- FIGURE 93 Ecarts de sensibilité pour un Syclop rectangulaire à une distance de 1,30 m
- FIGURE 94 Diagramme de sensibilité d'un Syclop rectangulaire à 1 m
- FIGURE 95 Diagramme de sensibilité d'un Syclop rectangulaire à 1,30 m
- FIGURE 96 Diagramme de sensibilité d'un Syclop rectangulaire à 1,50 m
- FIGURE 97 Vue face avant de l'Infinity Newport
- FIGURE 98 Linéarité de l'indicateur de process sans câble de 15 m et sans amplificateur
- FIGURE 99 Influence de la longueur de câble
- FIGURE 100 Linéarité de l'indicateur de process avec câble et sans amplificateur
- FIGURE 101 Linéarité de l'indicateur de process avec câble de 15 m et avec amplificateur
- FIGURE 102 Ecart d'affichage dû à l'indicateur de process avec câble de 15 m et avec amplificateur
- FIGURE 103 L'acquisition multivoies
- FIGURE 104 Unité d'acquisition mobile Système 4000
- FIGURE 105 Associations possibles de capteurs sur le support
- FIGURE 106 Equilibre thermique d'une parabole rectangulaire équipée de deux capteurs montés en opposition et sur deux faces différentes
- FIGURE 107 Equilibre thermique d'une parabole rectangulaire équipée de deux capteurs montés en série et sur la même face
- FIGURE 108 Equilibre thermique d'une parabole rectangulaire équipée de deux capteurs montés en opposition et sur la même face

- FIGURE 109 Détection en fonction du positionnement des capteurs sur le support
- FIGURE 110 Essais de détection d'intrusions
- FIGURE 111 Niveau de détection
- FIGURE 112 Niveau de détection sur une longue durée
- FIGURE 113 Niveau de détection en fonction du nombre de capteurs et de la distance
- FIGURE 114 Fluctuation du signal en fonction du niveau de détection
- FIGURE 115 Relevés de détection avec et sans éclairage
- FIGURE 116 Relevés sans et avec climatisation
- FIGURE 117 Relevés de détection sous climatisation
- FIGURE 118 Enregistrements de nuit pour deux paraboles
- FIGURE 119 Enregistrements de jour pour deux paraboles
- FIGURE 120 Enregistrement de surveillance pendant 12 heures par trois paraboles le 22/07/1995
- FIGURE 121 Intrusions corps noir, corps humain de 1m à 7m de distance entre l'intrusion et la parabole
- FIGURE 122 Intrusions corps noir, corps humain de 1m à 4m de distance entre l'intrusion et la parabole
- FIGURE 123 Intrusions corps noir, corps humain de 5,3m à 7m de distance entre l'intrusion et la parabole
- FIGURE 124 Détection d'intrusions simulées à différentes distances et de différentes manières dans un couloir surveillé par un Syclop rectangulaire
- FIGURE 125 Surveillance d'un couloir à LaSCo
- FIGURE 126 Relevés de mesures d'intrusion
- FIGURE 127 Variations de signal causées par des intrusions
- FIGURE 128 Surveillance ponctuelle avec une parabole circulaire
- FIGURE 129 Pot de stockage
- FIGURE 130 Temps de montée en température pour un pot en acier simulant un pot de Pu
- FIGURE 131 Vue de la chaîne de mesure
- FIGURE 132 Calibration de la ligne thermocouple n°1
- FIGURE 133 Banc de surveillance pour un pot
- FIGURE 134 Surfaces surveillées
- FIGURE 135 Ecarts de signal relevés pour un pot en position couchée en fonction de la puissance injectée et de la distance de surveillance
- FIGURE 136 Température de la surface surveillée du pot en fonction de la puissance injectée
- FIGURE 137 Ecarts de signal relevés pour un pot en position debout en fonction de la puissance injectée et de la distance de surveillance
- FIGURE 138 Surveillance de conteneurs
- FIGURE 139 Signal délivré par une parabole circulaire regardant une zone sous surveillance
- FIGURE 140 Prototype d'acquisition 16 voies
- FIGURE 141 Dispositif d'étalonnage de notre ligne de mesures
- FIGURE 142 Relevés de notre ligne de mesures avant exposition
- FIGURE 143 Premier site de démonstration de Syclop à Dounreay
- FIGURE 144 Déséquilibre thermique dû à une intrusion dans une zone surveillée

| FIGURE 145 | Evolution de la moyenne absolue sur 8 points en fixant les paramètres $x = 1$ et $y = 7$    |
|------------|---|
| FIGURE 146 | Evolution de la moyenne absolue sur 8 points en fixant les paramètres $x = 7$ et $y = 1$    |
| FIGURE 147 | Evolution de la moyenne absolue sur 8 points en fixant les paramètres $x = 2$ et $y = 6$    |
| FIGURE 148 | Evolution de la moyenne absolue sur 8 points en fixant les paramètres $x = 6$ et $y = 2$    |
| FIGURE 149 | Evolution de la moyenne absolue sur 8 points en fixant les paramètres $x = 3$ et $y = 5$    |
| FIGURE 150 | Evolution de la moyenne absolue sur 8 points en fixant les paramètres $x = 5$ et $y = 3$    |
| FIGURE 151 | Evolution de la moyenne absolue sur 8 points en fixant les paramètres $x = 4$ et $y = 4$    |
| FIGURE 152 | Pic de détection dû à une intrusion sur la parabole n°109                                   |
| FIGURE 153 | Evolution de la moyenne absolue sur 4 points en fixant les paramètres $x = 2$ et $y = 2$    |
| FIGURE 154 | Evolution de la moyenne absolue sur 6 points en fixant les paramètres $x = 3$ et $y = 3$    |
| FIGURE 155 | Evolution de la moyenne absolue sur 8 points en fixant les paramètres $x = 4$ et $y = 4$    |
| FIGURE 156 | Evolution de la moyenne absolue sur 10 points en fixant les paramètres $x = 5$ et $y = 5$   |
| FIGURE 157 | Evolution de la moyenne absolue sur 12 points en fixant les paramètres $x = 6$ et $y = 6$   |
| FIGURE 158 | Evolution de la moyenne absolue sur 14 points en fixant les paramètres $x = 7$ et $y = 7$   |
| FIGURE 159 | Evolution de la moyenne absolue sur 16 points en fixant les paramètres $x = 8$ et $y = 8$   |
| FIGURE 160 | Evolution de la moyenne absolue sur 18 points en fixant les paramètres $x = 9$ et $y = 9$   |
| FIGURE 161 | Evolution de la moyenne absolue sur 20 points en fixant les paramètres $x = 10$ et $y = 10$ |
| FIGURE 162 | Evolution du rapport S / B en fonction des paramètres "x" et "y"                            |
| FIGURE 163 | Ferme expérimentale de l'Université Autonome Vétérinaire à Barcelone                        |
| FIGURE 164 | Utilisation de l'énergie des aliments par les ruminants                                     |
| FIGURE 165 | Relevés de température pour la vache n°3 au cours d'une journée                             |
| FIGURE 166 | Une parabole circulaire focalisée sur une vache   |
| FIGURE 167 | Installation du système dans la ferme   |
| FIGURE 168 | Vue de la parabole  |
| FIGURE 169 | Lecteurs de température   |
| FIGURE 170 | Système d'enregistrement  |
| FIGURE 171 | Enregistrements pour une vache dans la ferme expérimentale                                  |
| FIGURE 172 | Parabole sans protection mise hors fonctionnement par les mouches                           |

# LISTE DES TABLEAUX

| TABLEAU 1 | Température du corps humain   |
|-----------|---|
| TABLEAU 2 | Types et caractéristiques des détecteurs infrarouges disponibles dans le commerce |
| TABLEAU 3 | Limites en température de quelques détecteurs I.R.                                |
| TABLEAU 4 | Guide de sélection du traitement des miroirs                                      |
| TABLEAU 5 | Mesure en réflexion   |
| TABLEAU 6 | Pourcentage de signal détecté par rapport à l'or                                  |

| TABLEAU 7  | Classement des matériaux en fonction du signal fem délivré / la distance entre le pot et la parabole                |
|------------|---|
| TABLEAU 8  | Ecart de tension relevée par rapport à celle délivrée par la parabole en Or   |
| TABLEAU 9  | Tableau de mesures indexées sur l'Or  |
| TABLEAU 10 | Echantillons "Rugotest" "E"   |
| TABLEAU 11 | Echelle des critères de rugosité  |
| TABLEAU 12 | Linéarité du dispositif amplificateur TSC900  |
| TABLEAU 13 | Sensibilités moyennes d'un fluxmètre radiatif 10x10 mm en fonction de la longueur d'onde nominale du filtre utilisé |
| TABLEAU 14 | Relevés de mesures pour l'indicateur de process Newport n°1   |
| TABLEAU 15 | Relevés de mesures pour l'indicateur de process   |
| TABLEAU 16 | Ecarts de détection lors d'intrusions humaines  |
| TABLEAU 17 | Relevés d'intrusions  |
| TABLEAU 18 | Variation de signal dues aux intrusions et indexées sur la stabilité thermique                                      |
| TABLEAU 19 | Ecart de signal relevé à différentes distances en fonction de la puissance injectée dans le pot en position couchée |
| TABLEAU 20 | Ecart de signal relevé à différentes distances en fonction de la puissance injectée dans le pot en position debout  |
| TABLEAU 21 | Contrôle de températures pour la vache n°3  |

.

# ANNEXES



# ANNEXE 1 : STRUCTURE DU FLUXMÈTRE RADRIATIF





# ANNEXE 2 : PREMIER PROTOTYPE DE PARABOLE RECTANGULAIRE



CONSTRUCTION PARABOLE AVEC CERCLES

Origine sur la surface du brut :

|    | Ordonnée du foyer : | 35     |                 |              |                 | Profondeur<br>parabole | 40            |               |     |
|----|---------------------|--------|-----------------|--------------|-----------------|------------------------|---------------|---------------|-----|
| p= |                     | 70     | Coordonnées poi | int tangence |                 | •                      | Coordonnées n | oint tangence |     |
|    | Ordonnée du centre  | Ravon  | ABCISSE         | ORDONNEE     | Ordonnée centre | Ravon                  | ABCISSE       | ORDONNEE      |     |
| 1  | 70                  | 70.00  | 0.00            | 0            | 30              | 70.00                  | 0.00          | -40           |     |
| 2  | 72                  | 71.97  | 16.73           | 2            | 32              | 71.97                  | 16.73         | -38           |     |
| 3  | 74                  | 73.89  | 23.66           | 4            | 34              | 73.89                  | 23.66         | -36           |     |
| 4  | 76                  | 75.76  | 28.98           | 6            | 36              | 75.76                  | 28.98         | -34           |     |
| 5  | 78                  | 77.59  | 33.47           | 8            | 38              | 77.59                  | 33.47         | -32           |     |
| 6  | 80                  | 79.37  | 37.42           | 10           | 40              | 79.37                  | 37.42         | -30           |     |
| 7  | 82                  | 81.12  | 40.99           | 12           | 42              | 81.12                  | 40.99         | -28           |     |
| 8  | 84                  | 82.83  | 44.27           | 14           | 44              | 82.83                  | 44.27         | -26           |     |
| 9  | 86                  | 84.50  | 47.33           | 16           | 46              | 84.50                  | 47.33         | -24           |     |
| 10 | 88                  | 86.14  | 50.20           | 18           | 48              | 86.14                  | 50.20         | -22           |     |
| 11 | 90                  | 87.75  | 52.92           | 20           | 50              | 87.75                  | 52.92         | -20           |     |
| 12 | 92                  | 89.33  | 55.50           | 22           | 52              | 89.33                  | 55.50         | -18           |     |
| 13 | 94                  | 90.88  | 57.97           | 24           | 54              | 90.88                  | 57.97         | -16           |     |
| 14 | 96                  | 92.41  | 60.33           | 26           | 56              | 92.41                  | 60.33         | -14           |     |
| 15 | 98                  | 93.91  | 62.61           | 28           | 58              | 93.91                  | 62.61         | -12           |     |
| 16 | 100                 | 95.39  | 64.81           | 30           | 60              | 95.39                  | 64.81         | -10           |     |
| 17 | 102                 | 96.85  | 66.93           | 32           | 62              | 96.85                  | 66.93         | -8            |     |
| 18 | 104                 | 98.29  | 68.99           | 34           | 64              | 98.29                  | 68.99         | -6            |     |
| 19 | 106                 | 99.70  | 70.99           | 36           | 66              | 99.70                  | 70.99         | -0            | ~   |
| 20 | 108                 | 101.09 | 72.94           | 38           | 68              | 101.09                 | 72.94         | -7            | र्च |
| 21 | 110                 | 102.47 | 74.83           | 40           | 70              | 102.47                 | 74.83         | 0             | Z   |
| 22 | 112                 | 103.83 | 76.68           | 42           | 72              | 103.83                 | 76.68         | 2             |     |
| 23 | 114                 | 105.17 | 78.49           | 44           | 74              | 105.17                 | 78.49         | - 4           |     |
| 24 | 116                 | 106.49 | 80.25           | 46           | 76              | 106.49                 | 80.25         | 6             | Ù   |
| 25 | 118                 | 107.80 | 81.98           | 48           | 78              | 107.80                 | 81.98         | 8             |     |
| 26 | 120                 | 109.09 | 83.67           | 50           | 80              | 109.09                 | 83.67         | 10            |     |
| 27 | 122                 | 110.36 | 85.32           | 52           | 82              | 110.36                 | 85.32         | 12            |     |
| 28 | 124                 | 111.62 | 86.95           | 54           | 84              | 111.62                 | 86.95         | 14            |     |
| 29 | 126                 | 112.87 | 88.54           | 56           | 86              | 112.87                 | 88,54         | 16            |     |
| 30 | 128                 | 114.11 | 90.11           | 58           | 88              | 114.11                 | 90.11         | 18            |     |
| 31 | 130                 | 115.33 | 91.65           | 60           | 90              | 115.33                 | 91.65         | 20            |     |
| 32 | 132                 | 116.53 | 93.17           | 62           | 92              | 116.53                 | 93.17         | 22            |     |
| 33 | 134                 | 117.73 | 94.66           | 64           | 94              | 117.73                 | 94.66         | 24            |     |
| 34 | 136                 | 118.91 | 96.12           | 66           | 96              | 118.91                 | 96.12         | 26            |     |
| 35 | 138                 | 120.08 | 97.57           | 68           | 98              | 120.08                 | 97.57         | 28            |     |
| 36 | 140                 | 121.24 | 98.99           | 70           | 100             | 121.24                 | 98.99         | 30            |     |
| 37 | 142                 | 122.39 | 100.40          | 72           | 102             | 122.39                 | 100.40        | 32            |     |
| 38 | 144                 | 123.53 | 101.78          | 74           | 104             | 123.53                 | 101.78        | 34            |     |
| 39 | 146                 | 124.66 | 103.15          | 76           | 106             | 124.66                 | 103.15        | 36            |     |
| 40 | 148                 | 125.78 | 104.50          | 78           | 108             | 125.78                 | 104.50        | 38            |     |
| 41 | 150                 | 126.89 | 105.83          | 80           | 110             | 126.89                 | 105.83        | 40            |     |
| 42 | 152                 | 127.98 | 107.14          | 82           | 112             | 127.98                 | 107.14        | 42            |     |
| 43 | 154                 | 129.07 | 108.44          | 84           | 114             | 129.07                 | 108.44        | 44            |     |
| 44 | 156                 | 130.15 | 109.73          | 86           | 116             | 130.15                 | 109.73        | 46            |     |
| 45 | 158                 | 131.22 | 111.00          | 88           | 118             | 131.22                 | 111.00        | 48            |     |
| 46 | 160                 | 132.29 | 112.25          | 90           | 120             | 132.29                 | 112.25        | 50            |     |
| 47 | 162                 | 133.34 | 113.49          | 92           | 122             | 133.34                 | 113.49        | 52            |     |

ANNEXE 3 : CONSTRUCTION DE LA PARABOLE CIRCULAIRE AVEC LA MÉTHODE DES CERCLES


# ANNEXE 4 : PREMIER PROTOTYPE DE PARABOLE CIRCULAIRE



## **ANNEXE 5 : AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL**

# TLC2654, TLC2654A Advanced LinCMOS™ LOW-NOISE CHOPPER-STABILIZED OPERATIONAL AMPLIFIERS

## TYPICAL APPLICATION DATA

### capacitor selection and placement

Leakage and dielectric absorption are the two important factors to consider when selecting external capacitors  $C_{XA}$  and  $C_{XB}$ . Both factors can cause system degradation negating the performance advantages realized by using the TLC2654.

Degradation from capacitor leakage becomes more apparent with increasing temperatures. Low-leakage capacitors and standoffs are recommended for operation at  $T_A = 125^{\circ}$ C. In addition, guardbands around the capacitor connections on both sides of the printed circuit board are recommended to alleviate problems caused by surface leakage on circuit boards.

Capacitors with high dielectric absorption tend to take several seconds to settle upon application of power, which directly affects input offset voltage. In applications needing fast settling of input offset voltage, it is recommended that high-quality film capacitors, such as mylar, polystyrene, or polypropylene, be used. In other applications, however, a ceramic or other low-grade capacitor may suffice.

Unlike many choppers available today, the TLC2654 is designed to function with values of  $C_{XA}$  and  $C_{XB}$  in the range of 0.1  $\mu$ F to 1  $\mu$ F without degradation to input offset voltage or input noise voltage. These capacitors should be located as close as possible to the  $C_{XA}$  and  $C_{XB}$  pins and returned to either the  $V_{DD-}$  pin or the C RETURN pin. Note that on many choppers, connecting these capacitors to the  $V_{DD-}$  pin causes degradation in noise performance, a problem that is eliminated on the TLC2654.

#### internal/external clock

The TLC2654 has an internal clock that sets the chopping frequency to a nominal value of 10 kHz. On 8-pin packages, the chopping frequency can only be controlled by the internal clock; however, on all 14-pin packages and the 20-pin FK package, the device chopping frequency may be set by the internal clock or controlled externally by use of the INT/EXT and CLK IN pins. To use the internal 10-kHz clock, no connection is necessary. If external clocking is desired, connect the INT/EXT pin to  $V_{DD-}$  and the external clock to CLK IN. The external clock trip point is 2.5 V above the negative rail; however, the CLK IN pin may be driven from the negative rail to 5 V above the negative rail. This allows the TLC2654 to be driven directly by 5-V TTL and CMOS logic when operating in the single-supply configuration. If this 5-V level is exceeded, damage could occur to the device unless the current into the CLK IN pin is limited to ±5 mA. A divide-by-two frequency divider interfaces with the CLK IN pin and sets the

chopping frequency. The chopping frequency appears on the CLK OUT pin.

#### overload recovery/output clamp

When large differential input voltage conditions are applied to the TLC2654, the nulling loop attempts to prevent the output from saturating by driving  $C_{XA}$  and  $C_{XB}$  to internally-clamped voltage levels. Once the overdrive condition is removed, a period of time is required to allow the built-up charge to dissipate. This time period is defined as overload recovery time (see Figure 33). Typical overload recovery time for the TLC2654 is significantly faster than competitive products; however, if required, this time can be reduced further by use of internal clamp circuitry accessible through the CLAMP pin.



**Operational Amplifiers** 

#### TLC2654, TLC2654A Advanced LinCMOS<sup>TM</sup> LOW-NOISE CHOPPER-STABILIZED OPERATIONAL AMPLIFIERS

#### **TYPICAL APPLICATION DATA**

The clamp is simply a switch that is automatically activated when the output is approximately 1 V from either supply rail. When connected to the inverting input (in parallel with the closed-loop feedback resistor), the closed-loop gain is reduced and the TLC2654 output is prevented from going into saturation. Since the output must source or sink current through the switch (see Figure 8), the maximum output voltage swing is slightly reduced.

#### thermoelectric effects

**V** Operational Amplifiers

To take advantage of the extremely low offset voltage temperature coefficient of the TLC2654, care must be taken to compensate for the thermoelectric effects present when two dissimilar metals are brought into contact with each other (such as device leads being soldered to a printed circuit board). It is not uncommon for dissimilar metal junctions to produce thermoelectric voltages in the range of several microvolts per degree Celsius (orders of magnitude greater than the 0.01- $\mu$ V/°C typical of the TLC2654).

To help minimize thermoelectric effects, careful attention should be paid to componet selection and circuit board layout. Avoid the use of nonsoldered connections (such as sockets, relays, switches, etc.) in the input signal path. Cancel thermoelectric effects by duplicating the number of components and junctions in each device input. The use of low-thermoelectric-coefficient components, such as wire-wound resistors, is also beneficial.

#### latchup avoidance

Because CMOS devices are susceptible to latchup due to their inherent parasitic thyristors, the TLC2654 inputs and output are designed to withstand -100-mA surge currents without sustaining latchup; however, techniques to reduce the chance of latchup should be used whenever possible. Internal protection diodes should not be forward biased in normal operation. Applied input and output voltages should not exceed the supply voltage by more than 300 mV. Care should be excised when using capacitive coupling on pulse generators. Supply transients should be shunted by using decoupling capacitors (0.1  $\mu$ F typical) located across the supply raits as close to the device as possible.

The current path established if latchup occurs is usually between the supply rails and is limited only by the impedance of the power supply and the forward resistance of the parasitic thyristor. The chance of latchup occurring increases with increasing temperature and supply voltage.

#### electrostatic discharge protection

The TLC2654 incorporates internal ESD protection circuits that prevent functional failures at voltages al or below 2000 V. Care should be exercised in handling these devices as exposure to ESD may result in degradation of the device parametric performance.

#### theory of operation

Chopper-stabilized operational amplifiers offer the best dc performance of any monolithic operational amplifier This superior performance is the result of using two operational amplifiers – a main amplifier and a nulling amplifier – plus oscillator-controlled logic and two external capacitors to create a system that behaves as a single amplifier. With this approach, the TLC2654 achieves submicrovolt input offset voltage, submicrovolt noise voltage, and offset voltage variations with temperature in the nV/°C range.

The TLC2654 on-chip control logic produces two dominant clock phases – a nulling phase and an amplifying phase. The term "chopper-stabilized" derives from the process of switching between these two clock phases. Figure 34 shows a simplified block diagram of the TLC2654. Switches A and B are make-before-break lypes. During the nulling phase, switch A is closed, shorting the nulling amplifier inputs together and allowing the nulling amplifier to reduce its own input offset voltage by feeding its output signal back to an inverting inc.:



#### TLC2654, TLC2654A Advanced LinCMOS™ LOW-NOISE CHOPPER-STABILIZED OPERATIONAL AMPLIFIERS

### **TYPICAL APPLICATION DATA**



#### FIGURE 34. TLC2654 SIMPLIFIED BLOCK DIAGRAM

node. Simultaneously, external capacitor  $C_{XA}$  stores the nulling potential to allow the offset voltage of the amplifier to remain nulled during the amplifying phase.

During the amplifying phase, switch B is closed, connecting the output of the nulling amplifier to a noninverting input of the main amplifier. In this configuration, the input offset voltage of the main amplifier is nulled. Also, external capacitor  $C_{XB}$  stores the nulling potential to allow the offset voltage of the main amplifier to remain nulled during the next nulling phase.

This continuous chopping process allows offset voltage nulling during variations in time and temperature and over the common-mode input voltage range and power supply range. In addition, because the low-frequency signal path is through both the null and main amplifiers, extremely high gain is achieved.

The low-frequency noise of a chopper amplifier depends on the magnitude of the component noise prior to chopping and the capability of the circuit to reduce this noise while chopping. The use of the Advanced LinCMOS process, with its low-noise analog MOS transistors and patent-pending input stage design, significantly reduces the input noise voltage.

The primary source of nonideal operation in chopper-stabilized amplifiers is error charge from the switches. As charge imbalance accumulates on critical nodes, input offset voltage can increase, especially with increasing chopping frequency. This problem has been significantly reduced in the TLC2654 by use of a patent-pending compensation circuit and the Advanced LinCMOS process.

The TLC2654 incorporates a feed-forward design that ensures continuous frequency response. Essentially, the gain magnitude of the nulling amplifier and compensation network crosses unity at the break frequency of the main amplifier. As a result, the high-frequency response of the system is the same as the frequency response of the main amplifier. This approach also ensures that the slewing characteristics remain the same during both the nulling and amplifying phases.

The primary limitation on ac performance is the chopping frequency. As the input signal frequency approaches the chopper's clock frequency, intermodulation (or aliasing) errors result from the mixing of these frequencies. To avoid these error signals, the input frequency must be less than half the clock frequency. Most chopper's available today limit the internal chopping frequency to less than 500 Hz in order to eliminate errors due to the charge imbalancing phenomenon mentioned previously. However, to avoid intermodulation errors on a 500-Hz chopper, the input signal frequency must be limited to less than 250 Hz. The TLC2654 removes this restriction on ac performance by using a 10-kHz internal clock frequency. This high chopping frequency allows amplification of input signals up to 5 kHz without errors due to Intermodulation and greatly reduces low-frequency noise.

2-830

#### TLC2654, TLC2654A Advanced LinCMOS™ LOW-NOISE CHOPPER-STABILIZED **OPERATIONAL AMPLIFIERS**





1800

# TLC2654, TLC2654A Advanced LinCMOS™ LOW-NOISE CHOPPER-STABILIZED **OPERATIONAL AMPLIFIERS**



#### FIGURE 34. TLC2654 SIMPLIFIED BLOCK DIAGRAM

node. Simultaneously, external capacitor CXA stores the nulling potential to allow the offset voltage of the amplifier to remain nulled during the amplifying phase.

During the amplifying phase, switch B is closed, connecting the output of the nulling amplifier to a noninverting input of the main amplifier. In this configuration, the input offset voltage of the main amplifier is nulled. Also, external capacitor CXB stores the nulling potential to allow the offset voltage of the main amplifier to remain nulled during the next nulling phase.

This continuous chopping process allows offset voltage nulling during variations in time and temperature and over the common mode input voltage range and power supply range. In addition, because the low frequency signal path is through both the null and main amplifiers, extremely high gain is achieved.

The low-frequency noise of a chopper amplifier depends on the magnitude of the component noise prior to chopping and the capability of the circuit to reduce this noise while chopping. The use of the Advanced LinCMOS process, with its low-noise analog MOS transistors and patent-pending input stage design, significantly reduces the input noise voltage.

The primary source of nonideal operation in chopper-stabilized amplifiers is error charge from the switches As charge imbalance accumulates on critical nodes, input offset voltage can increase, especially with increasing chopping frequency. This problem has been significantly reduced in the TLC2654 by use of a patent pending compensation circuit and the Advanced LinCMOS process.

The TLC2654 incorporates a feed forward design that ensures continuous frequency response. Essentially, the gain magnitude of the nulling amplifier and compensation network crosses unity at the break frequency of the main amplifier. As a result, the high-frequency response of the system is the same as the frequency response of the main amplifier. This approach also ensures that the slewing characteristics remain the same during both the nulling and amplifying phases.

The primary limitation on ac performance is the chopping frequency. As the input signal frequency approaches the chopper's clock frequency, intermodulation (or aliasing) errors result from the mixing of these frequencies. To avoid these error signals, the input frequency must be less than half the clock frequency. Most choppers available today limit the internal chopping frequency to less than 500 Hz in order to eliminate errors due to the charge imbalancing phenomenon mentioned previously. However, to avoid intermodulation errors on a 500-Hz chopper, the input signal frequency must be limited to less than 250 Hz. The TLC2654 removes this restriction on ac performance by using a 10-kHz internal clock frequency. This high chopping frequency allows amplification of input signals up to 5 kHz without errors due to intermodulation and greatly reduces lowfrequency noise.

TEYAS

2-828

### TLC2654, TLC2654A Advanced LinCMOS<sup>™</sup> LOW-NOISE CHOPPER-STABILIZED **OPERATIONAL AMPLIFIERS**



Amolifier Operational

10

KSVR +

**KSVR** 

10 k

# TLC2654, TLC2654A Advanced LinCMOS™ LOW-NOISE CHOPPER-STABILIZED **OPERATIONAL AMPLIFIERS**

LARGE-SIGNAL DIFFERENTIAL VOLTAGE

AMPLIFICATION AND PHASE SHIFT

vs

TYPICAL CHARACTERISTICS<sup>†</sup>



1.0

V<sub>DD ±</sub> = ± 7.5 V





LARGE-SIGNAL VOLTAGE AMPLIFICATION

VS

**FIGURE 14** 

V<sub>DD ±</sub> = ±5V

 $V_0 = 0$ 

No Load

1.6

 $R_L = 10 k\Omega$ 

 $V_0 = \pm 4V$ 



TA - Free-Air Temperature - °C FIGURE 20

Data at high and low temperatures are applicable only within the rated operating free-air temperature ranges of the various devices.

FIGURE 19



2-825

2-824

INSTRUMENTS POST OFFICE BOX 655012 - DALLAS, TEXAS 75265

Texas 🌱

#### TLC2654, TLC2654A Advanced LinCMOS™ LOW-NOISE CHOPPER-STABILIZED **OPERATIONAL AMPLIFIERS**

# TLC2654, TLC2654A Advanced LinCMOS™ LOW-NOISE CHOPPER-STABILIZED **OPERATIONAL AMPLIFIERS**



2.823

10 k

## TLC2654C, TLC2654AC Advanced LincMOS™ LOW-NOISE CHOPPER-STABILIZED OPERATIONAL AMPLIFIERS

|                   | TLC2654C, TLC2654A(          |
|-------------------|------------------------------|
| Advanced LinCMOS™ | LOW-NOISE CHOPPER-STABILIZED |
|                   | OPERATIONAL AMPLIFIERS       |

|   | F .  |  |
|---|------|--|
| electrical characteristics at specified free-air temperature, $v_{DD} \pm = \pm 5 v$ (unless otherwise noted) | D I  | encreting photostation of an adding free air temperature V and the W (unless otherwise noted)                        |
|   | r' 1 | $\alpha$ operating characteristics at specified free-air temperature, $v_{DD\pm} = \pm 5 v$ (unless otherwise noted) |

|                    | PARAMETER                    | TEST CO                                 | TL                       | C2654A     | C     | T     | LIGHT |       |       |       |              |                |
|--------------------|------------------------------|---|--------------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|----------------|
|                    | ranameren                    | 1201 00                                 | MIN                      | TYP        | MAX   | MIN   | TYP   | MAX   |       |       |              |                |
| Vic                | Incut offeet voltage         |   |                          | 25°C       |       | 4     | 10    |       | 5     | 20    |              |                |
| 10                 | mput unset vonage            |   |                          | Full range |       |       | 24    |       |       | 34    | "'           |                |
| <i></i>            | Temperature coefficient      |   |                          | 0°Сю       |       | 0.004 | 0.2   |       | 0.004 | 0.2   |              |                |
| ~00                | of input offset voltage      |   | R <sub>S</sub> = 50 Ω    |            | 70°C  |       | 0.004 | 0.3   |       | 0.004 | 0.3          | ۲ <b>۳</b> ۳ ۲ |
|                    | Input offset voltage         |   |                          | 2500       |       | 0.003 | 0.02  |       | 0.002 | 0.06  |              |                |
|                    | long-term drift (see Note 4) | 10 - 0, NS                              |                          | 230        |       | 0.003 | 0.02  |       | 0.003 | 0.00  | <b>P V W</b> |                |
| 10                 | Inout offset current         |   |                          | 25°C       |       | 30    |       |       | 30    |       | -            |                |
| -10                |                              |   |                          | Full range |       |       | 150   |       |       | 150   |              |                |
| teo                | Incut bias current           |   |                          | 25°C       |       | 50    |       |       | 50    |       |              |                |
|                    |                              |   |                          | Full range |       |       | 150   |       | -     | 150   | <u> </u>     |                |
|                    | Common-mode incud            |   |                          |            | - 5   |       |       | - 5   |       |       |              |                |
| VICR wolfage range | R <sub>S</sub> = 50 Ω        | t i i i i i i i i i i i i i i i i i i i | 0 Ω                      | Full range | to    |       |       | to    |       |       | V            |                |
|                    |                              |   |                          |            | 2.7   |       |       | 2.7   |       |       |              |                |
| Vou .              | Maximum positive peak        | R = 10 kO See                           | Note 5                   | 25°C       | 4.7   | 4.8   |       | 4.7   | 4.8   |       | l v          |                |
| * UNV +            | oulput voltage swing         | n - 10 min - 080                        | .,                       | Full range | 4.7   |       |       | 4.7   |       |       |              |                |
| Vou                | Maximum negative peak        | B 10 KO See                             | ), See Note 5            | 25°C       | - 4.7 | - 4.9 |       | - 4.7 | 4.9   |       | v            |                |
| · UNI              | output voltage swing         | 11 - 10 Mil, 000                        |                          | Full range | - 4.7 |       |       | - 4.7 |       |       |              |                |
| Avn                | Large-signal differential    |   | . R <sub>L</sub> = 10 kΩ | 25°C       | 135   | 155   |       | 120   | 155   |       |              |                |
|                    | voltage amplification        | •0 • <b>•</b> • • • • • • •             |                          | Full range | 130   |       |       | 120   |       |       | <u> </u>     |                |
| 1_2                | Internal chopping            |   |                          | 25.00      |       | 10    |       |       | 10    |       | L            |                |
| 'CN                | frequency                    |   |                          | 250        |       |       |       |       | 10    |       |              |                |
|                    | Clamo on-state current       | 8 100 kO                                |                          | 25°C       | 25    |       |       | 25    |       |       |              |                |
|                    |                              |   |                          | Full range | 25    |       |       | 25    |       |       | L            |                |
|                    | Clamp off-state current      |   |                          | 25°C       |       |       | 100   |       |       | 100   |              |                |
|                    |                              | ·O = - • • 10 • •                       |                          | Full range |       |       | 100   |       |       | 100   |              |                |
| CMRR               | Common-mode                  | $V_0 = 0, V_{IC} = V$                   | ICR min.                 | 25°C       | 110   | 125   |       | 105   | 125   |       | 40           |                |
|                    | rejection ratio              | Rg = 50 Ω                               |                          | Full range | 110   |       |       | 105   |       |       |              |                |
| kevm               | Supply-voltage rejection     | $V_{DD \pm} = \pm 2.3 \text{ V}$        | to ± 8 V.                | 25°C       | 120   | 125   |       | 110   | 125   |       | -19          |                |
| *SVR               | ratio (ΔVDD ± / ΔVIO)        | $V_{O} = 0$ , $R_{S} = 50 \Omega$       |                          | Full range | 120   |       |       | 110   |       |       |              |                |
| lon                | Supply current               | Vor 0 No.                               | heo                      | 25°C       |       | 1.5   | 2.1   |       | 1.5   | 2.1   | må           |                |
| 00                 |                              | 1.0 - 0. 1.01                           |                          | Euli ranne |       |       | 22    |       |       | 22    | l """        |                |

#### <sup>†</sup>Full range is 0°C to 70°C.

2

Operational

Amplifiers

NOTES: 4. Typical values are based on the input offset voltage shift observed through 168 hours of operating life test at  $T_A = 150^{\circ}C$  extrapol2 M to  $T_A = 25^{\circ}C$  using the Arrhenius equation and assuming an activation energy of 0.96 eV.

5. Output clamp is not connected.

|       | DADAMETED                      | TERT CON   | umount 1   | TLC2654AC TLC2654C |       |     |     |       |     | LINNT           |  |
|-------|--------------------------------|--|------------|--------------------|-------|-----|-----|-------|-----|-----------------|--|
|       | FARAMETER                      | TEST CONL  | ITIONS'    | MIN                | TYP   | MAX | MIN | TYP   | MAX |                 |  |
| co .  | Positive slew rate             |  | 25°C       | 1.5                | 2     |     | 1.5 | 2     |     |                 |  |
| 311 + | at unity gain                  | $v_0 = \pm 2.3 v_1$  | Full range | 1.3                |       |     | 1.3 |       |     | 1 V/μs          |  |
| 60    | Negative slew rate             | - HL = 10 K3,  | 25°C       | 2.3                | 3.7   |     | 2.3 | 3.7   |     |                 |  |
| эн -  | at unity gain                  | 1 CL = 100 pr  | Full range | 1.7                |       |     | 1.7 |       |     | ] V/μs          |  |
| v     | Equivalent input noise         | 1 = 10 Hz  | 25°C       |                    | 47    | 75  | _   | 47    |     |                 |  |
| Vn.   | voltage (see Note 6)           | I = 1 kHz  | 25°C       |                    | 13    | 20  |     | 13    |     |                 |  |
|       | Peak-to-peak equivalent        | f = 0 to 1 Hz  | 25°C       |                    | 0.5   |     |     | 0.5   |     | <u> </u>        |  |
| *NPP  | input noise voltage            | 1 = 0 to 10 Hz   | 25°C       |                    | 1.5   |     |     | 1.5   |     | 1 <sup>μν</sup> |  |
| 5     | Equivalent input noise current | f = 1 kHz  | 25°C       |                    | 0.004 |     |     | 0.004 |     | PA/√Hz          |  |
|       | Gain-bandwidth product         | I = 10  kHz,<br>$R_L = 10 \text{ kΩ},$<br>$C_L = 100 \text{ pF}$ | 25°C       |                    | 1.9   |     |     | 1.9   |     | MHz             |  |
| ¢m    | Phase margin at unity gain     | $R_{\rm L} = 10  \rm k\Omega$ ,<br>$C_{\rm L} = 100  \rm oF$     | 25°C       |                    | 48°   |     |     | 48°   |     | [               |  |

<sup>†</sup>Full range is 0°C to 70°C.

1

. : : :

NOTE 6: This parameter is tested on a sample basis for the TLC2654A. For other test requirements, please contact the factory. This statement has no bearing on testing or nontesting of other parameters.

Texas 🖑 Instruments



# ANNEXE 6 : SPÉCIFICATION DE L'AFFICHEUR INFINITY NEWPORT

| J - Fer - Constantan IPTS68           |
|---------------------------------------|
| K - Chromel - Alumel IPTS68           |
| DIN J - Fer - Constantan (DIN 43760)  |
| Crête 354 V par pas CEI               |
| RMS -60 dB; RMC -120 dB               |
| 240 V eff. maxi                       |
| LED 14 segments 13,8 mm rouge ou vert |
| 8888                                  |
|                                       |

# CONVERSION ANALOGIQUE/NUMÉRIQUE

| Technique          | : Double pente              |   |
|--------------------|-----------------------------|---|
| Résolution interne | : 15 bits                   |   |
| Vitesse lecture    | : 3/sec polarité automatiqu | C |

# PRÉCISION A 25°C

| Précision                  | : | ±0,5°C    |
|----------------------------|---|-----------|
| Coefficient de température | : | ±50 ppm/℃ |
| Réponse pas                | : | 1-2 sec.  |
| Temps de montée en temp.   |   |           |
| pour précision nominale    | • | 30 min    |

# SORTIE ANALOGIQUE

| Type signal          | : | Courant ou tension   |
|----------------------|---|--|
| Niveau signal        | : | 0–10 V, 4–20 mA ou (⊢20 mA   |
| Fonction             | : | Assignée à une gamme d'affichage ou une sortie de régulation<br>proportionnelle avec le point de consigne 1, en cas d'utilisation<br>comme une sortie de contrôle. |
| Tension d'excitation | : | 24 V/25 mA ou 12 V/50 mA, 10 V/120 mA ou 5 V/60 mA   |
| Tension              | : | 115 V ou 230 V eff. $\pm 15\%^{-1}$  |
| Tension cc           | : | 9,5 à 32 Vcc (suivant version commandée)   |
| Fréquence            | : | 50–60 Hz   |
| Puissance            | : | 6 watts  |

# ENVIRONNEMENT

| Temp. de fonctionnement | : | 0 à 50℃                        |
|-------------------------|---|--------------------------------|
| Température de stockage | : | -40 à 85℃                      |
| Humidité relative       | : | 90% à 40°C (sans condensation) |

| CARACTERISTIQUES | MECANIQUES             |
|------------------|------------------------|
| Découpe panneau  | : 45 x 92 mm (1/8 DIN) |
| 1.0102           | : 5/4 g                |

| Ang   | -30°   | -30°   | -30°   | -20°          | -20°  | -20°  | -15°   | -15°  | -15°  | -10°        | -10°  | -10°  | -5°   | -5°   | -5°   | %     | 0°    | 0°    | 5°    | 5°    | 5°    |       |
|-------|--------|--------|--------|---------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Dist. | M.1    | M.2    | M.3    | M.1           | M.2   | M.3   | M.1    | M.2   | M.3   | <b>M</b> .1 | M.2   | M.3   | M.1   | M.2   | M.3   | M.11. | M.2   | M.3   | M.I   | M.2   | M.3   |       |
| lm    | -9.00  | -11.80 | -10.80 | 8.00          | 8.20  | 7.60  | 27.00  | 25.90 | 25.40 | 21.10       | 20.90 | 20.40 | 10.20 | 11.10 | 9.20  | 9.70  | 10.50 | 10.80 | 12.70 | 13.10 | 13.50 |       |
| 2m    | -9.10  | -9.50  | -12.80 | 2.10          | 2.60  | 2.40  | 14.50  | 14.70 | 13.70 | 6.10        | 4.20  | 5.40  | -2.50 | -2.20 | -2.60 | -1.30 | 0.50  | 0.30  | 3.20  | 3.80  | 3.60  |       |
| 3m    | -10.30 | -10.50 | -8.10  | -4.60         | -4.90 | -5.30 | 5.30   | 6.10  | 6.40  | 0.90        | 0.30  | 1.00  | -2.50 | -3.40 | -2.90 | -2.10 | -2.20 | -2.60 |       |       |       |       |
| 4m    | -10.50 | -11.20 | -11.10 | -7.80         | -7.90 | -7.80 | 0.10   | 0.00  | 0.20  | -4.40       | -4.90 | -4.70 | -7.40 | -8.00 | -8.20 |       |       |       |       |       |       |       |
| Sm    | -10.40 | -10.20 | -9.80  | <b>-8</b> .10 | -8.20 | -7.80 | -2.20  | -2.30 | -2.70 | -6.40       | -6.70 | -6.60 | -9.10 | -8.60 | -8.30 |       |       |       |       |       |       |       |
| 6m    | -11.80 | -11.40 | -10.40 | -9.60         | -9.20 | -8.90 | -4.40  | -4.20 | -4.10 | -8.10       | -7.30 | -7.50 | -9.40 | -9.20 | -8.90 |       |       |       |       |       |       |       |
| 7m    | -10.90 | -10.70 | -10.80 | -8.70         | -8.50 | -8.80 | -4.50  | -6.50 | -6.60 | -9.70       | -9.30 | -9.00 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 8m    | 1      |        |        |               |       |       |        |       |       |             |       |       |       |       |       |       |       |       | [     |       |       |       |
|       | 1.     |        |        |               |       |       |        |       |       |             |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Ang   | 10°    | 10°    | 10°    | 15°           | 15°   | 15°   | Moy    | Moy   | Moy   | Moy         | Moy   | Moy   | Moy   | Moy   | Moy   | Ecca  |
| Dist  | M.1    | M.2    | M.3    | M.1           | M.2   | M.3   | -30°   | -20°  | -15°  | -10°        | .5°   | 0°    | +5°   | +10°  | +15°  | 20-30 | 15-30 | 10-30 | 5-30  | 0-30  | 5-30  | 10-30 |
| lm    | 14.40  | 13.60  | 12.60  | 3.40          | 2.40  | 3.60  | -10.53 | 7.93  | 26.10 | 20.80       | 10.17 | 10.33 | 13.10 | 13.53 | 3.13  | 18.47 | 36.63 | 31.33 | 20.70 | 20.87 | 23.63 | 24.07 |
| 2m    |        |        |        |               |       |       | -10.47 | 2.37  | 14.30 | 5.23        | -2.43 | -0.17 | 3.53  |       |       | 12.83 | 24.77 | 15.70 | 8.03  | 10.30 | 14.00 |       |
| 3m    |        |        |        |               |       |       | -9.63  | -4.93 | 5.93  | 0.73        | -2.93 | -2.30 |       |       |       | 4.70  | 15.57 | 10.37 | 6.70  | 7.33  |       |       |
| 4m    |        |        |        |               |       |       | -10.93 | -7.83 | 0.10  | -4.67       | -7.87 |       |       |       |       | 3.10  | 11.03 | 6.27  | 3.07  |       |       | Ecca  |
| 5m    |        |        |        |               |       |       | -10.13 | -8.03 | -2.40 | -6.57       | -8.67 |       |       |       |       | 2.10  | 7.73  | 3.57  | 1.47  |       |       | 15-30 |
| 6m    |        |        |        |               |       |       | -11.20 | -9.23 | -4.23 | -7.63       | -9.17 |       |       |       |       | 1.97  | 6.97  | 3.57  | 2.03  |       |       | 13.67 |
| 7m.   | 1      |        |        |               |       | -     | -10.80 | -8.67 | -5.87 | -9.33       |       |       |       |       |       | 2.13  | 4.93  | 1.47  |       |       |       |       |

ANNEXE 7 : RELEVÉ D'INTRUSIONS DANS UN COULOIR



Localisation des thermocouples - Pot vu de dessus

P.Guilmain 1994



# Localisation des thermocouples - Pot vu de face

P.Guilmain 1994



# Localisation des thermocouples - Pot vu de derrière

P.Guilmain 1994



Localisation des thermocouples - Pot vu de dessous

P.Guilmain 1994

| Ref.T° | Therm.nº1 | Therm.n°2 | Therm.n°3 | Therm.n°4 | Therm.n°5 | Therm.n°6 | Therm.n°7 |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 25.94  | 0.85      | 0.97      | 0.85      | 0.85      | 0.97      | 0.85      | 0.85      |
| 28.30  | 0.82      | 0.94      | 0.82      | 0.70      | 0.94      | 0.82      | 0.82      |
| 30.29  | 0.80      | 0.79      | 0.79      | 0.67      | 0.79      | 0.67      | 0.67      |
| 33.39  | 0.76      | 0.75      | 0.75      | • 0.63    | 0.75      | 0.75      | 0.63_     |
| 35.13  | 0.74      | 0.85      | 0.73      | 0.61      | 0.73      | 0.73      | 0.73_     |
| 36.98  | 0.72      | 0.71      | 0.71      | 0.59      | 0.71      | 0.71      | 0.71      |
| 38.83  | 0.69      | 0.81      | 0.69      | 0.69      | 0.69      | 0.69      | 0.69      |
| 39.90  | 0.72      | 0.83      | 0.71      | 0.59      | 0.71      | 0.71      | 0.71      |
| 42.75  | 0.79      | 0.90      | 0.90      | 0.78      | 0.90      | 0.78      | 0.90      |
| 47.26  | 0.90      | 0.89      | 0.77      | 0.77      | 0.89      | 0.77      | 0.89      |
| 48.21  | 0.92      | 0.91      | 0.91      | 0.79      | 0.91      | 0.91      | 0.91      |
| 50.87  | 0.80      | 0.91      | 0.79      | 0.79      | 0.91      | 0.79      | 0.79      |
| 52.42  | 0.70      | 0.69      | 0.69      | 0.57      | 0.69      | 0.69      | 0.69      |
| 55.12  | 0.54      | 0.65      | 0.53      | 0.53      | 0.65      | 0.53      | 0.53      |
| 57.31  | 0.41      | 0.40      | 0.40      | 0.28      | 0.40      | 0.40      | 0.40      |
| 59.12  | 0.41      | 0.52      | 0.52      | 0.40      | 0.40      | 0.40      | 0.52      |
| 60.27  | 0.46      | 0.57      | 0.45      | 0.33      | 0.45      | 0.45      | 0.45      |
| 62.93  | 0.58      | 0.69      | 0.57      | 0.45      | 0.57      | 0.57      | 0.57      |
| 64.55  | 0.65      | 0.76      | 0.76      | 0.64      | 0.76      | 0.76      | 0.76      |
| 66,40  | 0.74      | 0.84      | 0.72      | 0.60      | 0.84      | 0.72      | 0.72      |
| 68.13  | 0.81      | 0.92      | 0.80      | 0.68      | 0.80      | 0.80      | 0.80      |
| 69.86  | 0.89      | 1.00      | 0.88      | 0.76      | 0.88      | 0.88      | 0.88      |
| 71.13  | 0.95      | 1.06      | 1.06      | 0.93      | 1.06      | 0.93      | 0.93      |
| 73.32  | 1.05      | 1.03      | 1.03      | 0.91      | 1.03      | 1.03      | 0.91      |
| 76.10  | 1.17      | 1.16      | 1.16      | 0.91      | 1.16      | 1.16      | 1.16      |
| 77.60  | 1.24      | 1         | 1.22      | 1.10      | 1.22      | 1.22      | 1.22      |
| 79.91  | 1.34      | 1         | 1.33      | 1.21      | 1.33      | 1.33      | 1.33      |

Lorsque l'on est à une température proche de la température de référence, il faut retrancher l'écart au thermocouple pour avoir la température exacte que devrait donner le thermocouple.

| Therm.n°8 | Therm.n°9 | Therm.n°10 | Therm.n°11 | Therm.nº12 | Therm.nº13 | Therm.nº14 | Therm.nº15 |
|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.73      | 0.85      | 0.85       | 0.85       | 0.97       | 0.97       | 0.97       | 0.97       |
| 0.70      | 0.82      | 0.82       | 0.82       | 0.94       | 0.94       | 0.82       | 0.82       |
| 0.55      | 0.67      | 0.67       | 0.67       | 0.79       | 0.92       | 0.79       | 0.79       |
| 0.63      | 0.75      | 0.63       | 0.63       | 0.88       | 0.88       | 0.75       | 0.75       |
| 0.61      | 0.73      | 0.61       | 0.61       | 0.85       | 0.85       | 0.73       | 0.73       |
| 0.59      | 0.71      | 0.59       | 0.71       | 0.83       | 0.83       | 0.71       | 0.71       |
| 0.56      | 0.69      | 0.69       | 0.69       | 0.81       | 0.81       | 0.81       | 0.81       |
| 0.59      | 0.71      | 0.59       | 0.71       | 0.83       | 0.83       | 0.71       | 0.71       |
| 0.78      | 0.90      | 0.78       | 0.78       | 0.90       | 1.02       | 0.90       | 0.78       |
| 0.64      | 0.89      | 0.77       | 0.77       | 0.89       | 0.89       | 0.89       | 0.77       |
| 0.79      | 0.91      | 0.79       | 0.79       | 0.91       | 0.91       | 0.91       | 0.91       |
| 0.67      | 0.91      | 0.79       | 0.79       | 0.91       | 0.91       | 0.79       | 0.79       |
| 0.57      | 0.81      | 0.57       | 0.57       | 0.81       | 0.81       | 0.69       | 0.69       |
| 0.41      | 0.65      | 0.41       | 0.53       | 0.65       | 0.65       | 0.53       | 0.53       |
| 0.28      | 0.52      | 0,28       | 0.28       | 0.52       | 0.52       | 0.40       | 0.40       |
| 0.40      | 0.64      | 0.40       | 0.52       | 0.52       | 0.52       | 0.52       | 0.40       |
| 0.33      | 0.57      | 0.57       | 0.45       | 0.57       | 0.57       | 0.57       | 0.45       |
| 0.45      | 0.69      | 0.45       | 0.45       | 0.57       | 0.69       | 0.57       | 0.57       |
| 0.64      | 0.88      | 0.64       | 0.64       | 0.76       | 0.88       | 0.76       | 0.76       |
| 0.60      | 0.96      | 0.72       | 0.72       | 0.84       | 0.84       | 0.72       | 0.72       |
| 0.56      | 0.92      | 0.68       | 0.68       | 0.80       | 0.80       | 0.80       | 0.68       |
| 0.64      | 1.00      | 0.76       | 0.76       | 0.88       | 1.00       | 0.88       | 0.76       |
| 0.81      | 1.18      | 0.93       | 0.93       | 0.93       | 1.06       | 0.93       | 0.81       |
| 0.79      | 1.15      | 0.91       | 0.91       | 1.03       | 1.03       | 1.03       | 0.91       |
| 0.91      | 1.28      | 1.04       | 1.04       | 1.16       | 1.16       | 1.04       | 1.04       |
| 0.98      | 1.34      | 1.10       | 1.10       | 1.22       | 1.22       | 1.22       | 1.10       |
| 1.08      | 1.57      | 1.21       | 1.21       | 1.33       | 1.45       | 1.33       | 1.21       |

| Therm, n°16 | Threm.nº17 | Therm.nº18 | Therm.nº19 | Therm.n°20 | Therm.n°21 | Therm.n°22 | Therm.n°23 |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.97        | 1.10       | 0.97       | 0.97       | 0.97       | 0.50       | 0.50       | 0.62       |
| 0.94        | 0.94       | 0.94       | 0.94       | 0.94       | 0.59       | 0.34       | 0.47       |
| 0.79        | 0.92       | 0.92       | 0.92       | 0.79       | 0.44       | 0.32       | 0.44       |
| 0.75        | 0.88       | 0.88       | 0.88       | 0.88       | 0.53       | 0.28       | 0.41       |
| 0.85        | 0.85       | 0.85       | 0.85       | 0.73       | 0.51       | 0.26       | 0.39       |
| 0.83        | 0.83       | 0.83       | 0.83       | 0.83       | 0.49       | 0.24       | 0.36       |
| 0.81        | 0.93       | 0.93       | 0.81       | 0.81       | 0.47       | 0.34       | 0.34       |
| 0.83        | 0.83       | 0.83       | 0.83       | 0.83       | 0.49       | 0.25       | 0.37       |
| 0.90        | 0.90       | 0.90       | 0.90       | 0.90       | 0.68       | 0.44       | 0.56       |
| 0.89        | 1.01       | 1.01       | 0.89       | 0.89       | 0.67       | 0.43       | 0.55       |
| 1.03        | 1.03       | 1.03       | 1.03       | 1.03       | 0.70       | 0.45       | 0.57       |
| 0.91        | 0.91       | 0.91       | 0.91       | 0.91       | 0.70       | 0.45       | 0.58       |
| 0.81        | 0.81       | 0.81       | 0.81       | 0.81       | 0.48       | 0.24       | 0.36       |
| 0.65        | 0.65       | 0.65       | 0.65       | 0.65       | 0.44       | 0.08       | 0.20       |
| 0.52        | 0.52       | 0.52       | 0.52       | 0.52       | 0.19       | -0.05      | 0.07       |
| 0.52        | 0.64       | 0,52       | 0.64       | 0.64       | 0.31       | 0.07       | 0.19       |
| 0.57        | 0.69       | 0.57       | 0.57       | 0.57       | 0.37       | 0.12       | 0.24       |
| 0.69        | 0.69       | 0.69       | 0.69       | 0.57       | 0.49       | 0.12       | 0.24       |
| 0.88        | 0.88       | 0.88       | 0.88       | 0.88       | 0.68       | 0.32       | 0.44       |
| 0.84        | 0.84       | 0.84       | 0.84       | 0.84       | 0.64       | 0.28       | 0.40       |
| 0.80        | 0.80       | 0.80       | 0.80       | 0,80       | 0.72       | 0.36       | 0.48       |
| 0.88        | 1.00       | 1.00       | 1.00       | 0.88       | 0.80       | 0.44       | 0.56       |
| 1.06        | 1.06       | 1.06       | 1.06       | 0.93       | 0.86       | 0.49       | 0.62       |
| 1.03        | 1.15       | 1.03       | 1.03       | 1.03       | 0.96       | 0.59       | 0.71       |
| 1.16        | 1.16       | 1.16       | 1.16       | 1.16       | 0.96       | 0.72       | 0.84       |
| 1.22        | 1.22       | 1.22       | 1.22       | 1.22       | 1.15       | 0.79       | 0.91       |
| 1.45        | 1.45       | 1.45       | 1.33       | 1.33       | 1.25       | 0.89       | 1.01       |

٠.

| Therm.n°24 | Therm.n°25 | Therm.n°26 | Therm.n°27 | Therm.n°28 | Therm:n°29 | Therm.n°30 | Therm.n°31 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.62       | 0.50       | 0.50       | 0.50       | 0.50       | 0.50       | 0.50       | 0.74       |
| 0.47       | 0.47       | 0.34       | 0.34       | 0.34       | 0.47       | 0.34       | 0.59       |
| 0.44       | 0.32       | 0.32       | 0.32       | 0.32       | 0.32       | 0.32       | 0.57       |
| 0.41       | 0.41       | 0.28       | 0.28       | 0.28       | 0.28       | 0.28       | 0.53       |
| 0.39       | 0.39       | 0.26       | 0.26       | 0.26       | 0.26       | 0.26       | 0.51       |
| 0.36       | 0.36       | 0.36       | 0.24       | 0.24       | 0.24       | 0.24       | 0.49       |
| 0.34       | 0.34       | 0.34       | 0.34       | 0.22       | 0.22       | 0.22       | 0.47       |
| 0.37       | 0.37       | 0.25       | 0.25       | 0.25       | 0.25       | 0.25       | 0.49       |
| 0.44       | 0.44       | 0.44       | 0.44       | 0.44       | 0.44       | 0.32       | 0.56       |
| 0.55       | 0.43       | 0.43       | 0.43       | 0.43       | 0.43       | 0.31       | 0.67       |
| 0.57       | 0.45       | 0.45       | 0.45       | 0.45       | 0.45       | 0.33       | 0.70       |
| 0.45       | 0.45       | 0.45       | 0.33       | 0.45       | 0.33       | 0.33       | 0.58       |
| 0.36       | 0.36       | 0.24       | 0.24       | 0.24       | 0.24       | 0.12       | 0.48       |
| 0.20       | 0.20       | 0.08       | 0.08       | 0.08       | 0.08       | -0.04      | 0.32       |
| 0.07       | 0.07       | -0.05      | -0.05      | -0.05      | -0.05      | -0.17      | 0.19       |
| 0.19       | 0.19       | 0.07       | 0.07       | 0.07       | 0.07       | -0.05      | 0.19       |
| 0.24       | 0.12       | 0.12       | 0.12       | 0.12       | 0.12       | 0.00       | 0.24       |
| 0.24       | 0.24       | 0.12       | 0.12       | 0.12       | 0.12       | 0.00       | 0.36       |
| 0.44       | 0.44       | 0.32       | 0.32       | 0.32       | 0.32       | 0.20       | 0.44       |
| 0.40       | 0.40       | 0.28       | 0.28       | 0.28       | 0.28       | 0.16       | 0.52       |
| 0.48       | 0.48       | 0.36       | 0.36       | 0.24       | 0.24       | 0.12       | 0.48       |
| 0.56       | 0.44       | 0.44       | 0.44       | 0.44       | 0.44       | 0.32       | 0.68       |
| 0.62       | 0.62       | 0.49       | 0.62       | 0.49       | 0.49       | 0.37       | 0.74       |
| 0.71       | 0.71       | 0.59       | 0.59       | 0.59       | 0.47       | 0.35       | 0.84       |
| 0.84       | 0.72       | 0.60       | 0.72       | 0.60       | 0.60       | 0.48       | 0.84       |
| 0.91       | 0.91       | 0.79       | 0.79       | 0.67       | 0.67       | 0.55       | 0.91       |
| 1.01       | 0.89       | 0.89       | 0.89       | 0.77       | 0.77       | 0.65       | 1.13       |

| Therm.n°32 | Therm.n°33 | Therm.n°34 | Therm.n°35 | Therm.n°36 | Therm.n°37   | Therm.n°38 | Therm.n°39 |
|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|------------|------------|
| 0.62       | 0.62       | 0.62       | 0.74       | 0.74       | 0.74         | 0.62       | 0.74       |
| 0.59       | 0.59       | 0.47       | 0.59       | 0.71       | 0.59         | 0.59       | 0.71       |
| 0.44       | 0.44       | 0.44       | 0.57       | 0.57       | 0.57         | 0.44       | 0.57       |
| 0.41       | 0.41       | 0.41       | 0.53       | 0.53       | 0. <u>53</u> | 0.41       | 0.53       |
| 0.39       | 0.51       | 0.39       | 0.51       | 0.51       | 0.51         | 0.39       | 0.51       |
| 0.36       | 0.49       | 0.36       | 0.49       | 0.49       | 0.49         | 0.36       | 0.49       |
| 0.47       | 0.47       | 0.34       | 0.59       | 0.59       | 0.47         | 0.47       | 0.59       |
| 0.37       | 0.49       | 0.37       | 0.49       | 0.49       | 0.49         | 0.37       | 0.49       |
| 0.56       | 0.56       | 0.44       | 0.56       | 0.56       | 0.56         | 0.44       | 0.56       |
| 0.55       | 0.55       | 0.43       | 0.55       | 0.55       | 0.55         | 0.43       | 0.67       |
| 0.57       | 0.57       | 0.45       | 0.70       | 0.57       | 0.57         | 0.45       | 0.70       |
| 0.45       | 0.58       | 0.45       | 0.58       | 0.58       | 0.45         | 0.45       | 0.58       |
| 0.36       | 0.36       | 0.36       | 0.48       | 0.36       | 0.36         | 0.36       | 0.48       |
| 0.20       | 0.20       | 0.20       | 0.32       | 0.32       | 0.20         | 0.20       | 0.32       |
| 0.07       | 0.07       | 0.07       | 0.19       | 0.07       | 0.07         | 0.07       | 0.19       |
| 0.07       | 0.19       | 0.07       | 0.19       | 0.19       | 0.19         | 0.07       | 0.31       |
| 0.24       | 0.24       | 0.12       | 0.24       | 0.24       | 0.12         | 0.12       | 0.37       |
| 0.24       | 0.24       | 0.12       | 0.36       | 0.24       | 0.24         | 0.12       | 0.36       |
| 0.44       | 0.44       | 0.32       | 0.56       | 0.44       | 0.32         | 0.32       | 0.56       |
| 0.40       | 0.40       | 0.28       | 0.52       | 0.40       | 0.28         | 0.28       | 0.52       |
| 0.36       | 0,48       | 0.36       | 0.48       | 0.36       | 0.36         | 0.36       | 0.60       |
| 0.56       | 0.68       | 0.44       | 0.68       | 0.56       | 0.44         | 0.44       | 0.68       |
| 0.62       | .0.62      | 0.49       | 0.74       | 0.62       | 0.49         | 0.49       | 0.74       |
| 0.71       | 0.59       | 0.59       | 0.84       | 0.71       | 0.59         | 0.59       | 0.84       |
| 0.84       | 0.72       | 0.72       | 0.96       | 0.72       | 0.72         | 0.60       | 0.84       |
| 0.91       | 0.79       | 0.79       | 0.91       | 0.79       | 0.79         | 0.67       | 1.03       |
| 1.01       | 0.89       | 0.89       | 1.13       | 0.89       | 0.89         | 0.77       | 1.01       |

| Therm.n°40 | Therm.n°41 | Therm.n°42 | Therm.n°43 | Therm.n°44 | therm.n°45 | Therm.nº46 | Therm.n°47 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.86       | -0.11      | 0.02       | 0.01       | 0.02       | 0.01       | 0.02       | 0.02       |
| 0.71       | -0.25      | -0.13      | -0.01      | -0.13      | -0.14      | -0.01      | -0.13      |
| 0.69       | -0.28      | -0.15      | -0.16      | -0.15      | -0.16      | -0.15      | -0.15      |
| 0.65       | -0.31      | -0.19      | -0.19      | -0.19      | -0.19      | -0.19      | -0.19      |
| 0.63       | -0.33      | -0.20      | -0.21      | -0.20      | -0.21      | -0.08      | -0.20      |
| 0.61       | -0.35      | -0.22      | -0.23      | -0.22      | -0.23      | -0.10      | -0.22      |
| 0.59       | -0.24      | -0.24      | -0.13      | -0.12      | -0.13      | 0.00       | -0.24      |
| 0.61       | -0.34      | -0.22      | -0.22      | -0.22      | -0.22      | -0.09      | -0.22      |
| 0.68       | -0.26      | -0.14      | -0.03      | -0.02      | -0.03      | -0.02      | -0.14      |
| 0.67       | -0.27      | -0.15      | -0.04      | -0.03      | -0.04      | 0.09       | -0.15      |
| 0.70       | -0.12      | 0.00       | -0.01      | 0.00       | -0.01      | 0.12       | -0.12      |
| 0.70       | -0.24      | -0.12      | -0.01      | -0.12      | -0.01      | 0.12       | -0.12      |
| 0.48       | -0.33      | -0.21      | -0.22      | -0.21      | -0.22      | 0.03       | -0.21      |
| 0.44       | -0.49      | -0.37      | -0.26      | -0.37      | -0.38      | -0.13      | -0.37      |
| 0.31       | -0.62      | -0.50      | -0.51      | -0.50      | -0.51      | -0.26      | -0.62      |
| 0.31       | -0.62      | -0.38      | -0.39      | -0.38      | -0.39      | -0.26      | -0.50      |
| 0.37       | -0.57      | -0.32      | -0.34      | -0.45      | -0.34      | -0.20      | -0.45      |
| 0.49       | -0.44      | -0.32      | -0.21      | -0.32      | -0.34      | -0.08      | -0.44      |
| 0.56       | -0.25      | -0.13      | -0.14      | -0.13      | -0.14      | 0.11       | -0.25      |
| 0.52       | -0.28      | -0.16      | -0.18      | -0.16      | -0.18      | 0.08       | -0.28      |
| 0.60       | -0.20      | -0.20      | -0.10      | -0.20      | -0.22      | 0.04       | -0.20      |
| 0.68       | -0.25      | -0.13      | -0.02      | -0.13      | -0.14      | _0.12      | -0.13      |
| 0.86       | -0.07      | 0.05       | 0.04       | 0.05       | 0.04       | 0.30       | -0.07      |
| 0.84       | -0.09      | 0.03       | 0.02       | 0.03       | 0.02       | 0.28       | -0.09      |
| 0.96       | 0.04       | 0.04       | 0.15       | 0.16       | 0.15       | 0.40       | 0.04       |
| 1.03       | 0.11       | 0.23       | 0.21       | 0.23       | 0.21       | 0.47       | 0.11       |
| 1.13       | 0.21       | 0.33       | 0.32       | 0.33       | 0.32       | 0.70       | 0.33       |

| Therm.n°48 | Therm.n°49 | Therm.n°50 | Therm.n°51 | Therm.n°52 | Therm.n°53 | Therm.n°54 | Therm.n°55 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| -0.11      | -0.11      | -0.35      | 0.01       | 0.14       | 0.14       | 0.14       | 0.26       |
| -0.26      | -0.14      | -0.50      | -0.01      | -0.01      | 0.12       | -0.01      | 0.24       |
| -0.28      | -0.28      | -0.52      | -0.16      | -0.04      | -0.03      | -0.04      | 0.09       |
| -0.31      | -0.19      | -0,55      | -0.19      | -0.07      | -0.06      | -0.07      | 0.06       |
| -0.33      | -0.21      | -0.57      | -0.21      | -0.09      | -0.08      | -0.09      | 0.04       |
| -0.35      | -0.23      | -0.59      | -0.23      | -0.11      | -0.10      | -0.11      | 0.02       |
| -0.37      | -0.25      | -0.61      | -0.13      | -0.13      | -0.12      | -0.13      | 0.00       |
| -0.35      | -0.22      | -0.58      | -0.22      | -0.10      | -0.09      | -0.22      | 0.03       |
| -0.27      | -0.15      | -0.51      | -0.15      | -0.03      | -0.02      | -0.03      | 0.10       |
| -0.28      | -0.16      | -0.51      | -0.16      | -0.04      | 0.09       | -0.04      | 0.09       |
| -0.26      | -0.13      | -0.37      | -0.01      | -0.01      | 0.12       | -0.01      | 0.24       |
| -0.25      | -0.13      | -0.49      | -0.13      | -0.01      | 0.00       | -0.01      | 0.12       |
| -0.47      | -0.34      | -0.58      | -0.22      | -0.22      | -0.09      | -0.22      | 0.03       |
| -0.50      | -0.50      | -0.74      | -0.38      | -0.26      | -0.25      | -0.38      | -0.13      |
| -0.75      | -0.63      | -0.86      | -0.51      | -0.51      | -0.38      | -0.51      | -0.38      |
| -0.63      | -0.39      | -0.74      | -0.39      | -0.39      | -0.38      | -0.39      | -0.26      |
| -0.58      | -0.46      | -0.69      | -0.34      | -0.34      | -0.32      | -0.34      | -0.20      |
| -0.58      | -0.46      | -0.81      | -0.46      | -0.34      | -0.32      | -0.34      | -0.20      |
| -0.38      | -0.26      | -0.61      | -0.26      | -0.14      | -0.01      | -0.14      | -0.01      |
| -0.42      | -0.30      | -0.53      | -0.18      | -0.18      | -0.16      | -0.18      | 0.08       |
| -0.46      | -0.22      | -0.57      | -0.22      | -0.22      | -0.08      | -0.22      | 0.04       |
| -0.38      | -0.14      | -0.49      | -0.14      | -0.14      | 0.00       | -0.14      | 0.12       |
| -0.32      | -0.08      | -0.43      | -0.08      | -0.08      | 0.05       | -0.08      | 0.17       |
| -0.22      | -0.10      | -0.45      | -0.10      | -0.10      | 0.03       | -0.10      | 0.15       |
| -0.22      | 0.02       | -0.32      | 0.02       | 0.02       | 0.16       | 0.15       | 0.40       |
| -0.03      | 0.21       | -0.25      | 0.09       | 0.09       | 0.23       | 0.21       | 0.47       |
| 0.08       | 0.32       | -0.03      | 0.20       | 0.32       | 0.33       | 0.32       | 0.58       |

| Therm.n°56 | Therm.n°57 | Therm.n°58 | Therm.n°59 | Therm.n°60 | Therm.n°61 | Therm.nº62 | Therm.nº63 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.26       | 0.14       | 0.14       | 0.26       | 1.13       | 0.50       | 0.50       | 0.38       |
| 0.11       | 0.12       | 0.12       | 0.11       | 0.98       | 0.47       | 0.47       | 0.35       |
| -0.04      | -0.03      | -0.03      | 0.09       | 0.95       | 0.33       | 0.32       | 0.33       |
| -0.07      | -0.06      | -0.06      | 0.05       | 0.92       | 0.41       | 0.28       | 0.29       |
| -0.09      | -0.08      | -0.08      | 0.03       | 0.77       | 0.39       | 0.39       | 0.27       |
| -0.11      | -0.10      | -0.10      | 0.01       | 0.75       | 0.25       | 0.24       | 0.25       |
| -0.01      | -0.12      | -0.12      | -0.01      | 0.85       | 0.35       | 0.34       | 0.23       |
| -0.10      | -0.09      | -0.09      | 0.02       | 0.88       | 0.38       | 0.37       | 0.26       |
| -0.03      | -0.02      | -0.02      | 0.09       | 0.83       | 0.45       | 0.44       | 0.33       |
| 0.08       | -0.03      | -0.03      | 0.08       | 0.94       | 0.44       | 0.43       | 0.32       |
| 0.11       | 0.00       | 0.00       | 0.11       | 0.97       | 0.46       | 0.45       | 0.34       |
| -0.01      | 0.00       | 0.00       | 0.11       | 0.85       | 0.34       | 0.33       | 0.22       |
| -0.10      | -0.09      | -0.09      | -0.10      | 0.76       | 0.13       | 0.24       | 0.13       |
| -0.26      | -0.37      | -0.37      | -0.26      | 0.60       | 0.09       | 0.08       | -0.03      |
| -0.39      | -0.50      | -0.50      | -0.39      | 0.47       | -0.04      | -0.05      | -0.16      |
| -0.39      | -0.38      | -0.38      | -0.27      | 0.59       | -0.04      | 0.07       | -0.04      |
| -0.22      | -0.45      | -0.45      | -0.22      | 0.52       | 0.01       | 0.12       | 0.01       |
| -0.34      | -0.32      | -0.32      | -0.21      | 0.64       | 0.14       | 0.12       | 0.02       |
| -0.02      | -0.13      | -0.13      | -0.02      | 0.84       | 0.33       | 0.32       | 0.21       |
| -0.18      | -0.16      | -0.16      | -0.06      | 0.80       | 0.29       | 0.28       | 0.17       |
| -0.22      | -0.20      | -0.20      | -0.10      | 0.76       | 0.25       | 0.36       | 0.25       |
| -0.02      | -0.13      | -0.13      | -0.02      | 0.84       | 0.33       | 0.44       | 0.21       |
| 0.04       | -0.07      | -0.07      | 0.04       | 0.90       | 0.39       | 0.49       | 0.39       |
| 0.02       | 0.03       | 0.03       | 0.14       | 0.88       | 0.49       | 0.47       | 0.37       |
| 0.15       | 0.04       | 0.04       | 0.15       | 1.01       | 0.49       | 0.60       | 0.49       |
| 0.21       | 0.11       | 0.11       | 0.33       | 1.07       | 0.56       | 0.67       | 0.56       |
| 0.32       | 0.33       | 0.33       | 0.44       | 1.18       | 0.79       | 0.77       | 0.67       |

| Therm.n°64 | Therm.nº65 | Therm.n°66 | Therm.n°67 | Therm.n°68 | Therm.n°69 | Therm.nº70 | Therm.n°71 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.37       | 0.25       | 0.37       | 0.25       | 0.25       | 0.37       | 0.25       | 0.38       |
| 0.34       | 0.34       | 0.34       | 0.22       | 0.22       | 0.34       | 0.22       | 0.23       |
| 0.20       | 0.20       | 0.20       | 0.08       | 0.08       | 0.20       | 0.20       | 0.20       |
| 0.28       | 0.16       | 0.28       | 0.16       | 0.16       | 0.16       | 0.16       | 0.17       |
| 0.26       | 0.14       | 0.26       | 0.14       | 0.14       | 0.14       | 0.14       | 0.15       |
| 0.24       | 0.12       | 0.24       | 0.12       | 0.12       | 0.12       | 0.12       | 0.13       |
| 0.34       | 0.10       | 0.22       | 0.10       | 0.10       | 0.10       | 0.10       | 0.11       |
| 0.37       | 0.13       | 0.25       | 0.13       | 0.13       | 0.13       | 0.13       | 0.13       |
| 0.44       | 0.20       | 0.32       | 0.20       | 0.20       | 0.20       | 0.20       | 0.21       |
| 0.43       | 0.19       | 0.31       | 0.19       | 0.19       | 0.19       | 0.19       | 0.20       |
| 0.45       | 0.21       | 0.33       | 0.21       | 0.21       | 0.21       | 0.21       | 0.22       |
| 0.45       | 0.09       | 0.21       | 0.21       | 0.21       | 0.21       | 0.21       | 0.22       |
| 0.24       | 0.00       | 0.12       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.01       |
| 0.08       | -0.16      | -0.04      | -0.16      | -0.16      | -0.16      | -0.16      | -0.15      |
| -0.05      | -0.29      | -0.17      | -0.29      | -0.29      | -0.17      | -0.17      | -0.16      |
| 0.07       | -0.17      | -0.05      | -0.05      | -0.05      | -0.05      | -0.05      | -0.16      |
| 0.12       | -0.12      | 0.12       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.01       |
| 0.12       | -0.12      | 0.00       | -0.12      | -0.12      | -0.12      | -0.12      | -0.11      |
| 0.44       | 0.08       | 0.20       | 0.08       | 0.08       | 0.08       | 0.08       | 0.09       |
| 0.40       | 0.04       | 0.16       | 0.04       | 0.04       | 0.04       | 0.04       | 0.05       |
| 0.36       | 0.00       | 0.24       | 0.12       | 0.00       | 0.12       | 0.12       | 0.13       |
| 0.44       | 0.08       | 0.32       | 0.20       | 0.20       | 0.20       | _0.20      | 0.21       |
| 0.62       | 0.13       | 0.37       | 0.25       | 0.25       | 0.37       | 0.25       | 0.27       |
| 0.59       | 0.23       | 0.47       | 0.23       | 0.23       | 0.35       | 0.35       | 0.25       |
| 0.72       | 0.36       | 0.48       | 0.48       | 0.36       | 0.48       | 0.48       | 0.37       |
| 0.79       | 0.30       | 0.55       | 0.42       | 0.42       | 0.55       | 0.55       | 0.44       |
| 1.01       | 0.53       | 0.65       | 0.65       | 0.53       | 0.65       | 0.65       | 0.67       |

| Therm.n°72 | Therm.n°73 | Therm.n°74 | Therm.n°75 | Therm.n°76 | Therm.n°77 | Therm.n°78 | Therm.n°79 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.37       | 0.37       | 0.37       | 0.37       | 0.50       | 0.37       | 0.37       | 0.50       |
| 0.34       | 0.34       | 0.34       | 0.22       | 0.34       | 0.34       | 0.34       | 0.47       |
| 0.20       | 0.20       | 0.20       | 0.20       | 0.32       | 0.20       | 0.20       | 0.32       |
| 0.16       | 0.16       | 0.16       | 0.16       | 0.16       | 0.28       | 0.16       | 0.28       |
| 0.14       | 0.26       | 0.14       | 0.14       | 0.26       | 0.26       | 0.26       | 0.26       |
| 0.12       | 0.24       | 0.12       | 0.12       | 0.24       | 0.24       | 0.24       | 0.24       |
| 0.10       | 0.22       | 0.10       | 0.10       | 0.22       | 0.22       | 0.22       | 0.22       |
| 0.13       | 0.25       | 0.13       | 0.13       | 0.25       | 0.25       | 0.25       | 0.25       |
| 0.20       | 0.32       | 0.20       | 0.20       | 0.32       | 0.32       | 0.32       | 0.32       |
| 0.19       | 0.31       | 0.31       | 0.19       | 0.31       | 0.31       | 0.31       | 0.31       |
| 0.33       | 0.33       | 0.33       | 0.33       | 0.33       | 0.33       | 0.33       | 0.45       |
| 0.21       | 0.21       | 0.21       | 0.21       | 0.21       | 0.21       | 0.21       | 0.33       |
| 0.00       | 0.12       | 0.00       | 0.00       | 0.12       | 0.12       | 0.12       | 0.24       |
| -0.04      | -0.04      | -0.04      | -0.04      | -0.04      | -0.04      | -0.04      | 0.08       |
| -0.17      | -0.17      | -0.17      | -0.17      | -0.17      | -0.17      | -0.17      | -0.17      |
| -0.05      | -0.05      | -0.05      | -0.05      | -0.05      | -0.05      | 0.07       | 0.07       |
| 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.12       |
| -0.12      | 0.00       | 0.00       | -0.12      | 0.00       | 0.00       | 0.00       | 0.00       |
| 0.08       | 0.08       | 0.20       | 0.08       | 0.20       | 0.20       | 0.20       | 0.20       |
| 0.04       | 0.04       | 0.04       | 0.16       | 0.16       | 0.16       | 0.16       | 0.28       |
| 0.12       | 0.12       | 0.12       | 0.12       | 0.12       | 0.12       | 0.24       | 0.12       |
| 0.20       | 0.20       | 0.20       | 0.20       | 0.32       | 0.32       | 0.32       | 0.32       |
| 0.37       | 0.37       | 0.37       | 0.37       | 0.37       | 0.37       | 0.37       | 0.37       |
| 0.35       | 0.35       | 0.35       | 0.35       | 0.35       | 0.47       | 0.35       | 0.47       |
| 0.48       | 0.48       | 0.48       | 0.48       | 0.48       | 0.48       | 0.48       | 0.60       |
| 0.42       | 0.42       | 0.42       | 0.55       | 0.55       | 0.55       | 0.55       | 0.67       |
| 0.65       | 0.53       | 0.65       | 0.65       | 0.65       | 0.65       | 0.77       | 0.77       |

| Therm.n°80 | Therm.n°81 | Therm.n°82 | Therm.n°83 | Therm.n°84 | Therm.n°85 | Therm.n°86 | Therm.n°87 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.50       | -0.23      | -0.11      | -0.23      | -0.23      | -0.23      | -0.23      | -0.23      |
| 0.34       | -0.26      | -0.13      | -0.26      | -0.26      | -0.26      | -0.26      | -0.26      |
| 0.32       | -0.28      | -0.28      | -0.28      | -0.40      | -0.40      | -0.28      | -0.40      |
| 0.28       | -0.31      | -0.31      | -0.31      | -0.31      | -0.44      | -0.31      | -0.44      |
| 0.26       | -0.33      | -0.33      | -0.33      | -0.33      | -0.33      | -0.33      | -0.46      |
| 0.24       | -0.35      | -0.22      | -0.35      | -0.35      | -0.35      | -0.35      | -0.35      |
| 0.22       | -0.37      | -0.24      | -0.37      | -0.37      | -0.37      | -0.25      | -0.37      |
| 0.25       | -0.22      | -0.34      | -0.35      | -0.47      | -0.35      | -0.35      | -0.35      |
| 0.32       | -0.27      | -0.14      | -0.27      | -0.27      | -0.27      | -0.27      | -0.27      |
| 0.31       | -0.16      | -0.15      | -0.28      | -0.40      | -0.28      | -0.28      | -0.28      |
| 0.45       | -0.13      | -0.12      | -0.13      | -0.26      | -0.26      | -0.13      | -0.26      |
| 0.33       | -0.25      | -0.24      | -0.25      | -0.37      | -0.37      | -0.25      | -0.37      |
| 0.12       | -0.34      | -0.33      | -0.34      | -0.47      | -0.47      | -0.34      | -0.47      |
| 0.08       | -0.50      | -0.49      | -0.50      | -0.63      | -0.50      | -0.50      | -0.50      |
| -0.17      | -0.63      | -0.62      | -0.63      | -0.75      | -0.75      | -0.63      | -0.75      |
| 0.07       | -0.51      | -0.38      | -0.39      | -0.51      | -0.51      | -0.39      | -0.51      |
| 0.12       | -0.46      | -0.45      | -0.46      | -0.58      | -0.46      | -0.34      | -0.46      |
| 0.00       | -0.46      | -0.44      | -0.46      | -0.70      | -0.58      | -0.46      | -0.58      |
| 0.20       | -0.26      | -0.25      | -0.38      | -0.38      | -0.26      | -0.26      | -0.26      |
| 0.28       | -0.30      | -0.28      | -0.42      | -0.42      | -0.42      | -0.30      | -0.42      |
| 0.24       | -0.22      | -0.20      | -0.34      | -0.46      | -0.34      | -0.22      | -0.34      |
| 0.32       | -0.14      | -0.13      | -0.26      | -0.38      | -0.26      | -0.14      | -0.26      |
| 0.49       | -0.08      | -0.07      | -0.20      | -0.20      | -0.20      | -0.08      | -0.20      |
| 0.47       | -0.10      | 0.03       | -0.10      | -0.22      | -0.10      | -0.10      | -0.10      |
| 0.60       | 0.02       | 0.04       | -0.10      | -0.10      | 0.02       | 0.02       | 0.02       |
| 0.55       | 0.09       | 0.23       | 0.09       | -0.03      | 0.09       | 0.09       | 0.09       |
| 0.77       | 0.32       | 0.33       | 0.20       | 0.08       | 0.20       | 0.32       | 0.20       |

| Therm.n°88 | Therm.n°89 | Therm.n°90 | Therm.n°91 | Therm.n°92 | Therm.n°93 | Therm.n°94 | Therm.n°95 |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| -0.36      | -0.23      | -0.23      | -0.11      | -0.11      | -0.11      | -0.11      | -0.11      |
| -0.38      | -0.26      | -0.38      | -0.14      | -0.14      | -0.14      | -0.14      | -0.14      |
| -0.40      | -0.40      | -0.40      | -0.28      | -0.28      | -0.28      | -0.28      | -0.16      |
| -0.44      | -0.44      | -0.44      | -0.31      | -0.31      | -0.31      | -0.31      | -0.19      |
| -0.46      | -0.46      | -0.46      | -0.33      | -0.33      | -0.33      | -0.33      | -0.21      |
| -0.48      | -0.48      | -0.48      | -0.35      | -0.35      | -0.35      | -0.35      | -0.23      |
| -0.50      | -0.37      | -0.37      | -0.25      | -0.37      | -0.25      | -0.37      | -0.25      |
| -0.47      | -0.35      | -0,47      | -0.22      | -0.35      | -0.35      | -0.22      | -0.22      |
| -0.39      | -0.27      | -0.27      | -0.15      | -0.27      | -0.15      | -0.15      | -0.15      |
| -0.40      | -0.40      | -0.40      | -0.28      | -0.28      | -0.16      | -0.16      | -0.16      |
| -0.38      | -0.26      | -0.26      | -0.13      | -0.13      | -0.13      | -0.13      | -0.13      |
| -0.50      | -0.37      | -0.37      | -0.25      | -0.25      | -0.25      | -0.25      | -0.25      |
| -0.59      | -0.47      | -0.59      | -0.34      | -0.47      | -0.47      | -0.34      | -0.34      |
| -0.75      | -0.63      | -0,63      | -0.50      | -0.63      | -0.63      | -0.50      | -0.50      |
| -0.88      | -0.75      | -0.75      | -0.63      | -0.63      | -0.63      | -0.63      | -0.63      |
| -0.75      | -0.51      | -0.63      | -0.39      | -0.51      | -0.51      | -0.39      | -0.39      |
| -0.70      | -0.46      | -0.58      | -0.46      | -0.46      | -0.46      | -0.46      | -0.46      |
| -0.70      | -0.58      | -0.58      | -0.46      | -0.58      | -0.46      | -0.46      | -0.46      |
| -0.50      | -0.38      | -0.38      | -0.26      | -0.38      | -0.26      | -0.26      | -0.26      |
| -0.66      | -0.42      | -0.54      | -0.30      | -0.42      | -0.42      | -0.30      | -0.30      |
| -0.58      | -0.34      | -0.46      | -0.22      | -0.34      | -0.34      | -0.22      | -0.34      |
| -0.50      | -0.26      | -0.38      | -0.14      | -0.38      | -0.26      | -0.14      | -0.26      |
| -0.32      | -0.20      | -0.20      | -0.08      | -0.20      | -0.20      | -0.08      | -0.08      |
| -0.34      | -0.10      | -0.22      | -0.10      | -0.22      | -0.22      | 0.02       | -0.10      |
| -0.22      | 0.02       | -0.10      | 0.15       | -0.10      | -0.10      | 0.02       | 0.02       |
| -0.15      | 0.09       | -0.03      | 0.21       | -0.03      | -0.03      | 0.21       | 0.09       |
| -0.04      | 0.20       | 0.08       | 0.32       | 0.08       | 0.08       | 0.20       | 0.20       |

|            |            |            |            |             | m1          | (T)         | <b>51</b>   |
|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Therm.nº96 | Therm.nº97 | Therm.n°98 | Therm.nº99 | Therm.nº100 | Therm.nº101 | Therm.nº102 | Therm.nº103 |
| 0.01       | -0.11      | 0.01       | 0.01       | 0.01        | 2.84        | 2.48        | 2.35        |
| -0.01      | -0.14      | -0.14      | -0.01      | -0.01       | 2.81        | 2.32        | 2.32        |
| -0.16      | -0.28      | -0.28      | -0.16      | -0.16       | 2.66        | 2.30        | 2.17        |
| -0.19      | -0.19      | -0.19      | -0.19      | -0.19       | 2.62        | 2.38        | 2.13        |
| -0.21      | -0.33      | -0.21      | -0.09      | -0.21       | 2.72        | 2.36        | 2.23        |
| -0.23      | -0.35      | -0.23      | -0.11      | -0.23       | 2.70        | 2.33        | 2.21        |
| -0.13      | -0.37      | -0.25      | -0.13      | -0.25       | 2.67        | 2.31        | 2.19        |
| -0.22      | -0.35      | -0.22      | -0.10      | -0.10       | 2.70        | 2.46        | 2.21        |
| -0.03      | -0.27      | -0.15      | -0.03      | -0.15       | 2.77        | 2.52        | 2.28        |
| -0.16      | -0.28      | -0.16      | -0.04      | -0.04       | 2.75        | 2.51        | 2.27        |
| -0.01      | -0.13      | -0.13      | -0.01      | -0.01       | 2.90        | 2.53        | 2.29        |
| -0.13      | -0.25      | -0.25      | -0.13      | -0.13       | 2.78        | 2.41        | 2.17        |
| -0.22      | -0.34      | -0.34      | -0.22      | -0.22       | 2.56        | 2.32        | 2.08        |
| -0.38      | -0.50      | -0.50      | -0.38      | -0.38       | 2.52        | 2.16        | 1.92        |
| -0.51      | -0.63      | -0.63      | -0.51      | -0.51       | 2.39        | 2.15        | 1.91        |
| -0.27      | -0.51      | -0.51      | -0.27      | -0.27       | 2.63        | 2.27        | 2.15        |
| -0.34      | -0.46      | -0.46      | -0.34      | -0.22       | 2.56        | 2.32        | 2.08        |
| -0.34      | -0.58      | -0.58      | -0.34      | -0.34       | 2.44        | 2.20        | 1.96        |
| -0.14      | -0.38      | -0.26      | -0.14      | -0.14       | 2.76        | 2.40        | 2.15        |
| -0.18      | -0.42      | -0.42      | -0.18      | -0.18       | 2.72        | 2.48        | 2.12        |
| -0.10      | -0.34      | -0.34      | -0.10      | -0.10       | 2.68        | 2.44        | 2.20        |
| -0.02      | -0.26      | -0.26      | -0.14      | -0.02       | 2.88        | 2.64        | 2.28        |
| 0.04       | -0.20      | -0.08      | 0.04       | 0.04        | 2.94        | 2.70        | 2.45        |
| 0.14       | -0.22      | -0.10      | 0.02       | 0.14        | 2.92        | 2.80        | 2.43        |
| 0.15       | -0.10      | 0.02       | 0.15       | 0.27        | 3.04        | 2.92        | 2.56        |
| 0.33       | 0.09       | 0.09       | 0.21       | 0.33        | 3.11        | 2.99        | 2.63        |
| 0.44       | 0.20       | 0.20       | 0.32       | 0.44        | 3.22        | 3.10        | 2.74        |

| Therm.nº104 | Therm.nº105 | Therm.nº106 |  |
|-------------|-------------|-------------|--|
| 2.23        | 2.23        | 2.23        |  |
| 2.20        | 2.20        | 2.20        |  |
| 2.05        | 2.05        | 2.05        |  |
| 2.01        | 2.13        | 2.13        |  |
| 2.11        | 2.11        | 1.99        |  |
| 2.09        | 2.09        | 2.09        |  |
| 2.07        | 2.07        | 2.07        |  |
| 2.09        | 2.09        | 2.09        |  |
| 2.16        | 2.16        | 2.16        |  |
| 2.15        | 2.15        | 2.15        |  |
| 2.29        | 2.29        | 2.17        |  |
| 2.17        | 2.17        | 2.05        |  |
| 1.96        | 2.08        | 1.96        |  |
| 1.92        | 1.92        | 1.79        |  |
| 1.79        | 1.79        | 1.66        |  |
| 2.03        | 2.03        | 1.91        |  |
| 1.96        | 1.96        | 1.96        |  |
| 1.84        | 1.84        | 1.84        |  |
| 2.15        | 2.15        | 2.03        |  |
| 2.12        | 2.12        | 2.00        |  |
| 2.08        | 2.08        | 1.96        |  |
| 2.28        | 2.28        | 2.03        |  |
| 2.45        | 2.33        | 2.21        |  |
| 2.31        | 2.31        | 2.19        |  |
| 2.44        | 2.44        | 2.32        |  |
| 2.51        | 2.51        | 2.51        |  |
| 2.62        | 2.74        | 2.62        |  |

# SYCLOP<sup>1</sup> (SYstem of Control of Locations and Objects by Parabola) Heat Flow Sensor Parabola Used for Surveillance in Safeguards

P. Guilmain<sup>2</sup>, C. Korn, M. Cuypers EC, JRC, Ispra, Italy P. Thery University of Lille, France

### Abstract

Today, many pyroelectric and semiconductor based sensors are used for the measurement of thermal radiations emitted by the human body in order to detect its presence by measuring its temperature. Movement detectors are also used for the same purpose.

Based on heat flow technology, a new parabola detector has been developed in the LaSCo laboratory at JRC Ispra for the surveillance of a simulated nuclear material area. This detector could also be used for individual surveillance of small Pu containers.

The technical innovation consists in detection based on thermal balance variations, instead of infrared analysis.

This new detector will be described and two applications will also be presented:

- one for the detection of human intrusion in protected areas
- the second for surveillance of individual Pu containers (i.e. protection against theft)

#### 1. Introduction

To keep a continuous check on a previously defined quantity of material, different techniques are presently used: seal systems, optical surveillance, monitoring with cameras or classic sensors.

This article presents a scientifical innovation in the field of safeguards: the use of the heat flow technology for surveillance /1, 2/. It is a new low-cost approach which could complement or replace other monitoring techniques.

All traditional surveillance systems make use of semiconductor or pyroelectric sensors measuring the quantity of the incident infrared radition emitted by a source. In most detection applications these sensors are used to measure the radiation from heat sources in motion. Their principle is not particularly suitable for the surveillance of a defined zone (i.e. a corridor or a room) around which people are free to move and work, even in the unmonitored space.

The following table 1 shows the types and the characteristics of the infrared sensors presently available on the market /3/.

Passive surveillance systems are proposed here, which concentrate thermal radiation from the environment by means of a parabolic detector. Every modification of the thermal equilibrium in the monitored zone can be detected by means of a heat flow sensor. This device makes use neither of lenses nor of protective devices against convection. The spectral density of the radiation absorbed or emitted by the sensor is not disturbed.

### 2. Detection of Human Intrusion in Protected Zones

The aim of this system is the remote surveillance of locations or objects. Every object with a temperature over 0 °K emits infrared radiation, that is electromagnetic waves, the wavelength of which goes from 0.75 µm to 1000 µm, between visible light and microwaves.

Infrared radiation belongs to the physical field of thermodynamics. The heat flow sensor, usually measuring energy tranfer in steady conditions, is used here in transient conditions. Giving real information on the energy gap between a system and its environment, it can sense variations in the thermal charge (heat losses). As every variation in temperature is caused by gains or losses of energy, the EMF generated by a heat flow sensor makes it possible to determine the temperature variations in the system to which it is applied. The heat flow sensor allows to regulate the time constant according to the thermal process to be monitored, as it allows to sense the variations due to changes in the thermal charge of the process to be regulated.

The use of this detection system is a particularly important application of the heat flow sensor in transient condition

The EMF generated by a heat flow sensor fixed to a wall represents the radiant and convective exchanges with the surrounding environment. The separation of these exchanges is interesting because the convective component depends on the radiant temperature of the wall to which the sensor is applied.

Table 1: Infrared sensors presently available on the market

| Types of Detectors |   | Detectors   | Spectral<br>Response<br>(µm)                                     | Operating<br>Temperature<br>(T)  | D*<br>(cm.Hz½/W)   |   |
|--------------------|---|---|--|--|--|---|
| Thermal<br>type    | Thermal Thermocouple. Thermopile, Heat Flow<br>ype Bolomeier<br>Pneumatic cell<br>Pyroelectric detector |   | Golay cell,<br>Capacilor microphone<br>TGS, LiTaO,               | No wavalength<br>dependence  | 300<br>300<br>300<br>300                                     | $D^{*}(\lambda, 10, 1)=6 \cdot 10^{4}$<br>$D^{*}(\lambda, 10, 1)=1 \cdot 10^{4}$<br>$D^{*}(\lambda, 10, 1)=1 \cdot 10^{9}$<br>$D^{*}(\lambda, 10, 1)=2 \cdot 10^{3}$  |
| Quantum<br>type    | Intrinsic<br>type   | Photoconductive<br>is pe<br>Photovoltaic<br>Is pe | PbS<br>PbS<br>HgCdTc<br>Ge<br>InGaAs<br>InGaAs<br>InSb<br>HgCdTc | 1 to 3.6<br>1.5 to 5.8<br>2 to 16<br>0.8 to 1.8<br>0.7 to 1.7<br>1 to 3.1<br>1 to 5.5<br>2 to 16 | 300<br>304<br>77<br>300<br>300<br>77<br>77<br>77<br>77<br>77 | $D^{*}(500,600,1) = 1 \times 10^{6}$ $D^{*}(500,600,1) = 1 \times 10^{6}$ $D^{*}(500,600,1) = 2 \times 10^{10}$ $D^{*}(\lambda p, 1000,1) = 1 \times 10^{11}$ $D^{*}(\lambda p) = 5 \times 10^{17}$ $D^{*}(500,1200,1) = 1 \times 10^{19}$ $D^{*}(500,1200,1) = 1 \times 10^{19}$ |
|                    | Extransic type  |   | Ge'Au<br>Ge:Hg<br>Ge:Cu<br>Ge:Zn<br>Si:Ga<br>Si:As               | 1 to 10<br>2 to 14<br>2 to 30<br>2 to 40<br>1 to 17<br>1 to 23                                   | 77<br>4.2<br>4.2<br>4.2<br>4.2<br>4.2<br>4.2                 | D*(500,900,1)=1×10"<br>D*(500,900,1)=8×10"<br>D*(500,900,1)=8×10"<br>D*(500,900,1)=5×10"<br>D*(500,900,1)=5×10"<br>D*(500,900,1)=5×10"  |

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Patent No. LU-2488 "Dispositif de détection de rayonnement thermique et appareil de détection de présence à base d'un tel dispositif" <sup>2</sup> Research fellow at the EC, JRC, Ispra, Italy



Figure 1: Layout of surveilled areas

The EMF is positive whenever the wall absorbs thermal radiation and negative when it emits. The great advantage consists in having a calibration coefficient which is independent of the sensor temperature. The detected EMF is zero only when the sensor temperature is the same as the radiant temperature of the wall.

Furthermore, in the case of human intrusion in the surveilled area radiative exchanges are so important that the sensor's structure has been modified to obtain an EMF proportional only to radiant exchanges.

The idea consists of detecting any modification of the thermal equilibrium in a well defined volume caused by human intrusion in a monitored zone, by means of a sensor and a thermal concentrator, and not only of detecting the infrared radiations emitted by a human body at a short range (Im).

The surveillance of some areas in LaSCo (Laboratory of Surveillance and Containment) with a system which can be adjusted according to the volume (i.e. according to the distance and the observation angle) is at the basis of the surveillance system proposed and used at the JRC lspra.

#### 3. Features of the Heat Flow Sensor

The heat flow sensor which was specifically built for this purpose is fundamental to the remote monitoring system. It is very thin (0.2 mm) and produces a tension showing only the radiant exchanges between itself and the environment. This EMF is proportional to the total (or radiant) energy absorbed or emitted by the active surface of the sensor whatever its temperature. Its use is very simple as the differential structure of the sensor does not require any compensation wires.

The characteristics of this type of thermal sensor, which uses the heat produced by infrared radiation are.

- · response independent of the wavelength
- no need for a cooling system
- · use at room temperature.

Advantages of the association of a thermal sensor with a parabolic reflector:

- flexibility in adapting to the field of view by means of a voltage regulator
- no optical lens needed to focus incident thermal radiation, therefore no optical filter effect, no transmission coefficient, no glass capacitive effect
- no packaging problems, type T0-5
  - no cooling problems
  - low fabrication costs (on a large scale)
  - the sensitivity is practically the same as other sensors on the market
  - very low thermal resistance (< 1000 Ω), hence low noise, possible amplification, long surveillance range

Advantages in comparison with other surveillance systems:

- SYCLOP has an additional interest if compared with other infrared or ultrasonic surveillance systems based uniquely on movement
- SYCLOP detects the movements of a source of thermal radiation in a mon-

itored zone and also gives informatio on the evolution of the control signa during the time of modification of the thermal equilibrium in a well define volume. The modifications are translated by the sensor, which generate a real tension variation directly proportional to the quantities of energy exchanged between the environmen and the sensor itself. In this way SYCLOP detects the intruder, his presence and his position according to the distance and the angle in the monitored zone

 The various simulated attempts to violate this surveillance system were not successful. The sensor generates an EMF proportional only to exchanges by irradiation: a thermal balance is established between the sensor's temperature and the one detected by the parabolic detector. The stability of this detected EMF is strictly bound to the stability of the exchanges.

Since it is almost impossible to know the temperature of every point of the surface entered by the intruder and since the intruder's temperature must be the same as the average temperature of the surface he enters for the thermaibalance to be stable, it is very difficult to deceive this system.

#### 4. Surveillance of Single Pu Containers

A second application of this 'parabolic reflector heat flow sensor' surveillance system is as a new way of monitoring Pu storage (individual containers).

Using the same technology as in the first application, we can remotely monitor a defined zone of a room with the possibility to move and work in other parts of it. In fact, this technology is very precise and can be used to monitor not only large but also small areas (i.e. corridors and entire rooms). For this reason the thermal concentrator is selected to monitor reduced areas where a single simulated Pu container is placed.

An experimental study has confirmed all forecasts from classical modelling of parabolic mirrors. In practice, a sensor's 30 mV/W sensitivity makes it possible to monitor a container at a distance of five meters without interferences from the environment (such a distance can be increased to 12 m or more with certain configurations) (figure 2).

To characterise the system's performance we need data to model a Pu container. A stainless steel container, regulated in temperature (from 40 °C to 60 °C) has been used to characterise the sensitivity and the reliability of the system.



Figure 2: Containers surveillance with SYCLOP

#### 5. Detection surveys









### 6. Conclusions

There is a technological breakthrough in a scientific or economic field when the consequences of a scientific innovation are unforseen and unexpected.

As the control of a relevant number of physical quantities can be related to a temperature measure, every innovation in the field of thermal sensors can bring up the analysis and control methods in several applications for discussion again.

This cannot be seen yet as a technological breakthrough since it is impossible to foresee whether and which application fields will be deeply modified by this scientific innovation.

The two systems proposed represent new applications in the field of surveillance. The association of a new thermal sensor to a parabolic reflector implies specific advantages for a passive surveillance system. It is important to underline that this system is not based on infrared analysis, but on the modification of the thermal equilibrium in the surveilled zone.

#### 7. References

- "Fluxmétrie Thermique: son application aux mesures de faibles puissances dégagées et au Confinement Surveillance du Plutonium" C. SANSON, J. MONIER (CEA, CEN Fontenay-aux-roses) P. BOURRELLY, H. PATIN, R. SCHOEPP (Laboratoire de Chimie Physique Générale, Faculté des Sciences et Techniques de Marseille Saint Jerome) ESARDA84.
- (2) "Contrôle non destructif quantitatif de Plutonium et de Tritium même en petites quantités par Fluxmétrie Thermique" ESARDA87 P. BOURELLY, M. PATIN, R. SCHOEPP (Faculté de Marseille-Saint Jerome), J. MONIER (CEA Fontenay-aux-Roses), C. SANSON (CEA-Cadarache).
- /3/ Characteristics and Use of Infrared Detectors. Technical information Hamatsu SD-12/Jul. 93.



ANNEXE 11 :

a National Computer Security Association (NCSA) member





# Scopo

Questo manuale descrive le caratteristiche operative e funzionali del **Surveillance Parabola Control Software v.1.0** realizzato appositamente per l'acquisizione dei segnali elettrici provenienti da una parabola di sorveglianza sensibile alle radiazioni nel campo dell'infrarosso.

## Descrizione

Il software in questione è stato sviluppato in ambiente Lanwindows/CVI per Windows v.3.01 e necessita per il suo corretto funzionamento di una scheda Lab PC+ NATIONAL INSTRUMENTS alla quale sia stato collegato, sull'ingresso analogico #0, il segnale preamplificato proveniente dalla parabola.

Quest'ultima, deve essere alimentata a  $\pm$  6 Volt e può produrre un segnale massimo di  $\pm$  5 Volt riferiti a massa per cui la scheda di acquisizione deve essere configurata per operare con segnali di ingresso analogici compresi tra  $\pm$  5 Volt in modo RSE (Referenced Single-Ended). Nel caso specifico, il segnale proveniente dalla parabola può essere connesso al pin 1 (ACH0) ed il relativo riferimento di massa al pin 9 (AISENSE/AIGND).

Sebbene tale software possa essere utilizzato su qualsiasi PC in grado di operare in ambiente MS-Windows<sup>™</sup>, esso è stato particolarmente curato per poter operare su NOTEBOOK IBM 755 con processore 486 DX4 @ 75Mhz con schermo TFT LCD a colori 640x480 con 256 livelli di colore.

# Installazione

Prima di installare l'applicativo occorre accertarsi che sul sistema sia già presente il LabWindows/CVI Run Time Engine. Qualora non lo fosse bisogna procedere alla sua installazione dall'ambiente MS-Windows<sup>™</sup> attivando il programma SETUP.EXE presente sul dischetto LabWindows/CVI Run Time Engine.

Verificata la presenza del suddetto software, si può procedere all'installazione del software applicativo attivando nell'ambiente MS-Windows<sup>™</sup> il programma SETUP.EXE presente sul dischetto di distribuzione del software applicativo. Seguire quindi le istruzioni fornite dal programma di installazione sino al suo completamento.

Al termine dell'installazione si può avviare il programma effettuando un doppio-click sulla sua icona ed eseguire la fase di abilitazione che è richiesta solo la prima volta che si attiva il programma. Durante tale fase occorre essere in contatto telefonico con la NOS S.r.l. raggiungibile al 🖀 06 488 2806.



- schermo oscillografico, necessario per visualizzare in tempo reale l'andamento del segnale, suddiviso in 6 divisioni sulle ordinate, che rappresentano l'ampiezza del segnale in Volt, ed in 6 divisioni sulle ascisse che rappresentano il tempo, variabile in funzione della velocità di acquisizione selezionata;
- selettore operazioni sul segnale, tramite il quale è possibile scegliere il tipo di elaborazione da effettuare sul segnale di entrata tra le cinque previste e che consente di confrontare il segnale elaborato con quello direttamente proveniente dalla parabola; la selezione può essere effettuata agendo sul cursore a slitta e posizionandolo sulla funzione desiderata;
- campi di impostazione dei parametri operativi, per mezzo dei quali possono essere modificate le modalità di acquisizione e calcolo del segnale in ingresso, nonchè la scala di visualizzazione del segnale, la durata totale dell'acquisizione ed il nome dell'archivio dati da utilizzare per il salvataggio; l'impostazione di tali parametri può essere effettuata tramite digitazione diretta del valore o per mezzo dei mini-selettori posti sul lato sinistro del controllo;
- *regolatore della soglia di allarme*, che consente di impostare il livello di riferimento oltre il quale viene prodotto un allarme se il segnale (diretto o elaborato) raggiunge o supera tale soglia; tale allarme viene evidenziato dalla segnalazione luminosa posta alla sinistra del regolatore e, se selezionata tramite il controllo *suono*, da una segnalazione acustica; la regolazione può essere effettuata agendo direttamente sul cursore del regolatore (barra orizzontale) o agendo sul selettore numerico posto alla sua base;
- campi di visualizzazione automatica dei valori dell'acquisizione, per mezzo dei quali si possono ottenere delle informazioni generali sul processo di acquisizione, come la gamma del segnale di ingresso, l'effettivo intervallo di tempo di acquisizione (variabile in base al PC) ed il tempo trascorso dall'inizio dell'acquisizione;
- *bottoni di impostazione delle caratteristiche estetiche del grafico*, con i quali è possibile modificare i colori dello sfondo del pannello oscillografico nonchè della traccia e lo spessore di quest'ultima;
- *pulsanti di selezione della funzione principale*, per mezzo dei quali è possibile : visualizzare il secondo pannello video (DATI), stampare su foglio formato A4 lo schermo oscillografico (STAMPA), sospendere l'aggiornamento dei dati e della traccia sul pannello video mantenendo attiva l'acquisizione (PAUSA/FINE PAUSA)), attivare o disattivare l'acquisizione (START/STOP), uscire dall'applicazione (ESCI);



Il secondo pannello video visualizzato alla selezione del pulsante DATI è il seguente :



In esso sono identificabili, dall'alto in basso e da sinistra verso destra, i seguenti comandi ed indicatori :

- schermo oscillografico, (vedi sopra);
- *lista dei valori acquisiti*, nella quale per ogni punto acquisito (diretto o elaborato) viene inserita una riga riportante la data e l'ora dell'evento, un numero assoluto progressivo di acquisizione, il valore dell'acquisizione, lo stato dell'allarme per il punto acquisito; la barra posta sul lato destro della lista consente di far scorrere i record in avanti o indietro;
- campo di visualizzazione automatica del numero di records acquisiti, nel quale durante l'acquisizione viene incrementato il contatore il cui valore viene associato ad ogni registrazione;
- *pulsanti di selezione delle funzioni sui dati*, per mezzo dei quali è possibile : stampare un rapporto completo sui dati acquisiti (STAMPA) od archiviarlo in formato ASCII nell'archivio specificato (SALVA);



• *pulsante di ritorno*, con il quale viene ripristinato il pannello principale dell'applicazione (RITORNA).

## Dettagli

Di seguito viene descritta dettagliatamente la funzione dei controlli che principalmente regolano l'acquisizione dei dati e che, quindi, condizionano la loro interpretazione ed analisi.

- 1. selettore operazioni sul segnale
  - a) *diretto* : questa funzione consente di acquisire i dati alla cadenza specificata nel campo *Sample rate* (numero di millisecondi tra un'acquisizione e la successiva) e di visualizzarli e memorizzarli alla stessa velocità; con questa modalità operativa si può quindi osservare il segnale così come è nella realtà;
  - b) media a blocchi : questa funzione consente di acquisire singoli punti alla cadenza specificata nel campo Sample rate fino al raggiungimento di blocchi di dati della dimensione espressa nel campo Dimensione blocco, quindi di calcolare il valore medio del blocco di dati e di visualizzare e memorizzare tale valore; ad esclusione del primo blocco di dati acquisiti, nei successivi il primo valore del blocco è sempre il valore medio calcolato dal blocco precedente; con questa modalità operativa si può quindi osservare il segnale come se fosse acquisito al suo valore medio calcolato su Dimensione blocco alla cadenza pari a Sample rate \* Dimensione blocco;
  - media a blocchi sovrapposti : questa funzione consente di acquisire c) singoli punti alla cadenza specificata nel campo Sample rate fino al raggiungimento di blocchi di dati della dimensione espressa nel campo Dimensione blocco, quindi di calcolare il valore medio del blocco di dati e di visualizzare e memorizzare tale valore; ad esclusione del primo blocco di dati acquisiti, nei successivi i primi n valori del blocco, dove n è uguale al valore espresso nel campo Punti blocco sovrapposti, vengono lasciati immutati in modo da completare il blocco con un numero di acquisizioni pari a Dimensione blocco - Punti blocco sovrapposti; con questa modalità operativa, riconducibile alla funzione di cui al punto b) per il valore Punti blocco sovrapposti = 1, si può osservare il segnale come se fosse acquisito al suo valore medio calcolato su Dimensione blocco alla cadenza pari a Sample rate \* Punti blocco sovrapposti; questa sovrapposizione dei blocchi causa una variazione più lenta e più omogenea del valore medio;


a National Computer Security Association (NCSA) member

- d) differenza su medie : questa funzione è una evoluzione di quella esposta al punto c) in quanto accumula blocchi di m medie calcolate come già descritto, dove m è uguale al valore espresso nel campo Medie accumulate, e quindi calcola per ogni coppia di valori la loro differenza che si assume come valore finale del punto acquisito; questa operazione consente di effettuare una derivazione del valore medio del segnale per eliminare le componenti a bassa frequenza (variazioni lente nel tempo del segnale) ed esaltare le componenti ad alta frequenza (variazioni veloci nel tempo del segnale); poichè l'operazione di calcolo della differenza da come risultato un segnale che potrebbe essere molto piccolo, anche in funzione delle medie effettuate a monte, viene introdotto un fattore moltiplicativo sul valore finale del punto acquisito, espresso nel campo Amplificazione differenze, che consente di rendere più evidente la componente ad alta frequenza isolata;
- e) media delle differenze : questa funzione è una evoluzione di quella esposta al punto d) in quanto accumula blocchi di f differenze calcolate come già descritto, dove f è uguale al valore espresso nel campo Medie accumulate, e quindi calcola il valore medio di tali differenze che viene assunto come valore finale del punto acquisito; questa ulteriore operazione consente di eliminare componenti a frequenza troppo alta nel segnale e può essere utilizzata per discriminare il tipo di rilevamento effettuato (oggetto poco/troppo grande, poco/troppo lento, ecc.).

#### Formato dati

Di seguito viene descritto dettagliatamente il formato dei dati sia sulla stampa che sull'archivio ASCII specificato nel campo Nome archivio.

I dati sono costituiti essenzialmente da tre sezioni :

- la prima è il riepilogo dei dati e dei modi operativi impostati ed è composta da 24 righe terminate da Cr Lf,
- la seconda è l'intestazione del formato colonnare dei dati ed è composta da 2 righe terminate da Cr Lf,
- la terza è l'elenco dei dati in formato colonnare su cinque colonne.

A titolo esemplificativo nella pagina successiva è riportato un esempio del formato dei dati così come viene stampato e memorizzato nel file.



a National Computer Security Association (NCSA) member

#### Funzioni

Le funzioni effettuabili dal programma sono distribuite su due pannelli video che hanno in comune la rappresentazione dello schermo oscillografico necessario per visualizzare in tempo reale l'andamento del segnale.

Nel primo pannello sono raggruppati la maggior parte dei comandi e delle segnalazioni ed esso rappresenta il pannello principale di controllo ed osservazione, mentre nel secondo pannello è possibile visionare i dati acquisiti in formato di lista nonchè effettuare le operazioni di stampa ed archiviazione.<sup>6</sup>

Di seguito vengono illustrati i pannelli video e per ognuno di essi vengono descritte in dettaglio le funzioni svolte attraverso i vari comandi.



Il primo pannello video visualizzato alla partenza del programma è il seguente :

In esso sono identificabili, dall'alto in basso e da sinistra verso destra, i seguenti comandi ed indicatori :



a National Computer Security Association (NCSA) member

LaSCo Laboratory

\_\_\_\_\_

# Surveillance Parabola Control Software

| Segnale                      | : | Media del | le | differenze |
|------------------------------|---|-----------|----|------------|
| Dimensione blocco punti acq. | : | 10        |    |            |
| Punti blocco sovrapposti     | : | 9         |    |            |
| Numero medie accumulate      | : | 10        |    |            |
| Amplificazione               | : | 1         |    |            |
| Sample rate (ms)             | : | 100       |    |            |
| Sample rate effettivo (ms)   | : | 53.607    |    |            |
| Fondo scala Y (volt)         | : | 3.0       |    |            |
| Fondo scala X (punti)        | : | 100       |    |            |
| Soglia allarme (volt)        | : | 0.2       |    |            |
| Durata della prova (min)     | : | 0         |    |            |
| Nome archivio                | : | flusso.da | t  |            |
| Segnale max rilevato (volt)  | : | 3.0       |    |            |
| Segnale med rilevato (volt)  | : | 0.275     |    |            |
| Segnale min rilevato (volt)  | : | -2.0      |    |            |
| Numero punti acquisiti       | : | 162       |    |            |
|                              |   |           |    |            |

\_\_\_\_\_

| Data     | Ora               | Punto   | Valore          | Allarme |
|----------|-------------------|---------|-----------------|---------|
| 03-29-95 | 19:14:12          | 0000001 | -1.000          | 0       |
| 03-29-95 | 19:14:12          | 0000002 | -2.000          | 0       |
| 03-29-95 | 19:14:12          | 0000003 | 2.000           | 1       |
| 03-29-95 | 19:14:12          | 0000004 | 3.000           | 1       |
| 03-29-95 | 19:14:12          | 0000005 | 3.000           | 1       |
| 03-29-95 | 19:14:13          | 0000006 | -2.000          | 0       |
| 03-29-95 | 19:14:13          | 0000007 | 0.000           | 0       |
| 03-29-95 | 19:14:13          | 0000008 | -1.000          | 0       |
| 03-29-95 | 19:14:13          | 0000009 | 1.000           | 1       |
| 03-29-95 | 19:14:13          | 0000010 | 2.000           | 1       |
| 03-29-95 | 19:14:13          | 0000011 | -2.000          | 0       |
| 03-29-95 | 19:14:13          | 0000012 | 1.000           | 1       |
| 03-29-95 | 19:14:13          | 0000013 | 3.000           | 1       |
| 03-29-95 | 19:14:14          | 0000014 | 2.000           | 1       |
| 03-29-95 | 19:14:14          | 0000015 | 3.000           | 1       |
| 03-29-95 | 19:14:14          | 0000016 | 1.000           | 1       |
| •••••    | • • • • • • • • • | ••••    | • • • • • • • • | •       |
| 03-29-95 | 19:14:43          | 0000153 | 0.220           | 1       |
| 03-29-95 | 19:14:44          | 0000154 | 0.210           | 1       |
| 03-29-95 | 19:14:45          | 0000155 | 0.250           | 1       |
| 03-29-95 | 19:14:46          | 0000156 | 0.140           | 0       |
| 03-29-95 | 19:14:48          | 0000157 | 0.260           | 1       |
| 03-29-95 | 19:14:49          | 0000158 | 0.270           | 1       |
| 03-29-95 | 19:14:50          | 0000159 | 0.080           | 0       |
| 03-29-95 | 19:14:51          | 0000160 | 0.220           | 1       |
| 03-29-95 | 19:14:53          | 0000161 | 0.290           | 1       |
| 03-29-95 | 19:14:54          | 0000162 | 0.260           | 1       |

#### ANNEXE 12 :

# SYCIOP HEAT FLOW SENSOR PARABOLA USED FOR SURVEILLANCE IN SAFEGUARDS

P. Guilmain\*, C. Korn\*, M. Cuypers\*, P. Thery \*\*

\*EUROPEAN COMMISSION Joint Research Centre, Ispra (VA) Italy Institute for Systems Engineering and Informatic Unit Safeguards

# SYCLOP :

- New Detector
- Based on Heat Flow Sensor
- Detects a Thermal Disequilibrium

# **PRINCIPLE**:

The system concentrates the thermal radiation of a monitored environment on a heat flow sensor thanks to a parabolic reflector.

The heat flow sensor detects every modification of the thermal equilibrium in the vigilated zone.



Thermal Radiation Sensor

View of two Parabola Types

### **TRADITIONAL APPLICATIONS**

SURVEILLANCE OF DEFINED PROTECTED AREAS (e.g. HUMAN INTRUSION DYNAMIC DETECTION)

### NEW CAPABILITIES

SURVEILLANCE OF INDIVIDUAL OBJECTS (e.g.: PROTECTION AGAINST WITHDRAWAL OF PU CONTAINER)



Layout of Areas Protected by SYCLOPS



Surveillance of individual containers by SYCLOP



#### SIGNAL DELIVERED BY SYCLOP SURVEYING A MONITORED ZONE



DETECTION OF DIFFERENT SIMULATED INTRUSIONS AT VARYING DISTANCES IN A CORRIDOR SURVEYED BY SYCLOP

### ADVANTAGES OVER OTHER SURVEILLANCE SYSTEMS

 Supplies information about the intruder's presence and position within the monitoring area.

- No cooling system needed.
- No lenses necessary to focalise incident thermal radiation; so no "filter effect", no "transmission coefficient", no "glass capacitive effect".
- No encapsulation necessary.
- Easily adaptable to the monitoring area's topography thanks to adjustable focus.
- It is virtually impossible to know the temperature of each individual point of the surface covered by the intruder.
- For the thermal equilibrium to remain stable the average temperature of the intruder must be equal to the average temperature of the surface he is masking. It is therefore extremely difficult to cheat such a system.



# DESCRIPTIF DU SYSTEME D'ACQUISITION SoMat 2000

# Introduction

Le SoMat 2000 est un système d'acquisition portable à microprocesseur, conçu pour la capture des données dans des types d'environnements d'essai très divers. Le système de base comporte un module Processeur, un module Alimentation/Communications, et un Logiciel Test-Contrôle (TCS). Les utilisateurs peuvent choisir entre différents modules de conditionnement de signal ou d'acquisition de données à rajouter au système de base afin de configurer le système selon leurs impératifs.

# **Spécifications**

- \* Matériel modulaire avec une mémoire extensible et conditionneurs de signaux incorporés pour le stockage, affichage et analyse des données;
- \* Portable, dimensions reduites (76,2 mm x 76,2 mm x 127 mm), pouvant être fixé sur les objets à tester;
- \* Logiciel piloté par menu pour faciliter la configuration de l'essai, le fonctionnement et l'analyse;
- \* Réduction intelligente des données en temps réel à partir d'une librairie de fonctions d'acquisition de données;
- \* Acquisition de données à court terme et à long terme utilisant des voies multiples et une grande variété de capteurs;
- \* Faible consommation de courant pour fonctionnement avec des batteries internes ou externes;
- \* Calibration et configuration simplifiées;
- \* Batterie interne lithium pour protéger la mémoire;
- \* Voies calculées (combinaison arithmétique des voies);
- \* Traçage de voies en X,Y
- \* Visualisation en temps réel mode enregistreur

# Le système d'acquisition SoMat 2000

Le système d'acquisition SoMat 2000 est protégé par un boîtier en aluminium protegé contre les poussières et l'humidité. Le système est modulable, ce qui permet aux utilisateurs de concevoir un système spécifique pour chaque application. Le système est si petit qu'il peut être porté dans les bagages, emporté sur des sites d'essais très divers et directement fixé sur la plupart des objets à tester.

Le système SoMat 2000 est livré déjà assemblé. Toutefois, pour que le système soit opérationnel, l'utilisateur doit alimenter l'unité et la connecter à calculateur d'assistance. Le schéma 1-1 montre comment on peut très facilement connecter le SoMat 2000 au calculateur avec un câble de liaison série.



### Schéma 1-1 Le SoMat 2000 avec le calculateur d'assistance

Le calculateur d'assistance est un micro-ordinateur compatible PC. Son rôle est d'assister le SoMat 2000 en utilisant le Logiciel Test-Contrôle et en mémorisant les valeurs de l'essai fournies par le système d'acquisition. Les instructions d'installation et de configuration du SoMat 2000 par rapport au calculateur d'assistance figurent au Chapitre 2.

Pendant un essai, les modules d'acquisition de données sont reliés à des capteurs

ou des détecteurs qui sont fixés sur l'objet à mesurer afin de contrôler les variations de mouvement, contrainte, température ou d'autres facteurs. Les modules fourniront des valeurs numériques (valeurs mémorisées et manipulées en tant que octets 'valeurs binaires') à partir des signaux électriques provenant des capteurs. Le microprocesseur traite et mémorise ces données dans la mémoire numérique du système d'acquisition ScMat 2000, où elles sont gardées jusqu'à ce que l'utilisateur les transfère sur son calculateur de traitement.

La section suivante présente le logiciel SoMat II Test-Contrôle qui pilote le système d'acquisition SoMat 2000.

## Le logiciel Test-Contrôle SoMat II

Le programme Test-Contrôle SoMat II (TCS) est simple à utiliser et piloté par un menu c'est une interface entre l'utilisateur, le système d'acquisition SoMat 2000 et le calculateur d'assistance compatible IBM PC. Le logiciel "TCS" permet d'effectuer les opérations suivantes avec le matériel SoMat 2000:

- \* Configuration de l'essai
- \* Démarrage et arrêt de l'essai
- \* Acquisition et mémorisation des données
- \* Transfert des données vers un calculateur de plus grande capacité
- \* Affichage des résultats de l'essai

Le schéma 1-2 montre le transfert des spécifications ou du fichier de configuration de l'essai au SoMat 2000 et, après l'exécution de l'essai, le transfert des résultats vers le calculateur d'assistance. C'est par le programme TCS que s'effectuent tous ces opérations de données.

### Schéma 1-2 Interface calculateur d'assistance /SoMat 2000

# INSTALLATION DU SYSTEME D'ACQUISITION SoMaT 2000

### Introduction

L'installation du système SoMat 2000 concerne le matériel et le logiciel. Ce chapitre explique comment installer le système d'acquisition SoMat 2000, ainsi que le programme de pilotage TCS.

Le système d'acquisition SoMat 2000 est livré déjà assemblé. Cependant, pour être opérationnel, il doit être chargé sur un calculateur de travail (par exemple un PC) et configuré selon les spécifications de l'utilisateur.

L'installation du matériel et du logiciel est une procédure simple ; si toutefois vous rencontriez des difficultés pour l'installation ou la configuration après avoir étudié ce chapitre, n'hésitez pas à contacter JOHNE + REILHOFER FRANCE, PARIS, au (1) 47.83.37.25.

## Détail de la livraison

Si vous utilisez le système SoMat 2000 pour la première fois, le colis devrait contenir les éléments suivants, avec le système d'acquisition SoMat 2000 entièrement monté.

NOTE: Si un élément commandé manquait dans votre colis, contacter JOHNE + REILHOFER FRANCE immédiatement.

\* L'unité de base Processeur SoMat 2000

\* Le module Alimentation/Communications comporte une carte pour trois batteries 9 volts (standard) ou un convertisseur DC/DC (en option)

\* Couvercle supérieur

\* Tout module supplémentaire figurant dans votre commande (par ex. conditionnement de signal, mémoire, filtre)

\* Câble série (standard: connecteur D 25 broches)

\* Câble pour l'alimentation

\* Câble(s) capteur(s), un pour chaque module d'acquisition commandé

Installation du Système SoMat 2000

\* Kit de composants comporte des joints en caoutchouc, cavaliers de rechange et vis (fusibles de rechange si l'option convertisseur DC-DC a été commandée)

\* Tous les accessoires commandés en option (par ex. adaptateur d'alimentation AC ou cables d'extension.

\* Le logiciel SoMat II Test-Contrôle (disquettes 3"1/2 et 5"1/4)

\* Le manuel d'utilisation SoMat II Test-Contrôle

\* Le manuel "SoMat II Series 2000 Reference Manual".

# **Configuration nécessaire**

Chaque système d'acquisition SoMat 2000 nécessite deux éléments de base: un ordinateur d'assistance et le programme SoMat II TCS. Nous conseillons la configuration suivante pour l'ordinateur:

- \* Compatible IBM-PC (de préférence PC/AT)
- \* 640 K RAM
- \* 2 lecteurs de disquettes, dont l'un d'au moins 720 K
- \* Carte graphique vidéo (par ex. CGA, MCGA, Hercules, EGA, VGA)
- \* Port série
- \* Port imprimante (en option)

NOTE: Parce que le programme SoMat II TCS dépasse les 360 K, l'un des deux lecteurs de disquettes doit être de 720 K. Nous recommandons <u>vivement</u> un disque dur pour un fonctionnement optimal du système.

Les configurations de disquettes suivantes sont compatibles avec le système SoMat 2000:

- \* Deux lecteurs de disquettes 3 \* 1/2, 720 K
- \* Deux lecteurs de disquettes 5 \* 1/4, 1,2 MB
- \* Un disque dur avec un lecteur de disquettes 3 \* 1/2, 720 K.

### Description du SoMat 2000

Le coeur du système d'acquisition SoMat 2000 consiste en deux modules principaux: le Processeur et "Alimentation/ Communication. Ces deux cartes

sont indispensables au fonctionnement du SoMat 2000. Pour construire un système d'acquisition complet, différents modules de conditionnement de signal et d'acquisition de données peuvent être enfichés, étage par étage, entre ces deux cartes (voir le schéma 2-1 ci-dessous. Chaque module d'acquisition est identifié par un petit symbole gravé en face avant.



#### Schéma 2-1 Le système d'acquisition SoMat 2000

Le module Alimentation/Communications, situé à l'étage supérieur du système, alimente le SoMat 2000 et lui permet de communiquer avec le calculateur de controle. Cette carte comporte également une batterie haute capacité (lithium) pour la protection de la mémoire du SoMat 2000 en cas de problème d'alimentation. Le module processeur, situé à l'étage inférieur du système, fournit les informations pour la saisie et le traitement des données. Les modules

Installation du Système SoMat 2000

processeur sont disponibles en standard ou en version grande vitesse.

Les connecteurs du SoMat 2000 sont enfichables et vérouillables. Chaque module d'acquisition décrit est équipé d'un connecteur permettant la connexion d'un câble capteur pour la saisie des données. Les modules sont livrés avec des protecteurs de câbles afin d'éviter de les endommager pendant l'essai.

Le module Alimentation/Communications est équipé de deux connecteurs: un pour l'alimentation et un pour la liaison série avec le calculateur. Aucun connecteurs ne sont installés sur le couvercle du système, le module Processeur, les extensions mémoire et les filtres.

Le schéma 2-1 ne montre pas le bouchon de mise sous tension et le bouchon de protection du connecteur de la iaison série. Ces deux éléments sont suspendus à de petites chaînes fixées sur le module Alimentation/ Communication. Le bouchon de mise sous tension n'estmis en place qu'en cas d'utilisation d'un pack batteries interne pour l'alimentater le système. Le bouchon du connecteur de communication sert à protéger le connecteur de liaison série contre les poussières, débris, etc...

## Modules disponibles

La liste ci-dessous présente les modules disponibles pouvant être ajoutés au système de base SoMat 2000. Les quatre premiers modules sont des modules d'acquisition de données.

| Type de module      | Fonction  |
|---------------------|---|
| Jauge de contrainte | Mesure les tensions issues des jauges de contrainte;<br>complément de pont et résistances de calibrage shunt<br>inclus.   |
| Capteur analogique  | Mesure des tensions analogiques issues de capteurs,<br>par ex. psi,degrés, lbc tc   |
| Impulsion           | Mesure la fréquence ou la largeur d'impulsion propor-<br>tionnellement à la quantité désirée.   |
| Numérique           | Mesure si un commutateur est sur ON ou OFF et/ou<br>mesure un nombre binaire proportionnellement à la<br>qualité désirée.   |
| Filtre              | Filtre passe pas pour jauge decontrainte ou capteur analogique.   |
| Mémoire             | Fournit une extension de mémoire pour le stockage des<br>données en incréments de 256 K bytes (maximum pour<br>4 modules mémoire possibles pour un total de 1 mega-<br>byte).(ou 4*1 Mbyte = 4 Mbyte) |

|   |   |  |  |   | MENU<br>ALT  |   |
|---|---|--|--|---|--|---|
|   |   | Menu<br>Principal  |  | Config.   | Chaîne<br>SoMat  | Sortie  |
|   |   |  |  |   |  |   |
| Config.<br>Matériel   | Calibra-<br>tion voies  | Config.<br>Mode<br>Acquis  | Essais<br>Départ<br>Arrêt  | Transfert<br>données  | Données<br>traçage   | Enregis-<br>trement   |
| <ul> <li>Ajoute &amp;<br/>soustrait<br/>des étages</li> <li>Sauve &amp;<br/>charge les<br/>configura-<br/>tions</li> <li>Vérifie la<br/>configigura-<br/>tion du<br/>SoMat 2000</li> <li>Contrôle<br/>les groupes<br/>de cavaliers</li> </ul> | <ul> <li>Ajoute &amp; soustrait des voies</li> <li>Sauve &amp; charge les configurations</li> <li>Tableau de contrôle</li> <li>Mise à l'échelle / calibration</li> <li>Change les paramètres des voies</li> </ul> | <ul> <li>Ajoute &amp; soustrait des modes de données</li> <li>Sauve &amp; charge les configurations</li> <li>Entrée de description de l'essai</li> <li>Installe les paramètres du mode de données</li> </ul> | * Arrêt &<br>départ de<br>l'essai<br>* Initialise le<br>SoMat 2000<br>* Réinstalle<br>le SoMat<br>2000 | * Transfert<br>les résultats<br>de l'essai<br>du SoMat<br>2000 dans<br>un fichier<br>SoMat sur<br>le calculteur | <ul> <li>Traçage<br/>des<br/>données à<br/>partir d'un<br/>mode de<br/>données<br/>simple</li> <li>Listage<br/>des<br/>résultats</li> <li>Sauvegarde<br/>des<br/>données à<br/>partir des<br/>modes de<br/>données<br/>individuelles<br/>dans<br/>fichiers<br/>SoMat ou<br/>ASCII</li> </ul> | <ul> <li>Traçage<br/>en temps<br/>réel de<br/>voies<br/>multiples</li> <li>Listage de<br/>voies<br/>multiple en<br/>temps réel</li> </ul> |

## Schéma 3-2: Structure du Programme TCS

.



# ANNEXE 14 : IDENTIFICATION DE L'ÉCHANTILLON DE MATIÈRES FISSILES

### SCHEDA DI IDENTIFICAZIONE DEI CAMPIONI DI MATERIE FISSILI

| IDENTIFICAZIONE CAMPIONE   | 120  |                  |            |                    |                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|------------------|------------|--------------------|-----------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| PARTITA DI PROVENIENZA   | 633P2  |                  |            | ·                  |                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| CONTENITORE DI TRASPORTO   | <u>F352 599</u> /616                           |                  |            |                    |                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| LABORATORIO DI ORIGINE   | ALEEL  |                  |            |                    |                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| DATA DI RICEZIONE  | 5.5.88   |                  |            |                    |                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| CONTROLLO CONTAMINAZIONE   | Negativo                                       |                  |            |                    |                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| TEMPERATURA A CONTATTO   | 56   | °C               |            |                    |                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| INTENSITA' DI DOSE A CONT.<br>NEUTRONI<br>GAMMA                                | <u>    1600                               </u> | /uSv/h<br>/uSv/h | 180<br>200 | m Rills<br>m Rills | = 1, 8 m Su<br>2 m Su |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| CONTENITORE ESTERNO TIPO   | 2500   |                  |            |                    | ·                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| PROVA DI TENUTA IN DATA  | I  |                  |            |                    |                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| COPPIA DI SERRAGGIO USATA  | 1  | kgm              |            |                    |                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| NATURA   | <u>אות 20טיף</u>                               |                  |            | -                  |                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| FAMIGLIA   | 350 HBun                                       |                  |            |                    |                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| CONTENUTO IN PESO:<br>U-totale<br>U-235<br>Pu-totale<br>Th-totale<br>U-depleto | <u></u> 2453.734                               | g<br>g<br>g      |            | _                  |                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| POSIZIONE DI STOCCAGGIO  | 1406/B4  |                  |            | _                  |                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |



### SCHEDA DI IDENTIFICAZIONE DEI CAMPIONI DI MATERIE FISSILI

IDENTIFICAZIONE CAMPIONE: 120

COMPOSIZIONE ISOTOPICA IN PESO: Pu-238 : 1.721 %

|                                  |             |        | N                    |
|----------------------------------|-------------|--------|----------------------|
| Pu-239                           | ):          | 58.096 | %                    |
| Pu-24(                           | ):          | 24.768 | %                    |
| Pu-241                           | l :         | 9.771  | %                    |
| Pu-242                           | 2 :         | 5.645  | %                    |
| Am-24                            | 1:          | 14241  | / <sup>ug/g</sup> Pu |
|                                  |             |        |                      |
| U-234                            | :           |        | %                    |
| U-234<br>U-235                   | :           |        | %<br>%               |
| U-234<br>U-235<br>U-236          | :<br>:<br>: |        | %<br>%<br>%          |
| U-234<br>U-235<br>U-236<br>U-238 | :<br>:<br>: |        | %<br>%<br>%<br>%     |

DATA DI RIFERIMENTO: 1.11.1987



EUROPEAN COMMISSION Institute for Systems, Informatics and Safety T.E.M.P.E.S.T. Laboratory Ispra - Italy **ANNEXE 15 : RAPPORT D'ESSAIS** 

Technical Note No. I.96.84

### **Test Report**

### **Qualification Tests on SYCLOP Detector**

G. Azzalin, C. Buzzi, P. Guilmain (Grant Holder), F. Van Paemel, C. Korn

June 1996

**June 1996** 

### **Qualification Tests on SYCLOP Detector**

G.Azzalin, C. Buzzi, P. Guilmain, F. van Paemel, C. Korn

**Distribution list: 10** 

JRC Ispra: C. Korn...... 3 G. Azzalin....: 1 C. Buzzi....... 1 P. Guilmain...: 3 F. van Paemel.: 1 M. Cuypers....: 1

Joint Research Centre Customer: Institute for Systems, Informatics and Safety Unit Sa-Ve-Tech Sector Development, Performance and Qualification of Instruments Via E. Fermi I-21020 Ispra (Va)

Name Date

gnature

The information contained in this document may not be disseminated, copied or utilized without the written authorisation of the Commission. The Commission reserves specially its rights to apply for patents or to obtain other protection for the matter open to intellectual or industrial protection.

### **Qualification Tests on SYCLOP Detector**

- 1. Introduction
- 2. Equipment tested

#### 3. Tests and results

- 3.1 Test 0: Reference measurements
- 3.2 Cold (according to standard IEC 68.2.1) Test 1: Test Ab, Ta: -40 ° C, 16 h
- 3.3 Dry hot (according to standard IEC 68.2.2) Test 2: Test Bb, Tb: 70 ° C, 16 h
- 3.4 Change of temperature (Test Na according to standard IEC 68.2.14) Test 3: Ta: -40 °C; Tb: 70 °C; 5 cycles
- 3.5 Damp heat Steady State (Test Cb according to standard IEC 68.2.56) Test 4: T: 40°C; H: 85%; 4 days
- 3.6 Shock (Test Ea according to standard IEC 68.2.27) Test 5: 3 Shocks of 15 g, 11 ms. for each axis (Final peak sawtooth pulse).
- 3.7 Vibration tests (According to standard IEC 68.2.6) Test 6: Sinus vibration from 10-55 Hz. Test 7: Sinus vibration from 10-150 Hz.
- 3.8 Electrostatic discharges immunity (according to IEC 1000-4-2) Test 8: 4 kV contact discharge (according to EN 50082-1) Test 9: 8 kV air discharge (according to EN 50082-1)
- 3.9 Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity(according to IEC 1000-4-3) Test 10: 3 V/m in 80 Mhz - 1 Ghz frequency range (EN 50082-1)
- 3.10 Radio disturbances measurements Test 11: Measurements from 100 kHz to 1 GHz

#### 4. Conclusion

- 5. Annex I: Description of the equipment
- 6. Annex II: Test Logbook
- 7. Annex III: Pictures

### 1. Introduction:

The various tests described in this report were carried out on a Syclop detector s/n Syclop C1. This detector was developped at JRC Ispra and patented (no LU 88704). The tests conducted on this detector were done in accordance with various thermal and mechanical IEC standards as explained in this report.

All the results obtained during and after the various tests are valid only for the tested detector.

This test report contains 26 pages.

#### 2. Equipment tested:

The Syclop detector studied in this report is described in detail in annex I and shown in annex III.

This new detector based on heat flow sensor technology is used mainly for surveillance

The detector was received at the TEMPEST laboratory on 29-03-1996.

#### 3. Test and results

#### 3.1 - Test 0: Reference measurements

In order to check the proper operation of the Syclop detector during the various tests conducted in this report, it was necessary to take some first measurements, during normal operation of the detector and at room temperature, and that will be reference values.

The Syclop detector was placed at 1 m in front of a black body of 0.5 m<sup>2</sup>. This black body was powered by a DC power supply with a voltage of 20 V and a current of 8.95 A. The temperature of this black body was  $34^{\circ}C + 1^{\circ}C$ .

The gain of the Syclop detector was of 5000 so that its output voltage value measured on a HP voltmeter, when placed in front of the black body was:

U = 1.12 + 0.01 V

#### 3.2 - Cold (according to standard IEC 68.2.1)

#### Test 2: Test Ab, Ta: -40 ° C, 16 h

The detector, not operating, was placed, according to test Ab of IEC 68.2.1 standard, for 16 hours (starting when the climatic chamber and the module reached their thermal stability) at a temperature of -40°C +/- 3°C. The test conditions are presented in the Test Information 1 of Annex II.

At the end of the test, and after returning to ambient temperature, the detector was visually checked and no physical damage was observed. It was then installed as before in front of the black body, and its output voltage was measured : U = 1.12 + -0.01 V as in the reference test.

3.3 - Dry hot (according to standard IEC 68.2.2)

**Test 2:** Test Bb; Tb: 70 ° C, 16 h

The detector, not operating, was placed, according to test Bb of IEC 68.2.2 standard, for 16 hours (starting when the climatic chamber and the module reached their thermal stability) at a temperature of  $70^{\circ}C$  +/-  $2^{\circ}C$ . The test conditions are presented in the Test Information 2 of Annex II.

At the end of the test, and after returning to ambient temperature, the detector was visually checked and no physical damage was observed. It was then installed as before in front of the black body, and its output voltage was measured : U = 1.12 + -0.01 V as in the reference test.

#### 3.4 - Change of temperature (Test Na according to standard IEC 68.2.14)

#### **Test 3:** Ta: -40 °C; Tb: 70 °C; 5 cycles

The detector, not operating, was exposed to -40 °C +/- 3°C for 2 hours, then quickly placed at 70°C +/- 2°C for 2 hours. This procedure, according to test Na of IEC 68.2.14 standard, was repeated 5 times for a total of 20 hours of test (the transfer time from one chamber to another was between 20 and 30 seconds, as described in the IEC standard). After 20 hours, the detector was visually checked, no physical damage was observed. It was then installed as before in front of the black body, and its output voltage was measured : U = 1.12 + -0.01 V as in the reference test.

The test conditions are presented in the Test Information 3 of the Annex II.

3.5 - Damp heat - Steady State (Test Cb according to standard IEC 68.2.56)

Test 4: T: 40°C, H: 85%

According to test Cb of standard IEC 68.2.56, the detector, not operating was exposed to a temperature of 40 °C +/- 2°C and a humidity of 85% +/- 3% for 4 days. The test conditions are presented in the Test Information 4 of Annex II.

After these 4 days, and after it had returned to ambient temperature, the detector was visually checked and no physical damage was observed. It was then installed as before in front of the black body, and its output voltage was measured : U = 1.12 + 0.01 V as in the reference test.

#### 3.6 - Shock (Test Ea according to standard IEC 68.2.27)

Test 5: 3 shocks of 15g, 11 ms for each detector position

According to test Ea of standard IEC 68.2.27, three shocks of 15 g during 11 ms (Final peak sawtooth pulse), on two positions of the detector (see figure 1 below) were applied. After each series of 3 shocks, the detector was visually checked, no physical damage was observed. It was then installed as before in front of the black body, and its output voltage was measured : U = 1.12 + 0.01 V as in the reference test. The test conditions are presented in the Test Information 5 of Annex II.



Figure 1: The two positions of the detector (upper view)

#### 3.7 - Vibration tests (According to standard IEC 68.2.6)

Test 6: Sinus vibration 10-55 Hz.

The detector was exposed to a sinus vibration cycle on each of the two positions in. figure 1, as described below:

| Frequency (Hz)         | 10-55 |
|------------------------|-------|
| Displacement (mm)      | 0.75  |
| Sweep rate (oct./min.) | 1     |
| N° of Sweeps           | 10    |

The test conditions are presented in the Test Information 6 of Annex II. After each test on each position, the detector was visually checked: no physical damage was observed. It was then installed as before in front of the black body, and its output voltage was measured : U = 1.12 + 0.01 V as in the reference test.

Test 7: Sinus vibration 10-150 Hz.

The detector was exposed to a sinus vibration cycle on each of the two positions of figure 1, as described below:

| Frequency (Hz)         | 10-59 | 59-150 |  |  |  |  |  |  |
|------------------------|-------|--------|--|--|--|--|--|--|
| Displacement (mm)      | 0.70  |        |  |  |  |  |  |  |
| Acceleration (g)       |       | 5      |  |  |  |  |  |  |
| Sweep rate (oct./min.) |       | 1      |  |  |  |  |  |  |
| N° of Sweeps           | 10    |        |  |  |  |  |  |  |

The test conditions are presented in the Test Information 7 of Annex II. After each test on each position, the detector was visually checked: no physical damage was observed. It was then installed as before in front of the black body, and its output voltage was measured: U = 1.12 + 0.01 V as in the reference test.

#### 3.8 - Electrostatic discharges immunity (according to IEC 1000-4-2)

Test 8: 4 kV contact discharge (according to EN 50082-1)

According to standard IEC 1000.4.2 the Syclop detector, operating, was submitted to 10 contact discharges of 4 kV (on polarity + and -) on various points of its body, which can be normally touched by the user, as described in figure 2 below.

The tests conditions are presented in Test Information File 8 in annex II.

At each discharge, the output voltage of the Syclop detector varied from 100 to 300 mV from the initial voltage.

At the end of this test, the detector was visually checked: no physical damage was observed. It was then installed as before in front of the black body, and its output voltage was measured : U = 1.12 + -0.01 V as in the reference test.



Figure 2: The points of electrostatic discharges applications (in black)

Test 9: 8 kV air discharge (according to EN 50082-1)

According to standard IEC 1000.4.2 the Syclop detector, operating, was submitted to 10 air discharges of 8 kV (on polarity + and -) on various points of its body, which can be normally touched by the user, as described in figure 2 before.

The tests conditions are presented in Test Information File 8 in annex II.

At each discharge, the output voltage of the Syclop detector varied from 120 to 260 mV from the initial voltage.

At the end of this test, the detector was visually checked: no physical damage was observed. It was then installed as before in front of the black body, and its output voltage was measured: U = 1.12 + 0.01 V as in the reference test.

#### 3.9 - Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity(according to IEC 1000-4-3)

Test 10: 3 V/m in 80 Mhz - 1 Ghz frequency range (EN 50082-1)

The Syclop detector, in operation, was placed in a strip line system on each of its two positions defined before plus a third one: with the head under the box. (in front of the antenna).

According to standard IEC 1000.4.3, the detector was submitted, on each of its three positions, to radio frequency disturbances of 3 V/m in a frequency range of 80 Mhz to 1 Ghz, amplitude modulated by 1 kHz sine wave with a modulation depth of 80 %.

As presented in test information file 9 in annex II, and according to standard IEC 1000.4.3, two frequency ranges were selected in order to fulfil the frequency steps given by the standard. These two frequency ranges were the following:

#### . 80-200 MHz step 800 kHz

. 80 MHz-1 GHz step 2 MHz

The dwell time at each frequency was 2 seconds.

During the first frequency range (up to 200 Mhz), the digital voltmeter showed an output voltage of 0 V exept at 200 Mhz were we observed a peak up to 2.15 V.

During the second frequency range, the output voltage of the detector was measured between 0.01 and 0.03 V.

After each test in each frequency range, the output voltage of the Syclop detector, in front of the black body was: U = 1.12 + -0.01 V.

#### 3.10 - Radio disturbances measurements

#### Test 11: Measurements from 100 kHz to 1 GHz

The Syclop detector was placed, operating, inside the Gstrip system, in its three positions as described before.

The test conditions are presented in test information file 10 in annex II.

For each position, radio disturbances measurements were conducted and are presented (maximal values) in table 1 below:

|                      | Max 1 (dbµV/m)  | Position | Max 2 (dbµV/m)     | Position |
|----------------------|-----------------|----------|--------------------|----------|
| Average Measurements | 78.7 at 100 kHz | 3        | 59.4 at 10.099 MHz | 1,2,3    |
| Q Peak Measurements  | 72.6 at 100 kHz | 1,2      | 50.7 at 10.099 MHz | 1,2,3    |
| Peak Measurements    | 78.8 at 100 kHz | 1,2,3    | 59.5 at 10.099 MHz | 1,2,3    |

 Table 1: Radio frequency measurements

The figure 3 belows shows a typical spectrum obtained during the radio frequency measurements (position 1, Q Peak measurements)



Figure 3: Example of radio frequency measurements (position 1, Q Peak)

#### 4. Conclusion:

The Syclop detector passed the following thermal and mechanical tests:

- Cold (according to standard IEC 68.2.1), Test Ab, Ta: -40 ° C, 16 h

- Dry hot (according to standard IEC 68.2.2), Test Bb, Tb: 70 ° C, 16 h

- Change of temperature (Test Na according to standard IEC 68.2.14), Ta: -40 °C; Tb: 70 °C; 5 cycles

- Damp heat - Steady State (Test Cb according to standard IEC 68.2.56), T: 40°C; H: 85%; 4 days

- Shock (Test Ea according to standard IEC 68.2.27), 3 Shocks of 15 g, 11 ms. for each axis (Final peak sawtooth pulse).

- Vibration tests (According to standard IEC 68.2.6) Sinus vibration from 10-55 Hz. Sinus vibration from 10-150 Hz.

Some output voltage variations were observed in the following electromagnetic tests:

- Electrostatic discharges immunity (according to IEC 1000-4-2) 4 kV contact discharge (according to EN 50082-1) 8 kV air discharge (according to EN 50082-1)

- Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity(according to IEC 1000-4-3) 3 V/m in 80 Mhz - 1 Ghz frequency range (EN 50082-1)

Some radio disturbances measurements, emitted during Syclop operation were also conducted in the frequency range 100 kHz-1 GHz.

#### **ANNEXE 16 : REVENDICATIONS BREVET**



#### EUROPEAN COMMISSION

DIRECTORATE GENERAL XIII Telecommunications, information market and exploitation of research Dissemination and exploitation of RTD results, technology transfer and innovation Strategic aspects of innovation and exploitation of research and technological development, and intellectual property

> Luxembourg, TB/sd WO 2488-Patents D/1

21 FEV.97 + 01717

PAR VALISE DIPLOMATIQUE

Mr P. GUILMAIN JRC/ISEI

**I-21020 ISPRA** 

Subject: International Patent Application: "Dispositif de détection de rayonnement thermique et appareil de détection de présence à base d'un tel dispositif'

Dear Sir,

We have the pleasure to inform you that the above mentioned patent application has been filed on 24.01.97.

Provisional No:PCTFR97/00142Designations:Canada, Japan, Norway, United States, EuropeProprietor:EURATOM

Yours sincerely,

T. Botal

T. BOTELLA YAQUERO

Enclosure:1 copy of filed applicationcc.:Messrs Thery, Korn

Rue Alcide de Gasperi, L-2920 Luxembourg - Office: EUFO 2279 Telephone: exchange (+352)43011, direct line 4301 37116. Fax: 4301 32073. Telex: COMEUR LU 3423. Telegraphic address: EURDOC LU 2752.

# Dispositif de détection de rayonnement thermique et appareil de détection de présence à base d'un tel dispositif.

La présente invention concerne un dispositif de détection de rayonnement thermique et un appareil de détection de présence à base d'un tel dispositif. L'invention peut être utilisée notamment, mais non exclusivement, pour la détection d'une intrusion dans la surveillance de zones de sécurité.

Dans le domaine de la surveillance à haut degré de sécurité, par exemple pour le contrôle de lieux de stockage de matériel nucléaire, il est primordial de contrôler sans faille et sans interruption les objets dans la zone surveillée.

Actuellement, pour assurer la continuité de la connaissance d'un état à surveiller, par exemple une quantité de matière fissile, et pour surveiller une zone de dimension finie, on utilise des systèmes de scellés, électroniques ou non (avec identité et/ou intégrité), des systèmes de surveillance optique (par caméras) et un éventail de détecteurs classiques.

Les systèmes de scellés sont généralement inadéquats par le fait que la plupart ne sont utilisables qu'une scule fois et qu'ils sont incapables de permettre la surveillance à distance.

Au niveau des systèmes de surveillance vidéo, l'investissement important nécessaire, le traitement d'images et de signaux afin de détecter une intrusion et la possibilité d'erreur par une fausse image, font que ces systèmes présentent d'énormes défauts lorsqu'ils sont mis en oeuvre dans des dispositifs de surveillance à haute sécurité.

Dans la plupart des applications en détection, les systèmes de surveillance traditionnels à ultrasons sont utilisés pour la mesure de rayonnement de sources en mouvement. Leur principe est difficilement utilisable pour faire de la surveillance à grande distance tout en permettant des déplacements dans une portion non destinée à être surveillée du même local.

En effet, la surveillance est impossible par des détecteurs à ultrasons dès qu'il y a un quelconque déplacement autour des limites de la zone surveillée puisqu'ils sont basés sur le principe même de déplacement et vibration moléculaire.

De nombreux dispositifs pyroélectriques et à semiconducteurs sont généralement utilisés pour la détection du rayonnement thermique émis par une source en mouvement. Le rayonnement thermique émis variant avec l'émissivité de la surface, ces détecteurs présentent le grand inconvénient d'avoir leur responsivité

35 dépendante de la longueur d'onde. Il est donc nécessaire de choisir le détecteur en fonction de la source à surveiller <del>pu</del>isqu'il travaille dans une bande de fréquence

10

5

20

15

25

#### REVENDICATIONS

1. Dispositif (10) de détection de rayonnement thermique caractérisé en ce qu'il comprend :

- un détecteur (14) ayant une ou plusieurs portions (42a, 46) destinées à être exposées au rayonnement thermique et une ou plusieurs portions (42a, 44) destinées à être protégées du rayonnement thermique, le détecteur délivrant un signal de détection à partir d'une différence de température entre les portions exposées et les portions protégées; et

- un concentrateur du type réflecteur (12), associé audit détecteur pour
 concentrer sur celui-ci le rayonnement thermique émanant d'une zone spatiale prédéterminée.

Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit détecteur (14)
 est composé d'au moins une paire d'éléments thermocouple planaires (34, 36) ayant
 une jonction froide (40a) en contact thermique avec une portion protégée (42a, 44)
 du détecteur (14) et au moins une jonction chaude (40b) en contact thermique avec
 une portion exposée (42a, 46) du détecteur.

3. Dispositif selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que la ou les portions exposées (42a, 46) et la ou les portions protégées (42a, 44) du détecteur constituent une surface active commune (42a) du détecteur, et sont respectivement constituées par des éléments de surface sensiblement absorbants (46) et par des éléments de surface sensiblement réfléchissants (44) relativement au rayonnement thermique.

4. Dispositif selon la revendication 3, caractérisé en ce que ledit détecteur (14) comprend une pluralité de paires d'éléments thermocouples (34, 36) montés en série et disposés en plusieurs lignes reliées aux extrémités de manière à former une piste en méandres (38), les jonctions froides et chaudes (40a, 40b) étant disposées en rangées alternées respectives disposées transversalement aux lignes et étant en contact thermique avec un matériau (42) qui présente la surface sensible (42a) sous forme de bandes réfléchissantes (44) et absorbantes (46) arrangées en rangées alternées respectivement avec les jonctions froides (40a) et chaudes (40b).

5. Dispositif selon la revendication 3 ou 4, caractérisé en ce que lesdites paires d'éléments thermocouples (34, 36) sont réalisées par des éléments alternés de cuivre et de constantan déposés sur un substrat (30) en matériau électriquement isolant et d'absorption thermique élevée, et en ce que lesdits éléments thermocouples sont recouverts d'un matériau (42) présentant une absorption

9

15

20

25

30

35

thermique élevée, les portions dudit matériau recouvrant une jonction froide (40a) étant revêtues d'une couche de matériau réfléchissant (44).

6. Dispositif selon la revendication 5, caractérisé en ce que la surface (30a) dudit substrat (30) opposée à celle supportant lesdites paires d'éléments thermocouples (34, 36) est revêtue d'une couche métallique (32) destinée à être mise en contact avec une surface de support mécanique (24).

7. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 4 à 6, caractérisé en ce que ledit substrat (30) est en Kapton et en ce que ledit matériau (42) recouvrant les paires d'éléments thermocouples (34, 36) est en Kapton recouvert d'or aux portions de surface réfléchissantes (44).

8. Dispositif selon l'une quelconque des revendication 1 à 7, caractérisé en ce que le réflecteur (12) est du type parabolique.

9. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisé en ce qu'il comprend un support (16) pour ledit détecteur (14) monté mobile le long d'un axe (A-A') déterminé relativement audit réflecteur.

10. Appareil de détection de présence comprenant au moins un dispositif de détection de rayonnement thermique (10) selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, et un moyen de contrôle (54, 60) recevant le ou les signaux de détection et émettant un signal indicatif d'une présence en fonction du ou des signaux de détection.

20

5

10

### ANNEXE 17 : ENREGISTREMENTS EN MODE DIRECT ET ÉCARTS DES MOYENNES **POUR LE RÉGLAGE DES ALARMES**

#### Valeurs exprimées en V

|         |        |        |        |        | , <u>, , , , , , , , , , , , , , , , , , </u> |          |        |
|---------|--------|--------|--------|--------|---|----------|--------|
| 109     | MI-M7  | M7-M1' | M2-M6  | M6-M2  | M5'-M3'                                       | M3-M5    | M4-M4' |
| -0.0752 | 0.0010 | 0,0010 | 0.0028 | 0.0012 | 0.0015  | 0.0028   | 0.0019 |
| 0.0776  | 0.0050 | 0.0010 | 0.0025 | 0.0012 |   | 0.0020   | 0.0016 |
| -0.0776 | 0.0032 | 0.0010 | 0.0045 | 0.0037 | 0.0018  | 0.0034   | 0.0006 |
| -0.0752 | 0.0028 | 0.0070 | 0.0016 | 0.0033 | 0.0013  | 0.0013   | 0.0000 |
| -0.0728 | 0.0003 | 0.0028 | 0.0028 | 0.0020 | 0.0021  | 0.0008   | 0.0006 |
| -0.0679 | 0.0052 | 0.0003 | 0.0012 | 0.0004 | 0.0018  | 0.0005   | 0.0018 |
| -0.0752 | 0.0024 | 0.0003 | 0.0078 | 0,0004 | 0.0005  | 0.0034   | 0,0006 |
| 0.0752  |        |        | 0.0028 | 0.0004 | 0.0005  | 0.0034   | 0.000  |
| -0.0752 | 0.0024 | 0.0000 | 0.0028 | 0.0012 | 0,0008  | 0.0018   | 0.0006 |
| -0.0752 | 0.0024 | 0.0024 | 0.0037 | 0.0028 | 0.0021  | 0.0018   | 0.0018 |
| -0.0654 | 0.0091 | 0.0024 | 0.0041 | 0.0041 | 0.0042  | 0.0036   | 0.0037 |
| -0.0752 | 0,0000 | 0.0033 | 0.0016 | 0.0049 | 0.0039  | 0.0006   | 0.0037 |
| 0.0700  |        | 0.0001 | 0.0010 | 0.0045 |   | 0.0020   | 0.0037 |
| -0.0728 | 0.0045 | 0.0049 | 0.0053 | 0.0094 | 0.0080  | 0.0063   | 0.0067 |
| -0.0728 | 0.0084 | 0.0101 | 0.0098 | 0.0179 | 0.0143  | 0.0104   | 0.0122 |
| -0.0728 | 0.0146 | 0.0185 | 0.0155 | 0.0301 | 0.0251  | 0.0179   | 0.0208 |
| -0.0752 | 0.0220 | 0.0293 | 0.0256 | 0.0476 | 0.0409  | 0.0295   | 0.0348 |
| 0.0752  | 00266  | 0.0464 | 00411  | 0.0712 | 0.0620  | 0.0474   | 0.0542 |
| 0.0152  |        | 0.0404 | 0.04[1 | 0.0712 | 0.0020  | 0.0474   | 0.0045 |
| -0.0776 | 0.0530 | 0.0659 | 0.0602 | 0.0928 | 0.0846  | 0.0677   | 0.0757 |
| -0.0801 | 0.0732 | 0.0788 | 0.0806 | 0,1066 | 0.1032  | 0.0882   | 0.0964 |
| -0.0874 | 0.0907 | 0.0854 | 0.0977 | 0.1107 | 0.1113  | 0.1048   | 0.1099 |
| -0.0996 | 0.1050 | 0.0827 | 01111  | 0.1086 | 01121   | 01144    | 0 1141 |
| -01167  |        | 0.0904 | 0.1160 | 0,1000 | 0.1063  | 01120    | 0.1106 |
| -0.110/ | 0.114/ | 0.0800 | 0.1160 | 0.1038 | 0,1063  | 0.1138   | 0,1105 |
| -0.1436 | 0.1127 | 0.0732 | 0.1086 | 0.0916 | 0.0962  | 0.1043   | 0.0995 |
| -0.1777 | 0.0991 | 0.0607 | 0.0944 | 0.0732 | 0.0801  | 0.0892   | 0.0854 |
| -0.2095 | 0.0841 | 0.0450 | 0.0785 | 0.0549 | 0.0620  | 0.0747   | 0.0690 |
| -0.7398 | 0.0677 | 0.0221 | 0.0642 | 0,000  | 0.0446  | 0.0592   | 0.0612 |
|         |        | 0.0331 | 0.0045 | 0.0399 | 0.0440  | 0.0303   | 0,0515 |
| -0.2607 | 0.0551 | 0.0227 | 0.0480 | 0.0252 | 0.0296  | 0.0407   | 0.0342 |
| -0.2852 | 0.0356 | 0.0108 | 0.0285 | 0.0090 | 0.0140  | 0.0225   | 0.0183 |
| -0.3047 | 0.0174 | 0.0014 | 0.0122 | 0.0041 | 0.0003  | 0.0088   | 0.0049 |
| -03169  | 0.0035 | 0.0077 | 0.0008 | 0.0138 | 0.0114  | 0.0029   | 0.0073 |
| 0.2019  | 0.0045 | 0.0167 | 0.0000 | 0.0100 | 0.0104  | 0.0025   | 0.0015 |
| -0.3218 | 0.0045 | 0.0157 | 0.0085 | 0.0208 | 0,0184  | 0.0129   | 0.0105 |
| -0.3267 | 0,0140 | 0.0174 | 0.0179 | 0.0228 | 0.0234  | 0.0208   | 0.0220 |
| -0.3291 | 0.0216 | 0.0178 | 0.0236 | 0.0220 | 0.0231  | 0.0238   | 0.0244 |
| -0.3267 | 0.0258 | 0.0150 | 0.0252 | 0.0236 | 0.0238  | 0.0257   | 0.0244 |
| .0 2193 | 0,0051 | 0.0206 | 0,0260 | 0.0077 | 0.0247  | 0.0247   | 0.0244 |
| -0.5135 |        | 0.0200 | 0.0200 | 0.0217 | 0.0247  | 0.0217   | 0.0271 |
| -0.3145 | 0.0283 | 0.0213 | 0.0264 | 0.0321 | 0.0308  | 0.0265   | 0.0275 |
| _0.3047 | 0.0272 | 0.0279 | 0.0285 | 0.0399 | 0,0361  | 0.0303   | 0.0342 |
| -0.2998 | 0.0328 | 0.0338 | 0.0350 | 0.0480 | 0.0452  | 0.0394   | 0.0415 |
| -0.2949 | 0.0472 | 0.0405 | 0.0476 | 0.0631 | 0.0581  | 0.0500   | 0.0543 |
| 0.22717 |        | 0.0105 | 0.0410 | 0.0001 | 0.0001  | 0.0622   | 0.0671 |
| -0.2925 | 0.0372 | 0.0579 | 0860.0 | 0.0798 | 0,0725  | 0.0032   | 0.0071 |
| -0.2803 | 0.0642 | 0.0649 | 0.0700 | 0.0879 | 0.0859  | 0.0742   | 0.0793 |
| -0.2729 | 0.0774 | 0.0701 | 0.0806 | 0.0903 | 0.0908  | 0.0850   | 0.0903 |
| -0.2583 | 0.0834 | 0.0666 | 0.0875 | 0.0850 | 0,0890  | 0.0920   | 0.0909 |
| 0.2437  | 0.0882 | 0.0607 | 0.0016 | 0.0745 | 0.0796  | 0.0884   | 0.0848 |
| -0.2431 | 0.0082 |        | 0.0910 | 0.0/45 |   | 0.0001   | 0.0770 |
| -0.2200 | 0.0893 | 0.0485 | 0.0830 | 0.0602 | 0,0004  | 0.0781   | 0.0720 |
| -0.1948 | 0.0715 | 0.0377 | 0.0671 | 0.0452 | 0.0496  | 0.0610   | 0.0555 |
| -0.1704 | 0.0589 | 0.0262 | 0.0525 | 0.0354 | 0.0386  | 0.0474   | 0.0421 |
| -0,1460 | 0.0436 | 0.0241 | 0.0395 | 0,0305 | 0.0301  | 0.0350   | 0.0323 |
| -0.1290 | 0.0221 | 0.0190 | 0.0290 | 0.0232 | 0.0752  | 0.0769   | 0.0250 |
| -0.1209 | 0.0001 | 0.0177 | 0.0287 | 0.0232 |   | 0,0010   | 0.0230 |
| -0.1143 | 0.0234 | 0.0133 | 0.0224 | 0.0167 | 0.0194  | 0.0210   | 0.0214 |
| -0.1069 | 0.0202 | 0.0108 | 0.0187 | 0.0138 | 0.0146  | 0.0192   | 0.0171 |
| -0.0996 | 0.0171 | 0.0091 | 0.0183 | 0.0142 | 0.0138  | 0.0161   | 0.0140 |
| -0.0972 | 0.0181 | 0.0122 | 0.0146 | 0.0130 | 0.0124  | 0.0124   | 0.0122 |
| -0.0974 | 0.0108 | 0.0063 | 0.0004 | 0,00%5 | 0.0109  | 0.0099   | 0.0104 |
| -0.0874 | 0.0108 | 0.0005 | 0.0094 | 0.0085 | 0.0107  | 0.0077   | 0.0104 |
| -0.0825 | 0.0077 | 0.0063 | 0.0090 | 0.0073 | 0.0075  | 0.0094   | 0.0098 |
| -0.0825 | 0.0094 | 0.0045 | 0.0094 | 0.0053 | 0.0063  | 0.0093   | 0.0067 |
| -0.0801 | 0.0087 | 0.0028 | 0.0085 | 0.0045 | 0,0047  | 0.0057   | 0.0055 |
| -0.0776 | 0,0066 | 0.0035 | 0.0028 | 0.0004 | 0.0011  | 0.0028   | 0.0018 |
| 0.0700  | 0.0007 | 0.0042 | 0.000  | 0,0004 | 0.000   | 0.0002   | 0,0000 |
| -0.0703 | 0.000/ | 0.0042 | 0.0008 | 0.0024 |   | 0.0005   | 0.000  |
| -0.0728 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0008 | 0.0041 | 0.0049  | 0.0016   | 0.0024 |
| -0.0703 | 0.0014 | 0.0080 | 0.0016 | 0.0033 | 0.0020  | 0.0020   | 0.0037 |
| -0,0703 | 0.0021 | 0.0038 | 0.0024 | 0.0008 | 0.0036  | 0.0042   | 0.0024 |
| -0.0703 | 0.0021 | 0.0029 | 0.0053 | 0.0045 | 0,0008  | 0.0031   | 6 0043 |
| -0.0705 |        | 0.0028 | 0.0055 | 0.0045 |   | 0.0001   | 0.000  |
| -0.0679 | 0.0065 | 0.0042 | 0.0027 | 0.0049 | 0.0042  | . 0.0041 | 0.0002 |
| -0.0752 | 0.0010 | 0.0744 | 0.0024 |        | 0.0039  | 0.0016   | 0.0031 |
| -0.0703 | 0.0049 | 0.0742 | 0.0016 |        |   | 0.0037   | 0.0043 |
| -0.0801 | 0.0065 | 0.0752 | 0.0024 |        |   | 0.0033   |        |
| 0.000   | 0,0005 | 0.0774 | 0.0041 | l      |   | <b></b>  |        |
| -0.00/9 |        | 0.0730 | 0.0001 | l .    |   |          |        |
| -0.0752 | 0.0024 | 0.0764 |        |        |   |          |        |
|         |        |        |        |        |   |          |        |

Tableau - voie 109

 $\textbf{Tableau}_{-\infty}$  - Moyennes absolues selon les valeurs données à x et à y

#### Valeurs exprimées en V

| 109     |    | M2-M2  |   | M3-M3  |   | M4-M4  |                   | M5-M5  |   | M6-M6    |   | M7-M7  |   | M8-M8  | M9-M9  |   | M10-M10  |
|---------|----|--------|---|--------|---|--------|-------------------|--------|---|----------|---|--------|---|--------|--------|---|----------|
| -0.0752 |    | 0.0037 |   | 0.0057 |   | 0.0006 |                   | 0.0029 |   | 0.0033   |   | 0.0017 |   | 0.0006 | 0.0014 |   | 0.0017   |
| -0.0703 |    | 0.0061 |   | 0.0008 |   | 0.0043 |                   | 0.0049 |   | 0.0024   |   | 0.0009 |   | 0.0018 | 0.0016 |   | 0.0017   |
| -0.0728 |    | 0.0012 |   | 0.0057 |   | 0.0049 |                   | 0.0029 |   | 0.0008   |   | 0.0009 |   | 0.0015 | 0.0014 |   | 0.0022   |
| -0.0654 |    | 0.0073 |   | 0.0065 |   | 0.0043 |                   | 0.0015 |   | 0.0012   |   | 0.0013 |   | 0.0009 | 0.0022 |   | 0.0029   |
| -0.0034 |    | 0.0073 |   | 0.0024 |   | 0,0006 |                   | 0,0005 |   | 0.0004   |   | 0.0001 |   | 0.0012 | 0.0022 |   | 0.0032   |
| -0.0752 |    | 0.0007 |   | 0.0008 |   | 0.0008 |                   | 0.0013 |   | 0.0012   |   | 0.0004 |   | 0.0012 | 0.0022 |   | 0.0032   |
| -0.0752 |    | 0.0012 |   | 0.0008 |   | 0.0031 |                   | 0.0005 |   | 0.0004   |   | 0.0019 |   | 0.0031 | 0.0030 | ļ | 0.0027   |
| -0.0703 |    | 0.0012 |   | 0.0024 |   | 0.0006 |                   | 0.0010 | 1 | 0.0024   |   | 0.0034 |   | 0.0034 | 0.0030 |   | 0.0027   |
| -0.0728 |    | 0.0037 |   | 0.0024 |   | 0.0006 |                   | 0.0015 |   | 0.0033   |   | 0.0027 |   | 0.0027 | 0.0027 |   | 0.0027   |
| -0.0752 |    | 0.0024 |   | 0.0000 |   | 0.0018 |                   | 0.0034 |   | 0.0028   |   | 0.0024 |   | 0.0031 | 0.0027 |   | 0.0020   |
| -0.0703 |    | 0.0000 |   | 0.0033 |   | 0.0037 |                   | 0.0034 |   | 0.0028   |   | 0.0035 |   | 0.0034 | 0.0022 |   | 0.0015   |
| -0.0703 |    | 0.0024 |   | 0.0041 |   | 0.0031 |                   | 0.0024 |   | 0.0033   |   | 0.0036 |   | 0.0018 | 0.0016 |   | 0.0010   |
| -0.0703 |    | 0.0049 |   | 0.0016 |   | 0.0018 |                   | 0.0024 |   | 0.0033   |   | 0.0022 |   | 0.0012 | 0.0005 |   | 0.0005   |
| -0.0703 |    | 0.0012 |   | 0.0008 |   | 0.0018 |                   | 0.0029 |   | 0.0016   |   | 0.0010 |   | 0.0006 | 0.0000 |   | 0.0000   |
| -0.0752 |    | 0.0024 |   | 0.0008 |   | 0.0018 |                   | 0.0010 |   | 0.0004   |   | 0.0001 |   | 0.0006 | 0.0011 |   | 0.0002   |
| -0.0752 |    | 0.0012 |   | 0.0024 |   | 0.0012 |                   | 0.0010 |   | 0.0000   |   | 0.0001 |   | 0.0012 | 0.0005 |   | 0.0005   |
| -0.0728 |    | 0.0007 |   | 0.0008 |   | 0.0012 |                   | 0,0005 |   | 0.0000   |   | 0.0008 |   | 0.0012 | 0.0003 |   | 0.000    |
| -0.0776 |    | 0.0012 |   | 0.0000 |   | 0.0006 |                   | 0.0020 |   | 0.0012   |   | 0.0023 |   | 0.0003 | 0.0000 | 1 | 0.0002   |
| -0.0752 |    | 0.0012 |   | 0.0008 |   | 0.0018 |                   | 0.0015 |   | 0.0020   |   | 0.0012 |   | 0.0003 | 0.0005 |   | 0.0002   |
| -0.0752 |    | 0.0012 |   | 0.0016 |   | 0.0018 |                   | 0.0024 |   | 0.0012   |   | 0.0003 |   | 0.0003 | 0.0005 |   | 0.0005   |
| -0.0752 |    | 0.0012 |   | 0.0024 |   | 0.0018 |                   | 0.0015 |   | 0.0004   |   | 0.0008 |   | 0.0006 | 0.0014 |   | 0.0005   |
| -0.0776 |    | 0.0024 |   | 0.0024 |   | 0.0018 |                   | 0.0005 |   | 0.0008   |   | 0.0003 |   | 0.0018 | 0.0005 |   | 0.0005   |
| -0.0752 |    | 0.0024 |   | 0.0000 |   | 0.0000 |                   | 0.0010 |   | 0.0008   |   | 0.0022 |   | 0.0018 | 0.0008 |   | 0.0002   |
| -0.0752 |    | 0.0000 |   | 0.0000 |   | 0.0000 |                   | 0.0015 |   | 0.0024   |   | 0.0026 |   | 0.0009 | 0.0003 |   | 0.0017   |
| -0.0728 |    | 0.0024 |   | 0.0000 |   | 0.0012 |                   | 0.0029 |   | 0.0028   |   | 0.0026 |   | 0.0003 | 0.0008 |   | 0.0012   |
| -0.0728 |    | 0.0012 |   | 0.0008 |   | 0.0037 |                   | 0.0024 |   | 0.0024   |   | 0.0003 |   | 0.0012 | 0.0016 |   | 0.0017   |
| -0.0752 |    | 0.0024 |   | 0.0033 |   | 0.0024 |                   | 0.0024 |   | 0.0000   |   | 0.0020 |   | 0.0009 | 0.0019 |   | 0.0027   |
| -0.0752 |    | 0.0024 |   | 0.0041 |   | 0.0024 |                   | 0.0005 |   | 0.0020   |   | 0.0012 |   | 0.0021 | 0.0027 |   | 0.0029   |
| -0.0752 |    | 0.0049 |   | 0.0033 |   | 0.0008 |                   | 0.0010 |   | 0.0012   |   | 0.0012 |   | 0.0027 | 0.0033 |   | 0.0024   |
| -0.0752 |    | 0.0024 |   | 0.0024 |   | 0.0012 |                   | 0.0024 |   | 0.0028   |   | 0.0043 |   | 0.0034 | 0.0016 |   | 0.0012   |
| -0.0801 |    | 0.0049 |   | 0.0008 |   | 0.0031 |                   | 0.0034 |   | 0.0045   |   | 0.0035 |   | 0.0018 | 0.0016 |   | 0.0007   |
| -0.0776 |    | 0.0012 |   | 0.0000 |   | 0.0031 |                   | 0.0024 |   | 0.0028   |   | 0.0010 |   | 0.0012 | 0.0008 | f | 0.0010   |
| -0.0728 |    | 0.0024 |   | 0.0033 |   | 0.0024 |                   | 0.0029 |   | 0.0004   |   | 0.0010 |   | 0.0009 | 0.0000 |   | 0.0056   |
| -0.0752 |    | 0.0024 |   | 0.0041 |   | 0.0018 |                   | 0.0005 |   | 0.0012   |   | 0.0018 |   | 0.0009 | 0.0033 |   | 0.0095   |
| -0.0776 | •. | 0.0061 |   | 0.0024 |   | 0.0006 |                   | 0.0010 | i | 0.0016   | ļ | 0.0018 |   | 0.0021 | 0.0060 |   | 0.0168   |
| -0.0752 |    | 0.0024 |   | 0.0033 |   | 0.0000 |                   | 0.0010 |   | 0.0012   |   | 0.0016 |   | 0.0040 | 0.0114 |   | 0.0278   |
| -0.0728 |    | 0.0049 |   | 0.0000 |   | 0.0006 |                   | 0.0015 |   | 0.0020   |   | 0.0020 |   | 0.0076 | 0.0195 |   | 0.0417 _ |
| -0.0679 |    | 0.0037 |   | 0.0008 |   | 0.0018 |                   | 0.0020 |   | 0.0020   |   | 0.0032 |   | 0.0131 | 0.0312 |   | 0.0579   |
| -0.0752 |    | 0.0049 |   | 0.0041 |   | 0.0006 |                   | 0.0005 |   | 0.0024   |   | 0.0049 |   | 0.0214 | 0.0453 |   | 0.0757   |
| -0.0752 | 1  | 0.0049 |   | 0.0016 |   | 0.0008 |                   | 0.0020 |   | 0.0033   |   | 0.00%  |   | 0.0510 | 0.0836 |   | 0.0902   |
| -0.0752 |    | 0.0037 |   | 0.0008 |   | 0.0018 |                   | 0.0073 |   | 0.0102   |   | 0.0281 |   | 0.0708 | 0.1058 |   | 0.1399   |
| -0.0752 |    | 0.0012 |   | 0.0008 |   | 0.0037 |                   | 0.0103 |   | 0.0269   |   | 0.0430 |   | 0.0916 | 0.1275 |   | 0.1587   |
| -0.0728 |    | 0.0012 |   | 0.0033 |   | 0.0067 | j –               | 0.0186 |   | 0.0431   | 1 | 0.0639 |   | 0.1147 | 0.1489 | 1 | 0.1755   |
| -0.0728 |    | 0.0024 |   | 0.0041 |   | 0.0122 |                   | 0.0308 |   | 0.0635   | 1 | 0.0870 |   | 0.1370 | 0.1668 |   | 0.1870   |
| -0.0728 |    | 0.0024 |   | 0.0073 |   | 0.0208 | ļ                 | 0.0488 |   | 0.0863   | ] | 0.1100 |   | 0.1566 | 0.1793 |   | 0.1914   |
| -0.0752 |    | 0.0037 |   | 0.0130 |   | 0.0348 |                   | 0.0703 |   | 0.1086   |   | 0.1318 |   | 0.1700 | 0.1845 |   | 0.1887   |
| -0.0752 |    | 0.0073 |   | 0.0236 |   | 0.0543 | ļ                 | 0.0933 |   | 0.1298   | ļ | 0.1489 |   | 0.1758 | 0.1826 |   | 0.1799   |
| -0.0776 |    | 0.0146 |   | 0.0382 |   | 0.0757 |                   | 0.1138 |   | 0.1453   |   | 0.1575 | 1 | 0.1740 | 0.1733 |   | 0.1658   |
| -0.0801 |    | 0.0244 |   | 0.0570 |   | 0.0964 |                   | 0.1289 |   | 0.1518   | ł | 0.1574 |   | 0.1648 | 0.1590 |   | 0.1465   |
| -0.0874 |    | 0.0366 |   | 0.0757 |   | 0.1099 |                   | 0.1348 |   | 0.1489   |   | 0.1493 |   | 0.1495 | 0.1383 |   | 0.1230   |
| -0.0990 |    | 0.0525 |   | 0.0887 |   | 0.1141 |                   | 0.1318 |   | 0.1383   | ł | 0,1300 |   | 0.1265 | 0.0871 |   | 0.0713   |
| -0.1436 |    | 0.0635 |   | 0.0905 | ł | 0.0995 |                   | 0.1200 |   | 0.1229   | ł | 0.0920 |   | 0.0757 | 0.0610 |   | 0.0449   |
| -0.1777 | 1  | 0.0562 |   | 0.0749 | 1 | 0.0854 | 1                 | 0.0854 |   | 0.0773   | 1 | 0.0668 |   | 0.0500 | 0.0355 |   | 0.0193   |
| -0.2095 |    | 0.0488 |   | 0.0659 |   | 0.0690 |                   | 0.0645 |   | 0.0537   | 1 | 0.0434 |   | 0.0272 | 0.0125 |   | 0.0039   |
| -0.2388 | 1  | 0.0452 |   | 0.0529 | 1 | 0.0513 | 1                 | 0.0435 |   | 0.0321   | 1 | 0.0221 |   | 0.0061 | 0.0081 |   | 0.0242   |
| -0.2607 |    | 0.0378 |   | 0.0382 |   | 0.0342 | 1                 | 0.0254 |   | 0.0130   | 1 | 0,0035 |   | 0.0116 | 0.0255 |   | 0.0437   |
| -0.2852 | ]  | 0.0244 |   | 0.0236 | ] | 0.0183 | ]                 | 0.0078 |   | 0.0041   | ] | 0.0116 |   | 0.0266 | 0.0412 |   | 0.0615   |
| -0.3047 |    | 0.0134 |   | 0.0130 | ļ | 0.0049 |                   | 0.0068 |   | 0.0167   | 1 | 0.0230 |   | 0.0391 | 0.0556 |   | 0.0784   |
| -0.3169 | ļ  | 0.0085 | ļ | 0.0033 | ļ | 0.0073 |                   | 0.0176 |   | 0.0256   |   | 0.0313 |   | 0.0488 | 0.0694 |   | 6 9940   |
| -0.3218 | 1  | 0.0037 |   | 0.0057 |   | 0.0165 |                   | 0.0234 | I | 0.0321   | 1 | 0.0373 |   | 0.0598 | 0.0836 |   | 0.1094   |
| -0.3267 | 1  | 0.0049 |   | 0.0146 | ł | 0.0220 |                   | 0.0288 |   | 0.0370   | ļ | 0.0435 |   | 0.0720 | 0.0985 |   | 0.1226   |
| -0.3291 | ł  | 0.0110 |   | 0.0187 | ł | 0.0244 | 1                 | 0.0308 | [ | 0.0419   | 1 | 0.0503 |   | 0.0861 | 0.1118 | ł | 0.1345   |
| -0.3267 | ł  | 0.0134 |   | 0.0203 |   | 0.0244 |                   | 0.0332 |   | 0.0476   |   | 0.0014 |   | 0.0989 | 0.1240 |   | 0.1436   |
| -0.3195 | ł  | 0.0146 |   | 0.0171 | 1 | 0.0244 | $\left\{ \right.$ | 0.03/1 |   | 0.0582   | ł | 0.0731 |   | 0.1120 | 0.1340 |   | 0.1560   |
| -0.3047 | 1  | 0.0122 |   | 0.0179 | 1 | 0.02/3 | 1                 | 0.0552 |   | 0.0842   | 1 | 0.1011 |   | 0.1324 | 0.1476 |   | 0.1553   |
| -0.2998 | 1  | 0.0110 | 1 | 0.0252 | 1 | 0.0415 | 1                 | 0.0693 | [ | 0.0981   | t | 0.1140 |   | 0.1389 | 0.1478 |   | 0.1509   |
|         | 1  |        | 4 |        |   | L      |                   | L      | 1 | <u> </u> |   |        |   |        | L      |   |          |

| 109     |     | M2-M2  |    | M3-M3  |   | M4-M4  |   | M5-M5    |   | M6-M6      | 1  | M7-M7     |     | M8-M8      | M9-M9    |  | M10-M10 |
|---------|-----|--------|----|--------|---|--------|---|----------|---|------------|----|-----------|-----|------------|----------|--|---------|
| -0.2949 |     | 0.0171 |    | 0.0309 |   | 0.0543 |   | 0.0835   |   | 0.1103     |    | 0.1235    |     | 0.1392     | 0.1432   |  | 0.1423  |
| -0.2925 |     | 0.0208 |    | 0.0391 |   | 0.0671 | 1 | 0.0962   |   | 0.1188     | 1  | 0.1250    |     | 0.1346     | 0.1340   |  | 0.1316  |
| -0.2803 |     | 0.0256 |    | 0.0488 |   | 0.0793 | 1 | 0.1055   |   | 0.1184     | 1  | 0.1198    |     | 0.1242     | 0.1215   |  | 0.1179  |
| -0.2729 |     | 0.0305 |    | 0.0610 |   | 0.0903 | 1 | 0.1060   |   | 0.1123     | 1  | 0.1104    |     | 0.1114     | 0.1080   |  | 0.1042  |
| -0.2583 | 1   | 0.0403 |    | 0.0724 |   | 0.0909 |   | 0.0996   |   | 0.1009     | 1  | 0.0975    |     | 0.0961     | 0.0933   |  | 0.0898  |
| -0.2437 |     | 0.0525 |    | 0.0732 |   | 0.0848 | 1 | 0.0869   |   | 0.0871     | 1  | 0.0823    |     | 0.0818     | 0.0789   |  | 0.0764  |
| -0.2266 | 1   | 0.0525 |    | 0.0675 |   | 0.0720 |   | 0.0723   |   | 0.0708     | 1  | 0.0672    |     | 0.0671     | 0.0656   |  | 0.0627  |
| -0.1948 | 1   | 0.0452 |    | 0.0537 |   | 0.0555 | 1 | 0.0562   |   | 0.0553     | 1  | 0.0527    |     | 0.0543     | 0.0521   |  | 0.0491  |
| -0.1704 |     | 0.0366 |    | 0.0415 |   | 0.0421 |   | 0.0435   |   | 0.0431     | 1  | 0.0432    |     | 0.0430     | 0.0412   |  | 0.0391  |
| -0.1460 | 1   | 0.0269 |    | 0.0285 |   | 0.0323 | 1 | 0.0332   |   | 0.0354     |    | 0.0338    |     | 0.0336     | 0.0323   |  | 0.0300  |
| -0.1289 | 1   | 0.0183 |    | 0.0220 |   | 0.0250 |   | 0.0273   |   | 0.0281     | 1  | 0.0268    |     | 0.0275     | 0.0260   |  | 0.0242  |
| -0.1143 | 1   | 0.0122 |    | 0.0179 |   | 0.0214 |   | 0.0225   |   | 0.0224     | 1  | 0.0222    |     | 0.0220     | 0.0201   |  | 0.0178  |
| -0.1069 |     | 0.0110 |    | 0.0171 |   | 0.0171 |   | 0.0181   |   | 0.0191     |    | 0.0190    |     | 0.0183     | 0.0155   |  | 0.0132  |
| -0.0996 |     | 0.0134 |    | 0.0130 |   | 0,0140 |   | 0.0156   |   | 0.0163     | 1  | 0.0164    |     | 0.0125     | 0.0114   |  | 0.0081  |
| -0.0972 |     | 0.0098 |    | 0.0090 |   | 0.0122 | 1 | 0.0137   |   | 0.0142     | 1  | 0.0114    |     | 0.0098     | 0.0073   |  | 0.0046  |
| -0.0874 | 1   | 0.0037 |    | 0.0081 |   | 0,0104 |   | 0.0112   |   | 0.0090     | 1  | 0.0083    |     | 0.0058     | 0.0027   |  | 0.0010  |
| -0.0825 | 1   | 0.0037 |    | 0.0081 |   | 0.0098 | 1 | 0.0083   |   | 0.0069     | 1  | 0.0042    |     | 0.0028     | 0.0003   |  | 0.0024  |
| -0.0825 | 1   | 0.0073 |    | 0,0090 |   | 0.0067 |   | 0.0059   |   | 0.0033     | 1  | 0.0029    |     | 0.0006     | 0.0027   |  | 0.0032  |
| -0.0801 | 1   | 0.0073 |    | 0.0049 |   | 0,0055 | ł | 0.0034   |   | 0.0016     | 1  | 0.0003    |     | 0.0034     | 0.0043   |  | 0.0049  |
| -0.0776 |     | 0.0024 |    | 0,0033 |   | 0.0018 |   | 0.0005   |   | 0.0008     | 1  | 0.0030    |     | 0.0046     | 0.0060   |  | 0.0046  |
| -0.0703 | 1   | 0.0012 |    | 0.0016 |   | 0.0000 |   | 0.0015   |   | 0.0041     | 1  | 0.0050    |     | 0.0070     | 0.0051   |  | 0.0061  |
| -0.0728 | 1   | 0.0012 |    | 0,0000 |   | 0.0024 | 1 | 0.0034   |   | 0.0049     |    | 0.0058    |     | 0.0052     | 0.0065   |  | 0.0056  |
| -0.0703 | 1   | 0.0012 |    | 0.0008 |   | 0.0037 |   | 0,0034   |   | 0.0061     | 1  | 0.0048    |     | 0.0067     | 0.0060   |  | 0.0046  |
| -0.0703 | 1   | 0.0012 |    | 0.0057 |   | 0.0024 |   | 0.0063   |   | 0.0045     |    | 0.0076    |     | 0.0064     | 0.0049   |  | 0.0022  |
| -0.0703 | 1   | 0.0037 |    | 0.0016 |   | 0.0043 | ļ | 0.0034   |   | 0.0073     | 1  | 0.0069    |     | 0.0049     | 0.0019   |  | 0.0017  |
| -0.0679 | 1   | 0.0037 |    | 0.0033 |   | 0.0030 |   | 0.0063   |   | 0.0065     | 1  | 0.0054    |     | 0.0018     | 0.0014   |  | 0.0005  |
| -0.0752 | 1   | 0.0012 |    | 0.0016 |   | 0.0049 | 1 | 0.0063   |   | 0.0045     | 1  | 0.0017    |     | 0.0006     | 0.0005   |  | 0.0010  |
| -0.0703 | 1   | 0.0037 |    | 0.0065 |   | 0.0061 | 1 | 0.0054   |   | 0.0016     | 1  | 0.0013    |     | 0.0006     | 0.0019   |  | 0.0005  |
| -0.0801 | 1   | 0.0024 |    | 0.0049 |   | 0.0055 |   | 0.0005   |   | 0.0004     | 1  | 0.0009    |     | 0.0030     | 0.0016   |  | 0.0005  |
| -0.0679 | 1   | 0.0097 |    | 0.0065 |   | 0.0018 | 1 | 0.0020   |   | 0.0004     | 1  | 0.0028    |     | 0.0021     | 0.0005   |  | 0.0002  |
| -0.0752 | 1   | 0.0037 |    | 0.0000 |   | 0.0000 | 1 | 0.0019   |   | 0.0045     | 1  | 0.0039    |     | 0.0021     | 0.0014   |  | 0.0002  |
| -0.0776 | 1   | 0.0036 |    | 0.0000 |   | 0.0018 | 1 | 0.0049   |   | 0.0045     | 1  | 0.0039    |     | 0.0021     | 0.0005   |  | 0.0000  |
| -0.0850 | 1   | 0.0012 |    | 0.0024 |   | 0.0055 | 1 | 0.0049   |   | 0.0041     | 1  | 0.0039    |     | 0.0006     | 0.0000   |  | 0.0011  |
| -0.0752 | 1   | 0.0012 |    | 0.0033 |   | 0.0031 | 1 | 0.0029   |   | 0.0028     | 1  | 0.0005    |     | 0.0009     | 0.0020   |  | 0.0025  |
| -0.0801 | 1   | 0.0061 |    | 0.0041 |   | 0,0037 | 1 | 0.0039   |   | 0.0008     |    | 0.0003    |     | 0.0018     | 0.0024   |  | 0.0031  |
| -0.0825 | 1   | 0.0024 |    | 0.0024 |   | 0.0037 | 1 | 0.0015   |   | 0.0008     | 1  | 0.0026    |     | 0.0029     | 0.0035   |  | 0.0037  |
| -0.0752 | 1   | 0.0000 |    | 0.0024 |   | 0.0006 | 1 | 0.0015   |   | 0.0037     | 1  | 0.0040    |     | 0.0044     | 0.0044 - |  | 0.0029  |
| -0.0752 | 1   | 0.0024 |    | 0.0008 |   | 0.0000 | 1 | 0.0034   |   | 0.0041     | 1  | 0.0044    |     | 0.0044     | 0.0028   |  | 0.0020  |
| -0.0776 | 1   | 0.0012 |    | 0.0008 |   | 0.0031 | 1 | 0.0044   |   | 0.0045     | 1  | 0.0044    |     | 0.0027     | 0.0019   |  | 0.0007  |
| -0.0728 | 1   | 0.0000 |    | 0,0024 |   | 0.0049 | 1 | 0.0054   |   | 0.0048     | 1  | 0.0030    |     | 0.0020     | 0.0008   |  | 0.0007  |
| -0.0752 | 1 ' | 0.0012 |    | 0.0041 |   | 0.0055 | 1 | 0.0044   |   | 0.0024     | 1  | 0.0015    |     | 0.0003     | 0.0003   |  |         |
| -0.0728 | ]   | 0.0024 |    | 0.0057 |   | 0.0049 | ] | 0.0022   |   | 0.0012     |    | 0.0000    |     | 0.0000     |          |  |         |
| -0.0752 | 1   | 0.0049 |    | 0.0049 |   | 0.0012 | 1 | 0.0003   |   | 0.0008     | 1  | 0.0007    |     |            |          |  |         |
| -0.0752 | ]   | 0.0049 |    | 0.0008 |   | 0,0004 | ] | 0.0015   |   | 0.0012     |    |           |     |            |          |  |         |
| -0.0776 | ]   | 0.0000 |    | 0.0016 |   | 0.0024 | ] | 0.0020   | l |            | -  |           |     |            |          |  |         |
| -0.0825 | ]   | 0.0024 |    | 0.0033 |   | 0.0024 |   |          |   |            |    |           |     |            |          |  |         |
| -0.0801 | ]   | 0.0024 |    | 0.0016 |   |        |   |          |   |            |    |           |     |            |          |  |         |
| -0.0801 | ]   | 0.0012 |    |        |   |        |   |          |   |            |    |           |     |            |          |  |         |
| -0.0776 | ]   |        | -  |        |   |        |   |          |   |            |    |           |     |            |          |  |         |
| -0.0776 | ]   | т      | -1 | loon   | 1 | Mayonn | ~ | abcolues |   | alon les s | 00 | leure dor | 117 | áoc à v et | <br>17   |  |         |

- Moyennes absolues selon les valeurs données à x et à y Tableau

Tableau

- voie 109





### ANNEXE 19 : RAPPORT D'ÉSSAI DE LA CARACTÉRISATION D'UN CAPTEUR RADIATIF EN SENSIBILITÉ SPECTRALE

#### 1. DESCRIPTION DES OBJETS ESSAYES

Type : détecteurs thermiques pour l'infrarouge.

Modèle : prototypes.

Constructeur : non indiqué.

Indicateur : sans.

La partie sensible des trois détecteurs est constituée d'une surface plane à stries noires et dorées de 10 × 12 mm.

Deux détecteurs sont montés sur une tige support et possèdent deux fils pour la mesure du signal ; le troisième est monté dans la zone focale d'un réflecteur sphérique doré et comprend un amplificateur avec un connecteur.

#### 2. CONDITIONS DE REALISATION DE L'ESSAI

#### 2.1. OBJET DE LA PRESTATION

Caractérisation spectrale des deux types de capteurs radiatifs :

#### 1. Détecteur seul

Sensibilité spectrale entre 2,5 et 11 µm à l'aide d'un corps noir et de filtres interférentiels.

#### 2. Détecteur seul

Facteur de réflexion directionnel hémisphérique spectral de la surface sensible entre 1 et 14 µm à température ambiante, à 12° d'incidence.

### 3. Détecteur muni d'un réflecteur doré (parabole)

Mesure de la sensibilité à deux longueurs d'onde à l'aide de raies laser à 3,39 et 10,6 µm et comparaison avec le détecteur seul dans les mêmes conditions.

#### 2.2. LIEU ET DATE DE REALISATION

LABORATOIRE NATIONAL D'ESSAIS 5, avenue Enrico Fermi Z.A. TRAPPES - ELANCOURT 78197 TRAPPES CEDEX

Juin à septembre 1996.



#### 2.3. CONDITIONS AMBIANTES ET PARAMETRES

<u>Salle</u>

| Température | : 22°  | C ± 1°C |
|-------------|--------|---------|
| Humidité    | : 50 9 | % ± 5 % |

Sources de rayonnement utilisées :

| 1. | Corps noir               |   |  |
|----|--------------------------|---|--|
|    | Туре                     | : | cavité sphérique à 900°C avec ouverture de 50 mm.  |
|    | Géométrie du rayonnement | : | focalisé sur le détecteur, avec un diamètre de 1 cm et un <sup>1</sup> / <sub>2</sub> -angle d'ouverture de 11°. |
|    | Spectre                  | : | filtres interférentiels centrés à 12 longueurs d'onde entre 2,5 et 11 $\mu$ m.                                   |
| 2. | Laser CO2                |   |  |
|    | Longueur d'onde          | : | plusieurs raies entre 9,6 et 11 μm<br>(maximum à 10,6 μm).   |
|    | Diamètre du faisceau     | : | 8 mm et 40 mm après lentille.  |
| 3. | Laser HeNe               |   |  |
|    | Longueur d'onde          | : | 3,39 µm.   |
|    | Diamètre du faisceau     | : | 3 mm et 15 mm après lentille.  |

#### 2.4. METHODES D'ESSAI

#### Détecteur seul : sensibilité spectrale avec corps noir et filtres interférentiels.



Le schéma est présenté ci-après.

Le capteur est relié à un voltmètre piloté par ordinateur, chaque mesure étant une moyenne de 10 acquisitions au moins, encadrant chacune une mesure du zéro.



La puissance incidente sur le capteur est calculée à partir de la mesure de la température du corps noir, de la géométrie du montage et de la courbe de transmission spectrale des filtres interférentiels utilisés. Les variations du facteur de réflexion du miroir sphérique doré sont considérées comme des incertitudes.

 $P = G.Tmiroir \times \int L(\theta, \lambda).Tfiltre(\lambda)d\lambda$ 

#### Détecteur seul : sensibilité spectrale avec deux raies laser.

Le schéma est présenté ci-après.



Le radiomètre étalon mesure la puissance du faisceau transmise par le diaphragme.

On enregistre ensuite la tension donnée par le capteur placé dans les mêmes conditions. La sensibilité est le rapport de cette tension à la puissance mesurée.

#### Détecteur avec parabole : sensibilité spectrale avec deux raies laser.

Le schéma est présenté ci-dessous.




Le radiomètre étalon mesure la puissance du faisceau transmise par la lentille. Le faisceau diverge à partir du foyer pour donner un diamètre 2×w dans le plan du capteur. L'ensemble du détecteur est placé sur une platine de translation, ce qui permet d'enregistrer la tension donnée par le capteur aux mailles d'un réseau de points.

$$\sigma = \frac{1}{P} \int_{R^2} u(Q) dS_Q$$

La méthode utilisée pour approximer l'intégrale ci-dessus à partir de mesures de u faites sur un maillage de l'ouverture consiste à :

- moyenner les valeurs qui sont à une même distance du centre  $u_i = \overline{u(r_i)}$ , i=0 à n
- remplacer la répartition réelle u(r,θ) par une interpolation linéaire

$$u(r) = \frac{r_{i+1} - r}{r_{i+1} - r_i} . u_i + \frac{r - r_i}{r_{i+1} - r_i} . u_{i+1}$$

 calculer l'intégrale pour une fonction constante en θ et linéaire par morceaux en r, ce qui donne :

$$\sigma_{appr} = \frac{1}{P} \cdot \frac{\pi}{3} \sum_{i=0}^{n} u_i \cdot (r_{i+1} - r_{i-1}) \cdot (r_{i+1} + r_i + r_{i-1})$$

en posant  $r_1=r_0$  (=0) et  $r_{n+1}=r_n$ .

#### 2.5. ETALONS LNE

Pour les mesures avec laser HeNe : radiomètre à cône RL1, avec laser CO2 : radiomètre à disque WL10D1.

#### 3. **RESULTATS**

Les incertitudes mentionnées correspondent à 2 écarts-types, sauf indication contraire. Les sensibilités en éclairement se déduisent des sensibilités en flux en multipliant ces dernières par la surface, du détecteur, soit 1 cm<sup>2</sup> environ.



# Détecteur seul : sensibilité spectrale avec corps noir et filtres interférentiels.

Le tableau suivant donne les sensibilités moyennes trouvées en fonction de la longueur d'onde nominale du filtre utilisé.

| filtre | S    | 2σ   |
|--------|------|------|
| nm     | mV/  | N    |
| 2510   | 15,5 | 4,5  |
| 3010   | 16,4 | 4,4  |
| 3510   | 16,7 | 6,0  |
| 3990   | 11,6 | 5,4  |
| 4490   | 9,8  | 7,4  |
| 5000   | 13,5 | 5,3  |
| 5510   | 12,9 | 11,2 |
| 7350   | 21,3 | 13,7 |
| 7990   | 24,6 | 12,6 |
| 9060   | 27,6 | 20,3 |
| 9950   | 36,0 | 16,9 |
| 11130  | 35,8 | 71,2 |



## Détecteur seul : sensibilité spectrale avec deux raies laser.

| Longueur d'onde | Puissance incidente | Sensibilité | Incertitude à $2\sigma$ |
|-----------------|---------------------|-------------|-------------------------|
| [µm]            | [mW]                | [mV/W]      | [±%]                    |
| 3,39            | 5,3                 | 13,6        | 4,8%                    |
| 10,6            | 212                 | 57          | 5,0%                    |

### Détecteur avec parabole : sensibilité spectrale avec deux raies laser.

| Longueur d'onde | Puissance incidente | Sensibilité | Incertitude à $2\sigma$ |
|-----------------|---------------------|-------------|-------------------------|
| [µm]            | [mW]                | [V.cm²/mW]  | [± %]                   |
| 3,39            | 4,5                 | 1,6         | 25                      |
| 10,6            | 63                  | 2           | 25                      |

Les mesures faites sur le détecteur parabolique ont une incertitude plus importante, due aux interpolations et extrapolations nécessitées par la méthode de balayage.



## ANNEXE 20 : releves de temperature pour plusieurs vaches au cours de la journee

| Contro | l de temp | eraturas | : Vaca 9 | (en lacta | ación, I/                      | d)      |      | 10-11/abril/97         |
|--------|-----------|----------|----------|-----------|--------------------------------|---------|------|------------------------|
|        | media     | Tmercur  | io       | Tdigital  | 14+ 2 <sup>+</sup> 4 - 14 - 18 | Tbrauns | can  | Observaciones          |
| Hora   | Tamb      | TMr      | TMv      | TDr       | TDv                            | TSr     | TSv  | (r=rectal, v=vaginal)) |
| 7:00   | 13.5      | 38.5     | 38.2     | 38.42     | 38.27                          | 39.5    | 39.8 | Després munyir/menjant |
| 8:00   | 13.0      | 38.3     | 38.2     | 37.97     | 38.36                          | 39.2    | 39.7 |                        |
| 9:00   | 13.0      | 38.5     | 38       | 37.85     | 37.98                          | 38.9    | 39.5 |                        |
| 10:00  | 14.0      | 38.2     | 38.2     | 38.04     | 38.16                          | 39.5    | 39.6 |                        |
| 11:00  | )         |          |          |           | _                              |         |      |                        |
| 12:00  |           |          |          |           |                                |         |      |                        |
| 13:00  | 18.0      | 38.3     | 38.3     | 38.36     | 38.18                          | 38.7    | 39.8 | Defecació (TDr)        |
| 14:00  | 18.0      | 38.3     | 38.2     | 38.06     | 38.07                          | 39.4    | 38.7 |                        |
| 15:00  | 18.0      | 38.4     | 38.1     | 38.16     | 38.25                          | 39      | 39.8 | Defecació (TDr)        |
| 16:00  | 18.0      | 38.1     | 38.1     | 38.05     | 38.06                          | 39.2    | 39.9 |                        |
| 17:00  | 18.0      | 38.3     | 38       | 38.14     | 38.09                          | 39.8    | 40   |                        |
| 18:00  | 18.0      | 38.4     | 38.3     | 37.95     | 38.27                          | 39      | 40.1 |                        |
| 19:00  | 19.0      | 38.4     | 38.2     | 38.16     | 37.95                          | 39.6    | 39.8 |                        |
| 20:00  | 19.0      | 38.1     | 38.2     | 37.93     | 38.33                          | 39.4    | 39.7 |                        |
| 21:00  | )         |          |          |           |                                |         |      |                        |
| 22:00  | 18.0      | 38.5     | 38.4     | 38.84     | 38.54                          | 38.5    | 39.7 |                        |
| 23:00  | 18.0      | 38.6     | 38.8     | 38.47     | 38.37                          | 39      | 40.1 |                        |
| 0:00   | 18.0      | 38.4     | 38.5     | 38.18     | 38.19                          | 38.8    | 39.9 |                        |
| 1:00   |           |          |          |           |                                |         |      |                        |
| 2:00   | )         |          |          |           |                                |         |      |                        |
| 3:00   |           |          |          |           |                                |         |      |                        |
| 4:00   | )         |          |          | _         |                                |         |      |                        |
| 5:00   |           |          |          |           |                                |         |      |                        |
| 6:00   |           |          |          |           |                                |         |      |                        |
| 7:00   | 14.0      | 38.3     | 38.5     | 38.29     | 38.32                          | 39.2    | 40.1 | Abans munyida          |
| 8:00   | 14.0      | 38.3     | 38.2     | 38.15     | 38.24                          | 38      | 39.8 | Abans munyida          |
| 9:00   | 16.0      | 38.2     | 38.3     | 37.95     | 38.13                          | 39      | 39   |                        |
| 10:00  | 18.0      | 38.3     | 38.1     | 38.06     | 38.17                          | 38.4    | 39.5 |                        |
| 11:00  |           |          |          |           |                                |         |      |                        |
| 12:00  | )         |          |          |           |                                |         |      |                        |
| 13:00  | 21.0      | 38.6     | 38.5     | 38.09     | 38.25                          | 38.7    | 39.1 | Defecació (TMr)        |
| 14:00  | 22.0      | 38.4     | 38.4     | 38.26     | 38.08                          | 38.6    | 39.5 |                        |
| 15:00  | 23.0      | 38.4     | 38.3     | 38.34     | 38.19                          | 39.5    | 39.7 |                        |
| 16:00  | 23.0      | 38.7     | 38.8     | 38.53     | 38.48                          | 38.5    | 39.5 |                        |

# Contrôle de température pour la vache n°9



Relevés de température pour la vache n°9 au cours d'une journée

| Contr | ol de ter | nperaturas: | Vaca 3 (en lac | ctación, 20 1/d                          | ) de la constante |       | 11-11-11   | The second second   | 25-26/marzo/97          |
|-------|-----------|-------------|----------------|--|-------------------|-------|------------|---|-------------------------|
| 1.20  | ſ         | nedia       | Tmercurio      | 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1 | Tdigital          | 1997  | Tbraunscan | 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - | Observaciones           |
| Hora  | 1         | Tamb        | TMr            | TMv                                      | TDr               | TDv   | TSr        | TSv   | (r=rectal, v=vaginal))  |
|       | 7:00      |             | 38.7           | 38.3                                     | 38.43             | 38.34 | 39.5       | 38.7  | Comiendo                |
| -     | 8:00      | 17.1        | 38.4           | 38.3                                     | 38.47             | 38.19 | 39.4       | 39.7  |                         |
|       | 9:00      | 17.7        | 38.5           | 38.2                                     | 37.96             | 38.11 | 38.8       | 39.6  |                         |
|       | 10:00     | 19.3        | 38.3           | 38.3                                     | 38.28             | 38.25 | 39.3       | 39  | Salida de otras a patio |
|       | 11:00     |             |                |  |                   |       |            |   | L                       |
|       | 12:00     |             |                |  |                   |       |            |   |                         |
|       | 13:00     | 19.8        | 38.7           | 38.3                                     | 38.39             | 38.27 | 39.2       | 39.3  | Comiendo                |
|       | 14:00     | 20.5        | 38.5           | 38.28                                    | 38.5              | 38.14 | 39.9       | 39.8  |                         |
|       | 15:00     | 20.5        | 38.6           | 38.5                                     | 38.02             | 38.39 | 38.7       | 39  |                         |
|       | 16:00     | 20.0        | 38.3           | 38.2                                     | 37.59             | 37.78 | 38.1       | 37.8  |                         |
|       | 17:00     | 18.7        | 38.4           | 38                                       | 38.19             | 37.95 | 39.6       | 38.7  | Antes de ordeño         |
|       | 18:00     | 20.2        | 38.5           | 38.2                                     | 38.2              | 38.18 | 38.8       | 38.4  |                         |
|       | 19:00     | 19.4        | 38.4           | 38.2                                     | 38.06             | 37.94 | 38.7       | 38.9  |                         |
|       | 20:00     | 20.6        | 38.3           | 38.4                                     | 38.02             | 37.97 | 38.2       | 39.3  |                         |
|       | 21:00     |             |                |  |                   |       |            |   |                         |
|       | 22:00     | 20.5        | 38.4           | 38.1                                     | 37.79             | 37.93 | 37.3       | 39.2  |                         |
|       | 23:00     | 21.4        | 37.8           | 38.1                                     | 38.26             | 38.26 | 38.8       | 39.3  | Defecación en TMr       |
|       | 0:00      | 20.9        | 38.1           | 38.2                                     | 37,86             | 38.28 | 38.4       | 38.7  |                         |
|       | 1:00      |             |                | 1  |                   |       |            |   |                         |
|       | 2.00      |             |                |  |                   |       |            |   |                         |
|       | 3:00      |             |                |  |                   |       |            |   |                         |
|       | 4.00      |             |                |  |                   |       |            |   |                         |
|       | 5:00      |             |                |  |                   |       |            |   |                         |
|       | 6:00      |             |                |  |                   |       |            |   |                         |
|       | 7:00      | 12.9        | 38.5           | 38.4                                     | 38,48             | 38.36 | 39.9       | 39  |                         |
|       | 8:00      | 14.2        | 38.3           | 38.3                                     | 38.34             | 38.06 | 39         | 39  |                         |
|       | 9:00      | 17.3        | 38.4           | 38.4                                     | 37,98             | 38.39 | 38.7       | 38.6  |                         |
|       | 10:00     | 19.6        | 37.8           | 38                                       | 38.06             | 38.05 | 39.5       | 38.5  | Salida a patio          |
|       | 11:00     |             |                |  |                   |       |            |   |                         |
|       | 12:00     |             |                |  |                   |       |            |   |                         |
|       | 13:00     | 20.0        | 38.1           | 38.3                                     | 37.88             | 37.98 | 37.9       | 38.6  |                         |
|       | 14:00     | 20.0        | 38.4           | 38.2                                     | 38.34             | 37.98 | 39.3       | 38.4  |                         |
|       | 15:00     | 20.0        | 38.3           | 38.1                                     | 38.28             | 37.98 | 39.8       | 38.7  |                         |
|       | 16:00     | 19.0        | 38.5           | 38.2                                     | 37.78             | 37.96 | 37.9       | 39.4  |                         |
|       | 17:00     | 19.0        | 38.7           | 38.2                                     | 38.28             | 38.06 | 39         | 38.5  |                         |
|       | 18:00     | 19.0        | 37.6           | 38.3                                     | 37.82             | 38.34 | 38.2       | 39.2  | Defecación en TMr       |
|       | 19:00     | 19.0        | 38.6           | 38.2                                     | 38.16             | 38.08 | 39.2       | 38.3  |                         |
|       | 20:00     | 18.5        | 38.5           | 38.2                                     | 37.57             | 38.02 | 39         | 39.7  |                         |
|       | 21:00     |             |                |  |                   |       |            |   |                         |
|       | 22:00     | 20.0        | 38.3           | 38.7                                     | 37.79             | 38.67 | 38.1       | 39.5  |                         |
|       | 23:00     | 19.5        | 38             | 38.4                                     | 37.63             | 38.22 | 38.2       | 39  |                         |
|       | 0:00      | 19.5        | 38.2           | 38.3                                     | 37.37             | 38.35 | 38         | 38.7  |                         |

# Contrôle de température pour la vache n°3



Relevés de température pour la vache n°3 au cours d'une journée

| Control  | de temp | eraturas | : Vaca 1 | 0 (en lac | tación, | l/d)    |       | 10-11/abril/97          |
|----------|---------|----------|----------|-----------|---------|---------|-------|-------------------------|
| 「大同」の話出す | media   | Tmercur  | io       | Tdigital  |         | Tbrauns | can   | Observaciones           |
| Hora     | Tamb    | TMr      | TMv      | TDr       | TDv     | TSr     | TSv   | (r=rectal, v=vaginal))  |
| 7:00     | 13.5    | 38.9     | 38.7     | 38.68     | 38.64   | 40      | 40.5  | Després munyida/menjant |
| 8:00     | 13.0    | 39       | 38.6     | 38.66     | 38.62   | 39.7    | 39.5  |                         |
| 9:00     | 13.0    | 38.6     | 38.4     | 38.46     | 38.32   | 39.4    | 39.7  |                         |
| 10:00    | 14.0    | 38.7     | 38.5     | 38.55     | 38.28   | 39.3    | 39.9  |                         |
| 11:00    |         |          |          |           |         |         |       |                         |
| 12:00    |         |          |          |           |         |         |       |                         |
| 13:00    | 18.0    | 38.7     | 38.5     | 38.66     | 38.47   | 39.2    | 39.9  |                         |
| 14:00    | 18.0    | 38.6     | 38.5     | 38.63     | 38.42   | 38.2    | 39.8  |                         |
| 15:00    | 18.0    | 38.6     | 38.5     | 38.16     | 38.39   | 39.3    | 39.7  |                         |
| 16:00    | 18.0    | 38.7     | 38.4     | 38.54     | 38.28   | 39.4    | 39.9  |                         |
| 17:00    | 18.0    | 38.6     | 38.4     | 38.56     | 38.48   | 39.9    | 39.8  |                         |
| 18:00    | 18.0    | 38.8     | 38.6     | 38.53     | 38.64   | 39.8    | 40.1  | Just abans munyida      |
| 19:00    | 19.0    | 38.8     | 38.5     | 38.76     | 38.52   | 39.9    | 40.2  |                         |
| 20:00    | 19.0    | 38.8     | 38.4     | 38.64     | 38.53   | 39.9    | 40.5  |                         |
| 21:00    |         |          |          |           |         |         |       |                         |
| 22:00    | 18.0    | 39       | 39       | 38.46     | 38.73   | 38.9    | 40.4  |                         |
| 23:00    | 18.0    | 38.7     | 38.4     | 38.59     | 38.47   | 39.8    | 40.4  |                         |
| 0:00     | 18.0    | 38.6     | 39       | 38.24     | 38.65   | 39.5    | 40.5  |                         |
| 1:00     |         |          |          |           |         |         |       |                         |
| 2:00     |         |          |          |           |         |         |       |                         |
| 3:00     |         |          |          |           |         |         |       |                         |
| 4:00     |         |          |          |           |         |         |       |                         |
| 5:00     |         |          |          |           |         |         |       |                         |
| 6:00     |         |          |          |           |         |         |       |                         |
| 7:00     | 14.0    | 38.6     | 38.3     | 38.64     | 38.48   | 39.9    | 40.3  | Abans munyida           |
| 8:00     | 14.0    | 38.8     | 38.5     | 38.64     | 38.47   | 39.1    | 38.96 | Abans munyida           |
| 9:00     | 16.0    | 38.7     | 38.3     | 38.32     | 38.37   | 39.2    | 40.4  |                         |
| 10:00    | 18.0    | 38.6     | 38.3     | 38.37     | 38.26   | 38.5    | 39.7  |                         |
| 11:00    |         |          |          |           |         |         |       |                         |
| 12:00    |         |          |          |           |         |         |       |                         |
| 13:00    | 21.0    | 38.7     | 38.6     | 37.68     | 38.37   | 38.3    | 39.2  |                         |
| 14:00    | 22.0    | 38.4     | 38.5     | 38.57     | 38.28   | 38.6    | 39.4  | Orina (TDv)             |
| 15:00    | 23.0    | 38.7     | 38.6     | 38.23     | 38.24   | 38.9    | 39    |                         |
| 16:00    | 23.0    | 38.6     | 38.6     | 38.14     | 38.37   | 38.6    | 39.7  |                         |

Contrôle de température pour la vache n°10



Relevés de température pour la vache n°10 au cours d'une journée

# ENSEMBLE





# NOTES

- 1 Solgner L'aspect des plèces
- 2 Briser les orêtes
- 3 Anodiser de couleur noir opaque toute les pièces en AL. ou en Dural.
  ( protéger les endroits marqués par la lettre " P " avant d'anodiser )

Pour détails des pièces No 1,2,3 et 15 voir Des. No : 3\_20051 Pour détails des pièces No 4,5,6,7,8,9 et 18 voir Des.No : 3\_20052 Réduction de l'ensemble No : 0\_20056

| 18        | Support.Tôle 2                                 | 10 x 10 x 2                    | 2            | A-0  |  |  |
|-----------|--|--------------------------------|--------------|------|--|--|
| 17        | Connecteur 9 f                                 | ils                            | /            | 1    |  |  |
| 16        | Parabole                                       | 1                              | 1            |      |  |  |
| 15        | Rivet avec fil                                 | 6                              | AL           |      |  |  |
| 14        | Vis fix. No 1                                  | et 3 M3 x 8                    | 5            | Ind  |  |  |
| 13        | Ecrou M3 6 pan                                 | S                              | 5            | Inc  |  |  |
| 12        | Rondelle ø 3.2                                 | ×ø6×1                          | 3            | Imc  |  |  |
| 11        | Vis fixation c                                 | onnect.M3 x 8                  | 5            | Inc  |  |  |
| 10        | Vis fixation.T                                 | ête cyl. M4 x 10               | 2            | Ind  |  |  |
| 9         | Ecrou molete'                                  | M3                             | 5            | A-0  |  |  |
| 8         | Rondelle ø 3.2                                 | ×ø6×1                          | 3            | Dur  |  |  |
| 7         | Vis fixation N                                 | o 6.M3 x 10                    | 3            | Dur  |  |  |
| 6         | Support.Tôle 1                                 | 65 x 10 x 2                    | 2            | A-0  |  |  |
| 5         | Montant sup. parab.Tôle 100x55x2 2             |                                |              |      |  |  |
| 4         | Sup. parabole.Lam. 170 x 100 x 1.5 1           |                                |              |      |  |  |
| З         | Latéral. Tôle 165 x 140 x 2 1                  |                                |              |      |  |  |
| 2         | Latéral.Tôle 1                                 | 65 x 140 x 2                   | 1            | A-0  |  |  |
| 1         | Boîte.Tôle 310                                 | x 105 x 1.5                    | 1            | A-0  |  |  |
| Ν.        | DENOM  | INATION                        | QUANT.       | M    |  |  |
|           | /  |                                |              |      |  |  |
| +         | /  |                                |              |      |  |  |
| 2         | /  |                                |              |      |  |  |
| -/        | /  |                                |              |      |  |  |
| INDICE    | MOE  | IFICATIONS                     | tete         | D    |  |  |
| 11.9      | 3.1995 1.2 /                                   | GUIDUCCI /                     |              |      |  |  |
| ********* | JOINT<br>RESEARCH<br>CENTRE                    | PROGRAM : SAF<br>PROJECT : LaS | EGUARI<br>Co | )5   |  |  |
| <b> </b>  | CeVeTeeb                                       | PARABOLE RE                    | CTANGUL      | .AIR |  |  |
|           | <b>00761650</b> <u>/</u><br>11 NI 157 ENSEMBLE |                                |              |      |  |  |
| I         |  |                                |              |      |  |  |

| 3M        |            | /                      |
|-----------|------------|------------------------|
|           |            | A ne pas fournir       |
|           |            | A ne pas fournir       |
|           |            | 1                      |
| x         |            | Tête fraisée           |
| ×         |            | 1                      |
| x         |            | 1                      |
| x         |            | Tête cyl.              |
| x         |            | Dans rond ø 8          |
| 3M        |            | Dans rond ø 10         |
| al        |            | /                      |
| al        |            | Dans rond ø 10         |
| i3M       |            | 1                      |
| 3M        |            | 1                      |
| ISM       |            | 1                      |
| ЭМ        |            | /                      |
| i3M       |            | PARABOLE RECTANGULAIRE |
| ЭМ        |            | No 1 de 3              |
| ATERIA    | UX         | NORMES/OBSERVATIONS    |
|           | /          |                        |
| <u></u>   | /          |                        |
| ·         | /          |                        |
| /<br>ATES | <u>/</u>   |                        |
|           |            |                        |
| IGUILM    | AIN,       | r.  Savelech  /        |
|           | //         |                        |
| E         | DESSIN I   | ie /                   |
|           | TAB. No    | / 54. /                |
|           | anga sa sa | 3_20050                |
|           |            | ·                      |

-----







| 1         | 1                                 |                    | 1     |  |  |  |  |
|-----------|-----------------------------------|--------------------|-------|--|--|--|--|
| 28        | Connecteur 9 f                    | lls                | 1     |  |  |  |  |
| 27        | Concentrateur                     | parabolique        | 1     |  |  |  |  |
| 26        | Rivet avec filet M3               |                    |       |  |  |  |  |
| 25        | Ecrou M2.5                        |                    |       |  |  |  |  |
| 24        | Rondelle. ø2.7 x ø6.5             |                    |       |  |  |  |  |
| 23        | Vis fixat.connect.M2.5 x 8        |                    |       |  |  |  |  |
| 22        | Porte capteur                     | ø10.Rond 12 x 15   | 1     |  |  |  |  |
| 21        | Porte capteur                     | ø5.Rond 6 x 15     | 1     |  |  |  |  |
| 20        | Porte capteur                     | 5 x 5.Rond 10 x 15 | 1     |  |  |  |  |
| 19        | Porte capteur :                   | 3 x 3.Rond 5 x 15  | 1     |  |  |  |  |
| 18        | Rondelle. ø2.7                    | x ø8               | 2     |  |  |  |  |
| 17        | Vis.M4 x 8                        |                    | 8     |  |  |  |  |
| 16        | Vis.M3 x 8                        |                    | 12    |  |  |  |  |
| 15        | Vis fixat. sup                    | portM3 x 6         | 4     |  |  |  |  |
| 14        | Vis fixat. gui                    | de.M3 x 10         | 2     |  |  |  |  |
| 13        | Supp.guide.Rond 40 x 40           |                    |       |  |  |  |  |
| 12        | Vis bloquage curseur.Rond 15 x 20 |                    |       |  |  |  |  |
| 11        | Vis fin de course.Rond 15 x 15    |                    |       |  |  |  |  |
| 10        | Bras.Rond 3.2 x 120               |                    |       |  |  |  |  |
| 9         | Embout.Rond 6 x 6                 |                    |       |  |  |  |  |
| 8         | Embout.Rond 8 x 6                 |                    |       |  |  |  |  |
| 7         | Curseur.Rond 1                    | 5 x 25             | 1     |  |  |  |  |
| 6         | Gulde Long.Ron                    | d 12 x 330         | 1     |  |  |  |  |
| 5         | Guide court.Ro                    | nd 12 x 180        | 1     |  |  |  |  |
| 4         | Boîte.Tôle 290                    | x 2                | 1     |  |  |  |  |
| 3         | Couvercle Inf.                    | Disque 200 x 6     | 1     |  |  |  |  |
| 2         | Support parabo                    | Le.Disque 200 x 12 | 1     |  |  |  |  |
| 1         | Couvercle sup.                    | Disque 200 x 6     | 1     |  |  |  |  |
| <u>N.</u> | DENOM                             | IINATION           | QUAN  |  |  |  |  |
|           | /                                 |                    |       |  |  |  |  |
| -7-       | /                                 |                    |       |  |  |  |  |
| ĘŢ        |                                   |                    |       |  |  |  |  |
|           | /                                 |                    |       |  |  |  |  |
| ANTE      |                                   |                    | irit. |  |  |  |  |
| 19.9      | 1.1996   1+2 /                    | PROGRAM . SAF      | FGIIA |  |  |  |  |
| *         | RESEARCH<br>CENTRF                | PROJECT : Las      | Co    |  |  |  |  |
| Ľ*        | TSPRA                             | PARABOLE C         | IRCU  |  |  |  |  |
| (         | SaveTech <u>Ensemb</u>            |                    |       |  |  |  |  |
| 1         | UNIT <u>PORTE CAPTEUR</u>         |                    |       |  |  |  |  |

|                 |           |          | <del>.</del> |         |      |          | · · · · · · · · · · · · · · · · · · · |          |
|-----------------|-----------|----------|--------------|---------|------|----------|---------------------------------------|----------|
| /               | ,<br>     |          | 1            |         |      |          |                                       |          |
| /               | ,         |          | A            | ne      | pas  | four     | nir                                   |          |
| /               | •         |          | A            | ne      | pas  | four     | nir                                   |          |
| A               | l         |          | 1            |         |      |          |                                       |          |
| I               | nox       |          | UN           | 11 !    | 5588 |          |                                       |          |
| I               | nox       |          | UN           | 11 (    | 6592 |          |                                       |          |
|                 | Inox      |          | UN           | II I    | 6107 |          |                                       |          |
| I               | nox       |          | 1            |         |      |          |                                       |          |
| 1               | nox       |          | 1            |         |      |          |                                       |          |
| 1               | nox       |          | 1            |         |      |          |                                       |          |
| 1               | nox       | -        | 1            |         |      |          |                                       |          |
| A               | cier brun | i        | UN           | 11 (    | 6592 |          |                                       |          |
| A               | cier brun | i        | UN           | 11 :    | 7380 |          |                                       |          |
| . A             | cier brun | 1        | UN           | 11 !    | 5933 |          |                                       |          |
| A               | cier brun | i        | UN           | II !    | 5931 |          |                                       |          |
| A               | cler brun | 1        | UN           | 11 5    | 5931 | <u> </u> |                                       |          |
| ۵               | ural      |          | 1            |         |      |          |                                       |          |
| L               | aiton     |          | 1            |         |      |          |                                       |          |
| L               | aiton     |          | 1            |         |      |          |                                       |          |
| 1               | nox       |          | 1            |         |      |          |                                       |          |
| I               | mox       |          | 1            |         |      |          |                                       |          |
| I               | mox       |          | 1            |         |      |          |                                       |          |
| I               | nox       |          | 1            |         |      |          |                                       |          |
| D               | ural      | -        | 1            |         |      | ·        |                                       |          |
| D               | ural      |          | 1            |         |      |          |                                       |          |
| A               | L         |          | Pa           | ir r    | repo | ussag    | e                                     |          |
| D               | ural      |          | 1            |         |      |          |                                       |          |
| D               | ural      | 1        |              | PAF     | ABOL | E CI     | RCUL                                  | AIRE     |
| D               | ural      |          |              |         | No   | o 1 d    | e 4                                   |          |
| NT.             | MATERIA   | UX       | NC           | RM      | ES/  | OBSE     | RVA                                   | TIONS    |
|                 |           | /        |              |         |      | /        |                                       |          |
|                 | /         |          |              |         |      | /        |                                       |          |
|                 |           |          |              |         | ·    | 7        |                                       |          |
|                 |           | /        |              |         |      | 1        |                                       |          |
|                 |           | AU       |              | UR<br>T | -    |          | r KUl                                 |          |
|                 |           |          |              |         | SaVe | / fech   |                                       | /        |
| 111 <b>1</b> /0 | •         | //       | 1            | +,      | 4    | 4        | $\langle - , - \rangle$               | <u>'</u> |
| LATR            | E         | DESSIN N | /<br>io      | _//     | /    | /        | /                                     | /        |
|                 |           | TAB. No  |              | 1       |      | SR       | 1                                     |          |
| ø3.2            | 2         |          | MAX C        | rtud    | З    | _20      | 005                                   | ;4/      |









| Inox           |          | 1         |            |                        |              |                                       |            |
|----------------|----------|-----------|------------|------------------------|--------------|---------------------------------------|------------|
| Inox           |          | 1         |            |                        |              |                                       |            |
| Inox           |          | 1         |            | ********************** |              | • • • • • • • • • • • • • • • • • • • |            |
| Inox           |          | 1         |            |                        |              |                                       |            |
| Dural          |          | 1         |            |                        |              |                                       |            |
| Laiton         |          | 1         |            |                        |              |                                       |            |
| Laiton         |          | 1         |            |                        |              |                                       |            |
| Inox           |          | 1         |            |                        |              |                                       |            |
| Imox           |          | 1         |            |                        |              |                                       |            |
| Imox           |          | 1         |            |                        |              |                                       |            |
| Inox           |          | 1         |            |                        |              |                                       |            |
| Dural          |          | P         | ARAB       | OLE                    | CIRC         | ULAI                                  | RE         |
| Dural          |          | No 4 de 4 |            |                        |              |                                       |            |
| MATERIA        | UX       | NOR       | MES        | /0B                    | SER          | VATI                                  | ONS        |
|                | /        |           |            | · <del>/</del> /_      |              |                                       |            |
|                | ·        |           |            | - + -                  |              |                                       |            |
|                | ·<br>/   |           |            | · ť/-                  |              |                                       |            |
|                | /        |           |            | 7                      |              |                                       |            |
| DATE           | AU       | TEU       | R          |                        | APP          | ROUN                                  | /E         |
| GUILM          | AIN I    | Ρ.        | sal        | eTe                    | ch           |                                       |            |
| S              |          | -, 1      |            | /                      | 1 7          | 1 .                                   | 1          |
| -              |          |           |            | ,                      | 1/           | 1/                                    | ,          |
| DE             |          | •         | /<br>,     | /                      | <u> </u>     | <u> </u>                              | <u>1</u> Z |
| 5.6.7.8        | TAIL, No |           | •          | <b>S</b> U             | R            |                                       |            |
| 0.21.22        |          | MEN VIL   | <b>D</b> . | 2                      | 201          |                                       | 7 /        |
| <u>~16,166</u> |          |           |            | <u> </u>               | $\leq \cup $ | 101                                   |            |



